



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CAPACIDADE DAS ESTAÇÕES INFRASSÔNICAS DO IMS DETECTAREM
BÓLIDOS NA AMÉRICA DO SUL**

Letícia Guedes Assunção

Orientador: Prof. Dr. Lucas Vieira Barros

Brasília, 2025



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CAPACIDADE DAS ESTAÇÕES INFRASSÔNICAS DO IMS DETECTAREM
BÓLIDOS NA AMÉRICA DO SUL**

Trabalho Final de Conclusão de
Curso apresentada à Comissão
Examinadora do Instituto de
Geociências como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Geofísica

LETÍCIA GUEDES ASSUNÇÃO

Brasília, 2025

**CAPACIDADE DAS ESTAÇÕES INFRASSÔNICAS DO IMS DETECTAREM A
ENTRADA DE BÓLIDOS PRÓXIMO A AMÉRICA DO SUL**

LETÍCIA GUEDES ASSUNÇÃO

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Lucas Vieira Barros

Orientador

Instituto de Geociências – IG / Universidade de Brasília – UnB

Profa. Dra. Monica Giannoccaro Von Huelsen

Instituto de Geociências – IG / Universidade de Brasília – UnB

Dr.: Juraci Mario de Carvalho

Pesquisador

Instituto de Geociências – IG / Universidade de Brasília – UNB

Brasília, 2025

“Tudo posso naquele que me fortalece”.

Filipenses 4:13

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me dar forças todos os dias para continuar lutando pelos meus sonhos e objetivos. Sou imensamente grata por ter chegado até aqui. Em momentos difíceis, quando minha própria mente se volta contra mim, Deus sempre foi o meu refúgio e guia.

À minha mãe, Angelina, agradeço por todo o amor e apoio que me deu ao longo da vida. Se cheguei até aqui, foi porque tive em quem me inspirar.

Ao meu esposo e companheiro, Wenderson, sou grata por estar ao meu lado todos os dias, acreditando em mim, mesmo quando eu mesma duvidei da minha capacidade. Seu apoio foi essencial nessa jornada.

Aos meus dois pais, Wildemar e Marcos, minha gratidão por sempre torcerem por mim e me ajudarem da melhor forma possível.

Aos meus irmãos, Maria Eduarda e Guilherme, obrigada por segurarem minha mão e reafirmarem, em cada passo, que sou capaz.

Ao meu orientador, Lucas Barros, meu profundo agradecimento por acreditar em mim desde o início, por me incentivar e despertar em mim o desejo de ser cientista. Seu apoio me mostrou que posso ir muito além do que imaginava.

À minha universidade e ao Observatório Sismológico, sou grata pela oportunidade de adquirir conhecimento e pelas ferramentas que me proporcionaram para me tornar uma profissional capacitada.

RESUMO

Há muito tempo, objetos celestes provenientes do espaço despertam curiosidade e apreensão em pessoas ao redor do mundo. Segundo a NASA (National Aeronautics and Space Administration), os cientistas estimam que cerca de 48,5 toneladas de material meteórico caem na Terra todos os dias, penetrando na atmosfera com velocidades supersônicas que ultrapassam a velocidade do som. Tais objetos extraterrestres podem ser fragmentos de cometas e asteroides, sendo chamados de meteoroides. A comunidade científica conta com um Sistema Internacional de Monitoramento (International Monitoring System - IMS) para contribuir com a verificação do Tratado de Proibição Completa de Testes Nucleares (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty - CTBT). Esta rede global de sensores, destinada ao monitoramento de testes nucleares clandestinos em violação ao Tratado CTBT, conta com quatro tecnologias geofísicas para monitorar os três ambientes possíveis de realização de testes nucleares: sísmica (para monitoramento terrestre), infrassônica (para monitoramento na atmosfera), hidroacústica (para monitoramento subaquático) e radionuclídeos (tecnologia complementar ao monitoramento dos testes terrestres). A tecnologia infrassônica, além de ser apropriada para a detecção de explosões nucleares atmosféricas, pode ser utilizada também no estudo de outros eventos naturais e antropogênicos que geram sinais infrassônicos, como é o caso de meteoroides que, ao entrarem na atmosfera terrestre em altas velocidades, podem gerar ondas infrassônicas. Essas ondas acústicas percorrem longas distâncias devido às suas baixas frequências ($f < 20\text{Hz}$) e longos comprimentos de onda (ondas inaudíveis ao ser humano), pois sofrem baixa atenuação. Devido a essa característica, são necessárias apenas 60 estações para monitorar explosões nucleares em toda a Terra. Neste trabalho, são utilizados dados das estações infrassônicas localizadas na América do Sul, incluindo a única estação brasileira de infrassom (IS09), localizada em Brasília, mantida e operada pelo Observatório Sismológico da Universidade de Brasília. Este estudo apresenta um catálogo de eventos infrassônicos gerados por bólidos e bolas de fogo, detectados por estações infrassônicas do IMS, no período de 2018 a 2025, e estimativa da energia da onda infrassônica gerada por esses eventos. A verificação desses eventos é realizada a partir do banco de dados divulgado pelo Center for Near-Earth Object Studies (CNEOS).

Palavras-chave: Meteoroides; Bólidos; Infrassom; IMS; CNEOS.

ABSTRACT

For a long time, celestial objects from space have aroused curiosity and apprehension among people worldwide. According to NASA (National Aeronautics and Space Administration), scientists estimate that approximately 48.5 tons of meteoric material fall to Earth daily, entering the atmosphere at supersonic speeds exceeding the speed of sound. These extraterrestrial objects can be fragments of comets and asteroids, known as meteoroids. The scientific community relies on an International Monitoring System (IMS) to assist in verifying the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT). This global network of sensors, designed to monitor clandestine nuclear tests in violation of the CTBT, employs four geophysical technologies for monitoring in the three possible nuclear test environments: seismic (for terrestrial monitoring), infrasonic (for atmospheric monitoring), hydroacoustic (for underwater monitoring), and radionuclide (complementary technology for monitoring terrestrial tests). In addition to being suitable for detecting atmospheric nuclear explosions, infrasonic technology can also be used to study other natural and anthropogenic events that generate infrasonic signals, such as meteoroids entering Earth's atmosphere at high speeds, which can generate infrasonic waves. These acoustic waves travel long distances due to their low frequencies ($f < 20\text{Hz}$) and long wavelengths (inaudible to humans), as they suffer low attenuation. Due to this characteristic, only 60 stations are required to monitor nuclear explosions worldwide.

In this study, data from infrasonic stations located in South America are utilized, including the only Brazilian infrasound station (IS09) in Brasília, maintained and operated by the Seismological Observatory of the University of Brasília. This work presents a catalog of infrasonic events generated by bolides and fireballs, detected by IMS infrasonic stations from 2018 to 2025, along with the corresponding calculation of the infrasonic wave energy generated by these events. Verification of these events is conducted using the database provided by the Center for Near-Earth Object Studies (CNEOS).

Keywords: Meteoroids; Bolides; Infrasound; IMS; CNEOS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Estações Infrassônicas do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS). Fonte:(Neri,2019).	14
Figura 2- Relação entre período e comprimento de onda para diferentes fenômenos Atmosféricos. (Le Pichon., et al (2009)).....	15
Figura 3- Redes infrassônicas do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS) que foram utilizadas neste estudo.	16
Figura 4- A figura mostra a propagação de ondas infrassônicas (linhas azuis) a partir de uma fonte localizada ao nível do solo, interagindo com diferentes camadas atmosféricas: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. O perfil de temperatura (linha preta),(linha vermelha) influenciam a trajetória das ondas. A direção do vento, predominante na mesosfera, favorece a refração das ondas em altitudes elevadas. Os valores de velocidade do vento estão indicados na escala superior, enquanto a temperatura está representada na parte inferior do gráfico. Adaptado de Blanc et al., 1997.	19
Figura 5- Esquema ilustrativo da entrada de um meteoróide na atmosfera terrestre e sua transformação em meteoro e meteorito. O meteoróide, ao entrar na atmosfera, inicia o processo de ablação, tornando-se um meteoro visível por alguns segundos. Após o fim da ablação, tornando-se um meteoro visível por alguns segundos. Após o fim da ablação, o restante do material pode continuar sua trajetória em ‘dark-flight’ (é a fase final da queda de um meteorito, quando ele já não brilha, porque a ablação cessou). O tempo de duração dessas fases varia entre segundos e minutos. Fonte: (Bramom, 2024).	20
Figura 6- Representação das terminologias das rochas espaciais de acordo com suas características composicionais, dimensões e interações com as camadas atmosféricas terrestres. Modificada da American Meteor. Society: American Meteor Society, 2024).	23
Figura 7- Espectro de interação entre meteoróides e a atmosfera terrestre, mostrando a relação entre perda de massa, tamanho e brilho do objeto. Diferentes fenômenos atmosféricos e impactos estão associados ao tamanho do meteoróide e às suas consequências, desde desde meteoros menores, que produzem luz sem som, até impactos catastróficos de grandes bólidos. Destacam-se efeitos como formação de ondas de choque, crateras, tsunamis, e eventos extremos, como a extinção dos dinossauros no limite Cretáceo-Paleógeno e mudanças climáticas globais. A linha tracejada ilustra a variação da perda de massa em função do tamanho e da velocidade de entrada. Fonte: (Le Pichon., et al (2009)).	24

