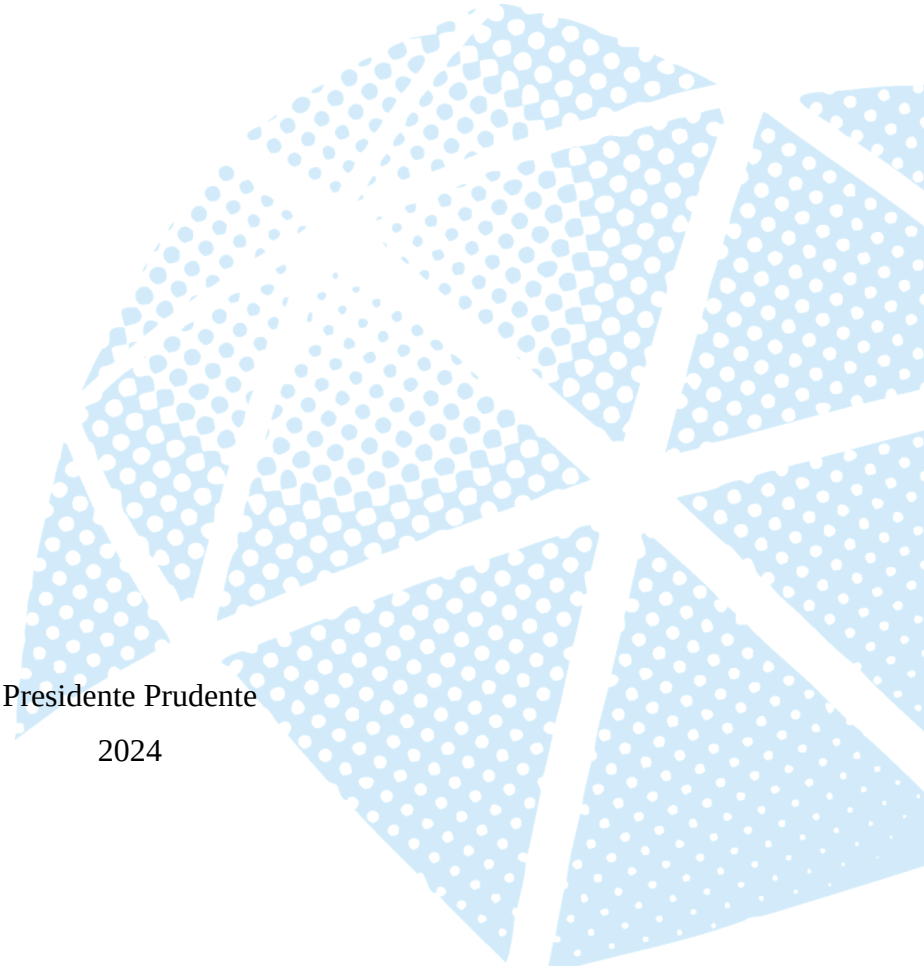
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Pres. Prudente

BEATRIZ COÊLHO SILVA
HENRIQUE YUDI YAMASHIRO
LETÍCIA NUNES DE CAMPOS

POTENCIAL DO USO DE PERFIS DE RÁDIO OCULTAÇÃO GNSS NA DETECÇÃO DE DESASTRES NATURAIS



Presidente Prudente
2024

BEATRIZ COÊLHO SILVA
HENRIQUE YUDI YAMASHIRO
LETÍCIA NUNES DE CAMPOS

Potencial do uso de perfis de Rádio Ocultação GNSS na detecção de Desastres Naturais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, campus de Presidente Prudente, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Área de concentração: Geodésia Aplicada

Orientadores: Prof. Dr.ª Daniele Barroca Marra Alves e Dr. Gabriel Oliveira Jerez

Presidente Prudente
2024

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação -UNESP, Campus de Presidente Prudente

Silva, Beatriz Coêlho.

S578p Potencial do uso de perfis de rádio ocultação GNSS na detecção de desastres naturais / Beatriz Coêlho Silva, Henrique Yudi Yamashiro, Letícia Nunes de Campos. - 2024
79 f. : il.

Orientadores: Daniele Barroca Marra Alves, Gabriel Oliveira Jerez

Trabalho de conclusão (bacharelado – Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2024
Inclui bibliografia

1. Rádio ocultação. 2. Desastres naturais. 3. Terremotos. 4. Erupções vulcânicas. 5. Furações. 6. Secas. I. Yamashiro, Henrique Yudi. II. Campos, Letícia Nunes de. III. Alves, Daniele Barroca Marra. IV. Jerez, Gabriel Oliveira. V. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. VI. Título.

Alessandra Kuba Oshiro Assunção
CRB-8/9013

Beatriz Coêlho Silva

Henrique Yudi Yamashiro

Letícia Nunes de Campos

POTENCIAL DO USO DE PERFIS DE RÁDIO OCULTAÇÃO GNSS NA DETECÇÃO DE DESASTRES NATURAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, campus de Presidente Prudente, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Área de Concentração: Geodésia Aplicada

Data da defesa: 11 / 12 / 2024

Banca Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
DANIELE BARROCA MARRA ALVES
Data: 04/02/2025 09:09:07-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Profa. Dra. Daniele Barroca Marra Alves
UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia - Campus de Presidente Prudente

gov.br Documento assinado digitalmente
GABRIEL OLIVEIRA JEREZ
Data: 03/02/2025 19:46:38-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Dr. Gabriel Oliveira Jerez
UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia - Campus de Presidente Prudente

gov.br Documento assinado digitalmente
JULIA ISABEL PONTES
Data: 03/02/2025 14:22:25-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Me. Julia Isabel Pontes
UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia - Campus de Presidente Prudente

gov.br Documento assinado digitalmente
TAYNA APARECIDA FERREIRA GOUVEIA
Data: 04/02/2025 16:32:42-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Profa. Dra. Tayná Aparecida Ferreira Gouveia
UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia - Campus de Presidente Prudente

RESUMO

A técnica de Rádio Ocultação GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) utiliza dois satélites ocultos pela Terra, sendo um GNSS, que emite os sinais, e um LEO (*Low Earth Orbit*), com receptor GNSS embarcado. A partir desse princípio, os sinais sofrem refração, o que permite a obtenção de dados atmosféricos na atmosfera neutra e ionizada, como densidade de elétrons, pressão, temperatura, vapor d'água, entre outros. A obtenção destes dados possibilita o monitoramento de alterações na composição atmosférica, o que viabiliza a análise das variações da composição em diferentes condições temporais e espaciais. Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho consistiu no monitoramento da composição da atmosfera durante a ocorrência de eventos extremos, com enfoque em abalos sísmicos, erupções vulcânicas, furacões e secas. Para isso, a metodologia aplicada incluiu, inicialmente, a seleção dos eventos a serem analisados, com critérios de escolha baseados na magnitude, data de ocorrência e localização, a fim de selecionar os eventos com maiores impactos. Em seguida, realizou-se a obtenção de dados das missões COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate*) e COSMIC-2, incluindo os produtos de densidade de elétrons, pressão, temperatura e vapor d'água, para os dias anteriores, o dia de ocorrência e os dias posteriores aos eventos selecionados. Assim, a maioria dos eventos analisados mostraram ser possível avaliar suas influências nas camadas atmosféricas a partir da técnica RO, ainda que o impacto possa ser observado em diferentes parâmetros, de acordo com o evento analisado. Nesse sentido, a pesquisa concluiu que a utilização de perfis atmosféricos provenientes de RO proporciona um método adicional para a identificação e avaliação de desastres naturais, sendo eficaz na detecção de mudanças significativas. No entanto, ainda é necessário aprimorar os métodos e explorar a integração com outras fontes de monitoramento para realização de análises mais robustas. Por fim, os resultados evidenciam o potencial da técnica como ferramenta complementar no estudo desses desastres, destacando a importância de prosseguir nas investigações.

Palavras-chave: Rádio Ocultação; Desastres naturais; Terremotos; Erupções vulcânicas, Furacões; Secas.

ABSTRACT

The GNSS Radio Occultation (RO) technique uses two satellites, one of which is GNSS (Global Navigation Satellite Systems) that emits signals, and the other is a LEO (Low Earth Orbit) satellite with an onboard GNSS receiver. Based on this principle, the signals undergo refraction, allowing the collection of atmospheric data in both neutral and ionized layers, such as electron density, pressure, temperature, water vapor, among others. The acquisition of these data enables the monitoring of changes in atmospheric composition, facilitating the analysis of variations in composition under different temporal and spatial conditions. In this regard, the main objective of this study was to monitor atmospheric composition during extreme events, focusing on seismic activity, volcanic eruptions, hurricanes, and droughts. The methodology applied included, initially, the selection of events to be analyzed, with selection criteria based on magnitude, date of occurrence, and location, to identify the events with the greatest impacts. Subsequently, data from the COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) and COSMIC-2 missions were obtained, including products such as electron density, pressure, temperature, and water vapor for the days before, on the day of, and after the occurrence of the selected events. Thus, most of the events analyzed showed that it is possible to assess their influences on the atmospheric layers using the RO technique, although the impact can be observed in different parameters depending on the event analyzed. In this sense, the research concluded that the use of atmospheric profiles from RO provides an additional method for the identification and assessment of natural disasters, proving effective in detecting significant changes. However, it is still necessary to refine the methods and explore integration with other monitoring sources for m re robust analyses. Finally, the results highlight the potential of the technique as a complementary tool in the study of these disasters, underscoring the importance of continuing research in this field.

Key words: Radio Occultation; Natural Disasters; Earthquake; Vulcanic eruption; Huricanes; Droughts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição da atmosfera neutra e ionosfera. 15
Figura 2 - Processo de fotoionização. 17
Figura 3 - Perfil de densidade de elétrons nas subcamadas da ionosfera. 18
Figura 4 - Número de manchas solares desde 1700. 19
Figura 5 - Regiões da Ionosfera. 20
Figura 6 - Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas. 22
Figura 7 - Comportamento do sinal GPS em uma RO-GPS. 24
Figura 8 - Geometria de uma ocultação GNSS. 24
Figura 9 - Satélite das missões COSMIC. 26
Figura 10 - Local de surgimento de uma ruptura na ocorrência de um terremoto. 30
Figura 11 - Ondas P (a) e S (b). 31
Figura 12 - Ondas de superfície Rayleigh e Love. 32
Figura 13 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o terremoto nas Filipinas. 36
Figura 14 - Perfis de densidade de elétrons antes, durante e após o terremoto: (a) dois dias antes; (b) um dia antes; (c) no dia do terremoto; (d) um dia após; (e) dois dias após. 37
Figura 15 - Caracterização das erupções explosivas. 39
Figura 16 - Caracterização das erupções efusivas. 40
Figura 17 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o vulcão Hunga Ha'apai. 42
Figura 18 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o vulcão Semeru. 42
Figura 19 - Perfis de densidade de elétrons obtidos para o vulcão Hunga Tonga em diferentes períodos: (a) dois dias antes; (b) um dia antes; (c) dia da erupção; (d) um dia após; (e) dois dias após. 44
Figura 20 - Perfis de densidade de elétrons obtidos para o vulcão Semeru em diferentes períodos: (a) dois dias antes; (b) um dia antes; (c) dia da erupção; (d) um dia após e (e) dois dias após. 45
Figura 21 - Perfis médios de temperatura obtidos para o vulcão Hunga Tonga. 46
Figura 22 - Perfis médios de temperatura obtidos para o vulcão Semeru. 47
Figura 23 - Perfis médios de pressão obtidos para o vulcão Hunga Tonga. 48
Figura 24 - Perfis médios de pressão obtidos para o vulcão Semeru. 49

Figura 25 - Dinâmica de um furacão. 52
Figura 26 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o furacão Dean. 54
Figura 27 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o furacão Ian. 54
Figura 28 - Perfis de densidade de elétrons para o furacão Dean. 56
Figura 29 - Perfis de densidade de elétrons para o furacão Ian. 56
Figura 30 - Perfis médios de pressão para o furacão Dean. 57
Figura 31 - Perfis médios de pressão para o furacão Ian. 58
Figura 32 - Perfis médios de temperatura para o furacão Dean. 59
Figura 33 – Perfis médios de temperatura para o furacão Ian. 60
Figura 34 - Perfis médios de vapor d'água para o furacão Dean. 61
Figura 35 - Perfis médios de vapor d'água para o furacão Ian. 62
Figura 36 - Monitoramento de Secas dos EUA (23 a 30 de abril de 2024). 66
Figura 37 - Mapa de secas do Brasil durante março de 2024. 67
Figura 38 - Gráficos do número de focos de incêndios no Pantanal. 68
Figura 39 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o período de secas de 2007. 69
Figura 40 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o período de secas de 2020. 69
Figura 41 – Perfis médios mensais de temperatura e pressão do vapor d’água em 2007. 70
Figura 42 – Perfis médios mensais de temperatura e pressão do vapor d’agua em 2020. 71
Figura 43 – (a) Média mensal de temperatura e (b) pressão do vapor d’água superficial em 2007; e (c) média mensal da temperatura e (d) pressão do vapor d’água em 2020.. 73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação do índice S4. 21
Quadro 2 - Escala de Intensidade de Mercalli Modificada. 32
Quadro 3 - Valores da magnitude Richter relacionados com a quantidade de energia liberada pelo abalo sísmico..... 34
Quadro 4 – Abalo sísmico avaliado e suas respectivas informações básicas. 35
Quadro 5 - Quantidade de ocultações por dias analisados para o terremoto das Filipinas. 36
Quadro 6 - Erupções vulcânicas avaliadas e suas respectivas informações básicas. 41
Quadro 7 - Quantidade de ocultações por dia e por produtos analisados. 43
Quadro 8 - Classificação na escala *Saffir-Simpson*. 52
Quadro 9 - Furacões avaliados e suas respectivas informações básicas..... 53
Quadro 10 - Quantidade de ocultações por dia e por produto analisados para o furacão Dean. 55
Quadro 11 - Quantidade de ocultações por dia e por produto analisados para o furacão Ian. 55
Quadro 12 - Média mensal da temperatura e pressão do vapor d'água até 10 km em 2007. 71
Quadro 13 - Média mensal da temperatura e pressão do vapor d'água até 10 km em 2020. 72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 Objetivos 12
1.2 Justificativa 13
1.3 Estrutura do trabalho 14
2 ESTRUTURA DA ATMOSFERA TERRESTRE E SEUS FENÔMENOS 15
2.1 Atmosfera Neutra 15
2.2 Ionosfera 17
3 RADIO OCULTAÇÃO 23
3.1 Princípio da técnica 23
3.2 Missões de RO-GNSS 25
4 METODOLOGIA PARA RECUPERAÇÃO DE PERFIS ATMOSFÉRICOS 27
4.1 Perfis de densidade de elétrons 27
4.2 Perfis de pressão, temperatura e pressão de vapor d'água 28
5 ABALOS SÍSMICOS 29
5.1 Seleção dos eventos analisados 35
5.2 Resultados 36
6 ERUPÇÕES VULCÂNICAS 39
6.1 Seleção dos eventos analisados 41
6.2 Resultados 43
7 FURACÕES 51
7.1 Seleção dos eventos analisados 53
7.2 Resultados 55
8 SECAS 64
8.1 Seleção dos eventos analisados 67
8.2 Resultados 70
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS 74
10 REFERÊNCIAS 76

1 INTRODUÇÃO

Desastres naturais são eventos que ocorrem de maneira espontânea e que representam instabilidades e riscos para a sociedade e levam frequentemente a grandes perdas materiais e socioeconômicas. Estes eventos são causados pela própria natureza e causam grandes impactos, dentre eles estão, por exemplo, os eventos conhecidos como abalos sísmicos, erupções vulcânicas, furacões e secas, sendo eles categorizados como desastres naturais, geológicos ou meteorológicos (SPOSOB; KILLMANN, 2023). Desta forma, é fundamental detectar e monitorar esses eventos para mitigar o impacto na saúde e vida das pessoas além de implementar estratégias eficazes de resposta e preparação.

Segundo o relatório publicado em 2020 pelo Escritório das Nações Unidas para Redução do Risco de Desastres (UNDRR – *United Nation Office for Disaster Risk Reduction*) com dados do período de 2000 a 2019, nos últimos 20 anos foram registrados um total de 7.348 desastres naturais, resultando na perda de 1,23 milhões de vidas, afetando cerca 4,03 bilhões de pessoas e gastos de 2,97 trilhões de dólares.

O UNDRR classifica os desastres em seis tipos diferentes, os geofísicos, os hidrológicos, os meteorológicos, os climatológicos, os biológicos e os espaciais. No presente trabalho foram objeto de estudo quatro tipos de eventos naturais: os abalos sísmicos e erupções vulcânicas, classificados como desastres geofísicos, desastres que se originam na superfície terrestre; os furacões, classificados como fenômenos meteorológicos causados por condições climáticas extremas e atmosféricas de curta duração; e as secas, eventos climatológicos causados por processos atmosféricos de longa duração.

Os abalos sísmicos são causados por movimentos de placas tectônicas terrestres, e dependendo da força em que ocorrem resultam nos terremotos, que são capazes destruir construções, provocar tsunamis e causar deslizamentos de terra. Já as erupções vulcânicas, ocorrem quando magma, gases e nuvens de cinzas são expelidos para a superfície por meio de vulcões. Enquanto os furacões são tempestades tropicais intensas formadas sobre águas quentes, caracterizadas por ventos fortes, chuvas torrenciais e baixa pressão atmosférica, podendo causar inundações severas e grandes danos em áreas costeiras. As secas, por sua vez, são períodos prolongados de falta de precipitação que comprometem a disponibilidade de água, levando a crises alimentares, perda de colheitas e incêndios naturais (TEIXEIRA et al., 2009).

Segundo dados do *Emergency Events Database* (EM – DAT), os eventos meteorológicos representam 34% do número total de desastres e impacta principalmente na economia. Enquanto os eventos geológicos representam 9% e são responsáveis por 59% das vítimas de desastres naturais. Já os eventos climatológicos representam apenas 8%, mas é o desastre que mais afeta a população. Os desastres naturais como abalos sísmicos, erupções vulcânicas, furacões e secas podem causar perturbações na composição da atmosfera, afetando principalmente o Conteúdo Total de Elétrons, a temperatura e a umidade.

Nesse sentido, a Geodésia, ciência dedicada à medição e representação da Terra além de suas variações temporais, desempenha um papel importante na compreensão das mudanças na crosta terrestre e na realização de medições precisas, tanto na superfície quanto na atmosfera terrestre. A aplicação de técnicas geodésicas permite o monitoramento de movimentos tectônicos, atividades vulcânicas e mudanças na atmosfera terrestre, auxiliando na previsão e mitigação dos impactos desses eventos (SEEBER, 2003; BONAFONI, 2019).

A técnica de RO-GNSS é uma ferramenta promissora por utilizar sinais de satélites para realizar avaliações da atmosfera da Terra, oferecendo dados atmosféricos, como temperatura, umidade, pressão e densidade de elétrons presentes nas camadas. Esses dados são importantes para o monitoramento de fenômenos atmosféricos relacionados a desastres naturais e podem fornecer informações complementares sobre mudanças que precedem ou acompanham os eventos analisados (BONAFONI, 2019).

Dessa forma, este trabalho busca explorar o uso dos dados advindos da técnica RO para investigar os impactos dos desastres naturais nas camadas atmosféricas, com o objetivo de avaliar como esses dados podem auxiliar a detecção e análise dos eventos e assim melhorar a previsão e mitigação dos impactos desses eventos.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é investigar o potencial do uso de perfis gerados a partir de dados de Rádio Ocultação GNSS para a detecção de desastres naturais, com foco específico em abalos sísmicos, erupções vulcânicas, furacões e secas. O estudo visa explorar como os dados obtidos por meio dessa técnica podem aprimorar a previsão e análise desses eventos e como a Geodésia pode se beneficiar dessa abordagem. A partir deste objetivo, tem-se como objetivos específicos:

- O estudo e compreensão de eventos naturais como abalos sísmicos, erupções vulcânicas, furacões e secas;
- A análise e seleção de eventos com base no ano em que ocorreu, na sua localização e magnitude;
- Avaliação de diferentes metodologias para a identificação de padrões de comportamento da atmosfera causados por esses eventos.

1.2 Justificativa

Nos últimos 20 anos, a quantidade e a intensidade de desastres naturais, como terremotos, erupções vulcânicas, furacões e grandes secas, vem aumentando, resultando em grandes prejuízos sociais e econômicos (UNDRR, 2020). Assim, a necessidade de utilizar ferramentas mais precisas de monitoramento e detecção, principalmente em tempo real, vem crescendo.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional, os alertas são instrumentos importantes nas ações de preparação, pois oferecem informações que permitem a mobilização antecipada de profissionais e colaboradores e a implementação de ações para evitar ou minimizar os efeitos decorrentes de desastres. O período de antecedência de um alerta pode variar conforme o tipo de evento e da capacidade de monitoramento e previsão (Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021).

Nesse sentido, a técnica de RO pode ser utilizada como uma ferramenta auxiliar ao controle de danos, por ser possível utilizá-la para detectar assinaturas desses desastres, a partir das mudanças atmosféricas causadas por eles, em dados de temperatura, pressão, umidade e densidade de elétrons, na região de ocorrência dos eventos.

A relevância deste estudo está diretamente alinhada à um dos objetivos da ONU (Organização das Nações Unidas), que busca “adotar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos” (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, [s.d.]). Neste objetivo, denominado “Ação contra a mudança global do clima”, é ressaltada a importância de integrar medidas da mudança climática, além de promover mecanismos para redução de impacto e para alertas precoces. A técnica de RO pode ser utilizada nessa integração, promovendo a detecção dos desastres naturais e sendo utilizada tanto na parte de alertar a população, quanto no monitoramento do fenômeno para facilitar na tomada de decisões que podem ser aplicadas para a redução de impacto.

Além disso, alguns estudos, como Riccardo Biondi et al. (2013), Xiaohong Sui et al. (2012) e Yang-Yi Sun et al. (2022), destacam o potencial da utilização da técnica

para a detecção de assinaturas dos desastres naturais na atmosfera, mostrando sua aplicabilidade na prevenção e resposta de desastres naturais. Esse trabalho analisa a possibilidade e a eficácia na utilização de dados provenientes de RO como método alternativo para o monitoramento desses eventos. Já que eles oferecem diversas informações cruciais sobre a atmosfera terrestre em grande parte do globo.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é dividido em 9 capítulos que abordam o uso de perfis de rádio ocultação no monitoramento de desastres naturais, e são organizados da seguinte forma. Este primeiro capítulo contém uma breve introdução sobre os temas abordados no trabalho, os objetivos e as justificativas na escolha do tema da pesquisa. O capítulo 2 apresenta a estrutura da atmosfera, explicando a composição e as diferenças entre as camadas, atmosfera neutra e a ionosfera.

O capítulo 3 é destinado para a técnica de rádio ocultação, nele foi explicado sobre os princípios da técnica e as principais missões. Já o capítulo 4 descreve a metodologia aplicada na recuperação dos perfis de rádio ocultação.

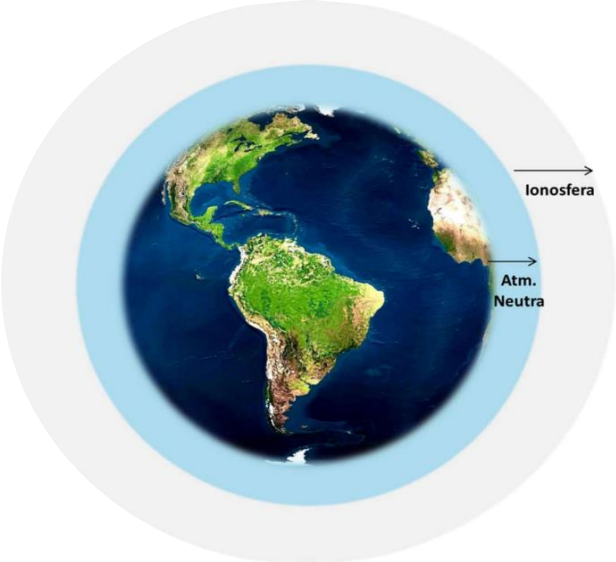
Os próximos quatro capítulos são destinados a cada um dos desastres naturais, onde são abordadas as principais causas, impactos e critérios utilizados na escolha dos eventos que representam cada categoria. Os eventos analisados estão dispostos na sequência: abalos sísmicos, erupções vulcânicas, furacões e secas. No fim de cada capítulo, também são apresentados os resultados das análises feitas.

E por fim, no capítulo 9 são apresentadas as considerações finais obtidas para cada um dos desastres naturais apresentados, seguidas por uma análise geral da aplicação dos dados de rádio ocultação GNSS para a detecção e monitoramento desses eventos através das mudanças causadas por eles na atmosfera.

2 ESTRUTURA DA ATMOSFERA TERRESTRE E SEUS FENÔMENOS

A atmosfera terrestre pode ser compreendida como uma série de camadas esféricas concêntricas, cada uma com diferentes propriedades físicas e químicas. Em termos da propagação do sinal GNSS, considera-se uma divisão com base na presença ou ausência de elétrons livres, que podem acarretar a degradação do sinal de rádio (MONICO, 2008). A Figura 1 representa a divisão entre a camada neutra e ionizada da atmosfera.

Figura 1- Distribuição da atmosfera neutra e ionosfera.



Fonte: GOUVEIA, 2019.

A camada com ausência de elétrons livres, também conhecida como atmosfera neutra, estende-se da superfície terrestre até cerca de 50 km de altitude, sendo composta principalmente por gases e vapor d'água. A camada com presença de elétrons livres, conhecida por ionosfera, abrange a faixa de 50 km a partir da superfície terrestre até aproximadamente 1000 km (GOUVEIA, 2019; SEEBER, 2003).

2.1 Atmosfera Neutra

A atmosfera neutra contém 50 km de espessura sendo considerada um meio não dispersivo porque, tanto para a pseudodistância quanto para a fase da onda portadora, a influência da frequência sobre o efeito da atmosfera neutra é inferior a 0,2 mm nas bandas de rádio utilizadas no GNSS, independentemente dos ângulos de elevação dos satélites (MONICO, 2008; HOBIGER et al., 2017).

A composição desta camada atmosférica pode ser dividida em duas componentes, sendo a componente hidrostática, composta por gases secos, e a componente úmida,

composta por vapor d'água. Enquanto a componente úmida depende da quantidade de vapor d'água na atmosfera e apresenta desafios na modelagem, ela contribui apenas com 10% a 20% da refração devido a atmosfera neutra ou refração neutrosférica (GOUVEIA et al., 2020). Entretanto, a variação temporal e espacial do atraso causado pelo vapor d'água pode ser bastante significativa, podendo chegar a até 20% em poucas horas, devido à variação diária da umidade na atmosfera neutra. Por outro lado, a componente seca é descrita com precisão de ±1% por meio de modelos. Os atrasos causados por essas componentes no zênite podem aumentar cerca de 10 vezes quando o satélite se localiza próximo ao horizonte, abaixo de 10° de elevação (SEEBER, 2003).

Os principais efeitos da atmosfera neutra no sinal GNSS são conhecidos por atenuação atmosférica, cintilação e atraso troposférico. A atenuação atmosférica é definida pela diminuição da potência da onda eletromagnética variando para cada frequência, ocasionada pela composição da atmosfera. A cintilação caracteriza-se pela oscilação na amplitude da onda eletromagnética, ocasionada pelas alterações e irregularidades no índice de refratividade (MONICO, 2008). O atraso troposférico que ocorre na atmosfera neutra é definido por uma variação no tempo de propagação do sinal GNSS, expresso em medidas de distância. Todos esses efeitos são influenciados por variações atmosféricas, como pressão, temperatura e vapor d'água, que variam com a altitude, sazonalidade, localização espacial e a direção do satélite em relação ao receptor (elevação e azimute) (SAPUCCI, 2001; HOBIGER et al., 2017; SEEBER, 2003).

A magnitude desse atraso depende não apenas da localização e época do ano, mas também do ângulo de elevação do satélite GNSS. Para ângulos próximos ao zênite (90º), o atraso total é em torno de 2,5 m, enquanto os ângulos próximos ao horizonte (5º), o atraso pode exceder 25 m, indicando a espessura da atmosfera atravessada pelo sinal. Portanto, a modelagem adequada desse atraso é essencial para mitigar os erros nas coordenadas finais obtidas a partir das observáveis dos satélites GNSS (HOBIGER et al., 2017; SEEBER, 2003).

O atraso hidrostático, causado principalmente pela quantidade de nitrogênio e oxigênio, descreve a maioria deste atraso e pode ser estimado com boa precisão, visto que sua variação é na ordem de 1%. Em contrapartida, o atraso úmido, embora menor em magnitude, tem variações temporais e espaciais mais complexas devido às mudanças rápidas na concentração de vapor d'água atmosférico (HOBIGER et al., 2017; SEEBER, 2003).

O atraso troposférico ocorre como consequência das variações no índice de refração atmosférica, que mede a capacidade do meio de alterar a direção e a velocidade de ondas eletromagnéticas durante sua propagação. Essas variações no índice de refração dos gases na atmosfera causam uma leve curvatura nos sinais GNSS, em comparação à trajetória geométrica ideal entre o satélite e um receptor em solo (SAPUCCI, 2001).

Esse atraso pode ser calculado como a soma dos efeitos advindos das componentes hidrostáticas e úmida, na qual cada uma delas é expressa como o produto do atraso zenital com uma função de mapeamento relacionando o atraso vertical com o atraso para outros ângulos de elevação.

Apesar de a refração atmosférica afetar os sinais GNSS, ela pode ser adotada em estudos que visam determinar a quantidade de vapor d'água na atmosfera, auxiliando em trabalhos de previsão meteorológica (SAPUCCI, 2005).

2.2 Ionosfera

Como visto anteriormente, a atmosfera terrestre pode ser segmentada em duas camadas principais, sendo uma delas a ionosfera, com extensão de 50 km até 1000 km de altitude e sua composição relacionada com a radiação solar eletromagnética. O processo de ionização da camada ocorre quando a radiação solar eletromagnética atinge a atmosfera neutra absorvida por elementos neutros, resultando na criação de íons e elétrons livres. Esse processo é denominado fotoionização ionosférica e pode ser visualizado na Figura (SEEBER, 2003; MATSUOKA, 2007).

Figura 2 - Processo de fotoionização.



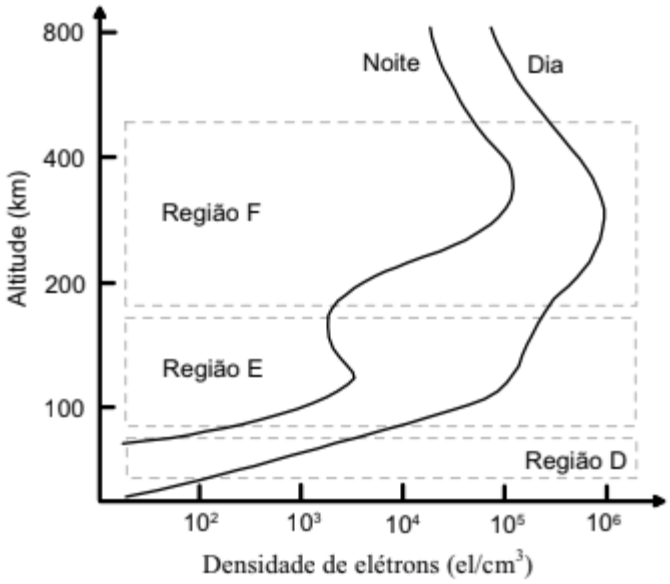
Fonte: MATSUOKA (2007).

A ionosfera pode ser dividida em três camadas, sendo D, E e F, cada uma delas apresentam um comportamento diferente em relação a variação da densidade de elétrons. A camada D é a parte mais baixa da ionosfera e se encontra próximo de 50 a 90 km de altura, afetada principalmente pela radiação solar. A densidade de elétrons varia conforme a incidência solar, apresentando maior quantidade de elétrons livres no período da manhã e diminuição no período da noite (SOUZA, 2019)

A camada E se localiza próximo do intervalo de 90 a 150 km e seu comportamento depende da atividade solar, podendo ser influenciada pelos campos magnéticos e gerando uma fina camada denominada “E esporádica” na região que abrange aproximadamente 90 a 130 km de altura. A camada E é presente apenas durante o dia, pois durante a noite a densidade de elétrons em sua composição é quase nula.

A camada F pode ser dividida em duas subcamadas, sendo elas a F1, com altitudes próximas de 150 km a 200 km, que varia conforme a atividade solar e a época do ano. Durante a noite essa camada também deixa de existir, devido à baixa densidade de elétrons. A F2, que se estende aproximadamente de 200 km até 1000 km, é a região onde se encontra a maior densidade de elétrons da ionosfera, em geral, entre 300 e 450 km de altura. Apesar de ser influenciado pelos mesmos fatores que a F1, a F2 não apresenta variação diurna (MATSUOKA, 2007). A Figura 3 apresenta o comportamento aproximado da densidade de elétrons por altitude.

Figura 3 - Perfil de densidade de elétrons nas subcamadas da ionosfera.



Fonte: MATSUOKA (2007).

O efeito de refração ionosférica é proporcional ao TEC (*Total Electron Contents* - Conteúdo Total de Elétrons), que corresponde ao número de elétrons presentes ao longo do caminho percorrido pelo sinal GNSS. O TEC varia no espaço e tempo em relação às variações da radiação solar, da localização geográfica, variações do campo magnético e algumas anomalias e irregularidades (MONICO, 2008; MATSUOKA, 2007).

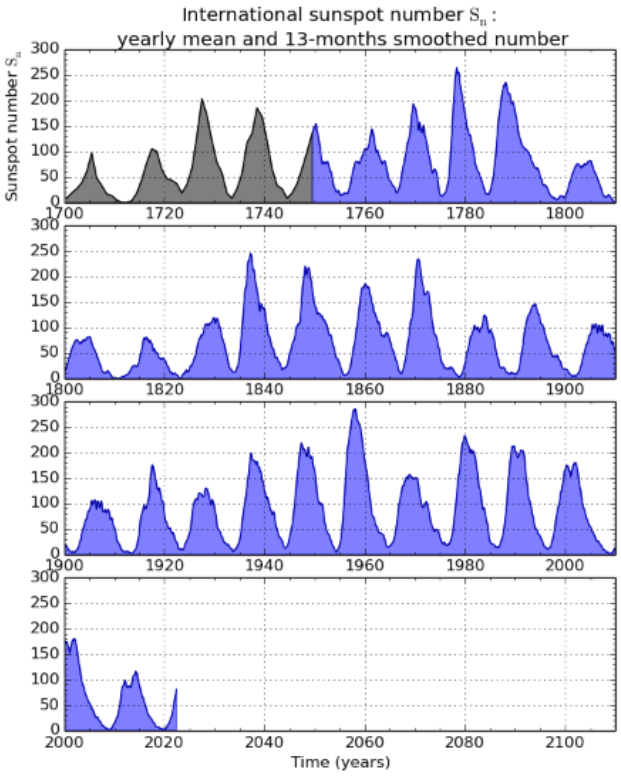
As variações no TEC em escala temporal correspondem às variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos. As variações diurnas ocorrem devido a mudanças

na ionosfera em certos momentos do dia devido à radiação solar, desaparecendo ao fim do dia. Por tratar-se de um fenômeno ocasionado pela radiação solar, seus efeitos no TEC dependem da hora local. Nos períodos de maior incidência solar, geralmente entre as 12 h e 16 h local, a quantidade de elétrons na camada aumenta significativamente e atinge o seu ponto máximo. Ao fim desse período, a concentração diminui devido à recombinação dos elétrons e íons, atingido a sua concentração mínima (WEBSTER, 1993).

As estações do ano também afetam os valores TEC devido à variação do ângulo zenital do Sol. Essas mudanças afetam a intensidade da radiação solar e, consequentemente, do fluxo de ionização, assim caracterizando as variações sazonais. No caso de países no hemisfério sul, os períodos com maior densidade de elétrons ocorrem no verão e os menores valores ocorrem no inverno (DAL POZ; CAMARGO, 2008).

As variações causadas pelos ciclos de longos períodos são ocasionadas pela ocorrência de manchas solares em um período de aproximadamente 11 anos por ciclo, como mostra a Figura 4. As manchas solares são regiões mais frias e escuras na superfície do Sol, no entorno dessas manchas ocorre um aumento na emissão da radiação solar, isso faz com que aumente a densidade de elétrons da ionosfera. Assim, quanto maior a ocorrência de manchas solares, maior será a ionização da camada (MATSUOKA, 2007).

Figura 4 - Número de manchas solares desde 1700.



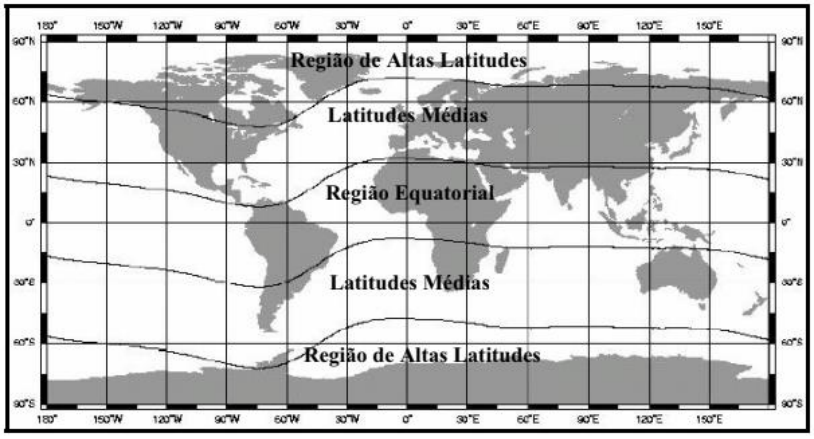
Fonte: SIDC: Sunspot data - Graphics, 2024.

Além da ocorrência de manchas solares, existem outros dois fenômenos associados à variação da emissão de radiação solar. O primeiro são as explosões solares (*solar flares*), caracterizadas por um aumento rápido da energia na superfície solar. Essas explosões normalmente duram em torno de 30 minutos. O segundo fenômeno são os buracos coronais (*coronal holes*), que são correntes de vento solar de alta velocidade. Ocorrem com mais frequência no fim do período de atividade solar, e esse fenômeno acelera as partículas emitidas pelo Sol.

As atividades solares também afetam o campo magnético da Terra, que por sua vez controla o movimento das partículas ionizadas. Qualquer perturbação no campo magnético acaba afetando a ionosfera (MATSUOKA, 2007; DAL POZ, 2010).

Os valores de TEC também podem variar conforme a localização. Nas regiões polares ou regiões de altas latitudes, o comportamento da ionosfera é altamente instável, enquanto em regiões de média altitudes (entre as latitudes 30° N a 50° N e 30° S a 50° S) apresenta um comportamento mais estável e com menos irregularidades. As regiões de baixas latitudes ou equatoriais (compreendidas entre as latitudes 30° N a 30° S) apresentam a maior concentração de densidade dos elétrons (MONICO, 2008). Essas regiões são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Regiões da Ionosfera.



Fonte: MONICO (2008).

As regiões equatoriais podem ser subdivididas em outras duas regiões, sendo elas a região equatorial propriamente dita (5° N e 5° S) e as regiões de baixas latitudes (5° N e 30° N, e 5° S e 30° S). Ambas apresentam fenômenos como a anomalia equatorial e a cintilação ionosférica (MATSUOKA, 2007).

A anomalia equatorial ocorre devido ao efeito fonte, que consiste nos movimentos de elevação e descida do plasma ao longo das linhas do campo geomagnético

até baixas latitudes, o que ocasiona o surgimento de duas regiões de pico de densidade de elétrons nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético, entre as latitudes de 10° e 20º. A anomalia equatorial apresenta uma variação diária com pico na densidade de elétrons por volta das 14h local e um segundo pico maior às 00h local (MONICO,2008).

A cintilação ionosférica é um efeito que causa o enfraquecimento ou a perda total dos sinais recebidos por receptores GNSS, causado pela flutuação da amplitude ou fase de uma onda de rádio, resultado do índice de refração e da sua propagação mediante uma região com densidade de elétrons irregular. Essas regiões de densidades irregulares normalmente se localizam entre 200 e 600 km de altitude. As regiões de maior intensidade de cintilação correspondem às regiões de pico da anomalia equatorial, aproximadamente 15° N e 15° S (MATSUOKA, 2007).

Uma das classificações da cintilação ionosférica mais usadas é baseada no índice adimensional S4, sendo este um indicador que divide a cintilação entre forte, moderada e fraca, conforme o Quadro 1 (TIWARI, 2011).

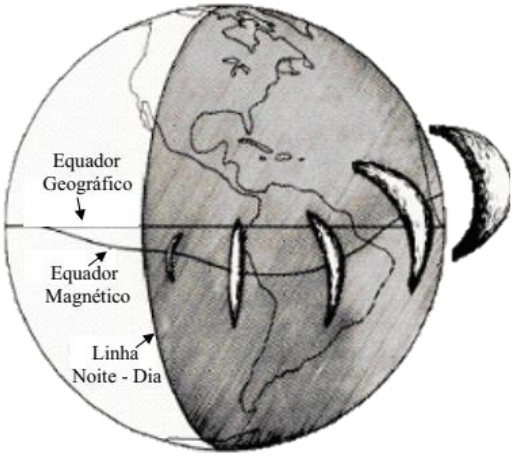
Quadro 1 – Classificação do índice S4.

S4	CLASSES
$S4 \geq 1$	FORTE
$0,5 < S4 < 1$	MODERADA
$S4 \leq 0,5$	FRACA

Fonte: TIWARI, et al. (2011).

A ocorrência de cintilações também pode ser agravada pelas bolhas de plasma ou bolhas ionosféricas, as quais são irregularidades do spread F equatorial caracterizados pela depleção do plasma de larga escala (MONICO, 2008). A interferência do sinal ocorre porque no interior da bolha a densidade do plasma é bem menor em relação às regiões externas, onde há uma maior concentração, resultando na irregularidade da ionosfera, dificultando a propagação de ondas. As bolhas ionosféricas apresentam grandes dimensões, alcançando extensões de 1000 km, e de 150 km a 300 km perpendicularmente. Suas principais ocorrências são na alta ionosfera e normalmente ocorrem no período da noite (SOARES, 2001). Uma representação dessas bolhas é apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.



Fonte: Soares (2001).

Nesse contexto, o efeito de refração da ionosfera ocorre em decorrência da densidade de elétrons em sua composição, podendo variar de acordo com a hora, época e localização geográfica. Compreender a influência desses fatores na composição e nos valores do TEC da atmosfera permite a obtenção de diversas informações da dinâmica ionosférica. Esses dados podem ser aplicados para mitigar os efeitos da ionosfera.

3 RADIO OCULTAÇÃO

A atmosfera de um planeta pode ser estudada através da ocultação, fenômeno astronômico em que um corpo celeste deixa de ser visto em razão à sobreposição de outro corpo. Os estudos referentes à atmosfera terrestre começaram com ocultações estelares, onde se geravam perfis da refração da luz que vinha de uma estrela, oculta por outro planeta, e sofria influência na atmosfera (HOLZSCHUH; SAPUCCI; MONICO, 2010).

A técnica de ocultação começou a ser utilizada nas missões para sondagem e pesquisa das atmosferas planetárias na década de 1960, mas foi a partir de 1995 em que o GPS (*Global Positioning System*) se tornou operacional, que se tornou viável a aplicação da técnica para estudar a atmosfera terrestre (JEREZ et al., 2022).

Além disso, atualmente utiliza-se, para gerar perfis da atmosfera terrestre, satélites artificiais em diferentes altitudes, sendo eles um GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e um LEO (*Low Earth Orbit*), com os quais é possível aplicar essa abordagem com o uso dos sinais de radiofrequência, sendo conhecida como Rádio Ocultação (RO).

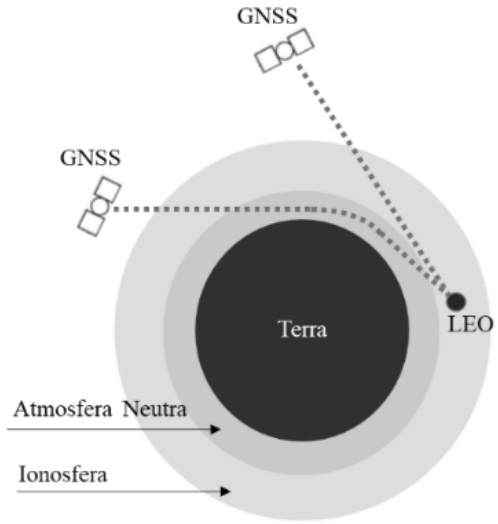
3.1 Princípio da técnica

O estudo da atmosfera terrestre, através da geração de perfis atmosféricos utilizando dados de RO, está relacionado com o conceito de refração do sinal de radiofrequência transmitido por um satélite GNSS e recebido por um satélite LEO. Isso ocorre porque essa técnica depende da existência de uma atmosfera que refrata o sinal transmitido por um dos satélites artificiais, consequentemente modificando sua trajetória e velocidade de propagação (KURSINKI *et al.*, 1997; 2000).

O sinal transmitido pelo GNSS chega ao receptor do satélite LEO, mesmo que os dois estejam ocultos, através da propagação do sinal em forma de linha curva, devido à refração da atmosfera, permitindo que os satélites que não estão visíveis entre si, possam transmitir e receber o sinal, como mostra o esquema da Figura 7.

Durante a ocultação, a posição dos satélites GNSS e LEO sofrem alterações, visto que esse fenômeno pode durar entre um e três minutos. Isso permite a obtenção de um perfil do sinal transmitido, possibilitando a recuperação de perfis atmosféricos através do uso dos dados obtidos nessa técnica (KURSINKI *et al.*, 1997).

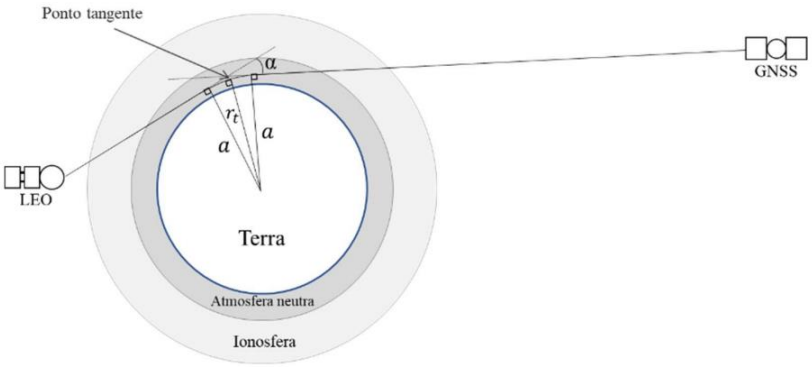
Figura 7 - Comportamento do sinal GPS em uma RO-GPS.



Fonte: Adaptado de Holzschuh (2010).

A geometria da ocultação entre os satélites que orbitam a Terra é apresentada na Figura 8 e possui elementos como o ângulo de refração (α), o parâmetro de impacto (a) e o raio de tangência (r_t), correspondente à distância entre o ponto de tangência e o centro da Terra.

Figura 8 - Geometria de uma ocultação GNSS.



Fonte: Jerez *et al.*, 2021.

Como a técnica é baseada na refração do sinal, é importante determinar o índice de refração total (n), dado pela Equação (1), em função das velocidades da luz no vácuo (c) e no meio (v).

$$n = \frac{c}{v}. \tag{1}$$

Esse índice ainda pode ser relacionado com algumas componentes atmosféricas através da sua relação com a refratividade (N), cuja expressão geral é dada na Equação (2) (KURSINKI *et al.*, 1997). Essas componentes são pressão atmosférica hidrostática

(P_{hid}), pressão parcial de vapor d'água (P_w), temperatura atmosférica (T), densidade de elétrons (n_e), frequência (f) e conteúdo líquido de água (W).

$$N = (n-1) \times 10^6 = 77{,}6\frac{P_{hid}}{T} + 70{,}4\frac{P_w}{T} + 3{,}73\frac{P_w}{T^2} - 4{,}03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2} + 1{,}4W. \qquad (2)$$

Dessa forma, ao considerar as variáveis atmosféricas na determinação da refratividade, como descrito nas Equações (4) e (5), a técnica de RO possibilita a observação de variações específicas na estrutura da atmosfera, contribuindo para a análise de comportamento dos perfis atmosféricos.

3.2 Missões de RO-GNSS

A técnica de RO utilizando satélites artificiais passou a ser aplicada após a operacionalização do sistema GPS, quando começaram a ser lançadas algumas missões visando investigar o comportamento da atmosfera terrestre por recuperações de perfis das componentes atmosféricas (JEREZ et al., 2021).

A primeira missão, denominada GPS-*Meterology* (GPS/MET), foi lançada em 1995 e operou durante dois anos, teve como objetivo principal aplicar o conceito da técnica e avaliar os resultados obtidos, mas também produziu dados de sondagem tanto da atmosfera neutra, quanto da ionizada (HOLZSCHUH; SAPUCCI; MONICO, 2010).

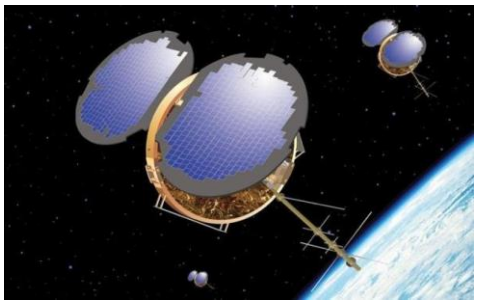
A partir disso, outras missões foram desenvolvidas com o intuito de obter dados de RO, sendo elas equipadas com receptores que permitissem a utilização da técnica. Dentre elas estão as missões CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload of Geophysical Research and Application*), IOX (*Ionosphere Occutation Experiment ombord PicoSat*), GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosfera and Climate*) e COSMIC-2.

A missão COSMIC, lançada em 2006, era composta por seis satélites LEO (Figura 9.a), e foi desenvolvida como uma missão experimental visando realizar observações da atmosfera terrestre. Essa missão permitiu coletar cerca de 2000 ocultações por dia, até que em 2013, foi atingida a vida útil dos satélites e o número caiu para cerca de 1000 ocultações diárias. A missão foi encerrada em 01 de maio de 2020, quando o último satélite da COSMIC encerrou suas atividades, totalizando 14 anos de coleta de dados atmosféricos (SNIDER, 2020).

Após o sucesso da COSMIC, a missão COSMIC-2 foi lançada em 2019, sendo idealizado o lançamento de dois grupos: 2A e 2B. Cada um dele com configurações diferentes quanto à inclinação das órbitas, procurando obter maior abrangência de dados.

Apesar disso, só foram lançados seis satélites LEO (Figura 9.b) em baixa órbita com receptores *multi-GNSS*, todos pertencentes ao grupo 2A, ou seja, com uma inclinação de 24°. O grupo 2B, cujos satélites deveriam ter 72° de inclinação, não foi lançado por falta de financiamento e, portanto, os dados fornecidos aos usuários são somente das regiões equatoriais, abrangidas pela COSMIC-2A (GUNTER'S SPACE PAGE, 2019).

Figura 9 - Satélite das missões COSMIC.



(a) COSMIC-1



(b) COSMIC-2

Fonte: COSMIC, 2021.

As observações dessas duas missões são armazenadas no CDAAC (COSMIC *Data Analsis and Archive Center*) com o intuito de fornecer as informações para a comunidade científica. Além disso, o banco de dados conta com o armazenamento de dados de outras missões, visando aumentar a quantidade de observações disponibilizadas.

O banco de dados é organizado por missão (COSMIC-1 ou COSMIC-2) e por nível de processamento, sendo eles basicamente quatro: o Nível-0, que corresponde a arquivos binários; o Nível-1a, que contém dados de rastreamento de órbita e de ocultação de rádio e informações de atitude do satélite; o Nível-1b, contendo soluções precisas de determinação da órbita, o conteúdo total de elétrons e a fase de excesso atmosférico; e o Nível-2, que armazena os perfis atmosféricos, em vários formatos (UCAR COSMIC PROGRAM, 2019).