Figura 8- Relação entre altitude, raio do meteoróide e número de Knudsen. Adaptado de Campbell-Brown e Koschny (2004).	28
Figura 9- Relação entre a altitude de transição linear (Ht) e o raio da explosão ($R0$) para diferentes altitudes de entrada do meteoróide. As curvas representam altitudes iniciais variando de 20 km a 100 km. Observa-se que, em altitudes mais elevadas, o raio da explosão é menor, resultando em uma dissipação mais rápida da onda de choque. Já para altitudes mais baixas, o raio da explosão aumenta, favorecendo a propagação do infrassom na atmosfera. Fonte: Le Pichon et al. (2009); Kalinowski et al. (2009).	30
Figura 10- Traço composto dos sinais de pressão atmosférica registrados em toda a Europa do Grande Meteoro Siberiano, em 30 de junho de 1908 (após Whipple 1930). Fonte: (Le Pichon., et al 2009).	32
Figura 11- Meteoro de Chelyabinsk. Fonte: Le Pichon et al.2013;(Brown et al.2013; Pilger et al.,2015).	33
Figura 12- Sinal registrado pela I31 KZ -Ondas infrassônicas geradas pelo Asteroide de Chelyabinsk. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior).	34
Figura 13- Estação infrassônica IS09 instalada no interior do Parque Nacional de Brasília, em que o triângulo representa o Observatório Sismológico, os três círculos rosas são os elementos do arranjo e o círculo vermelho, o arranjo central da estação.	35
Figura 14- Duração das janelas de tempo para o processamento das formas de onda infrassônicas em função das 11 faixas de frequência. Fonte: Le Pichon et al., (2009).	38
Figura 15- Curvas de resposta dos 11 filtros de Chebyshev utilizados na configuração PMCC. Fonte: Le Pichon et al., (2009).	38
Figura 16- Família PMCC formada por pixels com características semelhantes de azimuth, velocidade de traço horizontal, frequência e tempo. Fonte: (Le Pichon., et al 2009).	39
Figura 17- Bólidos e bolas de fogo detectados no planeta terra pelos satélites GOES no período de 2018 a 2025 por satélites GOES.	40
Figura 18- Eventos meteóricos detectados por estações infrassônicas do IMS localizadas na América do Sul e regiões oceânicas.	41
Figura 19- Sinal de infrassom gerado pelo bólido do dia 28 de julho de 2022, detectado na estação I20EC, localizada no Equador. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior)...43	43

Figura 20- Sinal de infrassom gerado pelo bólido do dia 28 de julho de 2022, detectado na estação I08BO, localizada na Bolívia. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior)...	44
Figura 21- Sinal de infrassom referente ao bólido do dia 28 de julho de 2022, detectado na estação I09BR, localizada em Brasília-DF. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior).....	45
Figura 22- Localização da explosão do bólido de 28 de julho de 2022. A bolinha vermelha indica a posição estimada da explosão, enquanto o triângulo amarelo representa a localização registrada pelo sensor GLM. As estrelas amarelas correspondem às estações de monitoramento, e as linhas mostram os raios azimutais dessas estações apontando para a fonte do evento.....	45
Figura 23- Sinal de infrassom referente ao bólido dia 06/12/2019, detectado na estação I09BR, localizada em Brasília-DF. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior)...	46
Figura 24-Sinal de infrassom referente ao bólido do dia 06/12/2019, detectado na estação I41PY, localizada no Paraguai. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior)...	47
Figura 25- Sinal de infrassom referente ao bólido do dia 06/12/2019, detectado na estação I08BO localizada na Bolívia. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior).	48
Figura 26- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 21/04/2022, detectado na estação I02AR, localizada na Argentina a cerca de 145 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (229°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.373 km/s).	49
Figura 27- Polar Plot da estação I02AR referente ao back-azimute da frente de onda do bólido do dia 21 de abril de 2022.	49
Figura 28- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 22/06/2019, detectado na estação I20EC, localizada na Ilha Galápagos a cerca de 3130 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (54,5°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.352 km/s).	50
Figura 29-- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 22/06/2019, detectado na estação I08BO, localizada na Bolívia a cerca de 3439 km de distância da fonte. No retângulo superior	

está a informação do back-azimute médio ($0,64^\circ$) e, no retângulo inferior está a informação do back-azimute médio ($0,64^\circ$) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.339 Km/s).	51
Figura 30- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 07/02/2022, detectado na estação I50GB, localizada a cerca de 3300 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (135°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.354 km/s).....	52
Figura 31- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 07/02/2022, detectado na estação I49GB, localizada na Ilha Tristan da Cunha a cerca de 2182 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (66°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.352 km/s).	53
Figura 32- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 07/02/2022, detectado na estação I09br, localizada em Brasília a cerca de 5975 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (113°) e, no retângulo inferior está a informação do back-azimute médio (113°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.338 km/s).....	54
Figura 33- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 07/02/2022, detectado na estação I08BO, localizada na Bolívia a cerca de 7955 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (110°) e, no retângulo inferior está a informação do back-azimute médio (110°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.338 km/s).....	55
Figura 34- Localização da explosão do bólido em 07 de fevereiro de 2022. A bolinha vermelha indica a posição estimada da explosão, enquanto a bolinha amarela representa a localização registrada pelo sensor GLM. As estrelas amarelas correspondem às estações de monitoramento, e as linhas mostram os raios azimutais dessas estações apontando para a fonte do evento.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estações infrassônicas utilizadas neste estudo e suas informações de localização e quantidade de elementos do arranjo.	17
Tabela 2- Propriedades físicas e orientação para uma observação arbitrária de meteoroides. (Le Pichon et al., 2009).....	25
Tabela 3- 19 Bólidos detectados por sensores GLM e estações do IMS localizadas na América do Sul e Ilhas Oceânicas.....	58
Tabela 4- Catálogo de eventos infrassônicos gerados por bólidos e bolas de fogo detectados por estações do IMS. Nas três últimas colunas são apresentados os valores de energia estimados por cada fórmula. Eventos detectados por mais de uma estação foram feitas as médias das suas respectivas energias.....	64

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos Gerais	17
1.2 Objetivos Específicos	17
CÁPITULO 2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 O Infrassom	18
2.2 Teoria do Movimento de Corpo Único.....	19
2.3 Variáveis que determinam a propagação do Infrassom até as estações	24
2.4 Propagação do infrassom gerado por meteoros na atmosfera	25
2.5 Eventos históricos de meteoroides	30
CAPÍTULO 3- ESTAÇÃO INFRASSÔNICA DE BRASÍLIA	34
CAPÍTULO 4 – PROCESSAMENTO DE DADOS INFRASSÔNICOS	36
CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA.....	39
5.1 Satélites GOES	41
5.2 Produtos do IDC (SEL-3).....	42
CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DE SINAIS INFRASSÔNICOS.....	42
6.1 Bólido do dia 28/07/2022	42
6.2 Bólido do dia 06/12/2019	46
6.3 Análise de formas de ondas de evento meteórico próximo à estação	48
6.4 Bólidos mais energéticos	50
6.4.1 Bólido do dia 22/06/2019 – 6 Kt	50
6.4.2 Bólido do dia 07/02/2022- 7 Kt.....	51
CAPÍTULO 7 – CATÁLOGO.....	57
CAPÍTULO 8 – CÁLCULO DA ENERGIA DAS ONDAS INFRASSÔNICAS	60
CAPÍTULO 9 – DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Um dos maiores eventos de extinção em massa ocorreu há cerca de 66 milhões de anos, na época conhecida como Extinção Cretáceo-Paleógeno (K-Pg). Aproximadamente três quartos da diversidade biológica existente naquela época foram perdidos, incluindo os dinossauros (Schulte et al., 2010). Cientistas apontam que a causa foi o impacto de um asteroide (Schulte et al., 2010; Alvarez et al., 1980), corpos rochosos ou metálicos geralmente encontrados no cinturão de asteroides entre Marte e Júpiter (Carry, 2012). O asteroide responsável foi denominado Chicxulub, pois caiu na Península de Yucatán, no México, na cidade de Chicxulub. Esse evento cósmico colossal teve implicações muito além da escala das bombas atômicas. A partir desse evento, os estudos sobre asteroides e cometas — corpos celestes compostos por gelo e poeira (NASA, 2025) — tornaram-se áreas significativas de pesquisa. Portanto, essa área de estudo tem por finalidade entender melhor esses objetos espaciais, monitorar potenciais ameaças à Terra e aprender sobre a formação e evolução do sistema solar.

O infrassom, ou mais precisamente a tecnologia infrassônica, uma das tecnologias do International Monitoring System (IMS), operado pela Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), desempenha um papel crucial no monitoramento e detecção de meteoroides, assim como na verificação do Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT). Essa tecnologia é capaz de captar variações na pressão do ar geradas por eventuais meteoroides, que frequentemente não atingem o solo, desintegrando-se em altas altitudes.

A rede infrassônica do IMS é composta por 60 estações infrassônicas ao redor do planeta (Fig. 1), capazes de captar ondas sonoras de frequência muito baixa, na faixa de 0,001 Hz a 16 Hz, frequências não audíveis pelo ser humano (Gossard e Hooke, 1975).