4 METODOLOGIA PARA RECUPERAÇÃO DE PERFIS ATMOSFÉRICOS

A presente seção apresenta a metodologia aplicada para visualização e análise dos perfis atmosféricos provenientes de Rádio Ocultação GNSS. Para os eventos selecionados, utilizaram-se metodologias com dados das missões COSMIC e COSMIC-2. Foram selecionados os arquivos de produtos *ionPrf, atmPrf* e *wetPrf*.

O arquivo *ionPrf,* contém um perfil de dados ionosféricos para cada uma das ocultações, de onde foram extraídos os dados de densidade de elétrons, sendo eficaz para analisar eventos geofísicos. O arquivo *atmPrf,* contém um perfil atmosférico sem informações de umidade, dos quais foram utilizados os dados de temperatura e pressão atmosférica. Por fim, o *wetPrf*, que contém informações de umidade incluídas, fornecendo dados de temperatura, pressão e pressão de vapor d'água, sendo ambos produtos eficazes para analisar eventos climatológicos e fenômenos meteorológicos.

A aquisição dos dados foi realizada com uso do banco de dados do CDAAC e o processamento desses dados foi realizado com uso do *software* Matlab. Para isso foram implementados *scripts* de download, leitura e processamento dos dados atmosféricos com o objetivo de gerar gráficos para visualizar e analisar os perfis atmosféricos.

4.1 Perfis de densidade de elétrons

Após a obtenção dos dados correspondentes aos eventos adotados, realizou-se uma filtragem dos perfis em janelas espaciais de 10º ou 20º em torno da localização do evento, a depender do fenômeno analisado.

Um estudo conduzido por Yang-Yi Sun et al. (2022) analisou alterações verticais na densidade de elétrons na ionosfera utilizando a técnica de RO, considerando a missão COSMIC-2 e ocultações a até 2000 km de distância do vulcão Tonga. Com base nessa metodologia e nos resultados apresentados no estudo, adotou-se uma janela espacial de 20º, quando considerados os eventos estáticos, como vulcânicos e de abalos sísmicos, garantindo que a distância considerada fosse semelhante para as ocultações. No entanto, para o furacão, um evento dinâmico, foi adotada uma janela de 10° para comparar com os resultados obtidos com as outras variáveis consideradas, e evitar a suavização de resultados devido ao rápido deslocamento do fenômeno na superfície.

Para evitar interferências ou exclusão de *outliers* que poderiam estar ligados aos impactos dos eventos nos resultados obtidos, não foram aplicadas filtragens adicionais aos dados. Embora alguns valores de densidade de elétrons negativos sejam observados, o que não corresponde a valores corretos, estes foram mantidos nos resultados por serem

considerados normais em análises de RO para valores de densidade de elétrons abaixo de 100 km, principalmente em decorrência do método de recuperação empregado, que considera a atmosfera esfericamente simétrica (Lei et al., 2007).

Assim, os gráficos foram construídos com intervalos de 2 em 2 horas, conforme empregado no estudo de Yang-Yi Sun et al. (2022), o que facilitou a visualização das variações temporais. Outros métodos de plotagem foram testados, considerando intervalos de 24 horas, porém não apresentaram resultados tão claros, pois os perfis ficam sobrepostos dificultando a análise do comportamento, o que permitiu a utilização do método proposto no artigo, que se mostrou eficaz para identificar o comportamento ao longo do dia.

Esse método foi empregado principalmente nos eventos pontuais, como abalos sísmicos e erupções vulcânicas. Já para furacões, os gráficos foram construídos com intervalos diários, a fim de facilitar a visualização do evento, visto que o fenômeno sofre movimentação e torna-se necessário analisar um intervalo maior de dias.

4.2 Perfis de pressão, temperatura e pressão de vapor d'água

Para as análises de pressão e temperatura, foram adotados os mesmos critérios de janelas espaciais definidos em densidade de elétrons, considerando intervalos espaciais de 10º e 20º em torno do evento, a fim de manter a consistência metodológica.

Após realizar a filtragem dos dados a serem utilizados, os dados de temperatura e pressão foram obtidos a partir do arquivo atmPrf, enquanto a pressão de vapor d'água foi obtida pelo arquivo wetPrf, ambos disponíveis no banco de dados. Dessa forma, os dados foram representados em perfis médios a partir de interpolações, a fim de garantir que todas as altitudes analisadas possuíssem um conjunto completo de dados (sem lacunas) para representar todos os valores encontrados nos arquivos obtidos. Assim, calcula-se a média para cada valor de altitude considerado, garantindo completude e a recuperação de perfis médios para cada período do evento considerado.

Cabe acrescentar que foram considerados diferentes intervalos de altitude, a depender do evento analisado. Nos abalos sísmicos, não foram analisadas essas variáveis atmosféricas, visto que teoricamente, elas não são alteradas com a presença do fenômeno. Nas erupções vulcânicas e nos furacões, foram plotados perfis gerais (de 0 a 60 km) e outros três intervalos com o intuito de fazer análises mais detalhadas: 0 a 10 km, 10 a 20 km e 20 a 60 km. Enquanto isso, para as secas, foram considerados os intervalos: 0 a 2 km, 2 a 4 km, 4 a 6 km e 6 a 10 km.

5 ABALOS SÍSMICOS

O termo terremoto, ou sismo, origina-se de uma ruptura ou deslizamento repentino de uma falha geológica, onde essa ruptura causa vibrações que se propagam em todas as direções. As rupturas surgem devido ao acúmulo de tensões no interior do planeta Terra, relacionado ao movimento das placas tectônicas. Quando estas tensões atingem um determinado nível, ocorre a emissão de energia acumulada, atingindo a superfície em forma de tremores, com variações na intensidade de cada um (ASSUMPÇÃO, 2019; TEIXEIRA et al., 2009).

A partir da movimentação da crosta ou litosfera[1], ocorre o acúmulo de tensão em diversos pontos das placas tectônicas, atingindo o limite de resistência das rochas ocasionando rupturas que causam vibrações que se propagam em todas as direções. Geralmente, os terremotos ocorrem nas zonas de encontro entre duas placas tectônicas, onde a atividade geológica é mais intensa. No entanto, também são comuns os sismos intraplaca, que ocorrem no interior das placas, sem necessariamente envolver uma ruptura visível na superfície (GROTZINGER et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2009).

Os terremotos ocorrem devido a três principais processos geológicos, sendo eles por causas tectônicas, vulcânicas e desmoronamentos internos superficiais. Além das falhas geológicas e efeitos causados pelos humanos (como mineração, extração de petróleo e algumas construções de barragens próximas a falhas geológicas) (GROTZINGER et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2009).

As causas tectônicas ocorrem devido às correntes de convecção localizadas no interior da Terra, onde há acúmulo de tensão e liberação de energia que atinge as placas tectônicas e provocam o seu deslocamento. As causas vulcânicas são resultantes de explosões internas, colapsos ou acomodação nos vazios internos resultantes da atividade vulcânica. Geralmente se apresentam como terremotos locais de pequena intensidade, afetando somente os arredores do hipocentro [2](GROTZINGER et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2009).

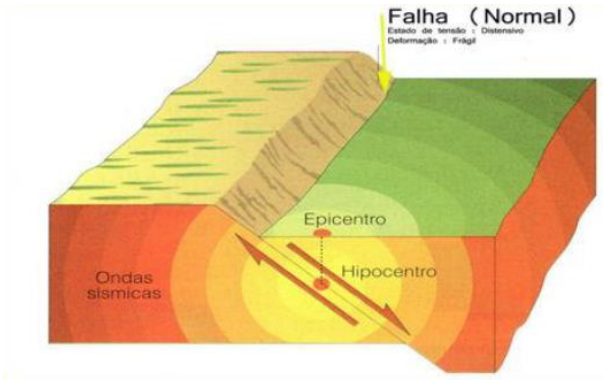
Os desmoronamentos internos e superficiais são ocasionados pelo rompimento de rochas subterrâneas e abalos sísmicos de pequena magnitude. Uma falha geológica trata-se de uma descontinuidade formada pela ruptura de uma rocha superficial, como,

[1] “a crosta, junto com uma parte do manto acima da zona de baixa velocidade, forma uma camada mais dura e rígida, chamada litosfera.” (TEIXEIRA et al., 2009)
[2] É o ponto de origem de um terremoto no interior da Terra (TEIXEIRA et al., 2009)

por exemplo, a Falha de San Andreas (Califórnia - EUA) (GROTZINGER et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2009).

Em um terremoto, o local de surgimento de uma ruptura é denominado de hipocentro ou foco, sendo o epicentro a projeção do hipocentro na superfície terrestre, e a distância entre o hipocentro e o epicentro é chamado de profundidade local, conforme visualizado na Figura 10. As vibrações se propagam por meio de ondas sísmicas que variam à medida que se distanciam do hipocentro (GROTZINGER et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2009).

Figura 10 - Local de surgimento de uma ruptura na ocorrência de um terremoto.



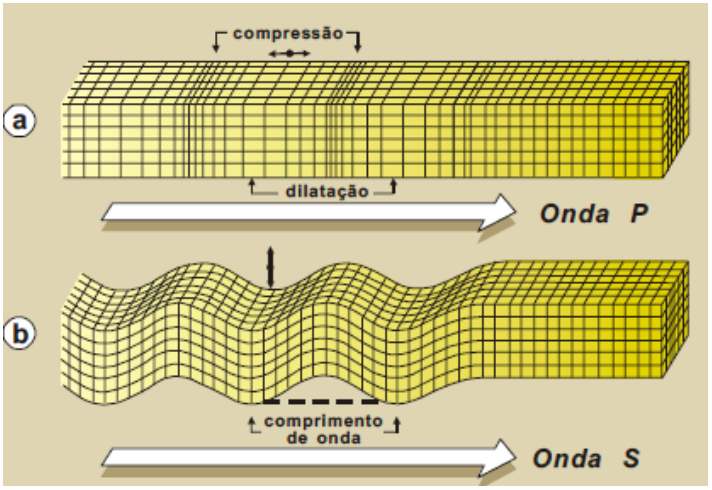
Fonte: SNIRH JÚNIOR (2024).

<https://snirh.apambiente.pt/junior/index.php?menu=2.4&item=5&subitem=1>

As ondas sísmicas são vibrações ou oscilações que se propagam no interior da Terra, em todas as direções a partir do hipocentro, sendo geradas por rupturas nas rochas. As vibrações são mais fortes, ou seja, com maior amplitude de oscilação, quanto maior a área da ruptura e maior a tensão liberada. As ondas sísmicas são denominadas de "elásticas", por se propagarem por meio de meios elásticos, como rochas ou outros materiais sólidos da superfície terrestre. Logo, ao se propagarem pelas rochas, as vibrações acarretam deformações que desaparecem logo após a passagem dessas ondas (ASSUMPÇÃO, 2019; TEIXEIRA et al., 2009).

Existem dois tipos de ondas fundamentais, sendo as longitudinais (ou primárias, ondas P) e as transversais (ou secundárias, ondas S). Nas ondas longitudinais, as partículas se movimentam na mesma direção em que se propagam (Figura 11.a), enquanto nas ondas transversais, as partículas oscilam perpendicularmente à direção de propagação (Figura 11.b) (GROTZINGER et al., 2006; ASSUMPÇÃO, 2019).

Figura 11 - Ondas P (a) e S (b).



Fonte: ASSUMPÇÃO (2019).

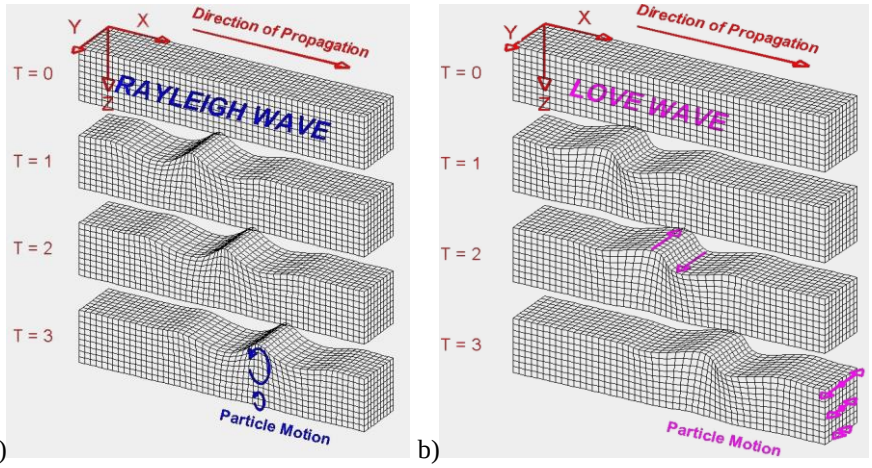
As ondas P possuem velocidade de propagação maior que das ondas S, sendo assim as primeiras registradas nos abalos sísmicos. As ondas P se propagam em meios sólidos, líquidos ou gasosos, enquanto as ondas S propagam-se somente em meios sólidos. As velocidades de propagação das ondas P e S dependem apenas do tipo de rocha, independente da amplitude das vibrações, assim como a velocidade do som no ar (onda P) é sempre de 340 m/s (GROTZINGER et al., 2006; ASSUMPÇÃO, 2019).

Duas outras categorias particulares de ondas sísmicas são bastante frequentes: as ondas superficiais de *Love* (Figura 12.a) e *Rayleigh* (Figura 12.b), que se movem ao longo da superfície, e suas oscilações diminuem rapidamente à medida que a profundidade aumenta. Nas ondas *Love*, as partículas vibram horizontalmente em uma direção perpendicular à transversal, sendo este um modo especial de propagação de ondas S polarizadas horizontalmente e restritas às camadas mais superficiais da Terra (GROTZINGER et al., 2006; ASSUMPÇÃO, 2019).

Por outro lado, nas ondas *Rayleigh*, as partículas oscilam em um plano vertical, descrevendo uma trajetória elíptica, sendo movimento semelhante às ondas do oceano. As ondas *Rayleigh* representam um modo especial de propagação através da interferência construtiva de ondas P e S refletidas nas camadas mais superficiais da Terra. As ondas superficiais têm velocidades de propagação mais baixas em comparação com as ondas P e S. Quanto mais raso o terremoto, maior será a amplitude das ondas superficiais (GROTZINGER et al., 2006; ASSUMPÇÃO, 2019).

Figura 12 - Ondas de superfície Rayleigh e Love.

a) b)



Fonte: ASSUMPÇÃO (2019).

Uma forma de avaliar a intensidade de um tremor sísmico é pela Escala de Mercalli, sendo o sistema mais comum para classificar os efeitos de um terremoto, com graus que variam de I a XII, dependendo dos impactos nas pessoas, edifícios e no ambiente natural. Assim, trata-se de uma escala que não depende de medições diretas com instrumentos, mas sim da categorização da intensidade das vibrações de acordo com a percepção humana e os danos causados (GROTZINGER et al., 2006; ASSUMPÇÃO, 2019). O Quadro 2 apresenta um resumo dos principais impactos dos terremotos de acordo com a escala "Mercalli Modificada", juntamente com os valores aproximados da aceleração do movimento do solo.

Quadro 2 - Escala de Intensidade de Mercalli Modificada.

Grau	Descrição dos Efeitos	Aceleração (g)
I	Não é sentido. Leves efeitos de período longo de terremotos grandes e distantes	-
II	Sentido por poucas pessoas paradas, em andares superiores ou em locais favoráveis.	<0,003
III	Sentido dentro de casa. Alguns objetos pendurados oscilam. Vibração parecida à passagem de um caminhão leve. Algumas pessoas sentem quantos segundos durou o tremor. Pode não ser reconhecido como um abalo sísmico.	0,004 – 0,008
IV	Objetos suspensos oscilam. Vibração parecida à de um caminhão pesado. Janelas, louças e portas fazem barulho. Paredes e estruturas de madeira rangem.	0,008 – 0,015
V	Sentido fora de casa; algumas pessoas percebem de onde vêm as vibrações. Pessoas acordam. Líquido em recipiente	0,015 – 0,04

	é perturbado. Objetos pequenos e instáveis são deslocados. Portas oscilam, fecham e abrem.	
VI	Sentido por todos. Muitos se assustam e saem às ruas. Pessoas andam sem firmeza. Janelas e louças são quebradas. Objetos e livros caem das prateleiras. Reboco e construção de má qualidade racham.	0,04 – 0,08
VII	Difícil manter-se em pé. Objetos suspensos vibram. Móveis quebram. Danos em construção de má qualidade, e formam-se algumas trincas em construção normal. Queda de reboco, ladrilhos ou tijolos mal assentados e telhas. Ondas em piscinas. Pequenos escorregamentos de barrancos arenosos.	0,08 – 0,15
VIII	Difícil manter-se em pé. Objetos suspensos vibram. Móveis quebram. Danos em construção de má qualidade, e formam-se algumas trincas em construção normal. Queda de reboco, ladrilhos ou tijolos mal assentados e telhas. Ondas em piscinas. Pequenos escorregamentos de barrancos arenosos.	0,08 – 0,15
IX	Pânico geral. Construções comuns são bastante danificadas, às vezes ocorre colapso total. Danos em construções reforçadas. Tubulação subterrânea quebrada. Rachaduras visíveis no solo.	0,3 – 0,6
X	A maioria das construções é destruída até as fundações. Danos sérios a barragens e diques. Grandes escorregamentos de terra. Água é lançada nas margens de rios e canais. Trilhos são levemente entortados.	0,6 – 1
XI	Trilhos são bastante entortados. Tubulações subterrâneas são completamente destruídas.	~1 – 2
XII	Destruição quase total. Grandes blocos de rocha são deslocados. Topografia e níveis são alterados. Objetos são lançados ao ar.	~2

Fonte: ASSUMPÇÃO (2019).

Outra forma de analisar sismos é pela magnitude de Richter, sendo esta baseada na amplitude máxima de uma onda sísmica, tipicamente a onda P ou a onda de superfície Rayleigh, pois são mais facilmente observadas. Ela realiza uma correção para compensar a atenuação da onda durante sua propagação do foco sísmico até a estação onde é medida (GROTZINGER et al., 2006; ASSUMPÇÃO, 2019).

Esta magnitude está diretamente relacionada com a quantidade total de energia liberada pela ruptura (Quadro 3). É importante ressaltar que a magnitude de Richter não possui um limite inferior definido, podendo até mesmo ser negativa. Por outro lado, o

limite superior da magnitude é determinado, na prática, pela maior extensão de ruptura que a litosfera pode suportar (GROTZINGER et al., 2006; ASSUMPÇÃO, 2019).

Quadro 3 - Valores da magnitude Richter relacionados com a quantidade de energia liberada pelo abalo sísmico.

M_S **magnitude**	**A amplitude a 50 km**	**L (km) comprimento da ruptura**	**D deslocamento da falha**	**Energia (J)**
9	1 m	400	10 m	$1{,}6.10^{18}$
7	1 cm	30	1 m	$2{,}1.10^{15}$
5	0,1 mm	5	1 cm	$2{,}8.10^{12}$
3	0,1 μm	1	1 mm	$3{,}6.10^{9}$

Fonte: ASSUMPÇÃO (2019).

Nesse sentido, diversas fontes, como explosões subterrâneas e nucleares, grandes erupções vulcânicas, terremotos de grande magnitude e lançamentos de foguetes, são conhecidas por desencadear ondas infrassônicas na atmosfera. Essas fontes provocam oscilações acústicas e gravitacionais que se propagam lateral e verticalmente, afastando-se do ponto de origem (BLANC, 1985). Essas oscilações podem causar distúrbios na atmosfera neutra, chegando a causar atrasos na propagação de sinais conhecidos como *Coseismic Tropospgeric Disturbances* (CTD), afetando principalmente sinais de comunicação até alcançarem as camadas ionosféricas, onde a interação entre a atmosfera neutra e o plasma ionizado resulta em variações na densidade eletrônica ionosférica (CALAIS et al., 1998; Kherani et al. 2021).

A previsão de terremotos é um desafio global, em grande parte devido à dificuldade dos cientistas em reunir um número suficiente de casos de terremotos destrutivos para formar estatísticas e validar métodos e teorias de previsão. Nas últimas décadas, a eficácia, adaptabilidade e confiabilidade do uso de perturbações ionosféricas para identificar processos que ocorrem na superfície da Terra e no interior da crosta antes de grandes terremotos têm sido amplamente estudadas (ALLEN et al., 2019; KUNITSYN et al., 2014; CORNELL, 1968; XINXIN, 2013; COBURN et al., 2002).

No contexto da observação e coleta de dados sísmicos, o monitoramento por satélite permite a realização de pesquisas estatísticas em grande escala, proporcionando uma base para testar diversos métodos e modelos. Com a capacidade de detectar perturbações na ionosfera, a técnica de Rádio Ocultação GNSS pode contribuir para a previsão de abalos sísmicos. Segundo Coïsson et al. (2015) as técnicas de RO são

extremamente sensíveis a variações na composição da atmosfera o possibilita o uso dessas técnicas para o desenvolvimento de sistemas de alertar precoce (ZHANG et al., 2023; Coïsson et al. 2015).

5.1 Seleção dos eventos analisados

O estudo do impacto dos abalos sísmicos na atmosfera foi realizado a partir da análise de um terremoto que ocorreu durante o período de operação da missão COSMIC-2. Esse evento foi escolhido previamente, a partir da análise de alguns eventos para as missões COSMIC e COSMIC-2. No entanto, em todos os casos da missão COSMIC, o volume de dados disponível se mostrou insuficiente para avaliação. Em alguns casos da missão COSMIC-2, os eventos apresentaram ausência de dados nos horários dos terremotos, o que inviabilizaria posteriores análises.

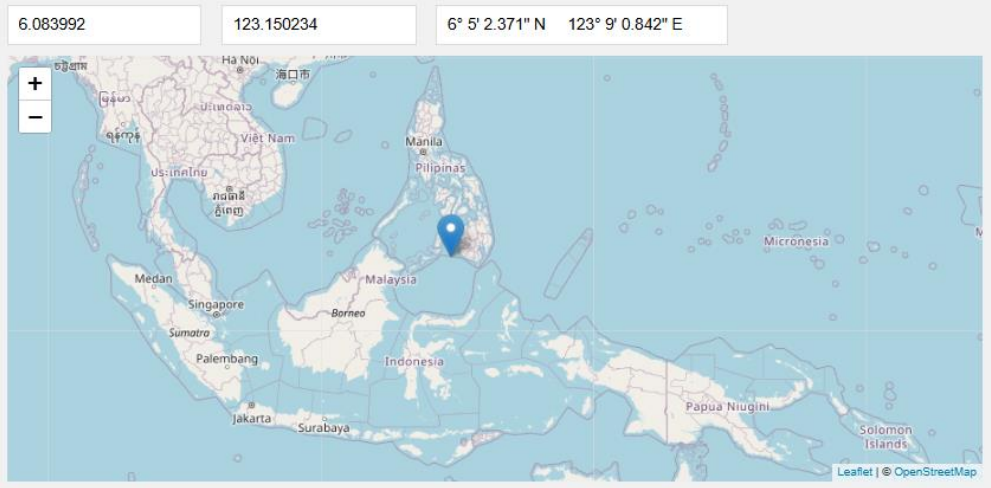
Para a seleção do abalo sísmico, além da disponibilidade de dados, foram consideradas a localização geográfica e a intensidade do evento. A localização foi um critério importante devido à cobertura espacial limitada da missão COSMIC-2, que não abrange todo o globo. Já em relação à intensidade do evento, foram considerados somente eventos com magnitude maior que 7 na Escala Richter. Assim, os abalos sísmicos avaliados na seleção constam no Quadro 4, sendo que dentre eles, foi escolhido o terremoto que aconteceu nas Filipinas (Figura 13), visto que os demais não apresentaram dados suficientes, como citado anteriormente.

Quadro 4 – Abalo sísmico avaliado e suas respectivas informações básicas.

Terremoto	**Acontecimento**	**Localidade**		**Categoria**
	Data do sismo	**Lat (º)**	**Lon (º)**	**Escala Richter**
Loyalty Islands	19/05/2023	-23.206	170.742	7.7
Filipinas	**11/07/2024**	**6.084**	**123.150**	**7.1**
Chile	19/09/2024	-23.079	67.840	7.4

Fonte: USGS, 2024

Figura 13 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o terremoto nas Filipinas.



Fonte: GPS coordenadas. https://www.coordenadas-gps.net/

As informações sobre o evento foram adquiridas no *Earthquake Hazards Program*, do USGS, que disponibiliza o horário, magnitude e localização do terremoto. Para posteriores análises, foram considerados perfis de densidade de elétrons, onde os dados foram obtidos no CDAAC, do produto *ionPrf*, considerando 5 dias de dados, sendo dois dias antes do evento, o dia do evento e dois dias após.

Considerando os cinco dias a serem analisados, inicialmente realizou-se um estudo de quantidade de ocultações na janela de 20º em torno do evento. O Quadro 5 apresenta os valores de ocultações por dias analisados.

Quadro 5 - Quantidade de ocultações por dias analisados para o terremoto das Filipinas.