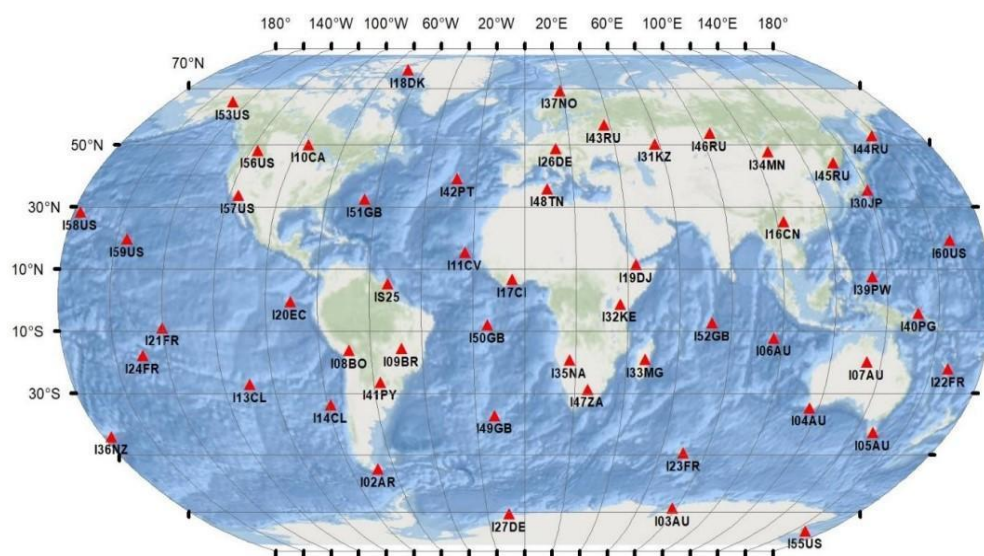


Figura 1- Estações Infrassônicas do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS). Fonte:(Neri,2019).

Essas estações possuem sensores microbarógrafos capazes de detectar fontes artificiais, como explosões químicas em mineradoras e pedreiras (Georges, 1973; Lin & Langston, 2009), e explosões de testes nucleares (Christie et al.,2001). Além disso, são sensíveis a fontes naturais, como meteoros (ReVelle, 1976; Evers and Haak, 2001). As estações também monitoram tempestades severas (Bowman & Bedard, 2010), microbaroms, aviões supersônicos, entre outros fenômenos (Fig.2).

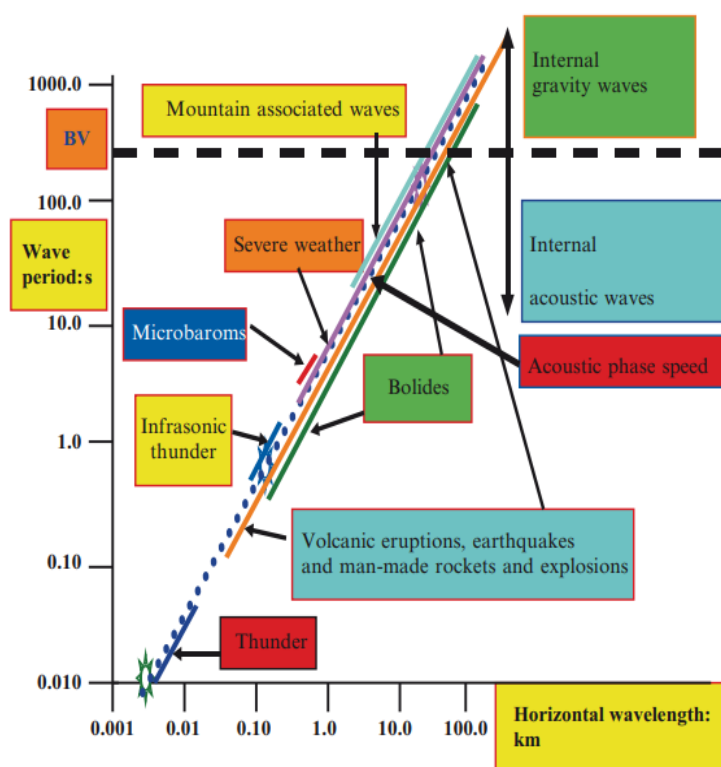


Figura 2- Relação entre período e comprimento de onda para diferentes fenômenos Atmosféricos. (Le Pichon., et al (2009).

Todas as estações da rede global IMS, que somam 337 instalações, são capazes de detectar qualquer teste nuclear em qualquer ambiente (massas aquáticas, atmosfera e subsuperfície) com potência superior ou equivalente a 1 quiloton (Kt) de trinitrotolueno (TNT) (Christie et al., 2001). Quando detectados, os dados são encaminhados para o Internacional Data Center (IDC) em Viena, Áustria (Christie & Campus, 2009).

As formas de ondas dos respectivos eventos detectados nos 4 ou mais elementos de uma estação infrassônica são processados utilizando um algoritmo de Correlação Multicanal Progressiva (Progressive Multi-Channel Correlation-PMCC) (Cansi, 1995; Le Pichon e Cansi, 2003), em que são feitas as análises das formas de ondas que chegam na estação para identificação dos eventos infrassônicos detectados.

O presente trabalho visa elaborar um catálogo com os bólidos e bolas de fogo que geraram infrassom ao interagir com a atmosfera terrestre no período de 2018-2025 e foram detectados pelas estações infrassônicas do IMS, localizadas na América do Sul (Figura 3 e Tabela 1), como I09BR (Brasil), I08B0 (Bolívia), I41PY (Paraguai), I13CL e I14CL (Chile), I20EC (Equador), I01AR e I02AR estações da Argentina e algumas estações no

Oceano Atlântico como I49GB e I50GB (Reino Unido) e no pacífico como I21FR, I24FR, I25FR estações francesas e, por fim a estação I11CV, estação do Cabo Verde.

Para auxiliar na detecção de eventos meteóricos, foi utilizado o banco de dados do Center For-Near Objects Study (CNEOS) da NASA, localizado no Jet Propulsion Laboratory (JPL), que disponibiliza todos os eventos de bólidos detectados por satélites, quando é captado o brilho máximo do objeto celeste. Também foram utilizadas informações da Brazilian Meteor Observation Network (Bramom), que disponibiliza com frequência informações de bólidos que atingem o Brasil, facilitando a busca dos registros desses na rede infrassônica do IMS.



Figura 3- Redes infrassônicas do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS) que foram utilizadas neste estudo.

Tabela 1: Estações infrassônicas utilizadas neste estudo e suas informações de localização e quantidade de elementos do arranjo.

<i>Código de ID Estação</i>	<i>Lat/Long</i>	<i>Localização</i>	<i>N °.de Element os</i>
I09BR	15.6 S/ 48.0 W	Brasília - Brasil	4
I08B0	16.2 S/ 68.5 W	La Paz - Bolívia	4
I20EC	0.6 S/ 90.4 W	Ilhas Galápagos – Equador	8
I41PY	26.3 S/ 57.3 W	Villa Florida - Paraguai	4
I01AR	41.1 S/ 70.7 W	Pilcaniyeu - Argentina	8
I02AR	54.6 S/ 67.3 W	Ushuaia - Argentina	5
I49 GB	37.1 S /12.3 W	Tristan da Cunha – Território Britânico do Oceano Atlântico	5
I50 GB	7.9 S /14.4 W	Ascensão – Território Britânico do Oceano Atlântico	8
I13CL	27.1 S/ 109.4 W	Ilha de Páscoa - Chile	8
I14 CL	33.6 S/ 78.8 W	Ilha Robinson Crusoe – Chile	8
I11CV	15.2 N /23.2 W	Ilhas Cabo Verde – Cabo Verde	8
I25 FR	16.1 N/ 61.6 W	Guadalupe - França (Departamento da Guadalupe, Caribe)	9
I24 FR	17.8 S/ 149.3 W	Taiti - Polinésia Francesa (França, Oceano Pacífico)	5
I2IFR	8.9 S /140.2 W	Ilhas Marquesas - Polinésia Francesa (França, Oceano Pacífico)	4

1.1 Objetivos Gerais

- Elaborar um catálogo de eventos infrassônicos gerados por bólidos e bolas de fogo no período de 2018 a 2025, detectados por estações infrassônicas do IMS localizadas na América do Sul e regiões oceânicas próximas.

1.2 Objetivos Específicos

- Preparar scripts para busca de dados no Banco do IDC;
- Executar o software de processamento para detecções;
- Classificar as detecções de acordo com a duração da família PMCC e outros parâmetros;
- Tabular os parâmetros das detecções: frequência, velocidade e azimuth da frente de ondas;
- Divulgar o boletim no site do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília.
- Por fim, este trabalho envolve estudos sobre a tecnologia infrassônica, suas aplicações mediante a análise e interpretação de sinais infrassônicos gerados por meteoros e detectados por estações infrassônicas do IMS.

CÁPITULO 2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O Infrassom

As ondas sonoras são ondas longitudinais, onde as partículas do meio vibram na mesma direção da propagação da onda. Quando essas ondas se propagam por um meio como o ar, elas causam variações no estado de equilíbrio, gerando compressões e rarefações. Além disso, as ondas sonoras exibem elasticidade, ou seja, quando as partículas se deslocam, uma força proporcional ao deslocamento age para restaurá-las à posição original (Le Pichon, Blanc, & Hauchecorne, 2009).