	Janela	**Quantidade de Perfis por Dia**					**Total**
		1º	**2º**	**3º**	**4º**	**5º**	
ionPrf	20º	52	37	50	53	52	244

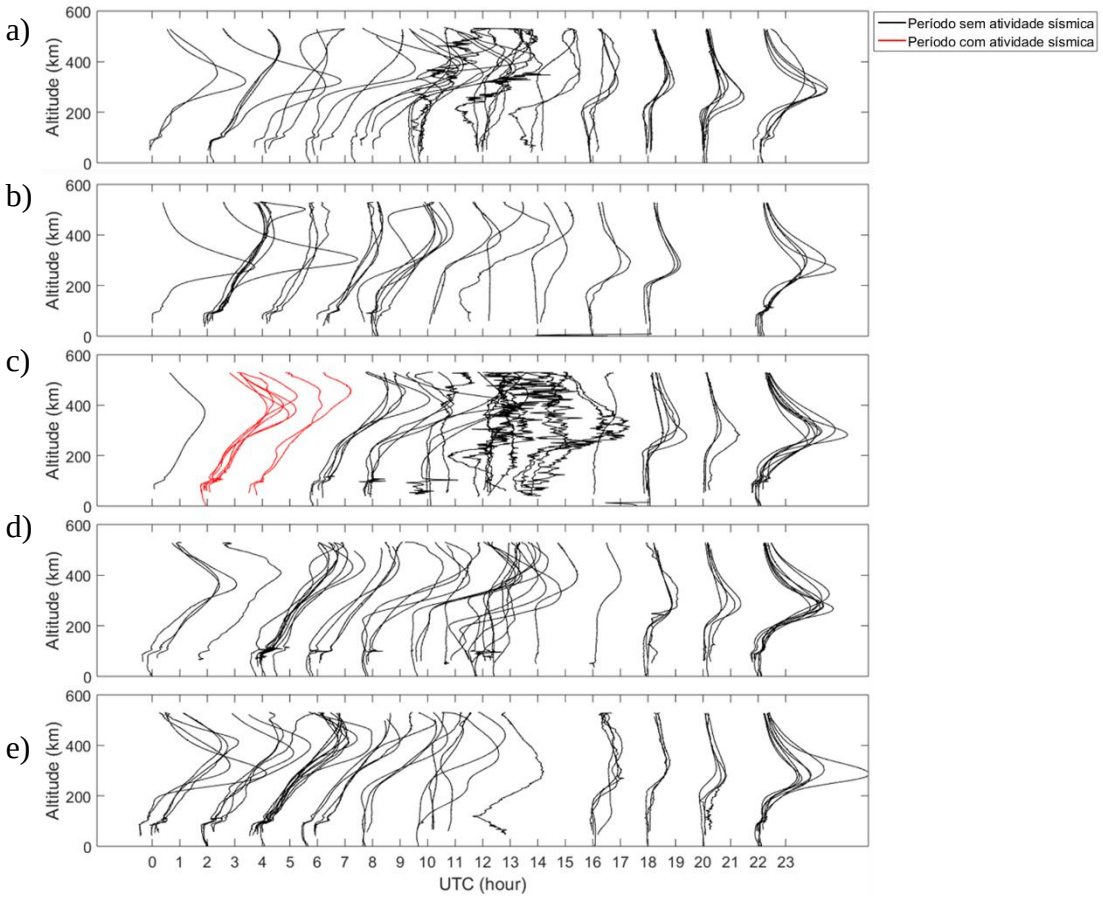
Fonte: Os autores, 2024.

Com base nos trabalhos de Yang-Yi Sun et al. (2022) foram construídos gráficos de densidade de elétrons por altitude, considerando conjuntos de dados a cada 2 horas de dados, a fim de melhorar a visualização para observar as variações na densidade de elétrons em diferentes altitudes ao longo do tempo.

5.2 Resultados

O impacto dos terremotos na camada atmosférica foi analisado a partir do comportamento dos valores de densidade de elétrons nos cinco dias analisados. Os resultados obtidos para os perfis de densidade de elétrons são apresentados na Figura 14, e estão organizados pelos dias de análise, sendo dispostos a cada 2 horas.

Figura 14 - Perfis de densidade de elétrons antes, durante e após o terremoto: (a) dois dias antes; (b) um dia antes; (c) no dia do terremoto; (d) um dia após; (e) dois dias após.



Fonte: Os autores, 2024.

Ao analisar os resultados, observa-se que, nos dias anteriores ao evento (Figura 14 a e b), os perfis exibiram um comportamento consistente, com curvas suaves ao longo da altitude. Embora alguns perfis tenham sido ruidosos, o padrão geral de comportamento de densidade de elétrons se manteve, sugerindo uma ionosfera em estado de maior estabilidade antes do epicentro do terremoto. O ruído observado em alguns perfis pode ser atribuído a movimentações menores que antecederam o epicentro do evento.

Durante o epicentro, perfis destacados em vermelho (Figura 14 c), que correspondem aos horários dos abalos sísmicos, exibiram um comportamento normalizado. No entanto, algumas horas após o evento sísmico, os perfis tornaram-se significativamente ruidosos, sugerindo uma possível influência prolongada do terremoto sobre a ionosfera. Esses distúrbios podem indicar que os efeitos do evento ainda se manifestaram após o abalo principal. Nos dias subsequentes (Figura 14 d e e), os perfis voltaram a exibir a curvatura característica, reforçando a hipótese de que a ionosfera retornou gradualmente a um estado mais estável.

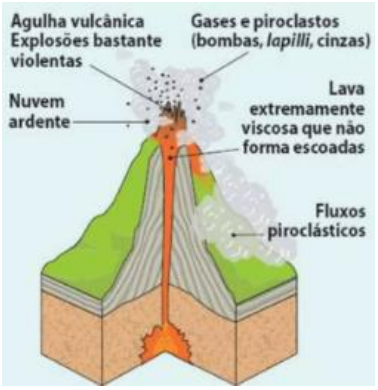
Assim, a análise dos perfis de densidade de elétrons ao longo dos cinco dias de observação revela variações mínimas atribuídas a pequenos movimentos tectônicos nos dias precedentes ao evento. Durante o epicentro do terremoto, embora os perfis estivessem normalizados, a instabilidade e o aumento de perfis ruidosos sugerem que o evento teve efeitos duradouros na ionosfera, os quais se manifestaram horas após o abalo. Nos dias seguintes, a gradual recuperação dos perfis para um comportamento mais estável mostra que a ionosfera retornou ao seu estado normal.

6 ERUPÇÕES VULCÂNICAS

Um vulcão é uma estrutura geológica resultado de uma abertura de fissuras na crosta terrestre, o que permite a liberação de magma, gases e materiais vulcânicos na superfície terrestre. O processo das erupções vulcânicas é explicado pelo movimento do magma do manto terrestre para a superfície, podendo ser classificado em dois tipos: explosiva ou efusiva (SIGURDSSON, ET AL., 2015; COURTILLOT, 1990).

Erupções vulcânicas explosivas produzem grandes nuvens de cinzas e injetam enormes quantidades de gás, aerossóis e cinzas na atmosfera neutra, podendo alcançar a estratosfera (SPARKS et al., 1997; BOURASSA et al., 2012, 2013; FROMM et al., 2013, 2014). Essas erupções são eventos extremos de alta intensidade, caracterizados pela liberação repentina de materiais piroclásticos[3] e gases a alta velocidade, incluindo escoamento de lava viscosa. Esses materiais piroclásticos liberados durante a erupção vulcânica, cuja classificação é baseada em seus tamanhos e formas, são constituídos por gotas de lava misturadas com cinzas, além de bombas e blocos que foram fragmentados pela expansão violenta de gases. Nesses elementos, é possível encontrar fragmentos de natureza magmática ou de rochas preexistentes. Entre eles, destacam-se as cinzas vulcânicas, que representam o material mais fino, variando desde poeira até partículas de areia fina (NUNES, 2002; TEIXEIRA et al., 2009; LOCKWOOD & HAZLETT, 2010). A Figura 15 apresenta um esquema das erupções explosivas.

Figura 15 - Caracterização das erupções explosivas.



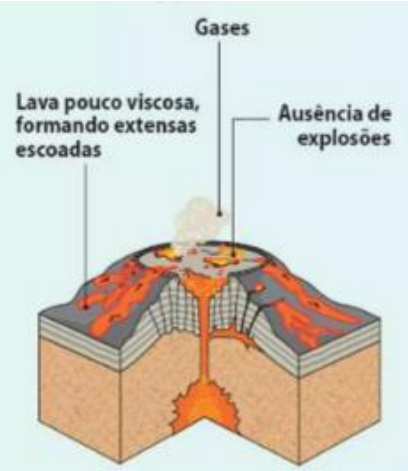
Fonte: VALENTIM, 2011.

As erupções efusivas são marcadas pela liberação de gases e extrusão[4] não explosiva de magma à superfície terrestre, geralmente pelo escoamento de lava de baixa

[3] "Os materiais piroclásticos sãos constituídos por materiais soltos ou misturas de cinzas vulcânicas, bombas, blocos e gases, produzidos durante erupções violentas de gases." (TEIXEIRA et al., 2009)
[4] É a passagem de material de forma forçada. (TEIXEIRA et al., 2009)

viscosidade. Ao contrário das erupções explosivas, nas quais há a liberação repentina de materiais piroclásticos e gases a alta velocidade, as erupções efusivas ocorrem de forma mais lenta e contínua, formando extensas escoadas que cobrem grandes áreas. Durante esses eventos, a lava fluida flui livremente, permitindo a fácil liberação de gases e resultando em uma série de manifestações vulcânicas menos explosivas (NUNES, 2002; LOCKWOOD & HAZLETT, 2010; SIGURDSSON, ET AL., 2015). A Figura 16 apresenta um esquema das erupções efusivas.

Figura 16 - Caracterização das erupções efusivas.



Fonte: VALENTIM, 2011.

As erupções vulcânicas são compostas por grandes explosões que geram ondas acústico-gravitacionais que se propagam pela atmosfera e perturbam a densidade do plasma ionosférico (OCCHIPINTI, 2015). À medida que essas ondas são amplificadas pela densidade decrescente da atmosfera neutra, acarreta variações no plasma ionosférico. Essas perturbações resultam em variações no conteúdo total de elétrons (TEC), medido pelo GNSS como a integral da densidade de elétrons ao longo da linha de visão entre o receptor GNSS e o satélite (TEUNISSEN, 2017).

A análise do TEC após erupções vulcânicas foi realizada por alguns trabalhos, como em erupções do Vulcão Pinatubo (Cheng & Huang, 1992; Igarashi et al., 1994), Vulcão Asama (Heki et al., 2006), Vulcão Soufrière Hills (Dautermann et al., 2009), Vulcão Calbuco (Shults et al., 2016) e Vulcão Kelud (Nakashima et al., 2016; MANTA, 2021).

Erupções vulcânicas significativas podem causar mudanças climáticas de curto prazo se o dióxido de enxofre (SO2) for injetado na estratosfera, formando aerossóis de sulfato com um longo tempo de residência (cerca de 1-3 anos) (ROBOCK, 2000). O efeito é um aquecimento da estratosfera, causado pelos aerossóis e pela circulação induzida,

além de um resfriamento da atmosfera neutra, como foi observado na erupção do Monte Pinatubo em 1991 (MCCORMICK et al., 1995; ROBOCK, 2000). Os impactos dependem na maioria da massa total ejetada, da altitude alcançada pelas cinzas e pelo SO2, da localização do vulcão e da extensão da dispersão devido à circulação atmosférica. O monitoramento desses elementos permite avaliar os possíveis riscos e mitigar os impactos causado pelo evento. Sendo cada vez mais necessário a combinação de diferentes técnicas como a RO e imageamento por satélites permite a obtenção de resultados mais precisos e eficientes (Cigala et al., 2019; Sun et al., 2022).

6.1 Seleção dos eventos analisados

Para analisar os efeitos das erupções vulcânicas na atmosfera, foram selecionados dois eventos que ocorreram durante o período de funcionamento da missão COSMIC-2. Para essa seleção foram consideradas a localização geográfica dos vulcões e a intensidade dos eventos. A localização foi um critério importante devido à cobertura espacial limitada da missão COSMIC-2, que não abrange todo o globo. Quanto à intensidade, foram consideradas duas categorias diferentes para identificar os distintos impactos relacionados à magnitude das erupções.

Na etapa de seleção dos eventos a serem analisados, foram avaliadas quatro erupções de vulcões ativos atualmente (Quadro 6), dos quais foram selecionados o vulcão Hunga Tonga - Hunga Ha'apai e o vulcão Semeru.

Quadro 6 - Erupções vulcânicas avaliadas e suas respectivas informações básicas.

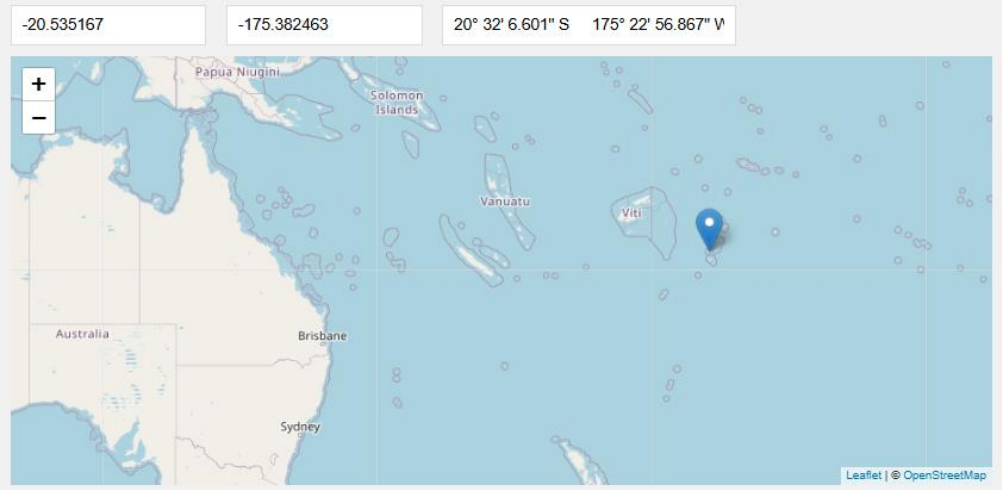
Vulcão	**Acontecimento**	**Localidade**		**Categoria**
	Data de erupção	**Lat (º)**	**Lon (º)**	**VEI**
Soufriere St. Vincent	09/04/2021	13.330	-61.180	4
La Palma	19/09/2021	28.570	-17.830	3
Semeru	**04/12/2021**	**-8.108**	**112.922**	**4**
Hunga Tonga-Hunga Ha'apai	**15/01/2022**	**-20.536**	**-175.382**	**5**

Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2024.https://www.noaa.gov/

O vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, localizado em Tonga (Figura 17), entrou em erupção às 04h30 UTC e foi caracterizado por uma intensidade extrema, expelindo água suficiente para encher mais de 58 mil piscinas olímpicas e sendo considerado mais

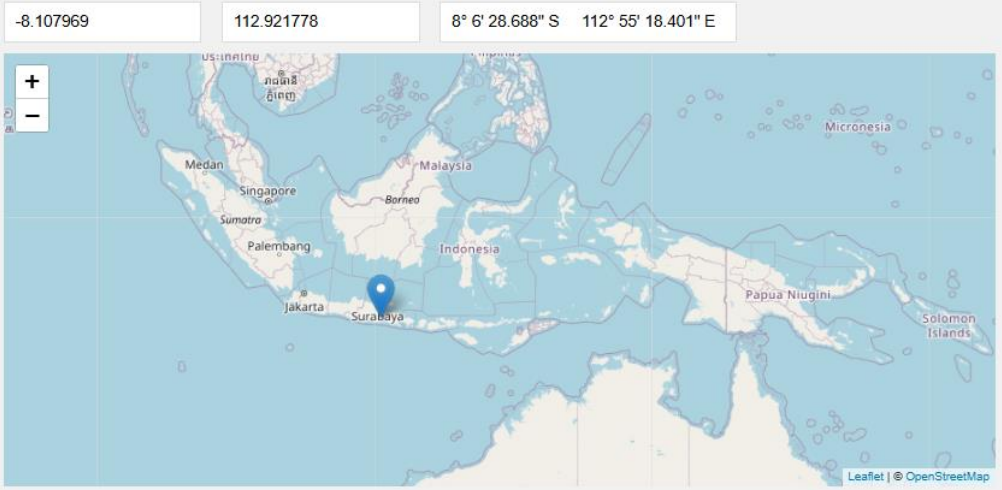
potente que a bomba de Hiroshima (G1, 2022). O vulcão Semeru, na Indonésia (Figura 18), teve sua erupção registrada às 21h09 UTC.

Figura 17 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o vulcão Hunga Ha'apai.



Fonte: GPS coordenadas. https://www.coordenadas-gps.net/

Figura 18 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o vulcão Semeru.



Fonte: GPS coordenadas. https://www.coordenadas-gps.net/

Para posteriores análises de detecção do impacto das erupções nos elementos da composição da atmosfera, como a densidade de elétrons, temperatura e pressão, os dados foram obtidos no CDAAC, abrangendo um período de 5 dias de dados, dois dias antes do evento, o dia da erupção e dois dias após.

Com base na metodologia apresentada na seção anterior, adotou-se uma janela espacial de 20º para filtrar as ocultações, garantindo que a distância considerada fosse semelhante. Além disso, os resultados apresentados incluíram uma distribuição de densidade de elétrons considerando o espaço temporal do dia. Assim, adotou-se o mesmo modelo representativo, considerando intervalos a cada 2 horas para cada dia analisado.

Esse critério foi aplicado tanto para obter resultados comparáveis para o mesmo vulcão, quanto para melhorar a visualização dos efeitos nos outros eventos vulcânicos.

Para a análise dos dados, foram empregados os produtos *ionPrf* e *atmPrf*. O produto *ionPrf* foi utilizado para obter perfis de densidade de elétrons, a fim de analisar o comportamento dos elétrons na ionosfera. O produto *atmPrf* fornece os perfis de temperatura e pressão atmosférica, a fim de analisar a interação da fumaça dos vulcões com a atmosfera.

Considerando os cinco dias a serem analisados, inicialmente realizou-se um estudo de quantidade de ocultações na janela de 20º em torno do evento, considerando os dois produtos utilizados. O Quadro 7 apresenta os valores de perfis por dias analisados.

Quadro 7 - Quantidade de ocultações por dia e por produtos analisados.

Vulcão	**Janela**	**Produto**	**Quantidade de Perfis por Dia**					**Total**
			1º	**2º**	**3º**	**4º**	**5º**	
Hunga Tonga-Hunga Ha'apai	20º	ionPrf	50	50	38	52	53	243
		atmPrf	67	74	76	84	85	386
Semeru	20º	ionPrf	56	51	69	54	52	282
		atmPrf	319	330	354	348	312	1663

Fonte: Os autores, 2024.

Ao analisar o Quadro 7, verifica-se que o vulcão Semeru, em relação ao Tonga, apresenta uma quantidade maior de ocultações na janela de 20º considerada. Isso ocorre, principalmente, pela sua localização geográfica, visto que na região equatorial a missão COSMIC-2 apresenta maior volume de dados.

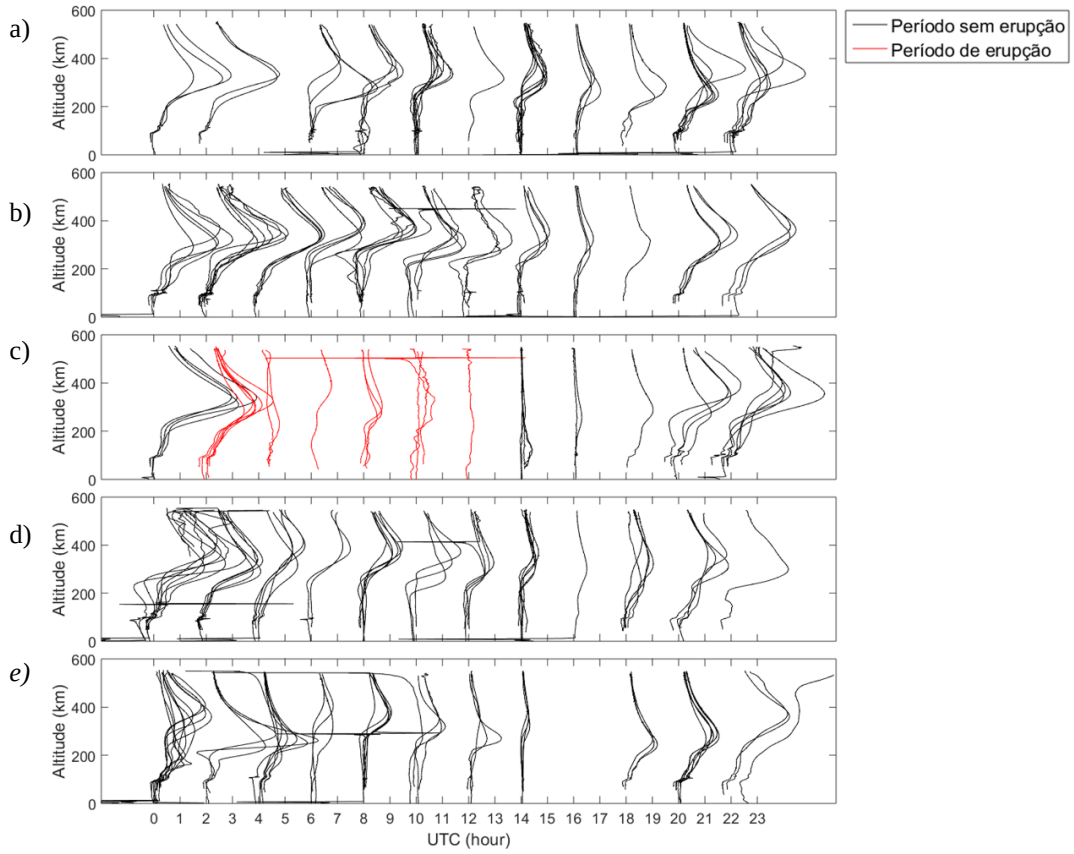
Para o produto ionPrf, foram plotados gráficos de densidade de elétrons por altitude, considerando conjuntos de dados a cada 2 horas de dados, a fim de melhorar a visualização para observar as variações na densidade de elétrons em diferentes altitudes ao longo do tempo. No caso do produto atmPrf, foram gerados perfis médios que relacionam temperatura e pressão com a altitude, levando em conta os dias anteriores e posteriores aos eventos vulcânicos.

6.2 Resultados

O impacto das erupções na camada atmosférica foi analisado a partir do comportamento dos valores de densidade de elétrons, temperatura e pressão nos cinco dias analisados. Primeiramente, serão analisados os perfis de densidade de elétrons, a partir da geração de perfis extraídos do produto *ionPrf*, da COSMIC-2, de acordo com a

metodologia apresentada anteriormente. Na Figura 19, são apresentados os perfis de densidade de elétrons obtidos para a erupção vulcânica do Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, em todos os dias analisados.

Figura 19 - Perfis de densidade de elétrons obtidos para o vulcão Hunga Tonga em diferentes períodos: (a) dois dias antes; (b) um dia antes; (c) dia da erupção; (d) um dia após; (e) dois dias após.



Fonte: Os autores, 2024.

Ao visualizar a Figura 19, a primeira análise realizada foi comparativa com os resultados de Yang-Yi Sun et al. (2022). Nos três dias iniciais, que coincidem com o período analisado no artigo, os resultados obtidos foram verificados para validação comparativa. Antes do evento (Figura 19 a e b), os perfis seguiram comportamento esperado, com uma curva gradualmente suave conforme a altitude, indicando que a ionosfera estava mais estável.

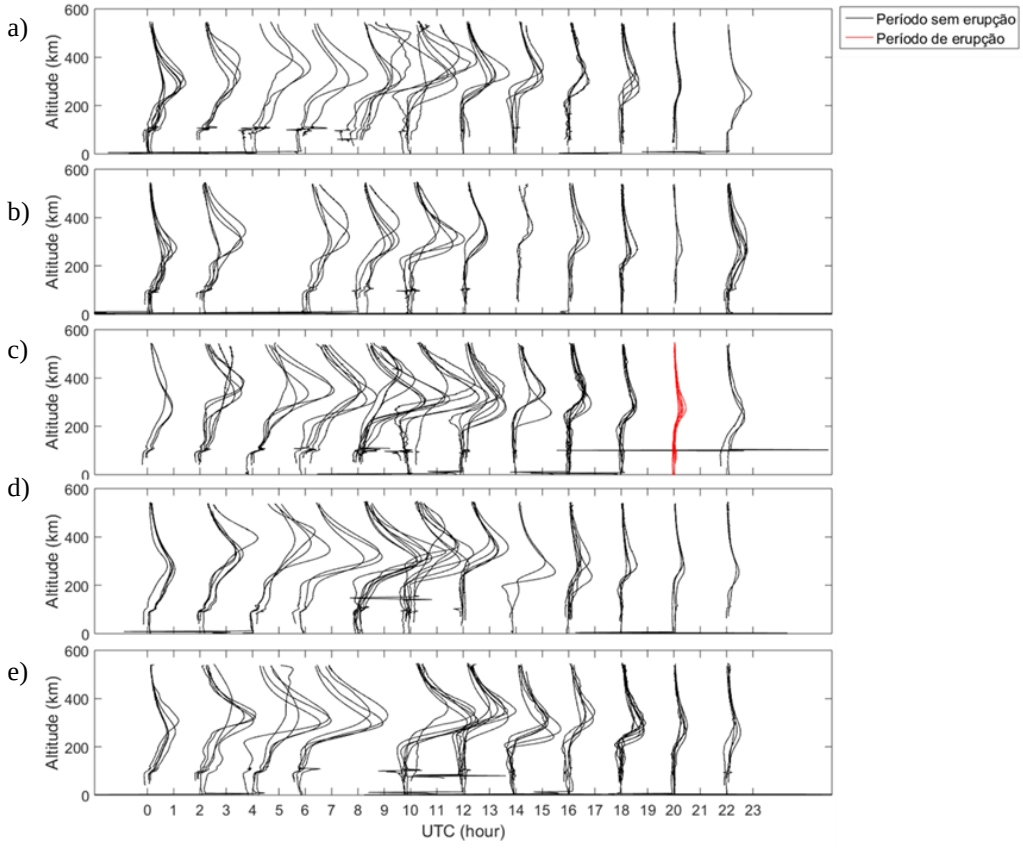
No entanto, no dia da erupção (Figura 19 c), observam-se perfis com uma possível assinatura do vulcão Tonga, evidenciando uma alteração na estrutura da densidade de elétrons. Os perfis destacados em vermelho correspondem aos horários da erupção vulcânica, apresentam um comportamento atípico para perfis de densidade de elétrons. Em vez de exibir a curvatura suave típica de um perfil ionosférico, os dados mostraram uma forma quase reta, o que sugere uma perturbação na ionosfera durante a erupção. Esse

comportamento anômalo pode ser associado à energia e fumaça liberadas pela erupção, que afetou diretamente a ionosfera, provocando mudanças nos perfis.

Nos dias subsequentes à erupção (Figura 19 d e e), os perfis retornaram gradualmente ao comportamento esperado, com a curvatura característica reaparecendo. No entanto, alguns perfis ainda exibiram ruídos ou distorções, o que pode ser explicado pela continuação da atividade vulcânica, uma vez que o vulcão ainda expelia fluídos e gases, causando perturbações menores na ionosfera, resultando em perfis menos regulares, embora num geral, parte da ionosfera tenha se estabilizado novamente.