O infrassom são ondas sonoras com frequências abaixo do limite audível humano, < 20 Hz (Gossard; Hooke, 1975). Essas ondas, por terem frequências muito baixas, percorrem longas distâncias devido aos longos comprimentos de onda e sofrem baixa atenuação. Sua propagação depende da composição do meio e, principalmente, da

velocidade do vento e da temperatura da atmosfera (ReVelle, 2007). A Figura 4 ilustra a propagação do infrassom na atmosfera terrestre (Blanc et al., 1997).

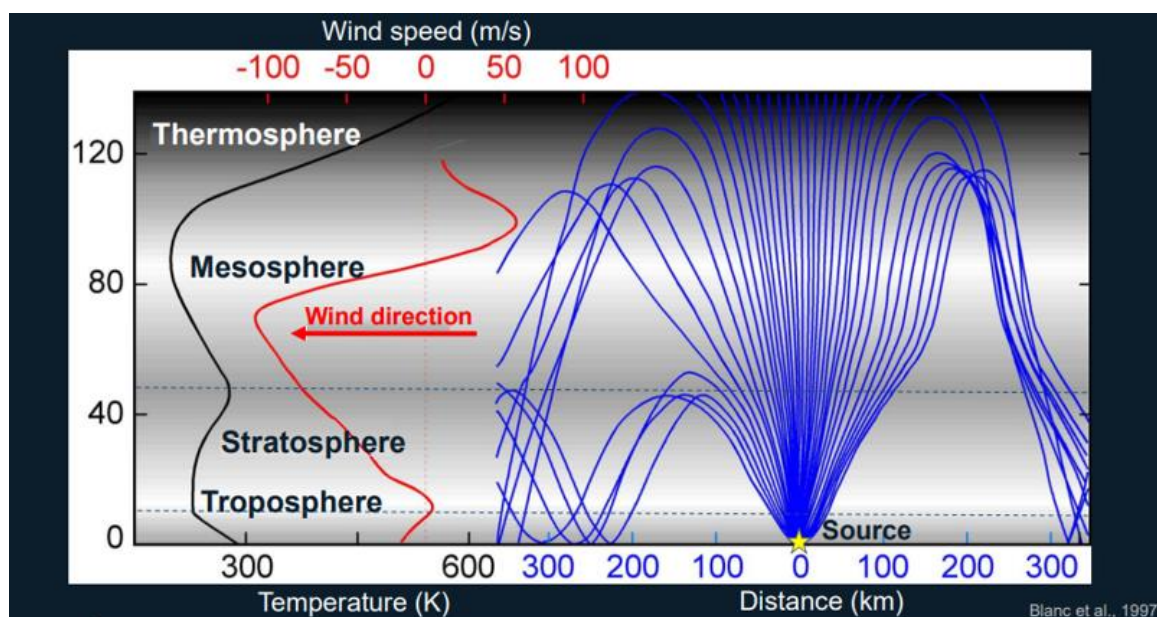


Figura 4- A figura mostra a propagação de ondas infrassônicas (linhas azuis) a partir de uma fonte localizada ao nível do solo, interagindo com diferentes camadas atmosféricas: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. O perfil de temperatura (linha preta), (linha vermelha) influenciam a trajetória das ondas. A direção do vento, predominante na mesosfera, favorece a refração das ondas em altitudes elevadas. Os valores de velocidade do vento estão indicados na escala superior, enquanto a temperatura está representada na parte inferior do gráfico. Adaptado de Blanc et al., 1997.

As ondas infrassônicas se propagam à velocidade do som, que é de aproximadamente 343 m/s a 20°C no ar (Blanc, & Hauchecorne, 2009). Essa velocidade aumenta com a temperatura e varia conforme as diferentes camadas da atmosfera, uma vez que a densidade do ar e a sua composição alteram-se com a altitude (Dutton, 2002). Ondas de baixa frequência, com velocidades inferiores à do som, são chamadas de ondas lentas, e geralmente se propagam a velocidades similares à do vento, variando entre 1 a 10 m/s (Davis, 2003). Objetos que se movem mais rapidamente que a velocidade do som, como bólidos ou aviões supersônicos, geram ondas de choque. Essas ondas de choque podem gerar infrassom, dependendo da energia do evento e da frequência envolvida (Pierce, 1981).

2.2 Teoria do Movimento de Corpo Único

Embora a pesquisa sobre a entrada de meteoroides na atmosfera ainda seja um campo ativo, com muitas variáveis não totalmente compreendidas, a física do movimento de um meteoróide como um corpo único é bem estabelecida e é amplamente usada para

descrever e comparar os dados das observações de meteoros (por exemplo, Ceplecha et al., 2000). Quando meteoroides entram na atmosfera da Terra, eles passam por um processo dinâmico no qual a interação com o ar gera calor e resulta em ablação, ou perda de massa (Fig.5). Para descrever o movimento de um meteoróide durante esse processo, é utilizado um modelo simplificado, que considera o meteoróide como um corpo único, sem fragmentação, com características como massa, densidade volumétrica e velocidade. Esse modelo, desenvolvido por autores como Öpik (1933, 1937) e Whipple (1938), utiliza um conjunto de equações diferenciais para descrever a trajetória do meteoróide na atmosfera, considerando a força de arrasto atmosférico e a ablação.

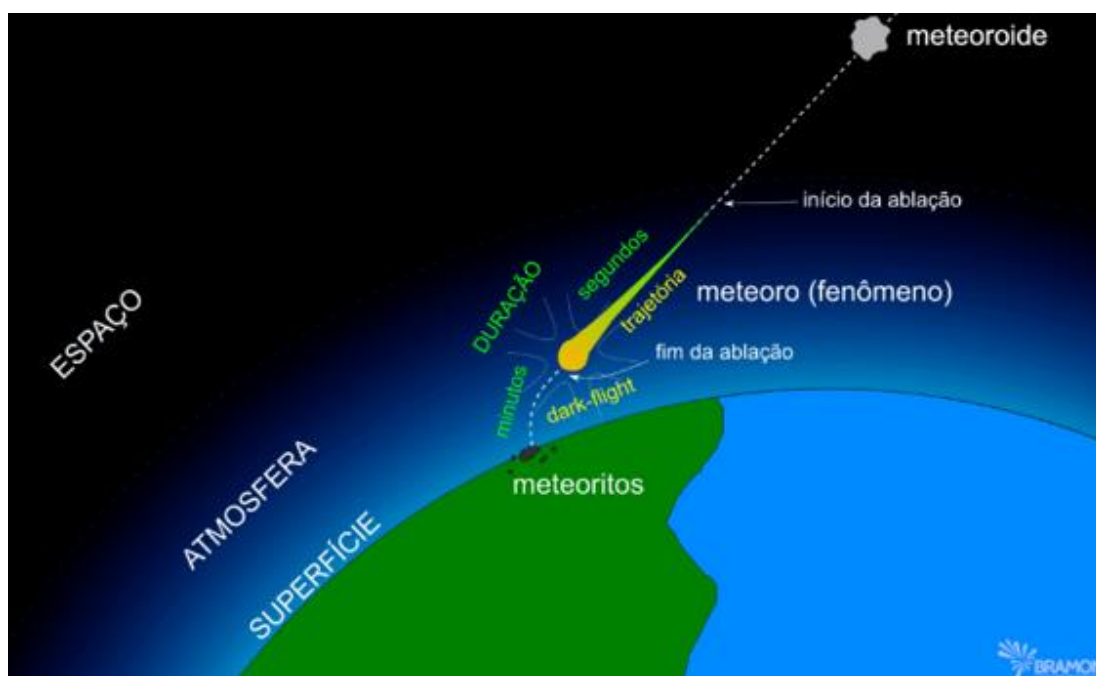


Figura 5- Esquema ilustrativo da entrada de um meteoróide na atmosfera terrestre e sua transformação em meteoro e meteorito. O meteoróide, ao entrar na atmosfera, inicia o processo de ablação, tornando-se um meteoro visível por alguns segundos. Após o fim da ablação, tornando-se um meteoro visível por alguns segundos. Após o fim da ablação, o restante do material pode continuar sua trajetória em 'dark-flight' (é a fase final da queda de um meteorito, quando ele já não brilha, porque a ablação cessou). O tempo de duração dessas fases varia entre segundos e minutos. Fonte: (Bramom, 2024).

Os meteoroides, ao entrarem na atmosfera terrestre, se movem a velocidades hipersônicas, variando de 11,2 km/s a 72,8 km/s (Ceplecha et al., 1998). Durante essa entrada, a força de arrasto atmosférico se torna a única força significativa que atua sobre o meteoróide, tornando a gravidade desprezível, devido à curta duração do evento. Esse movimento é descrito pela Teoria do Movimento de Corpo Único, que trata o meteoróide como um único corpo sujeito apenas à resistência do ar (Ceplecha et al. (1998)).

Essa teoria simplifica a análise do movimento do meteoróide, pois ele é considerado como uma partícula isolada, sem interação com outros corpos, e a única força relevante é a força de arrasto, que causa a desaceleração do meteoróide. De acordo com a teoria do movimento de corpo único, a dinâmica do meteoróide é governada pelas equações (1), (2) e (3).