Para o vulcão Semeru, os resultados obtidos para os perfis de densidade de elétrons são apresentados na Figura 20.

Figura 20 - Perfis de densidade de elétrons obtidos para o vulcão Semeru em diferentes períodos: (a) dois dias antes; (b) um dia antes; (c) dia da erupção; (d) um dia após e (e) dois dias após.



Fonte: Os autores, 2024.

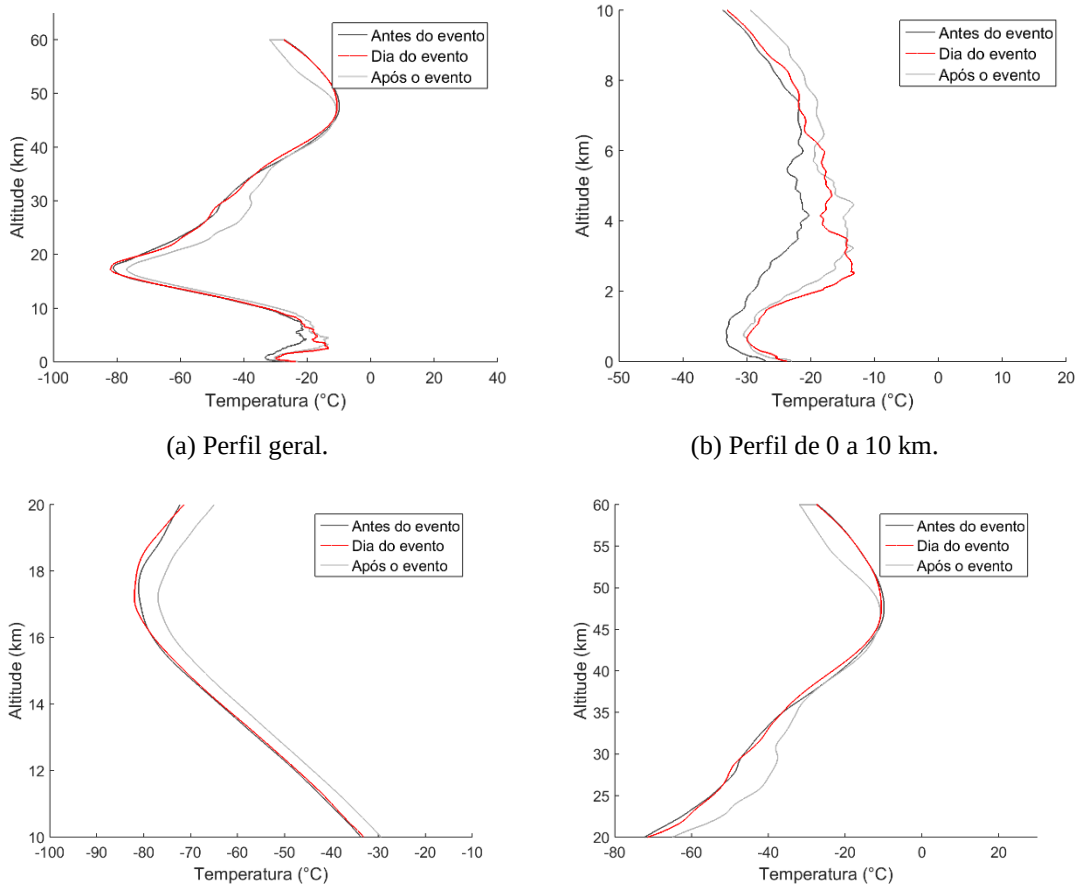
A análise dos perfis de densidade de elétrons para o vulcão Semeru apresentou um comportamento conforme o esperado nos dias que antecederam o evento, com os perfis exibindo a curvatura típica da ionosfera. No dia da erupção, o comportamento ionosférico seguiu o padrão esperado, exceto durante o horário da erupção, quando o perfil apresentou redução na curvatura, porém não tão verticalizado quanto o observado

na erupção do vulcão Tonga. Nos dias subsequentes à erupção, os perfis voltaram a exibir a curvatura característica, indicando um retorno à normalidade na ionosfera.

Embora a visualização do evento do Semeru não tenha sido tão expressiva quanto a do Tonga, ainda foi possível observar uma redução na curvatura dos perfis durante a erupção. Essa diferença pode ser explicada pela menor intensidade do evento no Semeru, cujo VEI é 4, enquanto o VEI do Tonga foi 5, sugerindo que a magnitude menor da erupção pode ter gerado menos perturbações na ionosfera. Apesar disso, o comportamento observado ainda reforça a influência das erupções vulcânicas nas camadas superiores da atmosfera, embora a extensão e a intensidade das alterações ionosféricas variem conforme a força do evento vulcânico.

Em relação ao produto *atmPrf*, foram analisados perfis de temperatura e pressão atmosférica, a fim de analisar nas diferentes altitudes antes, durante e após as erupções vulcânicas. Inicialmente são apresentados na Figura 21 os perfis médios de temperatura obtidos para o vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha'apai.

Figura 21 - Perfis médios de temperatura obtidos para o vulcão Hunga Tonga.



(a) Perfil geral.

(b) Perfil de 0 a 10 km.

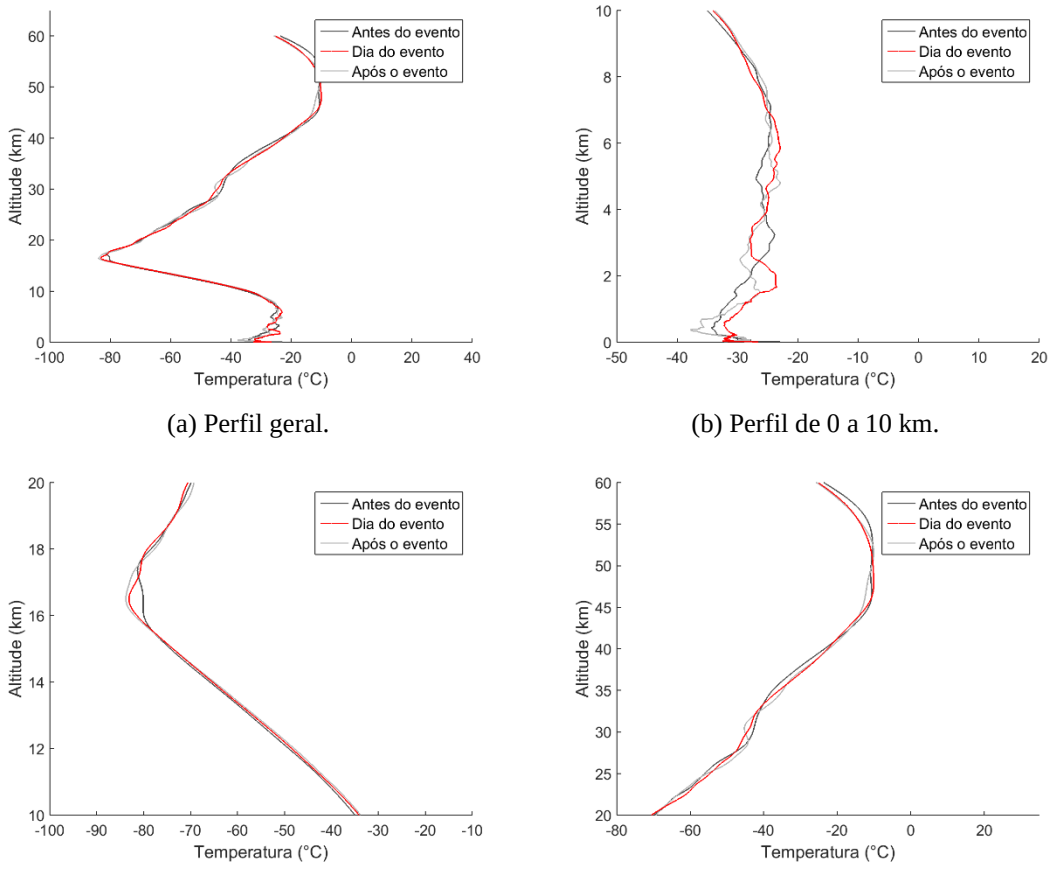
(c) Perfil de 10 a 20 km.

(d) Perfil de 20 a 60 km.

Fonte: Os autores, 2024.

Após a análise dos perfis médios de temperatura para o vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, na Figura 21 observou-se que durante o evento a temperatura foi maior em todas as faixas de altitude avaliadas, quando comparada ao dia anterior ao evento. Esse aumento na temperatura ocorre devido à liberação de calor e à emissão de grandes nuvens de fumaça pela erupção. Na faixa de 0 a 10 km, além da elevação da temperatura durante o evento, observou-se perfis ruidosos, o que é comum para essa faixa de altitude. Nas faixas de 10 a 20 km e 20 a 60 km, as temperaturas antes e depois do evento oscilaram entre si. No entanto, a elevação da temperatura durante o evento foi consistente nas altitudes mais baixas (0 a 4 km), reforçando o impacto na temperatura ocasionado pela erupção. A Figura 22 apresenta os mesmos resultados para o vulcão Semeru.

Figura 22 - Perfis médios de temperatura obtidos para o vulcão Semeru.



(a) Perfil geral.

(b) Perfil de 0 a 10 km.

(c) Perfil de 10 a 20 km.

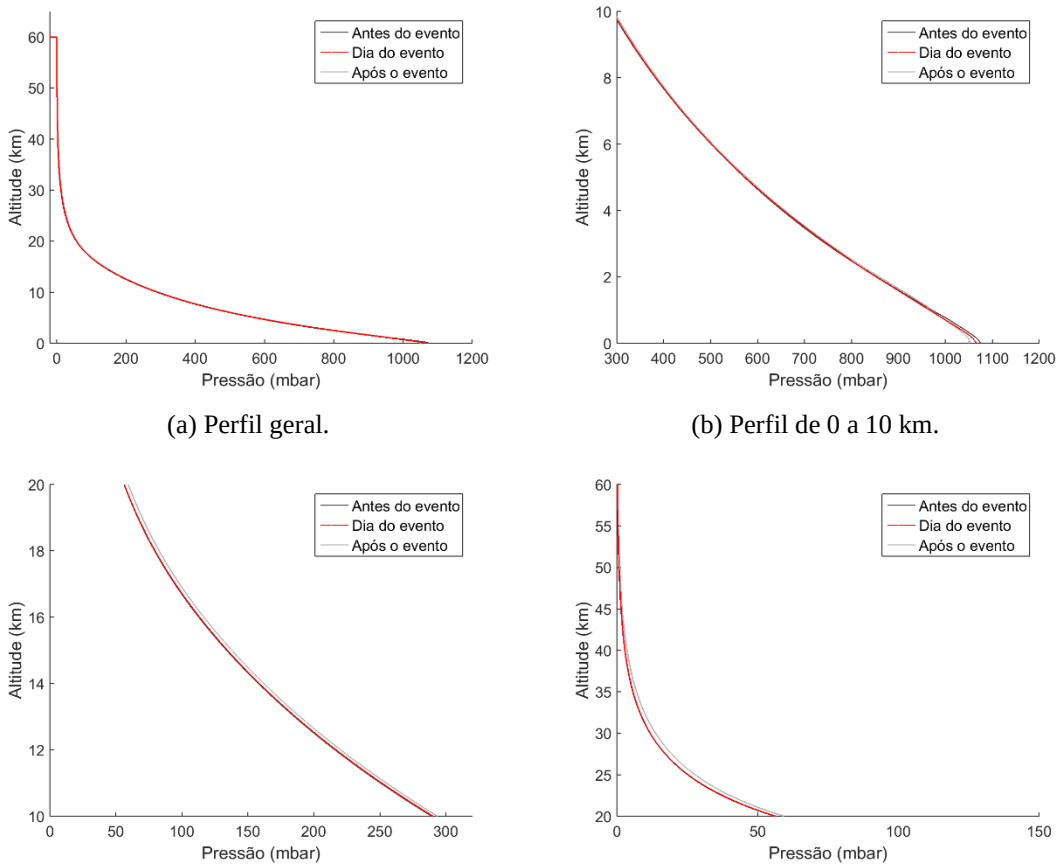
(d) Perfil de 20 a 60 km.

Fonte: Os autores, 2024.

Para o vulcão Semeru, as temperaturas nas três faixas de altitude analisadas apresentaram oscilações entre si. Na faixa de 0 a 10 km, os perfis foram ruidosos, com as temperaturas oscilando sem um padrão claro. Nessa faixa, nem sempre a temperatura durante o evento foi maior em relação aos dias anteriores ou posteriores, o que sugere que

a erupção não impactou tanto a atmosfera nessa altitude específica. Nas faixas de 10 a 20 km e de 20 a 60 km, também houve variações entre os perfis, mas sem uma alteração significativa durante o evento, reforçando a ideia de que a erupção do Semeru, com um VEI menor que o do Tonga, gerou um impacto mais sutil na atmosfera. Outra justificativa seria a quantidade maior de perfis do vulcão Semeru, que pode ser atenuado o impacto da erupção vulcânica. A Figura 23 apresenta os gráficos de pressão do vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, considerando as mesmas divisões de altitude.

Figura 23 - Perfis médios de pressão obtidos para o vulcão Hunga Tonga.



(a) Perfil geral.

(b) Perfil de 0 a 10 km.

(c) Perfil de 10 a 20 km.

(d) Perfil de 20 a 60 km.

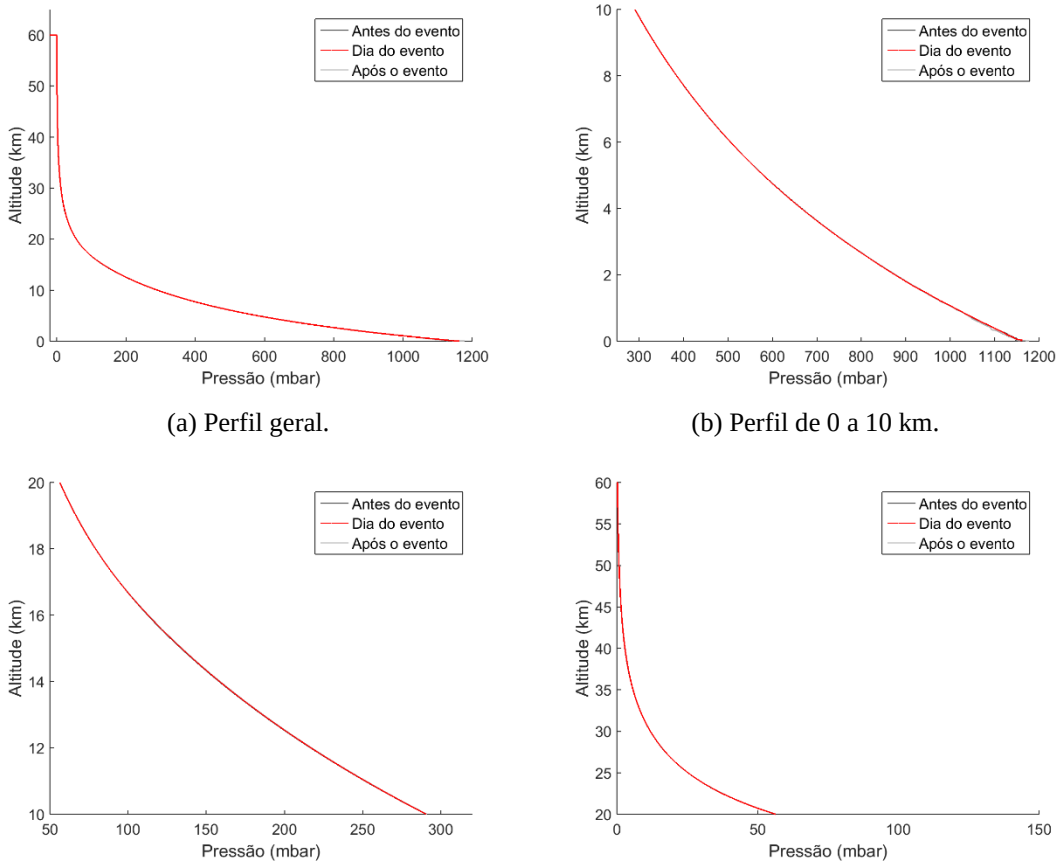
Fonte: Os autores, 2024.

A análise dos perfis médios de pressão atmosférica durante a erupção do vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha'apai mostrou que, até 1 km de altitude, a pressão foi menor no dia do evento. Essa diminuição pode estar relacionada a perturbação causada pela liberação de gases e cinzas, criando uma zona de baixa pressão (Robock, 2000).

Antes e após o dia do evento, as pressões atmosféricas se mostraram bastante semelhantes, sugerindo que, embora as erupções tenham gerado flutuações temporárias,

a atmosfera rapidamente retornou ao seu estado de equilíbrio. A Figura 24 mostra as respectivas análises para o vulcão Semeru.

Figura 24 - Perfis médios de pressão obtidos para o vulcão Semeru.



(a) Perfil geral.

(b) Perfil de 0 a 10 km.

(c) Perfil de 10 a 20 km.

(d) Perfil de 20 a 60 km.

Fonte: Os autores.

A análise dos perfis médios de pressão atmosférica durante a erupção do vulcão Semeru indicou que, até 1 km de altitude, a pressão variou no dia do evento, apresentando algumas flutuações. Os perfis de pressão foram coincidentes em todas as altitudes, tanto antes quanto durante e após a erupção, sugerindo que a pressão atmosférica se manteve relativamente estável. Em comparação, a erupção do vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha'apai também apresentou uma diminuição da pressão até 1 km, mas com perturbações mais acentuadas e variáveis, evidenciando uma resposta atmosférica mais visível do que observada no Semeru.

Assim, a análise dos perfis de densidade de elétrons, temperatura e pressão permitiram avaliar os impactos atmosféricos das erupções dos vulcões selecionados. Diante dos resultados apresentados, verifica-se que a erupção do vulcão Hunga Tonga-

Hunga Ha'apai apresentou alterações expressivas nos perfis avaliados, principalmente em comparação ao vulcão Semeru.

No caso do vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, a pressão atmosférica apresentou uma queda evidente até 1 km de altitude no dia da erupção, o que reforça a influência dos gases e cinzas expelidos sobre a atmosfera local. No entanto, para o vulcão Semeru, os efeitos na pressão atmosférica foram menos pronunciados e as variações de temperatura não demonstraram mudanças significativas, sugerindo um impacto menor devido à menor intensidade do evento.

7 FURACÕES

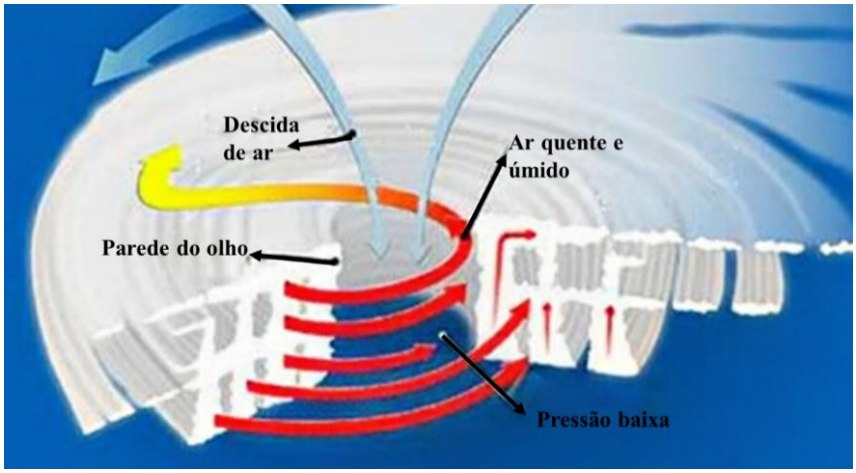
Os furacões são fenômenos meteorológicos complexos, de grande impacto ambiental e acontecem a oeste de Greenwich, sendo também conhecidos como ciclones tropicais, termo utilizado para generalização do fenômeno, ou tufões, quando o fenômeno ocorre à leste de Greenwich (BRYANT, 2005; NASA SPACE PLACE, 2019).

Sua formação ocorre sob as águas quentes dos oceanos tropicais, caracterizada por ventos fortes que giram em torno de um centro de baixa pressão, chamado de olho do furacão, e se deslocam em alta velocidade (BRYANT, 2005). Além disso, eles são responsáveis por grandes nuvens densas na região dos trópicos, compostas por grandes quantidades de água e gelo, condições essas que favorecem a investigação do fenômeno utilizando a técnica de RO (LASOTA et al., 2018).

Existem também épocas propícias para a formação de furacões, sendo entre junho e outubro para o hemisfério norte e, entre dezembro e maio para o hemisfério sul. Isso está relacionado com o período de equinócio de cada hemisfério, onde as águas superficiais dos oceanos começam a se aquecer, podendo atingir temperaturas propícias para a sua geração (BRYANT, 2005).

Os furacões são gerados quando há encontro entre um centro de baixa pressão e águas que apresentam temperatura acima de 26°C, possibilitando o aumento da evaporação das águas oceânicas. A partir da formação do furacão, o ar úmido, que é mais leve, eleva-se próximo ao centro e perde calor enquanto sobe na atmosfera, formando grandes nuvens úmidas. Em seguida, o vapor d’água libera calor graças à alteração do estado físico de gasoso para líquido, num processo de condensação. Por fim, o calor aquece o ar, que volta a subir, causando a redução da pressão no olho do furacão, fortalecendo-o (Figura 25). Além disso, segundo o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE, quanto menor é a pressão no olho do furacão, mais fortes serão os ventos do fenômeno (BRYANT, 2005; NASA SPACE PLACE, 2019; SOUSA, 2019).

Figura 25 - Dinâmica de um furacão.



Fonte: Adaptado de NASA SPACE PLACE, 2019.

Outro ponto importante sobre a formação dos furacões é que dificilmente eles se iniciam muito próximos ao equador, porque dependem da força de rotação da Terra para acionar sua própria rotação em torno da zona de elevação, ou seja, próximo ao olho do furacão (SOUSA, 2019).

Os ciclones são classificados de acordo com a escala *Saffir-Simpson* (NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL, 2023) que não se baseia no potencial de destruição causado pela passagem o furacão, mas pela velocidade atingida por ele. São estabelecidas cinco categorias de furacões (Quadro 2), apesar de que o fenômeno pode ser denominado uma depressão tropical, se os ventos vão até 63 km/h, ou uma tempestade tropical, se os ventos ficarem entre 63 e 117 km/h.

Quadro 8 - Classificação na escala *Saffir-Simpson*.

Categoria	Especificação
Classe 1	Apresenta ventos entre 118 e 153 km/h
Classe 2	Apresenta ventos entre 154 e 177 km/h
Classe 3	Apresenta ventos entre 178 e 209 km/h
Classe 4	Apresenta ventos entre 210 e 249 km/h
Classe 5	Apresenta ventos acima de 250 km/h

Fonte: Adaptado de National Geographic Brasil, 2023.

Como já mencionado, os furacões são grandes correntes de ar com vapor d'água, formando grandes "nuvens" que percorrem uma trajetória se intensificando até atingir seu pico e em seguida diminuindo a força até estabilizar. E apesar dos furacões serem considerados nuvens e a técnica de RO ser considerada insensível às nuvens, estudos

mostram que é possível detectar assinaturas de furacões principalmente pela refração em condições nubladas (BRYANT, 2005).

Trabalhos como de Biondi et al. (2013), Biondi et al. (2011) e Lasota el al. (2018), que avaliam a utilização da técnica de RO para análise de furacões, estão ligados a detecção da altura da nuvem ou em determinar uma assinatura para detecção de furacões através da anomalia do ângulo de flexão, mas alguns ainda analisam a variação da temperatura, para trabalhar com dados padrão, que geralmente são considerados nas análises feitas pelos meteorologistas responsáveis pelos estudos de institutos como o NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

7.1 Seleção dos eventos analisados

Para estudar o impacto deste fenômeno na atmosfera, foram selecionados dois furacões, sendo um deles no período de funcionamento da missão COSMIC e o outro enquanto a missão COSMIC-2 já estava ativa. Para realizar essa seleção, foram analisadas a intensidade do furacão e a quantidade de informações e dados disponíveis. Além disso, foram selecionados para a realização do estudo uma janela espacial de 10° e uma janela temporal de 15 dias, sendo basicamente 7 dias antes e 7 dias após o furacão atingir seu ápice.

Na etapa de seleção, foram avaliados 9 furacões (Quadro 9) e, desses, foram selecionados os furacões Dean e Ian, por estarem em uma localização propícia, terem atingido categoria 5 da escala *Saffir-Simpson* (Quadro 2) e apresentarem perfis disponíveis para a maioria dos dias analisados.

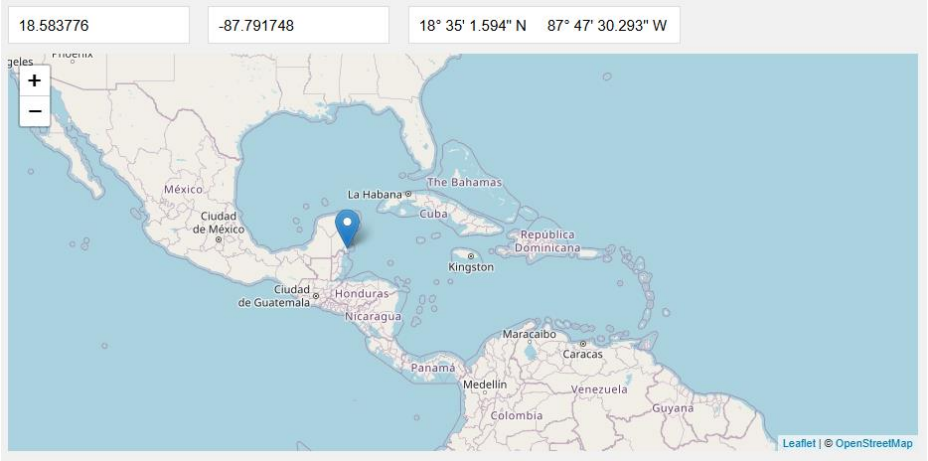
Quadro 9 - Furacões avaliados e suas respectivas informações básicas.

Nome	**Acontecimento**		**Localidade**		**Categoria**
	Formação	**Dissipação**	**Lat (°)**	**Long (°)**	**Escala Saffir-Simpson**
Dean	**13/08/2007**	**23/08/2007**	**18,5838**	**-87,7917**	**5**
Felix	31/08/2007	05/09/2007	13,8381	-83,4961	5
Gustav	25/08/2008	04/09/2008	21,0025	-79,4971	4
Irene	21/08/2011	30/08/2011	24,6071	-77,9260	3
Sandy	24/10/2011	31/10/2011	21,1255	-78,0139	3
Iota	13/11/2020	18/11/2020	13,3041	-83,6719	4
Laura	20/08/2020	29/08/2020	29,8025	-91,8896	4
Grace	13/08/2021	21/08/2021	19,2282	-96,7676	3
Ian	**23/09/2022**	**02/10/2022**	**26,2343**	**-81,7712**	**5**

Fonte: Os autores, 2024.

O furacão Dean da temporada de 2007, tem uma característica especial por ter atingido a categoria máxima duas vezes, a primeira na manhã do dia 18 de agosto e a segunda, na madrugada do dia 21 de agosto, e por isso, nesse evento foram considerados quatro dias como o período do evento. A localidade central (Figura 14) considerada para a análise do evento foi escolhida com base nas informações disponibilizadas pela agência AOML (*Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratories*) no banco de dados do IBTrACS (*International Best Track Archive for Climate Stewardship*).

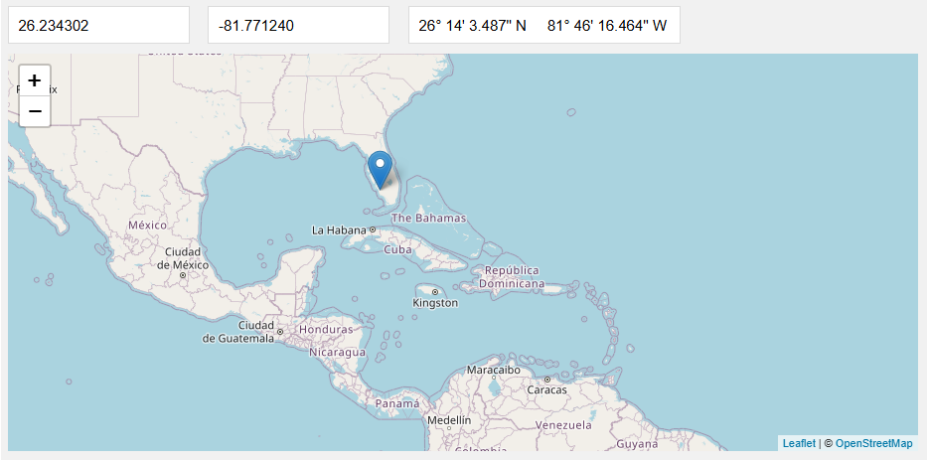
Figura 26 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o furacão Dean.



Fonte: GPS coordenadas. https://www.coordenadas-gps.net/

O furacão Ian da temporada de 2022, por sua vez, atingiu a categoria máxima uma vez, no dia 28 de setembro, dia este que foi considerado como o período de ocorrência do evento. A localidade central (Figura 27) considerada para a análise do evento também foi escolhida com base nas informações disponibilizadas pela agência AOML no banco de dados do IBTrACS.

Figura 27 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o furacão Ian.



Fonte: GPS coordenadas. https://www.coordenadas-gps.net/

Os dados utilizados para a análise dos componentes atmosféricos antes, durante e após a passagem dos furacões nas localidades selecionadas foram extraídos do CDAAC, sendo que para o furacão Dean foram utilizados dados da missão COSMIC, enquanto para o furacão Ian foram utilizados dados da missão COSMIC-2.

Após a obtenção dos dados correspondentes à localização e ao período analisado, chegou-se a uma média de 76 perfis por produto para o furacão Dean (Quadro 10), e uma média de 222 perfis para o furacão Ian (Quadro 11), sendo que os dias considerados como "ocorrência do evento" estão sinalizados em verde.

Quadro 10 - Quantidade de ocultações por dia e por produto analisados para o furacão Dean.

	DOY – ano de 2007														
	224	**225**	**226**	**227**	**228**	**229**	**230**	**231**	**232**	**233**	**234**	**235**	**236**	**237**	**238**
ionPrf	4	3	2	0	4	3	5	5	4	1	4	8	5	4	4
atmPrf	5	9	5	3	6	5	3	6	6	5	7	12	5	8	5
wetPrf	4	9	3	3	6	4	2	6	6	5	7	9	4	8	5

Fonte: Os autores, 2024.

Quadro 11 - Quantidade de ocultações por dia e por produto analisados para o furacão Ian.

	DOY – ano de 2022														
	264	**265**	**266**	**267**	**268**	**269**	**270**	**271**	**272**	**273**	**274**	**275**	**276**	**277**	**278**
ionPrf	19	19	12	21	7	13	20	16	16	12	9	17	14	12	13
atmPrf	20	12	13	16	10	12	12	15	19	13	18	15	14	12	14
wetPrf	21	15	16	19	14	11	12	16	17	14	18	19	14	11	15

Fonte: Os autores, 2024.

Em seguida, foram selecionadas as variáveis a serem analisadas, com base em outros trabalhos como os de Biondi (2011;2013), em que foram avaliados o impacto na temperatura e no ângulo de flexão. Neste trabalho, optou-se por analisar também a influência na densidade de elétrons, na pressão e no vapor d'água, por se tratar de um fenômeno que têm como características principais possuir um centro de baixa pressão e transportar vapor d'água da superfície oceânica para o topo da nuvem gerada.

Com essas variáveis definidas, foi aplicada a metodologia apresentada para recuperação de perfis (Seção 4), com uma resolução de 10 m para interpolação de altitudes e geração de um perfil médio para cada variável em cada fase do evento (antes, durante e após a passagem do furacão).

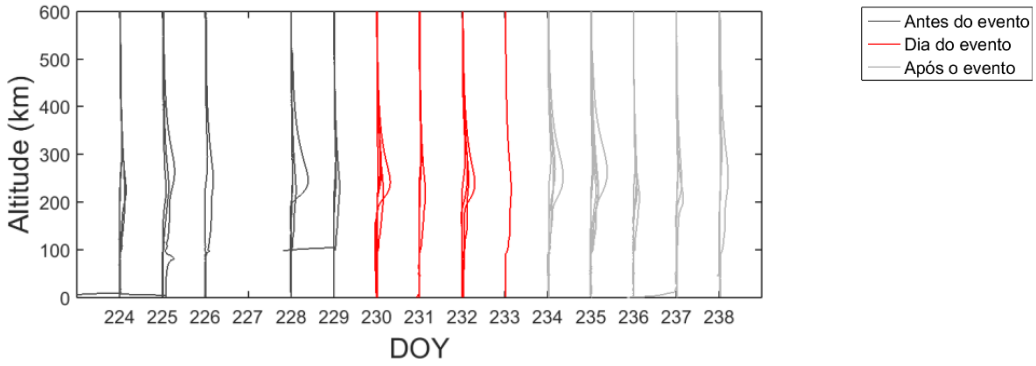
7.2 Resultados

O impacto dos furacões na atmosfera foi estudado através da avaliação da mudança do comportamento ou intensificação dos valores obtidos nos dias considerados

como de ocorrência do evento, comparação com os dias que precederam e sucederam o furacão na localidade, sendo analisadas as variáveis de densidade de elétrons, pressão, temperatura e vapor d'água.

Os resultados obtidos para densidade de elétrons foram extraídos dos dados de *ionPrf* e os perfis foram plotados conforme os 15 dias observados. Para o furacão Dean, em que foram considerados 4 dias de ocorrência do evento, os perfis de densidade de elétrons obtidos são apresentados na Figura 28, onde não fica perceptível nenhum tipo de assinatura do evento, por não apresentar nenhuma mudança brusca no comportamento dos perfis.

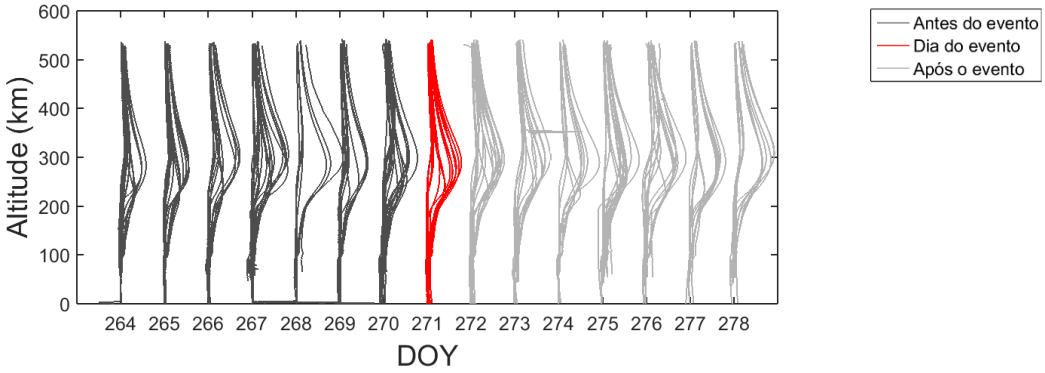
Figura 28 - Perfis de densidade de elétrons para o furacão Dean.



Fonte: Os autores, 2024.

Para o furacão Ian, em que foi considerado apenas um dia de evento, os perfis de densidade de elétrons obtidos para os dias observados são apresentados na Figura 29, onde, assim como para o outro furacão, não ficam evidentes nenhum tipo de assinatura do evento na ionosfera.

Figura 29 - Perfis de densidade de elétrons para o furacão Ian.

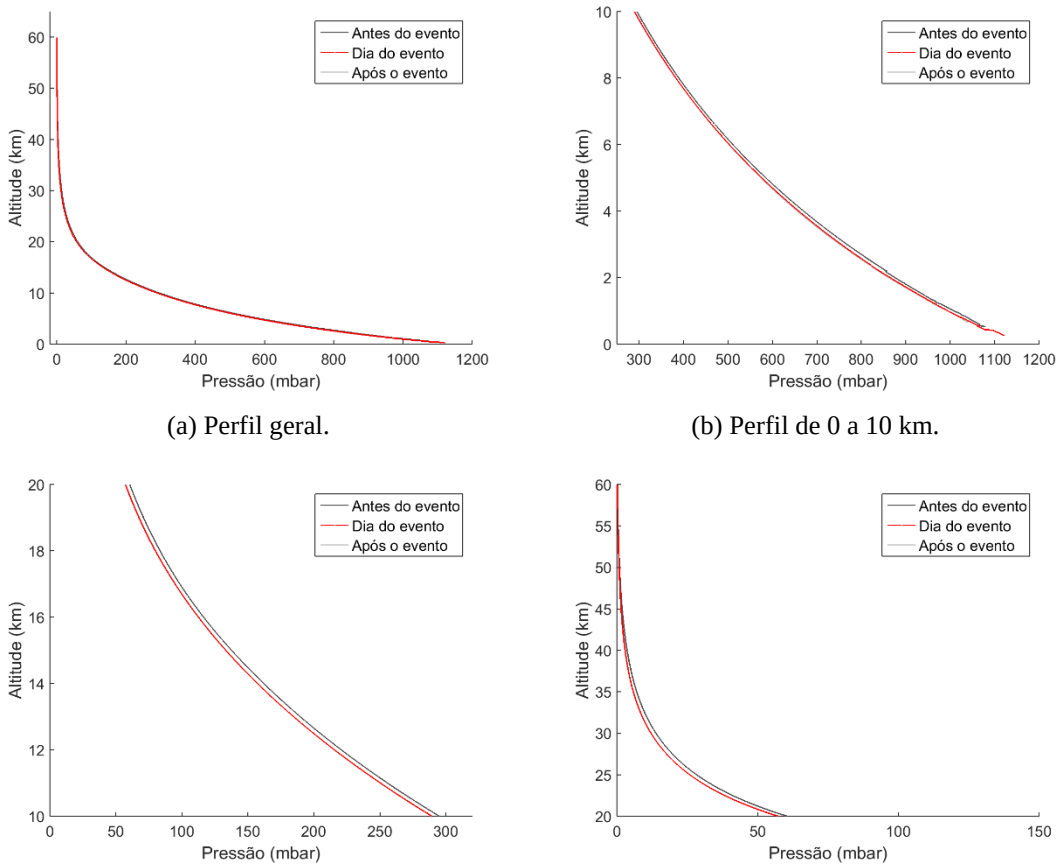


Fonte: Os autores, 2024.

No caso da pressão, para os resultados obtidos utilizando o produto *atmPrf*, foram plotados os perfis médios de cada "época" do evento, procurando evidenciar as

diferenças de como estava a pressão antes, durante e após a passagem do furacão. Para o furacão Dean os gráficos apresentados na Figura 30 mostram os perfis médios de pressão, onde é possível observar que para os dias de evento, os valores de pressão são levemente mais baixos do que nos demais dias.

Figura 30 - Perfis médios de pressão para o furacão Dean.



(a) Perfil geral.

(b) Perfil de 0 a 10 km.

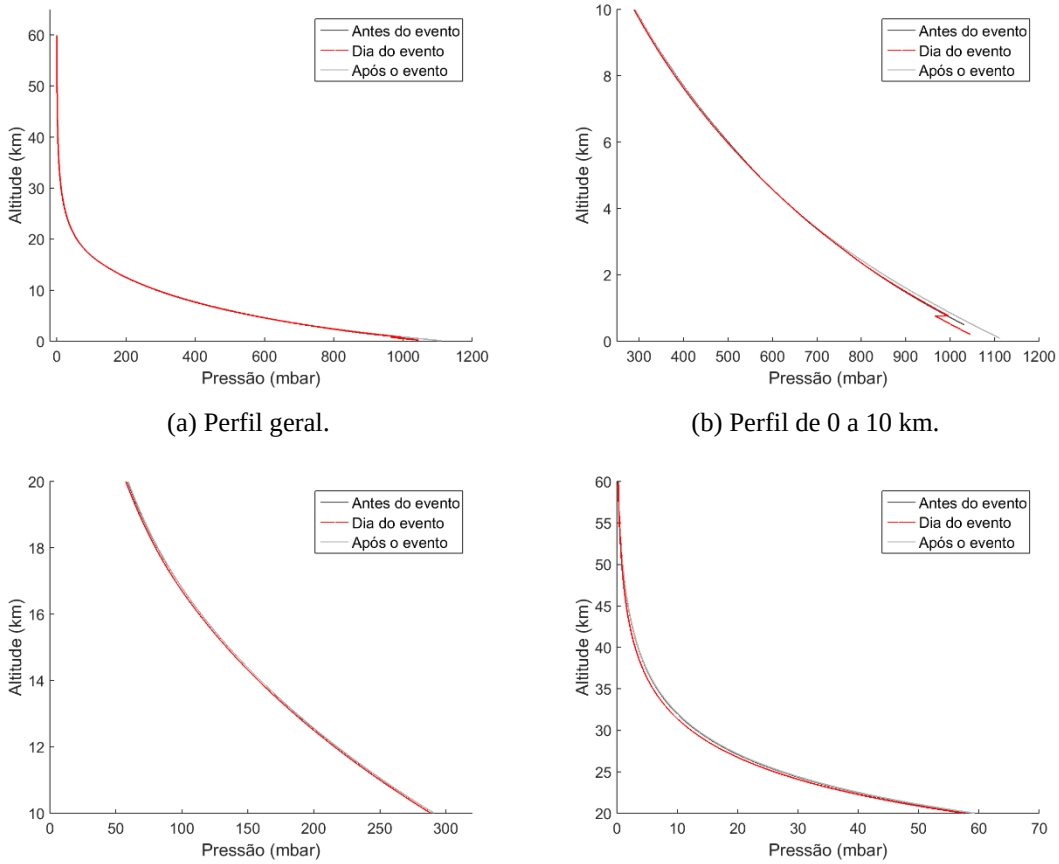
(c) Perfil de 10 a 20 km.

(d) Perfil de 20 a 60 km.

Fonte: Os autores, 2024.

Para o furacão Ian, os perfis médios de pressão são apresentados nos gráficos da Figura 31, onde também fica evidente que a pressão no dia do evento é menor do que nos demais dias, ficando mais evidente nas baixas altitudes (Figura 31.b).

Figura 31 - Perfis médios de pressão para o furacão Ian.



(a) Perfil geral.

(b) Perfil de 0 a 10 km.

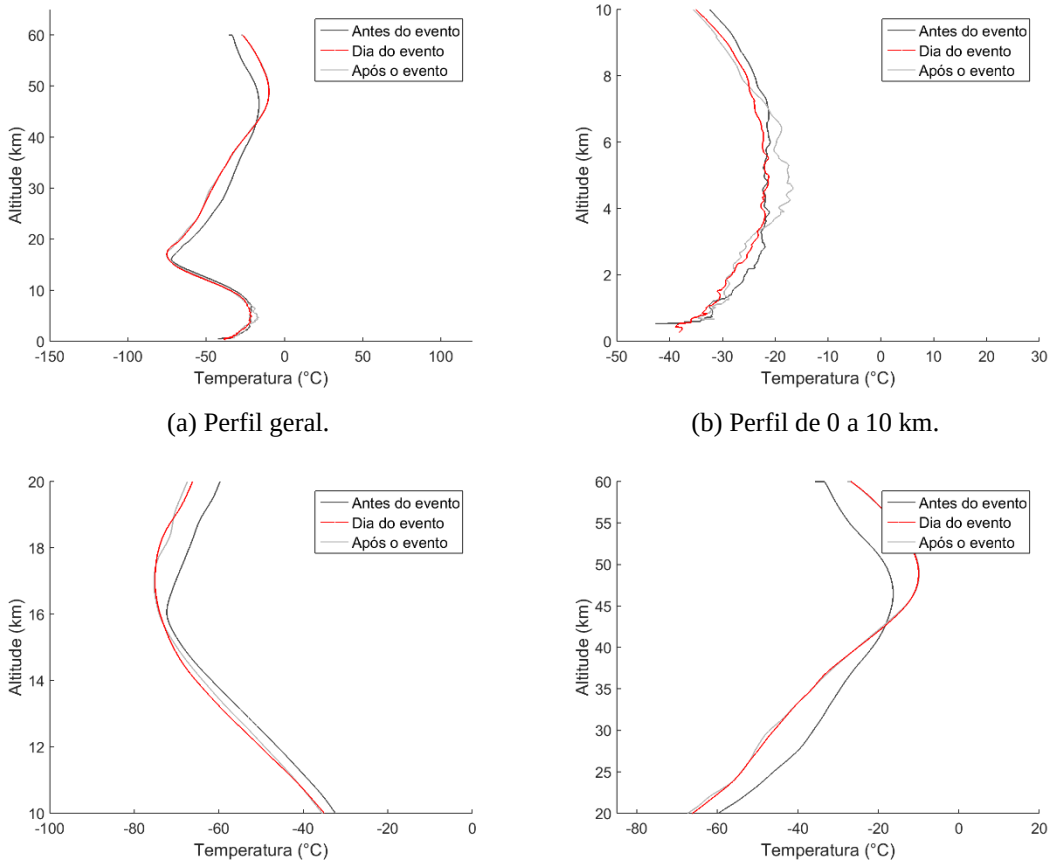
(c) Perfil de 10 a 20 km.

(d) Perfil de 20 a 60 km.

Fonte: Os autores, 2024.

No caso da temperatura, os resultados obtidos utilizando o produto *atmPrf*, foram plotados pelos perfis médios de cada época do evento, por evidenciar as modificações na atmosfera devido a presença dos furacões. Para o furacão Dean, esses perfis são apresentados nos gráficos da Figura 32 e é possível observar que os perfis que representam os dados durante e após a passagem do furacão são muito parecidos. Mas se diferenciam do perfil para os dados dos dias que precederam o furacão, mas isso não interfere na identificação de uma assinatura do evento, visto que este é um furacão atípico e pode ter respostas um pouco diferentes por atingido a escala máxima duas vezes.

Figura 32 - Perfis médios de temperatura para o furacão Dean.



(a) Perfil geral.

(b) Perfil de 0 a 10 km.

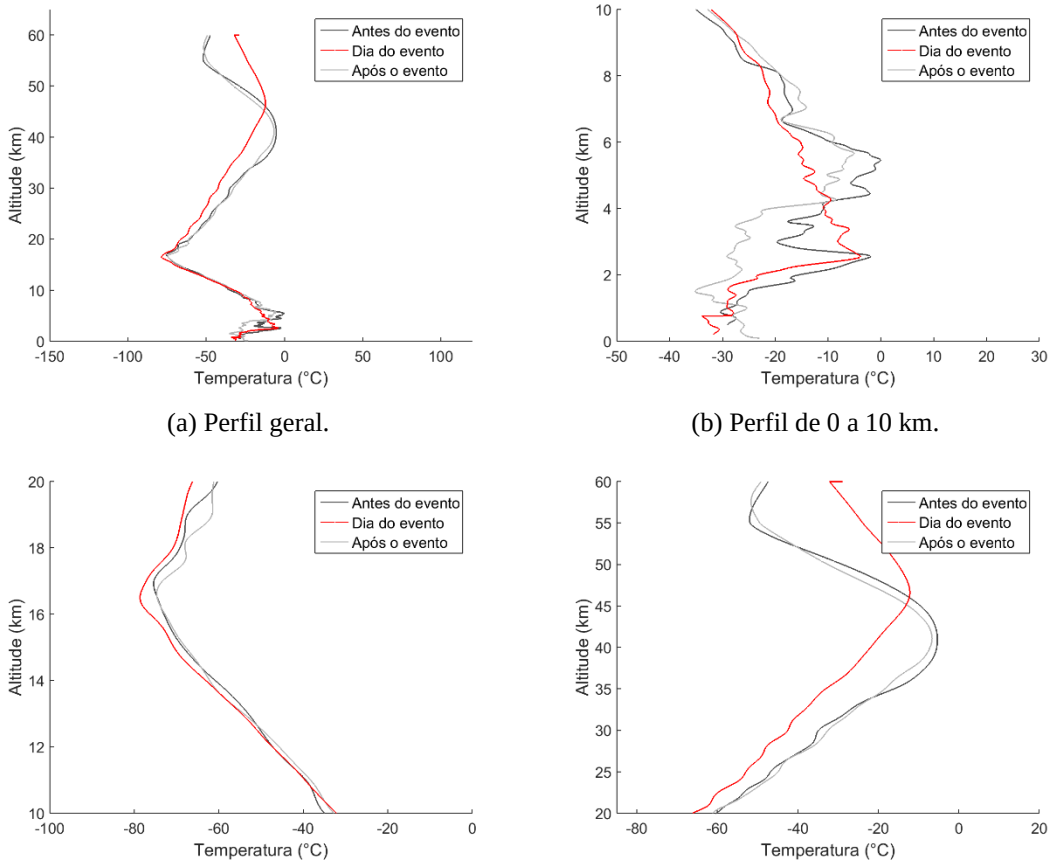
(c) Perfil de 10 a 20 km.

(d) Perfil de 20 a 60 km.

Fonte: Os autores, 2024.

Para o furacão Ian, os perfis médios são apresentados nos gráficos da Figura 33 e principalmente nas figuras (c) e (d) é fácil identificar a mudança de comportamento do perfil que representa os dados correspondentes ao dia do evento, se comparado aos demais períodos. Além disso, os resultados obtidos mostram uma semelhança aos resultados obtidos por Biondi, em que o dia da passagem do furacão apresenta uma temperatura um pouco maior do que nos dias anteriores ao evento entre 8 e 13 km, e depois uma temperatura menor a partir dessa altitude. No artigo em questão, são apresentados resultados até os 20 km, mas nesse trabalho é possível ver que ocorre mais uma inversão de comportamento perto dos 50 km, apesar de não ser possível afirmar que este último seria uma assinatura do furacão, pensando que o topo de sua nuvem não atinge tal altura.

Figura 33 – Perfis médios de temperatura para o furacão Ian.



(a) Perfil geral.

(b) Perfil de 0 a 10 km.

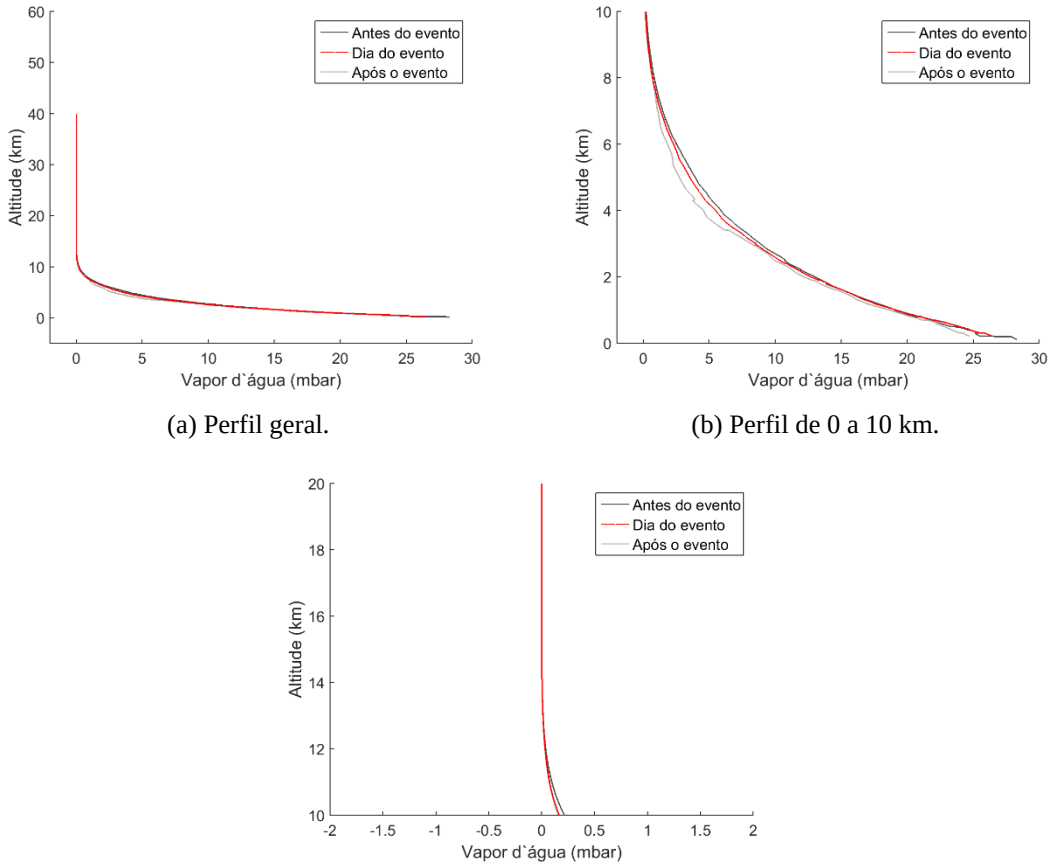
(c) Perfil de 10 a 20 km.