A equação (1) representa a equação do movimento, a (2) a equação da perda de massa e a (3) é fator de mudança de forma.

$$\frac{dv}{dt} = -\Gamma A \rho_m^{-2/3} \rho_m^{-1/3} v^2 \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{\Lambda A}{2\xi} \rho_m^{-2/3} \rho_m^{-2/3} v^3 \quad (2)$$

$$A = S_m^{-2/3} \rho_m^{-2/3} \quad (3)$$

Em que A é o chamado fator de mudança de forma. Em (1) - (3), S é a área frontal de seção transversal do meteoróide, ou seja, a parte da frente da rocha espacial que está em contato com ar, Γ é o coeficiente de arrasto, ρ é a densidade atmosférica, Λ é o coeficiente de transferência de calor (uma medida de quão eficiente o calor de fricção é transferido para o meteoróide) e ξ é a energia de ablação do meteoróide (a energia necessária para ablatar uma unidade de massa) (Ceplecha et al. (1998)). A geometria da trajetória do meteoro é então descrita por essas equações:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{l - \frac{a}{2}}{\frac{b}{2} + h} v \quad (4)$$

$$z(t) = \cos^{-1} \left(\frac{l - \frac{a}{2}}{\frac{b}{2} + h} \right) \quad (5)$$

$$al + bh + c = l^2 - h^2 \quad (6)$$

As variáveis t (tempo), h (altura), l (distância ao longo da trajetória) e z (distância zenital do radiante do meteoro, ou seja, a direção no céu de onde ele se origina, são elementos fundamentais na descrição do movimento do meteoróide). As constantes a , b e

c estão relacionadas à geometria que define a trajetória do objeto na atmosfera. Resolver numericamente as equações (4) a (6) fornece insights importantes sobre os processos de ablação (Fig.5) e as características dinâmicas do meteoróide, além de permitir comparações com dados de observação e a determinação de suas propriedades físicas (Ceplecha et al., 1998).

Quando as observações registram com precisão a desaceleração do meteoróide, é possível usar a equação (2), junto com hipóteses sobre sua densidade, para estimar sua massa. Essa estimativa, conhecida como 'massa dinâmica', é derivada diretamente do comportamento observado durante o movimento do meteoro na atmosfera. No entanto, o meteoróide em si não é visível nesse processo. O que se observa são os fenômenos associados à sua interação com o ar, como emissão de luz, ionização e ondas sonoras.

As observações que permitem esse tipo de análise incluem registros obtidos por fotometria e vídeo, com câmeras especializadas que capturam a trajetória e variações de brilho do meteoro; radares meteoríticos, que medem a ionização deixada pelo meteoróide; espectroscopia, que analisa sua composição química; detectores de ondas sonoras (infrassom), que registram as ondas de choque geradas pelo objeto; e interferometria de rádio, que mede a trilha ionizada deixada pelo meteoro na atmosfera. Esses métodos fornecem dados fundamentais para determinar a velocidade, a trajetória e a desaceleração do meteoróide, permitindo assim a estimativa de sua massa e outras propriedades físicas.

Os processos de emissão luminosa e ionização estão diretamente relacionados à ablação do meteoróide (Fig.5). Quando ele entra em contato com moléculas da atmosfera, o atrito aquece sua superfície, provocando fusão e vaporização, além de fragmentações ocasionais. Isso gera ionização dos átomos liberados, formando um plasma que rapidamente envolve o objeto. Os elétrons dos átomos excitados liberam energia ao retornar ao estado fundamental, emitindo fótons que originam o brilho característico do meteoro (Le Pichon, Blanc, & Hauchecorne, 2009).

Dependendo das dimensões e da intensidade do brilho, um meteoro pode ser classificado como uma bola de fogo, que é um meteoro excepcionalmente brilhante, com magnitude próxima à do planeta Vênus. Quando o meteoro é ainda mais brilhante e explode na atmosfera, frequentemente acompanhado de um estrondo sônico causado pela onda de choque, ele é classificado como um bólido (Fig.6). Este fenômeno ocorre devido à alta velocidade e à pressão exercida pela passagem do meteoro na atmosfera, o que pode gerar

uma explosão sônica (American Meteor Society, 2024). Frequentemente, esses meteoros não atingem o solo, não gerando meteoritos.



Figura 6- Representação das terminologias das rochas espaciais de acordo com suas características composicionais, dimensões e interações com as camadas atmosféricas terrestres. (Modificada da American Meteor. Society: American Meteor Society, 2024).

A luminosidade do meteoro I está diretamente relacionada à perda de massa do meteoróide (Fig.7), conforme indicado na equação (7), onde τ_L é a eficiência luminosa, que define a fração da energia total do meteoróide que é convertida em radiação luminosa. De forma mais abrangente, essa relação também pode ser expressa por meio da variação da energia cinética do meteoróide ao longo do tempo, incluindo a energia adicional resultante da desaceleração do objeto (Ceplecha et al., 1998).

$$I = -\tau_L \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dt} \quad (7)$$

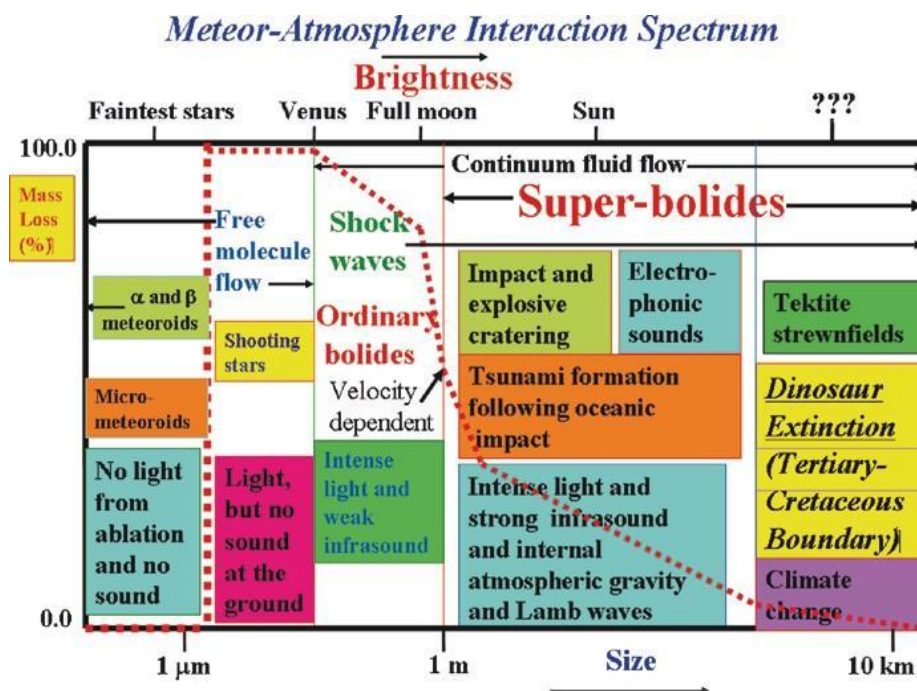


Figura 7- Espectro de interação entre meteoroides e a atmosfera terrestre, mostrando a relação entre perda de massa, tamanho e brilho do objeto. Diferentes fenômenos atmosféricos e impactos estão associados ao tamanho do meteoróide e às suas consequências, desde meteoros menores, que produzem luz sem som, até impactos catastróficos de grandes bólidos. Destacam-se efeitos como formação de ondas de choque, crateras, tsunamis, e eventos extremos, como a extinção dos dinossauros no limite Cretáceo-Paleógeno e mudanças climáticas globais. A linha tracejada ilustra a variação da perda de massa em função do tamanho e da velocidade de entrada. Fonte: (Le Pichon., et al (2009).

2.3 Variáveis que determinam a propagação do Infrassom até as estações

A detecção de infrassom gerado por meteoros exige uma compreensão dos fatores essenciais que permitem a propagação dessa onda até o local de observação. Simplesmente conhecer a forma característica da onda de pressão de um meteoro não é suficiente para sua identificação, uma vez que outras fontes, como relâmpagos ou aeronaves supersônicas, também podem gerar ondas de pressão semelhantes (Brown et al., 2010). Para que o infrassom de um meteoro seja detectado, três condições devem ser atendidas:

1. A onda de choque gerada por um meteoro, ocorre quando ele viaja mais rápido do que a velocidade do som na atmosfera, criando uma compressão de ar à frente dele. Essa compressão se propaga como uma onda de choque, que pode ser detectada como infrassom na superfície da Terra (Ceplecha et al., 1998). Contudo, para que essa onda de choque seja detectável, o meteoróide fonte deve ser grande o suficiente e/ou se mover rápido o suficiente para que a onda balística gerada não seja atenuada completamente pela atmosfera antes de chegar ao observador. A energia da onda precisa ser suficiente para superar a absorção atmosférica e outras perdas de energia que ocorrem enquanto a onda se propaga pela atmosfera (Le Pichon et al., 2009).

2. Além disso, a trajetória do meteoro deve estar alinhada de tal forma que um caminho acústico na atmosfera conecte o meteoro ao observador. Se a trajetória estiver desalinhada, a onda de choque pode se propagar em direção oposta, não sendo detectada pelo observador (Kalinowski et al., 2010).

3. Por fim, os níveis de ruído de fundo acústico/infrassônico no ponto de observação devem ser suficientemente baixos para que a onda infrassônica gerada pelo meteoro seja detectada acima desse ruído. Isso implica que o local de observação deve ser relativamente silencioso, livre de fontes de ruído que possam mascarar o sinal infrassônico do meteoro (Le Pichon et al., 2009).

A Tabela 2 apresenta uma série de parâmetros essenciais para a detecção e caracterização dos infrassons gerados por meteoros.

Tabela 2- Propriedades físicas e orientação para uma observação arbitrária de meteoroides. (Le Pichon et al., 2009).

Características do Meteoróide:	
Velocidade (v)	20 km/s (72000 Km/h)
Massa do Meteoróide (m)	1 kg
Densidade do Meteoróide (ρ_m)	3,700 kg/m ³
Altitude da Fonte (Z_z)	80 km
Inclinação da Trajetória (θ)	45°
Desvio dos Raios ($d\varphi$)	89°
Alcance no Solo (R_g)	100 km
Elevação (Z_0)	0 m

2.4 Propagação do infrassom gerado por meteoros na atmosfera

A atmosfera da Terra é composta por várias camadas, e cada uma delas desempenha um papel crucial na propagação do infrassom gerado por meteoros. Essas camadas incluem a troposfera, a estratosfera, a mesosfera, a termosfera e a exosfera, e suas propriedades físicas influenciam diretamente o comportamento (Fig.4) das ondas de choque geradas por meteoros.

A troposfera, a camada mais próximas da superfície, estende-se de 0 km até cerca de 12 km de altitude nas regiões polares e até 17 km nas regiões equatoriais. É nela que

ocorrem os fenômenos meteorológicos e a maior parte da dinâmica atmosférica (The Weather Station Experts, 2024). Acima da troposfera está a estratosfera, que vai de aproximadamente 12 km até 50 km de altitude. É nessa camada que se encontra a camada de ozônio, responsável por absorver a radiação ultravioleta prejudicial do Sol, protegendo a Terra (The Weather Station Experts, 2024). A mesosfera, localizada entre 50 km e 85 km de altitude, é onde ocorre a maior parte da desintegração dos meteoroides ao entrar na atmosfera. Esta camada também desempenha um papel crucial na interação entre partículas cósmicas e a atmosfera terrestre (The Weather Station Experts, 2024).

A termosfera, que se estende de 85 km até cerca de 600 km de altitude, é essencial para as comunicações de rádio e abriga fenômenos como as auroras boreais e austrais (The Weather Station Experts, 2024). Já a exosfera, a camada mais externa da atmosfera, se inicia a partir de 500 km de altitude (Earth Now, 2025), onde a densidade do ar é extremamente baixa e as partículas de ar podem se mover em órbitas ao redor da Terra (Wallace & Hobbs, 2006; Jacobson, 2011).

No contexto do infrassom gerado por meteoros, a mesosfera e a baixa termosfera são particularmente importantes (Ceplecha et al. (1998). Na mesosfera, que é a camada mais fria da atmosfera, com temperaturas que podem chegar a -100°C , a maioria dos meteoros hipersônicos deposita sua energia, gerando ondas de choque infrassônicas detectáveis na superfície terrestre. Já na termosfera, que apresenta temperaturas muito mais altas, a densidade do ar é muito baixa, o que permite que as ondas de infrassom se propaguem por distâncias maiores sem perder tanta energia (Brown et al., 2008).

Embora a densidade do ar na mesosfera seja mais baixa do que nas camadas inferiores, as ondas de infrassom podem ser geradas e se propagar devido a fenômenos como a refração e reflexão. A propagação das ondas infrassônicas pode ser complexa, pois, ao passar de uma camada para outra com características físicas diferentes, como densidade e temperatura, a onda pode mudar de direção e até retornar em direção à superfície. Isso ocorre devido à mudança na velocidade de propagação da onda nas diversas camadas atmosféricas. A onda de choque gerada pelo meteoro pode, portanto, se propagar para cima em direção à termosfera e depois descer em direção à superfície, ou até se refletir nas camadas superiores (Arrowsmith et al., 2008; Kalinowski et al., 2010).

Para que a onda de infrassom gerada pelo meteoro seja detectada na superfície, é essencial que existam condições favoráveis, tais como distância entre o meteoro e o observador, ruído de fundo no local de detecção e a propriedade da trajetória do meteoro.

A trajetória deve estar alinhada de maneira a permitir que a onda se propague em direção ao ponto de observação. Caso contrário, a onda pode ser desviada, não sendo detectada. Além disso, a energia da onda deve ser suficiente forte para superar as perdas de energia durante a propagação e ser superior ao ruído ambiente (Kalinowski et al., 2010; Brown et al., 2008).

A altura em que os meteoroides entram na atmosfera da Terra pode variar, mas para que gerem ondas de infrassom, a interação com a atmosfera deve ocorrer em altitudes onde o número de Knudsen (Kn) seja muito menor que 1 ($Kn \ll 1$) (Fig.8). O número de Knudsen é um parâmetro que caracteriza o regime de fluxo ao redor do meteoróide e é definido como a razão entre o caminho livre médio das moléculas de gás (a distância média que uma molécula percorre antes de colidir com outra) e uma dimensão característica do meteoróide, como seu diâmetro (Kalinowski et al., 2010). Matematicamente, é expresso por:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (8)$$

Onde λ é o caminho livre médio das moléculas de gás e L é o diâmetro do meteoróide.

- Quando $Kn \gg 1$ (Fig.8), o caminho livre médio das moléculas é muito maior que o meteoróide, e as colisões entre moléculas são raras. Isso caracteriza um fluxo livre molecular, típico de altitudes elevadas, como a exosfera e a termosfera superior, onde a atmosfera é extremamente rarefeita. Nessa região, a interação entre o meteoróide e o ar é muito fraca (Kalinowski et al., 2009).

- Quando $Kn \ll 1$ (Fig.8), o caminho livre médio é muito menor que o meteoróide, o que significa que as moléculas de gás colidem constantemente com sua superfície. Esse é o regime de fluxo contínuo, no qual o gás ao redor do meteoróide interage de forma mais eficiente, permitindo a dissipação de energia e a geração de ondas de choque e infrassom. Esse regime ocorre abaixo de aproximadamente 100 km de altitude, com um pico de geração de infrassom por volta de 80 km para meteoroides de tamanho centimétrico (Kalinowski et al., 2009).

O número de Knudsen é essencial para descrever como os meteoroides interagem com a atmosfera. Em altitudes mais elevadas, onde $Kn \gg 1$, as colisões entre moléculas e o meteoróide são pouco frequentes, resultando em um fluxo altamente não uniforme e uma interação fraca (Tsien, 1946; Kalinowski et al., 2009; Moreno-ibáñez et al., 2018). Já em

altitudes mais baixas, onde a densidade atmosférica aumenta e $Kn \ll 1$, o fluxo se torna contínuo, permitindo uma dissipação mais eficiente da energia (Anderson, 2006; Silber et al., 2017).

Além disso, para que um meteoróide produza ondas de infrassom detectáveis na superfície, é necessário que ele gere uma explosão suficientemente forte e tenha uma geometria favorável para a propagação dessas ondas atmosféricas (Kalinowski et al., 2009).

Portanto, o número de Knudsen é um fator essencial para compreender as interações entre meteoróides e a atmosfera em diferentes altitudes, influenciando tanto a dissipação de energia quanto a geração de fenômenos secundários, como o infrassom.

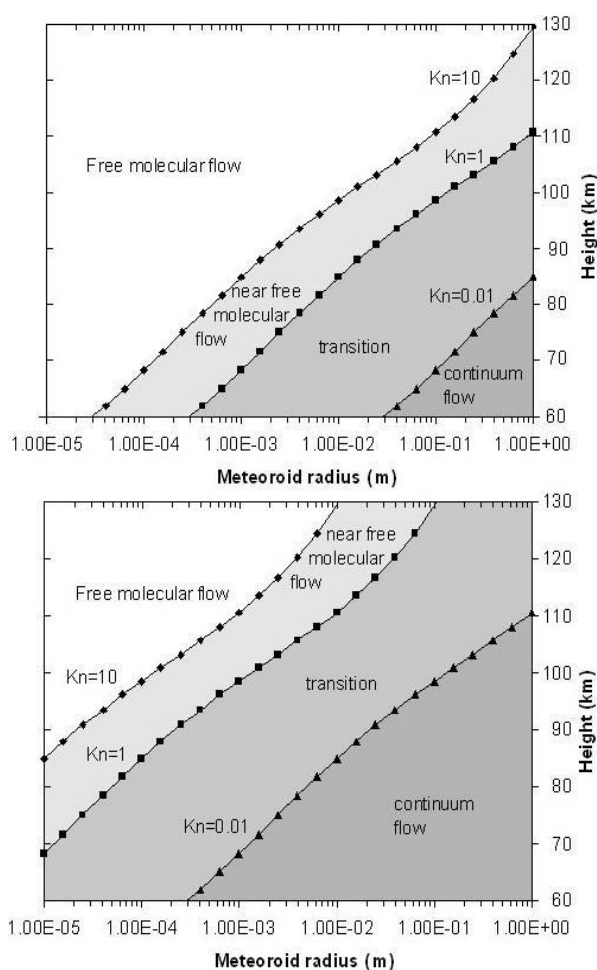


Figura 8- Relação entre altitude, raio do meteoróide e número de Knudsen. Adaptado de Campbell-Brown e Koschny (2004).