(d) Perfil de 20 a 60 km.

Fonte: Os autores, 2024.

Para o vapor d'água, os resultados obtidos utilizando o produto *wetPrf*, também foram organizados por épocas do evento e gerados a partir de perfis médios. Para o furacão Dean, os perfis médios são apresentados na Figura 34, onde é possível verificar que não há mudança a partir dos 12 km de altitude, apesar disso, o comportamento abaixo dessa altitude não mostra uma assinatura do evento, além de mostrar que antes mesmo da passagem do furacão, a presença de vapor d'água já era alta na área analisada.

Figura 34 - Perfis médios de vapor d'água para o furacão Dean.



(a) Perfil geral.

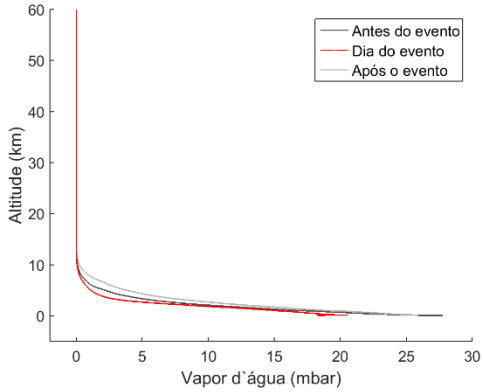
(b) Perfil de 0 a 10 km.

(c) Perfil de 10 a 20 km.

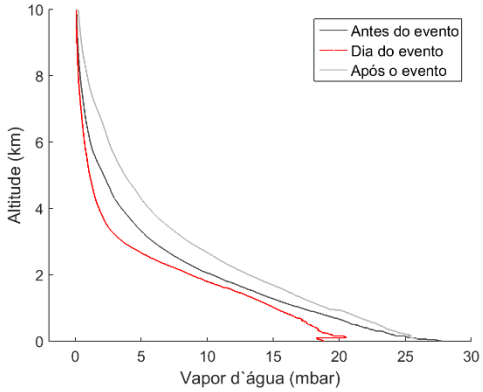
Fonte: Os autores, 2024.

Para o furacão Ian, os perfis médios são apresentados na Figura 35, onde também é possível identificar que pouco acima dos 12 km de altitude, os perfis não apresentam diferenças entre si, porém o comportamento nesse evento é um pouco diferente do anterior, visto que o período com maior presença de vapor d'água é após a passagem do furacão. Apesar disso, o perfil que representa os dias antecedentes ao evento ainda apresenta maior umidade do que o perfil do dia do evento.

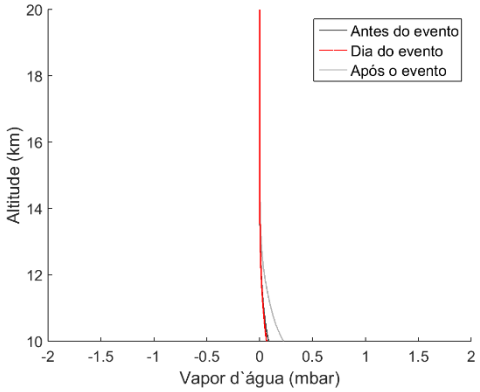
Figura 35 - Perfis médios de vapor d'água para o furacão Ian.



(a) Perfil geral.



(b) Perfil de 0 a 10 km.



(c) Perfil de 10 a 20 km.

Fonte: Os autores, 2024.

Em resumo, os resultados mostram que é possível identificar variações na atmosfera causadas pelos furacões. No entanto, essa identificação nem sempre é evidente para todas as variáveis analisadas, sendo que a capacidade de detectar os furacões varia conforme o parâmetro estudado ou a combinação entre eles.

Por exemplo, ao analisar a densidade de elétrons, não foi possível observar alterações significativas que pudessem ser atribuídas diretamente aos furacões. Em contrapartida, nas demais variáveis, verificou-se que houve mudanças no comportamento ou variações na intensidade dos valores, especialmente nos momentos de passagem dos furacões, evidenciando a influência dos furacões sobre a atmosfera.

Na análise da pressão, os resultados mostram que a pressão é menor durante a passagem do furacão, o que é explicado pela característica de um furacão possuir um centro de baixa pressão. No entanto, esperava-se um resultado mais acentuado, considerando que a pressão é uma das principais variáveis físicas responsáveis pelo fenômeno. É possível que a suavidade dos resultados tenha sido influenciada pelo

tamanho da janela espacial de análise, e que uma janela menor poderia ter destacado mais intensamente as variações na pressão, porém a quantidade de perfis detectados é muito pequena e na maioria dos dias não foram detectados perfis, dificultando uma abordagem que empregasse janelas espaciais menores.

Já na análise da temperatura, apesar do resultado ter variado um pouco em cada evento, de forma geral a temperatura nos dias que precedem o evento é mais alta que nos demais períodos. Nos dois furacões, na faixa de 0 a 10 km de altitude, observaram-se perfis ruidosos, o que, em geral, é comum para essa altitude. No furacão Ian, fica evidente que durante o evento o perfil tem um comportamento diferente dos outros dois, enquanto no furacão Dean, o perfil após o evento se parece muito com o perfil durante o evento, o que pode ser explicado pelo fato deste fenômeno ser um pouco mais complexo por ter apresentado mais de uma parede de olho do furacão, o que pode impactar de forma diferente os efeitos causados na atmosfera.

Por fim, na análise do vapor d'água, os dois furacões mostram comportamentos iguais para os perfis médios acima de 12 km de altitude, além de evidenciarem que a umidade próxima à superfície fica menor durante o evento, o que pode ser explicado pela dinâmica do furacão de transportar vapor d'água para o topo da nuvem (BRYANT, 2005).

8 SECAS

Os eventos climáticos como as secas são gerados a partir da movimentação de massas de ar frio (mais pesada) e massas de ar quente (mais leve) na superfície terrestre, esse movimento ocorre quando o ar frio se desloca para a região de baixa pressão enquanto o ar quente sobe para as regiões de alta pressão gerando correntes de ar que controlam as variações e eventos climáticos da terra. A seca é um evento natural que pode ser definido como um extenso período de déficit de precipitação, o qual afeta tanto a vegetação quanto o abastecimento de água de áreas urbanas (BRYANT, 2005).

As secas podem ser classificadas em quatro tipos diferentes: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica. A seca meteorológica está relacionada com a diminuição do nível de precipitação e o aumento na evaporação da água, essas mudanças estão relacionadas com as alterações climáticas locais. A seca agrícola ocorre quando os efeitos da seca meteorológica atingem a produção agrícola, causada pela diminuição da umidade do solo pelo baixo nível pluviométrico e pelo aumento da evapotranspiração do solo. No caso da seca hidrológica ela é causada pela extensão de uma seca meteorológica, o baixo índice pluviométrico acaba causando uma redução do nível das águas superficiais e subterrâneas. A combinação dos efeitos das três secas acaba resultando na seca socioeconômica, causada pela escassez de um recurso por falta de chuvas (ROSSI, 2020).

Além do impacto socioeconômico, o período de seca também aumenta o número de incêndios no mundo, principalmente em locais que apresentam longos períodos áridos e vegetações como eucalipto, carvalho e manzanita, como a Austrália e algumas regiões nos Estados Unidos e Europa (BRYANT,2005).

No Brasil a ocorrência de incêndios é influenciada por diversos fatores como ações humanas e condições climáticas, ocorrendo principalmente durante o período de transição de estações em biomas como o pantanal que apresenta um período de enchentes causados pelas chuvas, seguido por um período de seca que facilita a ocorrência de incêndios (PIVELLO et al.,2021).

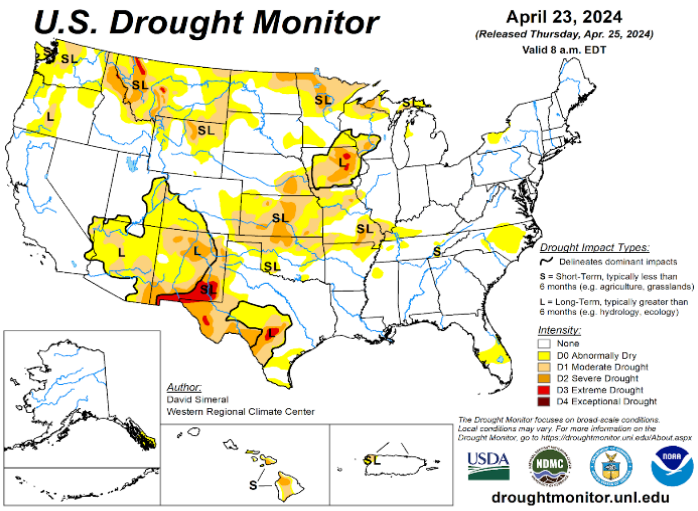
As secas, ao contrário de outros eventos climáticos, apresentam um processo de formação mais lento. Com o intuito de facilitar a identificação, o monitoramento do grau da severidade, a duração e a frequência desses eventos criaram-se os índices de secas. Esses índices variam de acordo com a categoria e o tipo de seca sendo monitorada. Apesar de não existir um índice único, a maioria utiliza uma combinação de dados da precipitação com outros dados, como o nível de água da superfície, umidade do solo e temperatura

permitem analisar e monitorar diferentes tipos de secas e para diferentes finalidades (SIMÕES et al.,2009; GONÇALVESs et al., 2021).

Os dados obtidos a partir desses índices são as principais ferramentas para amenizar os efeitos das secas, essas informações são utilizadas para determinar se há ou não a necessidade de utilizar medidas de emergências. Alguns países criaram ferramentas de monitoramento e previsão de secas, dentre eles pode-se citar o Monitor de Secas dos Estados Unidos (*United States Drought Monitor*-USDM), Monitor de Secas Norte Americano (*North America Drought Monitor* - NADM) e o Monitor de Secas do Brasil. Os três modelos categorizam as secas em 5 tipos: seca anormal ou fraca, moderada, severa ou grave, extrema e excepcional, a única diferença entre esses sistemas é a região de monitoramento e o índice utilizado (GONÇALVES et al., 2021).

O USDM foi criado em 1999 pelos órgãos da Agência Nacional Oceânica e Atmosférica (N*ational Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA) e o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*US. Department of Agriculture* - USDA), ele utiliza índices como o Índice de Severidade de Secas de Palmer (*Palmer Drought Severity Index* - PDSI), Índice de Resposta à seca de Vegetação (*Vegetation Drought Response Index* - Veg.-DRI), porcentagem de umidade do solo, Índice de Precipitação Padronizada (*Standardized Precipitation Index* - SPI), além de outros. Os EUA também contribuem com dados para o sistema de monitoramento NADM criado a partir da uma colaboração entre EUA, Canadá e México, utiliza índices como o SPI, PDSI entre outros, os dados são organizados e disponibilizados mensalmente. A Figura 36 mostra o produto disponibilizado pelo USDM (GONÇALVES et al., 2021).

Figura 36 - Monitoramento de Secas dos EUA (23 a 30 de abril de 2024).

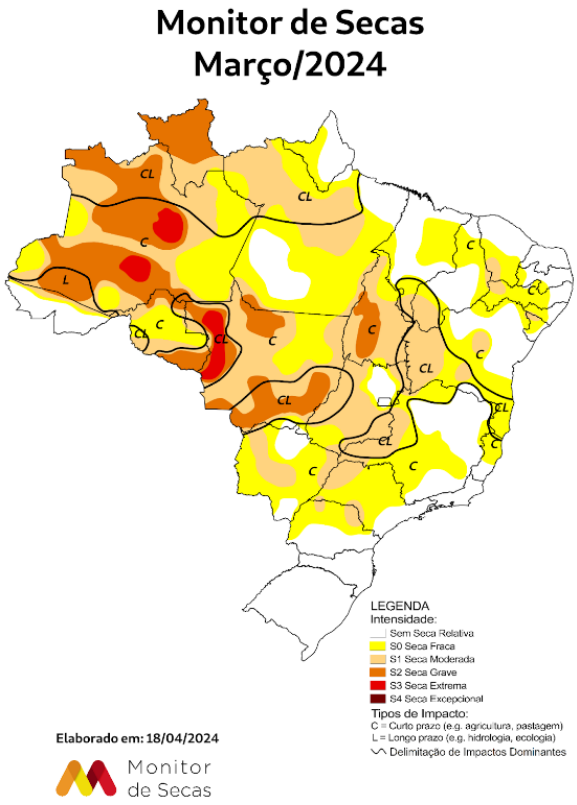


Fonte: USDM, 2024.

No Brasil a Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA) é responsável pelas ferramentas de monitoramento de secas, o Monitor de Secas do Brasil foi criado em 2014, utiliza índices como o SPI, Indicador de Veranicos Padronizado (*Standardized Dry-Spell Index* – SDSI), Indicador de Escoamento Padronizado (*Standardized Runoff Index* – SRI) e o Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado (*Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* - SPEI). Inicialmente, o Monitor de Secas era um projeto apenas para o monitoramento da região nordeste, ao longo dos anos foi se expandindo até cobrir todo o território nacional.

O monitoramento é feito por meio de mapas mensais produzidos por um grupo de pessoas e instituições de diferentes estados. As instituições são responsáveis por coletar e processar os dados do mês anterior, esses dados então são enviados para a ANA, onde são analisados e utilizados para a confecção de um mapa rascunho, o qual passa por uma análise para ser validado para a publicação. A divulgação desses mapas é feita mensalmente pelo site: https://monitordesecas.ana.gov.br/ ("Monitor de Secas" AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, Brasil, 2024). Onde é possível ver todos os mapas e uma síntese que descreve as principais mudanças de cada mapa. A partir de abril de 2023 os mapas e as sínteses publicadas são referentes a todo o território nacional. A Figura 37 apresenta o monitoramento de secas no país durante o mês de março de 2024.

Figura 37 - Mapa de secas do Brasil durante março de 2024.



Fonte: Agência das Águas e Saneamento Básico, 2024.

Os impactos causados pelas secas podem ser percebidos na composição da atmosfera terrestre, afetando principalmente as temperaturas e o volume de vapor da água, estudos como o de Sui, Wu e Zhao em 2012 e de Ringer e Healy em 2008, mostrou que técnicas de rádio ocultação possuem um grande potencial para complementar outros métodos de monitoramento e previsão de eventos climáticos possibilitando a visualização desses impactos na atmosfera terrestre (SUI; WU; ZHAO, 2012).

8.1 Seleção dos eventos analisados

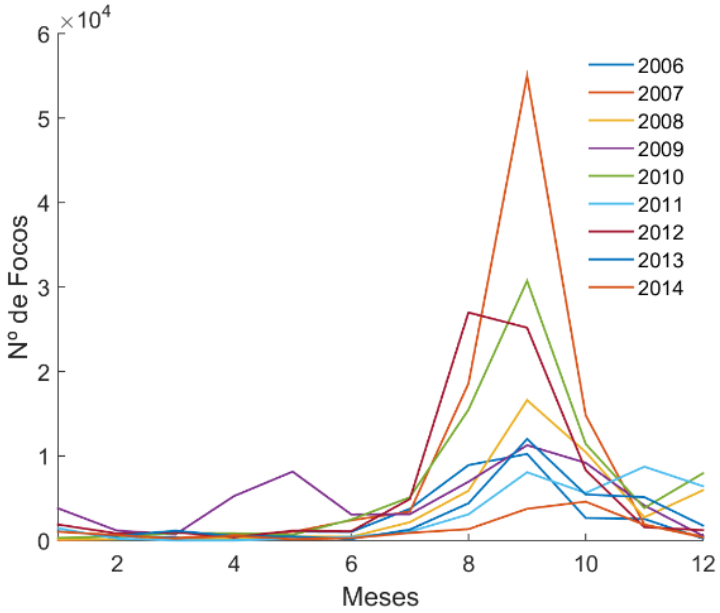
Para estudar o impacto deste fenômeno na atmosfera, foram utilizados como parâmetros de seleção para eventos a disponibilidade de dados durante o período de operação das missões COSMIC e COSMIC-2, a dimensão do evento, a sua localização e o clima da região.

Inicialmente foram selecionados eventos ocorridos em regiões como Estados Unidos e a Austrália, países que possuem condições propensas a incêndios durante as secas. No entanto, devido à falta de dados durante o período da COSMIC-1 e a localização em regiões costeiras, que poderia resultar na interferência de dados de umidade da atmosfera, optou-se por eventos ocorridos na região central do Brasil. Especificamente

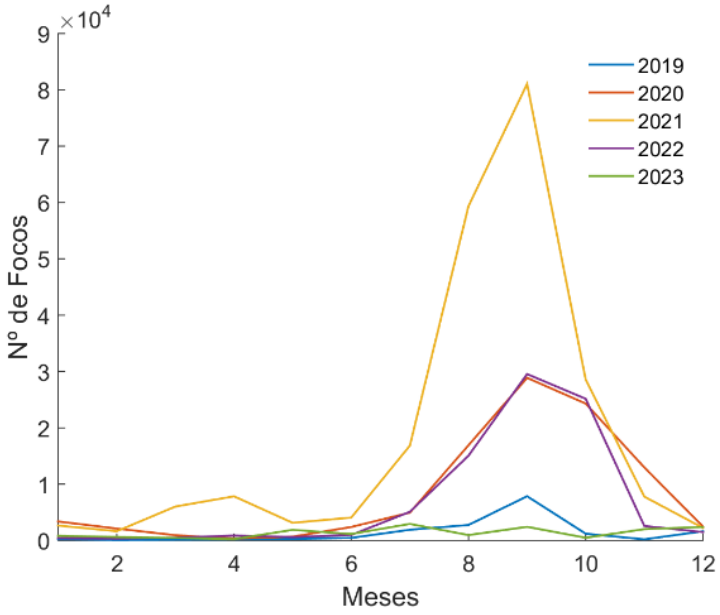
secas e incêndios no bioma do Pantanal, uma região que apresenta um ciclo anual denominado de pulso de inundação, aonde no verão apresenta um clima mais quente e úmido, e no inverno apresenta temperaturas e umidade mais baixa (EMBRAPA).

Para a seção dos anos a serem analisados, foram considerados principalmente o número de focos de incêndios durante o período e a disponibilidade de dados. Os gráficos apresentados na Figura 38 mostram respectivamente o número de focos de incêndios mensais durante o período de operação das missões COSMIC e COSMIC-2.

Figura 38 - Gráficos do número de focos de incêndios no Pantanal.



(a) 2007



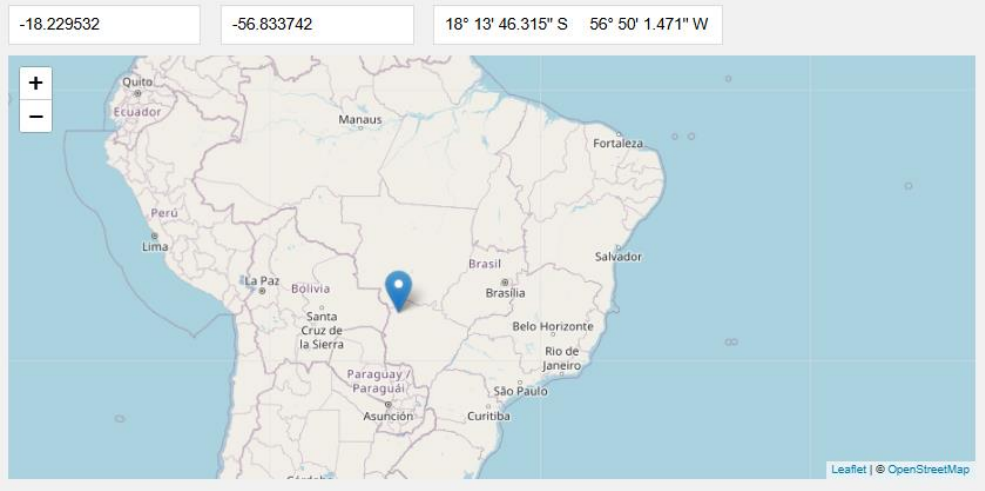
(b) 2020

Fonte: Programa de Queimadas do INPE, 2024

Os eventos selecionados ocorreram nos anos de 2007 e 2020, com o intuito de identificar algum padrão no comportamento da atmosfera conforme o número de focos de incêndios aumenta ao longo do período. Estes anos foram escolhidos por apresentarem alto número de focos de incêndio combinados com a grande disponibilidade de dados de rádio ocultação pelas missões COSMIC para esses anos.

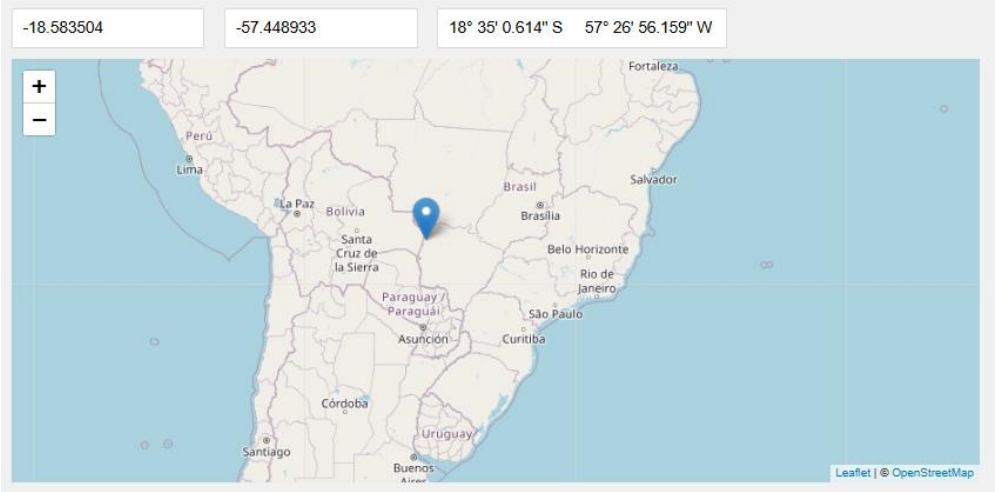
As janelas temporais consideradas são de 4 meses, sendo de junho a setembro, período da seca no pantanal onde ocorre o maior número de focos de incêndios. Além disso, o ponto central para a janela espacial considerada é apresentado na Figura 39, para o ano de 2007, e na Figura 40, para o ano de 2020.

Figura 39 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o período de secas de 2007.



Fonte: GPS coordenadas. https://www.coordenadas-gps.net/

Figura 40 - Localização do ponto central da janela espacial considerada para o período de secas de 2020.



Fonte: GPS coordenadas. https://www.coordenadas-gps.net/

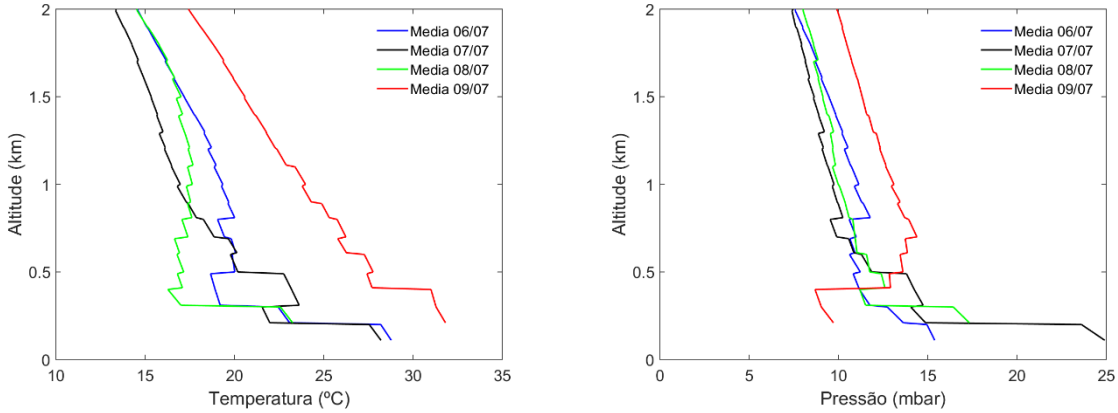
A princípio foram utilizados dados como densidade de elétrons, temperatura e pressão dos meses junho a setembro. Ao analisar os dados foi possível perceber que não

houve uma variação significativa na concentração de elétrons nesse período e a variação de temperatura e pressão ocorre nas camadas mais baixas da atmosfera. Com base nas análises iniciais e outros estudos, como o de Sui, Wu e Zhao em 2012, decidiu-se por analisar apenas os dados de temperatura e pressão do vapor d'água, provenientes do *wet profile*, perfil da atmosfera com umidade, e dados de estações de radiossonda localizadas dentro da área de interesse.

8.2 Resultados

Os resultados obtidos foram gerados a partir de uma análise e comparação da média mensal da temperatura e da pressão do vapor d'água durante os meses de junho a setembro para os anos de 2007 e 2020. Ao analisar os gráficos obtidos para temperatura e vapor d'água a partir dos dados de 2007, apresentados na Figura 41, é possível perceber que a média mensal da temperatura aumentou drasticamente no mês de setembro em relação aos meses anteriores. Já a pressão do vapor d'água apresentou um pequeno aumento em julho e agosto, enquanto a média do mês de setembro apresentou uma diminuição na umidade próxima da superfície e um aumento nas altitudes mais altas.

Figura 41 – Perfis médios mensais de temperatura e pressão do vapor d'água em 2007.