Quando um meteoróide entra na atmosfera terrestre em velocidades supersônicas, ele sofre processos de ablação, desintegração e, em alguns casos, explosão (Fig.5), gerando uma onda de choque que pode ser detectada como infrassom. Esse infrassom pode ser produzido em diferentes momentos da trajetória do meteoróide:

1. Durante a entrada atmosférica, quando o meteoróide viaja a velocidades hipersônicas, comprimindo e aquecendo o ar à sua frente, formando uma onda de choque contínua.

2. No momento da explosão, se houver uma fragmentação catastrófica, liberando uma grande quantidade de energia em um curto intervalo de tempo, o que intensifica a onda de choque.

A propagação e a detecção desse infrassom dependem de vários fatores, como a energia liberada, o tamanho do meteoróide e a altitude em que ocorre a interação mais intensa com a atmosfera. O raio de explosão corresponde à região ao redor do ponto de fragmentação onde os efeitos da onda de choque são mais intensos. Esse raio varia conforme a altura do evento, influenciando diretamente a propagação e a detecção do infrassom (Fig.9).

Altitudes mais elevadas (acima de ~60 km) → A atmosfera é mais rarefeita, o que faz com que a onda de choque se dissipe rapidamente, reduzindo a eficiência da propagação do infrassom e dificultando sua detecção.

Altitudes intermediárias (~40 a 60 km) → A onda de choque gerada pela entrada do meteoróide ainda é forte e pode ser detectada, dependendo das condições atmosféricas.

Altitudes mais baixas (abaixo de ~40 km) → O infrassom se propaga com maior intensidade, pois há mais moléculas de ar para interagir com a onda de choque, permitindo que ele viaje por distâncias maiores e seja mais facilmente detectado na superfície (Pierce, 1989).

O estudo de Ceplecha et al. (1998) demonstra que meteoros podem ser observados em uma ampla faixa de altitudes, de 120 km a 20 km, e que a probabilidade de detecção do infrassom depende diretamente da altura da entrada e da explosão, além da energia liberada. Em geral, meteoróides que explodem em altitudes mais baixas tendem a gerar ondas de choque mais intensas e detectáveis, enquanto explosões em altitudes elevadas resultam em ondas que se dissipam rapidamente.

A relação entre a altitude do meteoróide, o raio de explosão e a absorção da onda de choque pode ser visualizada em gráficos como na (Fig.9), que mostram que explosões mais próximas da superfície e ondas de choque geradas em altitudes médias tendem a produzir infrassom mais intenso e detectável, enquanto eventos em grandes altitudes atenuam rapidamente essas ondas.

Dessa forma, a altitude em que um meteoróide interage mais intensamente com a atmosfera é um fator determinante para sua detecção por infrassom, influenciando a forma como a energia da onda de choque se dissipa e se propaga pela atmosfera.

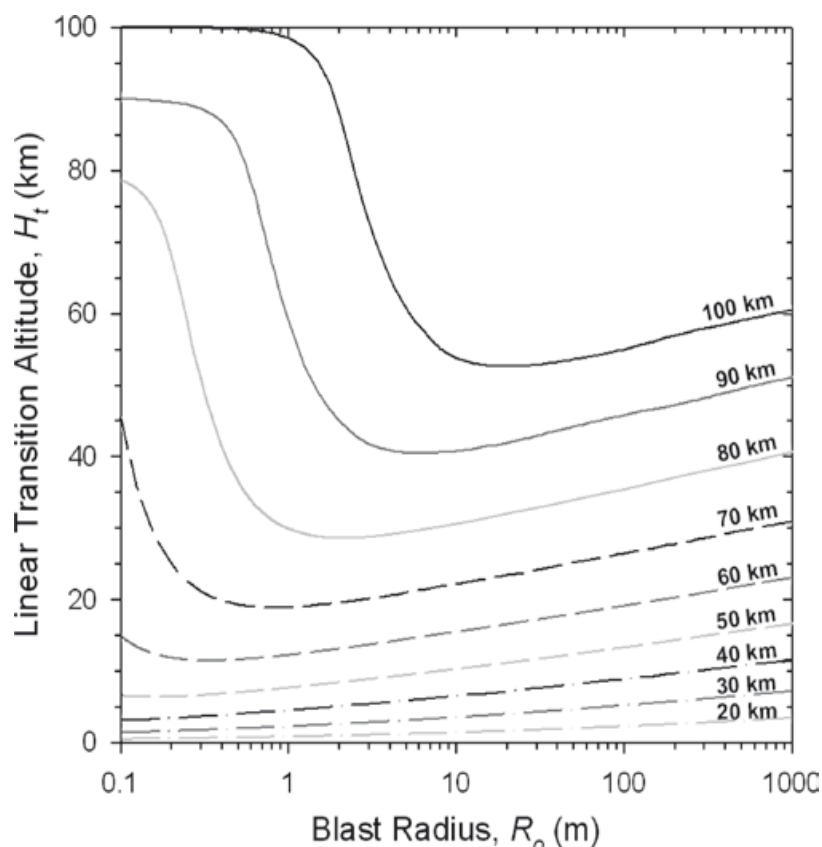


Figura 9- Relação entre a altitude de transição linear (H_t) e o raio da explosão (R_o) para diferentes altitudes de entrada do meteoróide. As curvas representam altitudes iniciais variando de 20 km a 100 km. Observa-se que, em altitudes mais elevadas, o raio da explosão é menor, resultando em uma dissipação mais rápida da onda de choque. Já para altitudes mais baixas, o raio da explosão aumenta, favorecendo a propagação do infrassom na atmosfera. Fonte: Le Pichon et al. (2009); Kalinowski et al. (2009).

2.5 Eventos históricos de meteoróides

Meteoros desempenham um papel significativo na produção de ondas infrassônicas (McIntosh et al., 1976). Estima-se que, em média, ocorram mais de dois meteoros explosivos com rendimentos efetivos de 1 quilotonelada (kT) ou mais a cada ano em escala global (ReVelle 1997; Brown et al. 2002).

Os sinais gerados por meteoros geralmente apresentam frequências entre 0,01 e 20 Hz, com amplitudes variando de 0,01 a 10 Pa. Esses sinais costumam ser complexos, frequentemente apresentando dois ou mais grupos de ondas, resultantes da refração em diferentes camadas da alta atmosfera (McIntosh et al., 1976; ReVelle, 1997).

Um dos eventos históricos mais notáveis envolvendo um meteoro foi o Evento de Tunguska, ocorrido em 30 de junho de 1908, na Sibéria (NASA, 2023). Na ocasião, um objeto extraterrestre, possivelmente um pequeno asteroide, explodiu a vários quilômetros acima da superfície terrestre, gerando ondas de choque que foram detectadas em diversas regiões da Rússia e da Europa (Whipple, 1930).

O primeiro estudo sistemático sobre o local foi conduzido pelo geólogo russo Leonid Kulik, que iniciou expedições em 1921. Ele identificou evidências como árvores queimadas e derrubadas em uma extensa área próxima ao rio Podkamennaya Tunguska. No entanto, apesar das diversas investigações ao longo dos anos, a ausência de uma cratera de impacto e de fragmentos identificáveis do corpo celeste mantém o Evento de Tunguska como um mistério não totalmente resolvido. Hipóteses sugerem que o objeto poderia ter sido um cometa ou um asteroide, mas a falta de evidências diretas ainda gera debates entre os pesquisadores (NASA, 2023).

Os estudos sobre esse evento ganharam maior atenção na década de 1930, quando Whipple publicou uma análise pioneira dos fenômenos geofísicos associados ao impacto. Ele utilizou registros de microbarógrafos localizados no Reino Unido para analisar as ondas de pressão geradas pela explosão. Esses microbarógrafos, desenvolvidos por Shaw e Dines no início do século XX, foram os primeiros a registrar tais ondas atmosféricas a grandes distâncias (Shaw & Dines, 1904). A análise desses registros permitiu compreender melhor a propagação das ondas geradas pelo impacto, tornando-se uma ferramenta essencial para estudos sobre eventos similares (Le Pichon, Blanc & Hauchecorne, 2009).

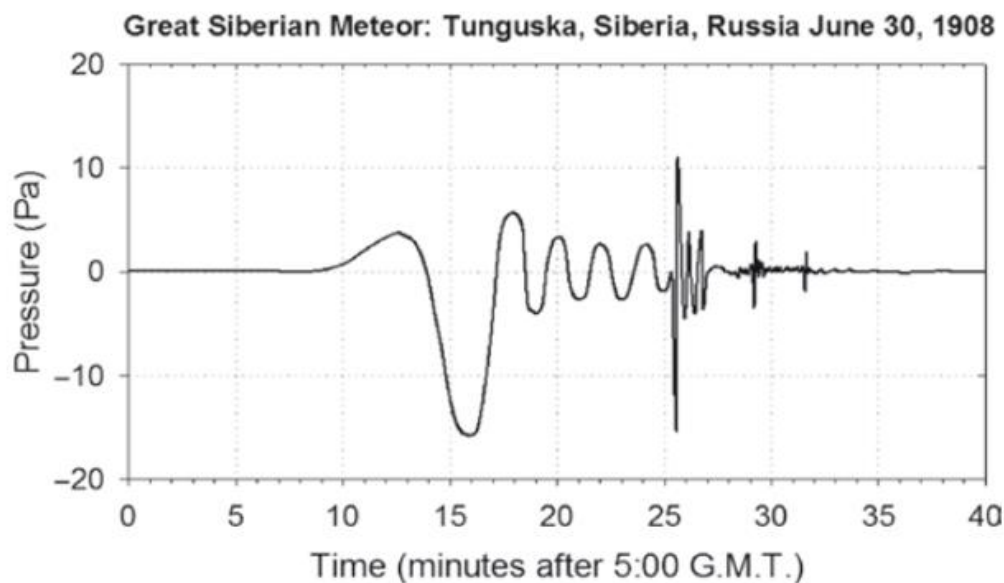


Figura 10- Traço composto dos sinais de pressão atmosférica registrados em toda a Europa do Grande Meteoro Siberiano, em 30 de junho de 1908 (após Whipple 1930). Fonte: (Le Pichon., et al 2009).