(a) Média da temperatura (b) Média da pressão do vapor d'água

Fonte: Os autores, 2024.

Os gráficos demonstram a influência das secas e incêndios até 2 km da atmosfera, para facilitar a visualização desse comportamento foi calculada a média até 10 km de altitude. A análise desses valores revelou que a temperatura entre junho e setembro aumentou cerca de 4.7ºC, mostrando um comportamento similar ao do gráfico. Já o vapor d'água próximo da superfície aumentou cerca de 1.3 mbar. O Quadro 12 mostra os valores das médias calculadas por camadas.

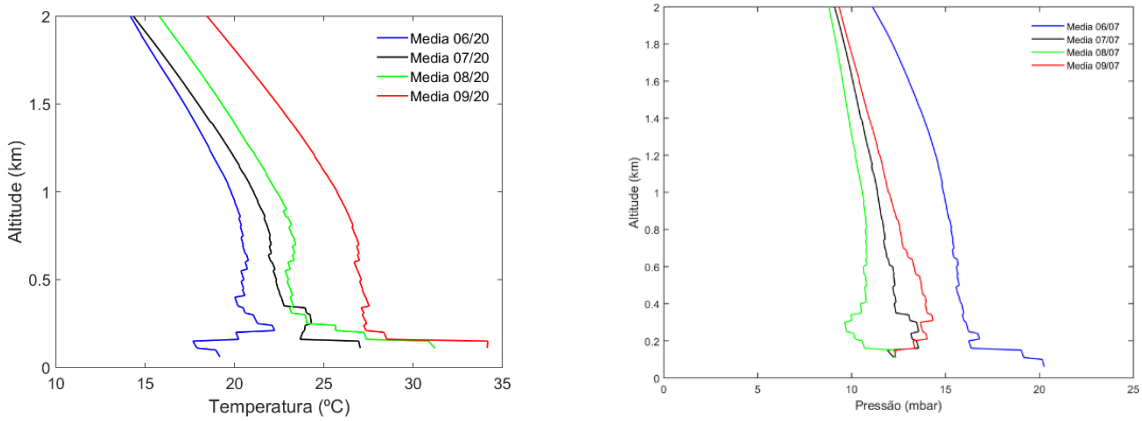
Quadro 12 - Média mensal da temperatura e pressão do vapor d'água até 10 km em 2007.

Mês	Altitude	Valores médios	
		Temperatura (ºC)	Vapor d'água (mbar)
06/2007	0 a 2 km	18,873	10,527
	2 a 4 km	10,419	3,271
	4 a 6 km	0,295	0,540
	6 a 10 km	-21,492	0,166
07/2007	0 a 2 km	17,929	10,756
	2 a 4 km	8,453	4,584
	4 a 6 km	-2,671	1,112
	6 a 10 km	-23,061	0,252
08/2007	0 a 2 km	17,119	10,324
	2 a 4 km	9,038	4,658
	4 a 6 km	-0,788	0,810
	6 a 10 km	-20,911	0,150
09/2007	0 a 2 km	23,582	11,845
	2 a 4 km	10,268	6,443
	4 a 6 km	-1,699	1,681
	6 a 10 km	-20,841	0,299

Fonte: Os autores, 2024.

Para 2020 os gráficos resultantes são apresentados na Figura 42 e mostram que a temperatura apresenta o mesmo comportamento visto nos gráficos anteriores, já a média do vapor d'água no mês de junho é maior que em relação aos outros meses, ou seja, a pressão do vapor d'agua diminui nos meses julho e agosto e em setembro começa a aumentar gradualmente.

Figura 42 – Perfis médios mensais de temperatura e pressão do vapor d'agua em 2020.



(a) Média da temperatura (b) Média da pressão do vapor d'água

Fonte: Os autores, 2024.

Os valores apresentados no Quadro 13 evidenciam o comportamento visto nos gráficos, no qual a temperatura e a umidade aumentam com o passar dos meses. Em 2023 a temperatura aumentou cerca de 5.24ºC e a umidade apresentou uma diferença de 3.01 mbar.

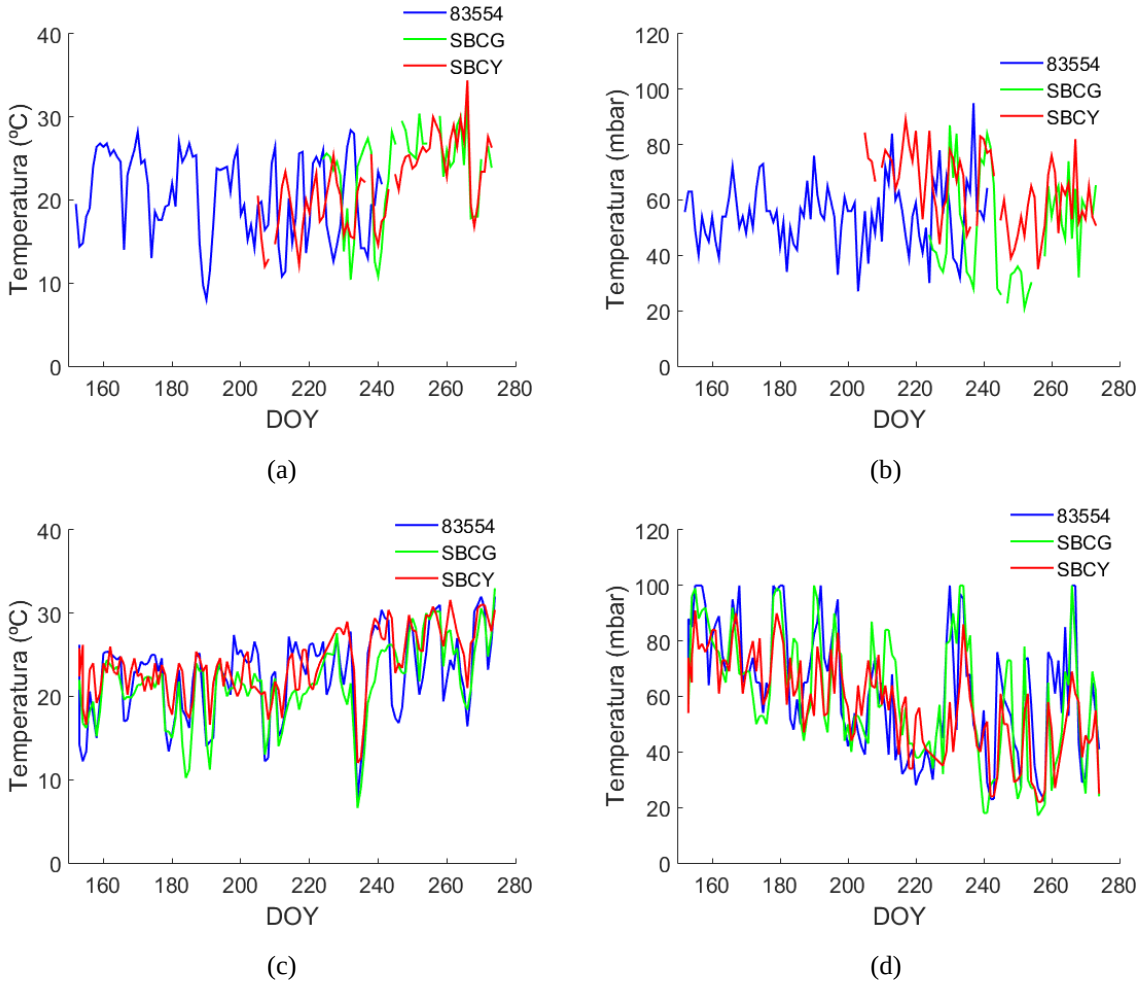
Quadro 13 - Média mensal da temperatura e pressão do vapor d'água até 10 km em 2020.

Mês	**Altitude**	**Valores médios**	
		Temperatura (ºC)	**Vapor d'água (mbar)**
06/2007	0 a 2 km	18,085	14,204
	2 a 4 km	9,656	6,133
	4 a 6 km	-0,518	1,640
	6 a 10 km	-19,995	0,249
07/2007	0 a 2 km	19,052	10,580
	2 a 4 km	9,206	4,783
	4 a 6 km	0,201	0,618
	6 a 10 km	-20,841	0,142
08/2007	0 a 2 km	20,258	9,591
	2 a 4 km	9,581	5,557
	4 a 6 km	-0,232	1,155
	6 a 10 km	-20,806	0,225
09/2007	0 a 2 km	23,325	11,188
	2 a 4 km	10,510	6,472
	4 a 6 km	-0,403	1,269
	6 a 10 km	-20,435	0,239

Fonte: Os autores, 2024.

Esses resultados foram comparados com dados da superfície obtidas pelas estações de radiossondas SBCY, SBCG e 83554, localizadas dentro da área de estudo. Os gráficos apresentados na Figura 43 mostram a variação de temperatura e umidade nas estações SBCY, SBCG e 83554 ao longo de 2007 e 2023. Em 2007 apesar das estações não possuírem dados do ano todo ainda é possível visualizar a mesma oscilação da temperatura e umidade, o mesmo pode ser observado na temperatura e na umidade em 2020. Mostrando que é possível visualizar os impactos de eventos naturais como secas e incêndios em dados de temperatura e umidade da atmosfera utilizando dados de perfis atmosféricos úmidos *(wetPrf).*

Figura 43 – (a) Média mensal de temperatura e (b) pressão do vapor d'água superficial em 2007; e (c) média mensal da temperatura e (d) pressão do vapor d'água em 2020.



Fonte: Os autores, 2024.

Em resumo, os resultados para esse fenômeno mostram que é possível monitorar o impacto das grandes secas na atmosfera, a partir de dados de rádio ocultação, porém por se tratar de um evento que afeta principalmente a temperatura e a umidade das camadas mais baixas da atmosfera, o seu impacto só é perceptível em dados como temperatura e vapor d'agua provenientes de *wetPrf*. Sendo assim, em dados provenientes de *ionPrf* e *atmPrf*, como densidade de elétrons e pressão atmosférica, não é possível notar impactos significativos que possam ser utilizados como assinaturas desse fenômeno.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho investigou o potencial do uso de perfis de Rádio Ocultação GNSS na detecção e monitoramento de desastres naturais, abordando diferentes tipos de eventos: abalos sísmicos, erupções vulcânicas, furacões e secas. Os resultados mostraram que a eficácia da técnica varia de acordo com a natureza e intensidade do fenômeno analisado.

No caso dos abalos sísmicos, os perfis de densidade de elétrons apresentaram algumas alterações em relação ao comportamento esperado, indicando que é possível identificar impactos ionosféricos, embora de forma limitada. Entretanto, a análise foi restrita pela baixa disponibilidade de dados da missão COSMIC-1, o que levou à utilização apenas de dados da missão COSMIC-2. Mesmo assim, foi possível identificar algumas anomalias nos perfis de densidade de elétrons, mostrando que a detecção dos efeitos de abalos sísmicos por meio de RO se mostrou promissora, mas a variação nos perfis não foi suficientemente significativa para indicar um padrão claro e consistente.

Já para as erupções vulcânicas, a técnica de RO se destacou na detecção de alterações tanto nos perfis de densidade de elétrons quanto nos perfis de temperatura e pressão. Utilizando a metodologia aplicada por Yang-Yi Sun et al. (2022), observou-se um comportamento anômalo dos perfis durante as erupções analisadas, especialmente no caso do vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, que apresentou alterações significativas em todos os produtos investigados. No entanto, assim como nos abalos sísmicos, a baixa quantidade de dados da missão COSMIC-1 limitou as análises, de modo que apenas a missão COSMIC-2 foi considerada. A magnitude catastrófica da erupção do Tonga permitiu visualizar claramente o impacto na atmosfera e ionosfera, com perfis que perderam suas características normais durante o evento. Para vulcões de menor intensidade, como o Semeru, as mudanças foram mais sutis, mas ainda assim detectáveis por meio da técnica de RO.

Quanto aos furacões, não foi possível observar alterações nos perfis de densidade de elétrons. No entanto, nos perfis de pressão, os resultados indicaram uma diminuição nas camadas mais baixas de altitude durante o evento, sugerindo que a técnica pode ser eficiente para monitorar alterações atmosféricas mais próximas à superfície. Em relação ao vapor d’água, observou-se que durante o evento, as concentrações nas proximidades da superfície foram menores em comparação aos demais dias analisados, indicando um efeito local. Já nos perfis de temperatura, houve um aumento nos dias que antecederam o

furacão e, nas camadas inferiores, os perfis apresentaram comportamento ruidoso, embora sem anomalias significativas que possam ser diretamente associadas ao furacão.

Por fim, em eventos de secas, os perfis de temperatura apresentaram um aumento significativo durante o mês de ocorrência dos incêndios, indicando a influência do evento na atmosfera. Em termos de pressão de vapor d'água, houve uma redução nas altitudes próximas à superfície, normalizando-se com o aumento da altitude. Esse comportamento foi mais evidente em 2007, mas menos perceptível em 2020. Ainda assim, os resultados indicam que a técnica de RO pode captar os impactos atmosféricos relacionados aos períodos de seca.

Dessa forma, conclui-se que a técnica de Rádio Ocultação GNSS possui um potencial significativo para contribuir no monitoramento e detecção de alterações atmosféricas associadas a desastres naturais. Contudo, a efetividade dessa detecção depende diretamente da magnitude e natureza do evento. As erupções vulcânicas mostraram-se como os fenômenos mais facilmente identificáveis pela técnica, enquanto abalos sísmicos, furacões e secas apresentaram variações mais complexas e sutis. A aplicação de RO em estudos dessa natureza pode fornecer informações para o monitoramento ambiental e contribuir para uma melhor compreensão das interações entre esses eventos e a atmosfera.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a combinação desses dados extraídos a partir da técnica de RO com informações de outras fontes de dados, como satélites meteorológicos e medições terrestres, com o intuito de ampliar as possibilidades de análise com uma melhora na previsão e no monitoramento, a fim de aprimorar a acurácia e as avaliações dos fenômenos estudados.

10 REFERÊNCIAS

ALLEN, R.M.; MELGAR, D. **Earthquake early warning: Advances, scientific challenges, and societal needs**. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2019, 47, 361–388.

BIONDI, R. et al. Measurements of the upper troposphere and lower stratosphere during tropical cyclones using the GPS radio occultation technique. **Advances in Space Research**, v. 47, n. 2, p. 348–355, jan. 2011a.

BIONDI, R. et al. **Radio occultation bending angle anomalies during tropical cyclones**. [s.l.] Others (Wind, Precipitation, Temperature, etc.)/Remote Sensing/Data Processing and Information Retrieval, 28 fev. 2011b. Disponível em: https://amt.copernicus.org/preprints/4/1371/2011/amtd-4-1371-2011.pdf.

BIONDI, R. et al. Tropical cyclone cloud-top height and vertical temperature structure detection using GPS radio occultation measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 11, p. 5247–5259, 16 jun. 2013.

BLANC, E., 1985. **Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary**. Annales Geophysicae 3, 673–688.

BONAFONI, S. et al. Radio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events: A review. **Atmospheric Research**, v. 230, p. 104624, 1 dez. 2019.

BOURASSA, A.E., ROBOCK, A., RANDEL, W.J., DESHLER, T., RIEGER, L.A., LLOYD, N.D., LLEWELLYN, E.J., DEGENSTEIN, D.A., 2012. **Large volcanic aerosol load in the stratosphere linked to asian monsoon transport**. Science 337, 78–81. http://dx.doi.org/10.1126/science.1219371.

BRASIL. Ministério de Desenvolvimento regional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. **Guia prático de utilização de alertas do Governo Federal para ações de preparação para desastres**. 2. ed. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/copy_of_guiapraticodesastres.pdf.

BRYANT, E. **Natural Hazards**. 2. ed. Nova York, Estados Unidos: Cambridge University Press, 2005.

CALAIS, E.; MINSTER, J. B. **GPS, earthquakes, the ionosphere, and the Space Shuttle**. Physics of the Earth and Planetary Interiors, v. 105, n. 3-4, p. 167-181, 1998.

Centre for Research on The Epidemiology of Disasters; United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019) | UNDRR**. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019>.

CIGALA, V.; BIONDI, R.; PRATA, A. J.; STEINER, A. K.; KIRCHENGAST, G.; BRENOT, H. **GNSS Radio Occultation Advances the Monitoring of Volcanic Clouds: The Case of the 2008 Kasatochi Eruption**. 2019.

COBURN, A.; Spence, R. **Earthquake Protection**; JohnWiley Sons: Hoboken, NJ, USA, 2002.

COÏSSON, P.; LOGNONNÉ, P.; WALWER, D.; ROLLAND, L. M. **First tsunami gravity wave detection in ionospheric radio occultation data.** Earth and Space Science, v. 2, p. 125-133, 2015**.**

CORNELL, C.A. **Engineering seismic risk analysis**. Bull. Seismol. Soc. Am. 1968, 58, 1583–1606.

COURTILLOT, V. E. (1990). **A volcanic eruption**. Scientific American, 263(4), 85-93.

DAL POZ, W. R.; CAMARGO, P. D. O. Influência da variação espacial do TEC na definição do comprimento de linha de base: abordagem teórica e prática. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 60, n. 4, dez. 2008.

ELGERED, G., WICKERT, J. **Monitoring of the Neutral Atmosphere**. In: Teunissen P.J., Montenbruck O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer Handbooks. Springer, Cham., 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_38.

FROMM, M., KABLICK III, G., NEDOLUHA, G., CARBONI, E., GRAINGER, R., CAMPBELL, J., LEWIS, J., 2014. **Correcting the record of volcanic stratospheric aerosol impact: Nabro and Sarychev Peak. J. Geophys**. Res. Atmos. 119, 10343–10364. http://dx.doi.org/10.1002/2014JD021507.

FROMM, M., NEDOLUHA, G., CHARVAT, Z., 2013. Comment on ‘‘**Large volcanic aerosol load in the stratosphere linked to asian monsoon transport**”. Science 339. http://dx.doi.org/10.1126/science.1228605.

Gahtan, J., K. R. Knapp, C. J. Schreck, H. J. Diamond, J. P. Kossin, M. C. Kruk, 2024: International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4r01. **NOAA National Centers for Environmental Information**. doi:10.25921/82ty-9e16.

GONÇALVES, S. T. N. et al. Índices e Metodologias de Monitoramento de Secas: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2 jul. 2021.

GOUVEIA, T. A. F.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F.; GEREMIA-NIEVINSKI, F. 50 anos de sinergia entre Geodésia Espacial e Meteorologia: do erro no posicionamento GNSS a aplicações de previsão de precipitação de curtíssimo prazo. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1509–1535, 2020. https://doi.org/10.14393/rbcv72nespecial50anos-56767.

GOUVEIA, T. A. F. **Função de mapeamento brasileira da atmosfera neutra e sua aplicação no posicionamento GNSS na América do Sul**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Presidente Prudente, 2019.

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a Terra.** PORTO ALEGRE: Bookman, 2006. 656p.

GUNTER’S SPACE PAGE. **FORMOSAT-7/COSMIC-2**. Disponível em: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/formosat-7-cosmic-2.htm.

HOBIGER, T., JAKOWSKI, N. **Atmospheric Signal Propagation**. In: Teunissen, P.J., Montenbruck, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer Handbooks. Springer, Cham., 2017 https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_6.

HOLZSCHUH, M. L.; SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Avaliação de perfis atmosféricos de rádio ocultação GPS do satélite CHAMP sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 147–155, jun. 2010.

HOPFIELD, H. S. **Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data**. Journal of Geophysical Research, Vol. 74, No. 18, pp. 4487–4499, 1969.

JEREZ, G. O. et al. **Estimativa e análise de perfis de densidade de elétrons para a região brasileira: integração de rádio ocultação GNSS e de informações ionosféricas provenientes de estações GNSS terrestres**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Presidente Prudente, 2021.

JEREZ, G. O. et al. Rádio Ocultação GNSS: Revisão Teórica, Missões e Produtos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 4, p. 943–967, 23 dez. 2022.

KHERANI, E. A.; SANCHEZ, S. A.; DE PAULA, E. R. **Numerical Modeling of Coseismic Tropospheric Disturbances Arising from the Unstable Acoustic Gravity Wave Energetics**. 2021. *Atmosphere*, v. 12, n. 6, p. 765.

Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, 2010: The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 91, 363-376. doi:10.1175/2009BAMS2755.1

KUNITSYN, V.; ANDREEVA, E.; NESTEROV, I.; PADOKHIN, A.; GRIBKOV, D.; REKENTHALER, D.A**. Earthquake Prediction Research Using Radio Tomography of the Ionosphere**. In Universe of Scales: From Nanotechnology to Cosmology: Symposium in Honor of Minoru M. Freund; Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; pp. 109–132.

KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G.; SCHOFIELD, J.; LINFIELD, R.; HARDY, K. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D19, 23429-23465, 1997.

KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G.A.; LEROY, S.S.; HERMAN, B. The GPS Radio Occultation Technique. In: LEE, L.C.; ROCKEN, C.; KURSINSKI, R. **Applications of Constellation: Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate**. Hong Kong: Springer-Verlag, 2000.

LASOTA, E. et al. Cloud Detection from Radio Occultation Measurements in Tropical Cyclones. **Atmosphere**, v. 9, n. 11, p. 418, 25 out. 2018.

Longitude e latitude / GPS coordenadas. (n.d.). Coordenadas-gps.net. Disponível em: www.coordenadas-gps.net/

MANTA, F., OCCHIPINTI, G., HILL, E. M., PERTTU, A., ASSINK, J., & TAISNE, B. (2021). Correlation between GNSS-TEC and eruption magnitude supports the use of ionospheric sensing to complement volcanic hazard assessment. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126, e2020JB020726. https://doi.org/10.1029/2020JB020726.

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Presidente Prudente, 2007.

MCCORMICK, M.P., THOMASON, L.W., TREPTE, C.R., 1995. **Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption**. Nature 373, 399–404. http://dx.doi.org/10.1038/373399a0.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento Pelo GNSS: Descrição, Fundamentos E Aplicações** (2a Edição). [s.l.] Editora Unesp, 2008.

NASA SPACE PLACE. **How Do Hurricanes From?** Disponível em: https://spaceplace.nasa.gov/hurricanes/en/.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Sustainable Development Goal 13: Ação contra a mudança global do clima**. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/13.

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. **Escala Saffir-Simpson**. Disponível em: https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2023/10/o-que-e-a-escala-de-vento-de-furacoes-saffir-simpson-e-quais-sao-seus-cinco-niveis.

OCCHIPINTI, G. (2015). **The seismology of the planet Mongo: the 2015 ionospheric seismology review**. Subduction Dynamics: From Mantle Flow to Mega Disasters. Geophysical Monograph Series, 211, 169–182. https://doi.org/10.1002/9781118888865.

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. Natural Disasters. **Our World in Data**, 12 mar. 2024.

ROBOCK, A., 2000. **Volcanic eruptions and climate**. Rev. Geophys. 38, 191–219. http://dx.doi.org/10.1029/1998RG000054.

ROSSI, J. Representação de eventos de secas no Brasil por produtos de sensoriamento remoto. [s.l: s.n.].

SAASTAMOINEM, J. **Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction**. Bulletin Geodésiqué, Vol. 105, Sept 1972, Vol. 106, Dec 1972, Vol. 107, March, 1973.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Presidente Prudente, 2001.

SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: Sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Presidente Prudente, 2005.

SEEBER, G. **Satellite geodesy**. 2nd completely rev. and extended ed ed. Berlin ; New York: Walter de Gruyter, 2003.

SIGURDSSON, H., HOUGHTON, B., MCNUTT, S., RYMER, H., & STIX, J. (Eds.). (2015). **The encyclopedia of volcanoes**. Elsevier.

SIMÕES, D. et al. Documentos 244 Índices para a Quantificação da Seca Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Arroz e Feijão Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. [s.l: s.n.].

SOARES, A. P. Monitoração de anomalias em comunicações via satélite. In: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, SP, Brasil, 21 a 26 de outubro, 2001.

SOUSA, R. **Furacão: o que é, origem e os maiores do mundo**. Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/geografia/furacao.htm.

SOUZA, A. L. C. DE. **Cálculo da velocidade de deriva das bolhas ionosféricas a partir de observações GNSS**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade

de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Presidente Prudente, 2019.

SPARKS, R.S.J., BURSIK, M.I., CAREY, S.N., GILBERT, J.S., GLAZE, L.S., SIGURDSSON, H., WOODS, A.W., 1997. **Volcanic Plumes**. J. Wiley and Sons, Chichester, UK, p. 574.

SPOSOB, G.; KILLMANN, M. **Desastres naturais: o que são, suas causas e características**. Disponível em: https://humanidades.com/br/desastres-naturais/.

SUI, XIAOHONG; WU, FALIN; ZHAO, YAN. Extreme Weather Monitoring Using GPS Radio Occultation Technique: Preliminary Result from 2010 Yunnan Drought Analysis. In: **Advances in Computational Environment Science: Selected papers from 2012 International Conference on Environment Science (ICES 2012), Australia, Melbourne, 15-16 January, 2012**. Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 273-279.

SUN, Y.; CHEN, C.; LIN, C. **Detection of Vertical Changes in the Ionospheric Electron Density Structures by the Radio Occultation Technique Onboard the FORMOSAT-7/COSMIC2 Mission over the Eruption of the Tonga Underwater Volcano on 15 January 2022**. 2022.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. **Decifrando a Terra**. 2 ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

UCAR COSMIC PROGRAM. **COSMIC-2 Data Products**. Disponível em: https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-do/cosmic-2/data/.

VALENTIM, P. Actividade Vulcânica, Batalha, Portugal, 2011.

XINXIN, M.; ZHAN, L.; HUARAN, C.; HONGLIN, J.; DAHU, L.; LIGUO, J.; XIAOCAN, L. **Ionosphere anomaly before the Wenchuan M S 8.0 earthquake detected by COSMIC occultation data**. Acta Seismol. Sin. 2013, 35, 848–855.

ZHANG, T.; TAN, G.; BAI, W.; SUN, Y.;WANG, Y.; LUO, X.; SONG, H.; SUN, S. **A Disturbance Frequency Index in Earthquake Forecast Using Radio Occultation Data**. Remote Sens. 2023, 15, 3089. https://doi.org/10.3390/rs15123089.