Os registros históricos de eventos infrassônicos transcenderam seu contexto original, desempenhando um papel essencial no desenvolvimento das estações de infrassom do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS). Os avanços pioneiros proporcionados pelos microbarógrafos na década de 1930 foram fundamentais para a evolução da tecnologia atual, permitindo que o IMS monitorasse e analisasse eventos geofísicos em escala global. Essa contribuição consolidou uma base duradoura para a ciência e a tecnologia associadas ao estudo de fenômenos atmosféricos extremos.

A explosão do Evento Tunguska, estimada em até 10 megatons de TNT (Gladysheva, 2023), teve proporções catastróficas, devastando vastas áreas da Sibéria. Apesar de sua magnitude, as manifestações sonoras associadas a meteoros caíram no esquecimento por décadas. Foi somente com a escalada da Guerra Fria, na década de 1950, que houve um avanço significativo na detecção e análise do infrassom gerado por esses corpos celestes.

No dia 15 de fevereiro de 2025, completou-se 12 anos desde a queda do asteroide de Chelyabinsk, na Rússia. Com aproximadamente 20 metros de diâmetro, esse objeto gerou uma explosão aérea com energia estimada entre 500 e 600 quilotons de TNT (Brown et al., 2013). O impacto da onda de choque danificou milhares de edifícios e feriu centenas de pessoas, principalmente devido aos estilhaços de vidro provenientes das janelas quebradas pela súbita variação de pressão (Popova et al., 2013).

Quando um meteoróide de grande massa penetra nas camadas mais densas da atmosfera, como a mesosfera inferior e a estratosfera, sua interação com o ar intensifica fenômenos como a emissão de luz e a ablação – processo em que o calor extremo faz com que o material do meteoróide se vaporize. Em casos de objetos de grande porte, toneladas de material podem ser consumidas antes que a resistência atmosférica cause sua fragmentação e explosão (Ceplecha et al., 1998). Esse processo é comparável a uma colisão contra uma barreira sólida.

Foi exatamente o que ocorreu com o meteoróide de Chelyabinsk. Durante sua entrada na atmosfera, uma fração significativa de sua energia cinética foi dissipada, resultando em uma explosão aérea que gerou uma poderosa onda de choque. Poucos minutos após o evento, essa onda atingiu o solo, sendo percebida como um estrondo intenso, similar a uma explosão (Brown et al., 2013; Popova et al., 2013).

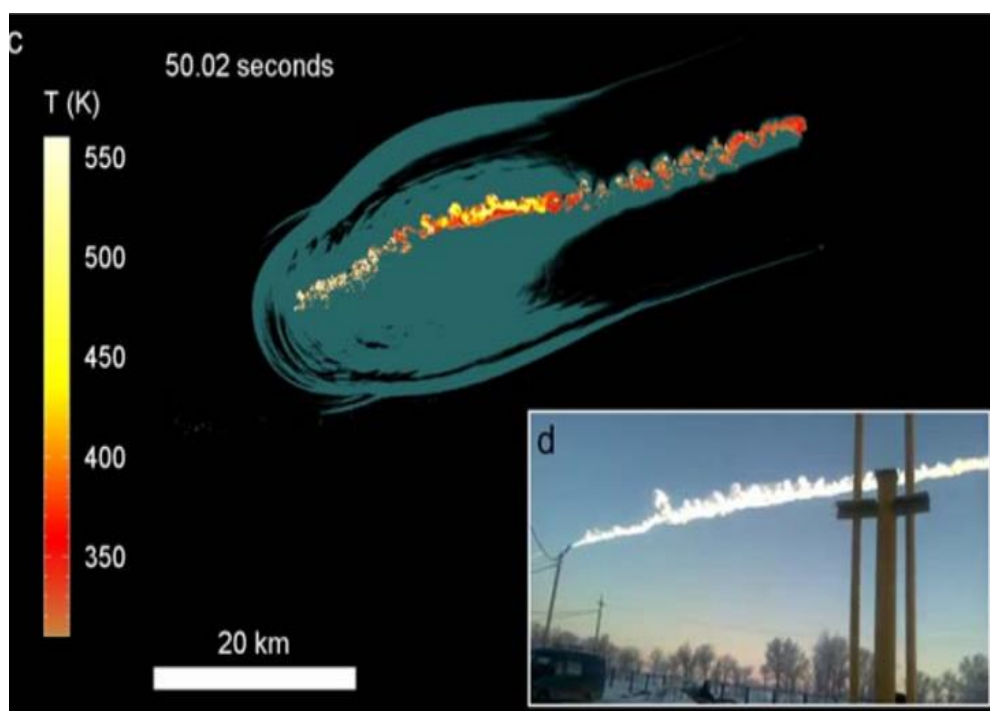


Figura 11- Meteoro de Chelyabinsk. Fonte: Le Pichon et al.2013;(Brown et al.2013; Pilger et al.,2015).

O evento foi detectado por diversas estações da rede IMS, com 20 delas registrando os dados (Le Pichon et al., 2013; Brown et al., 2013; Pilger et al., 2015). Além disso, o fenômeno foi monitorado globalmente por câmeras de observação e satélites, como o GOES-16 e o GOES-17.

A figura 12 ilustra a família associada a este fenômeno, a fim de proporcionar uma compreensão do comportamento do sinal. O processamento dos dados foi conduzido utilizando informações da estação I31NZ (Estação do Kazaquistão), localizada em Aktyubinsk, Rússia, a uma distância de 593,8 Km (quilômetros) do local do evento relacionado ao Asteroide de Cheliabinsk. O back-azimute registrado pelos sensores foi de 29° graus, enquanto o azimuth calculado foi de 23° graus. Adicionalmente, a frequência fornecida pelo software foi de 0.975 Hz, a velocidade aparente atingiu 0.353 Km/s e a duração total foi de 1230 segundos.

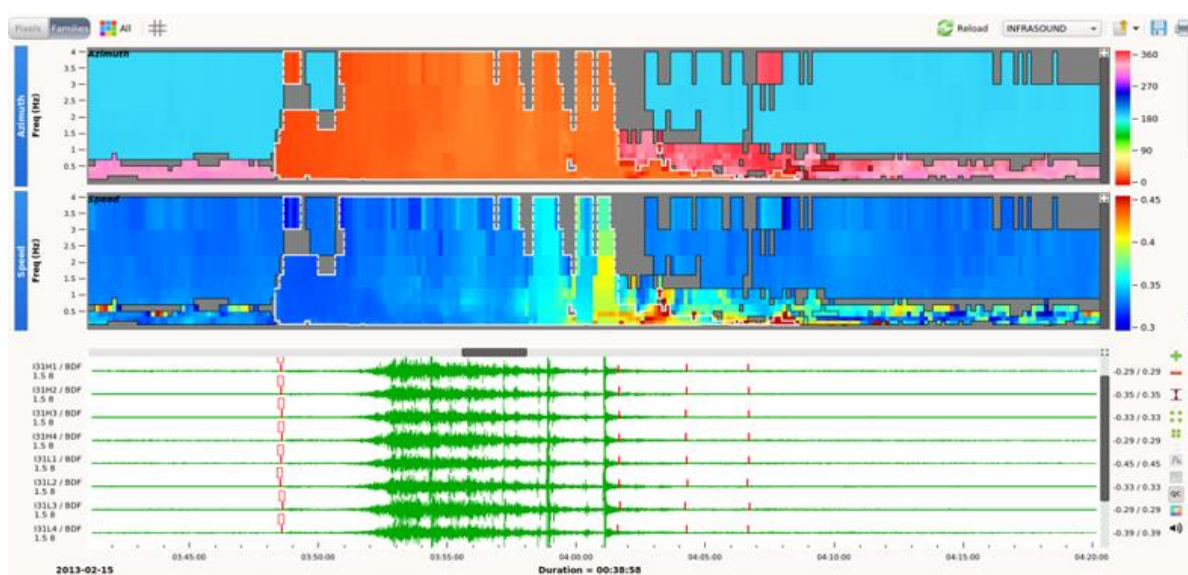


Figura 12- Sinal registrado pela I31 KZ -Ondas infrassônicas geradas pelo Asteroide de Chelyabinsk. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior).

CAPÍTULO 3- ESTAÇÃO INFRASSÔNICA DE BRASÍLIA

No Brasil, há uma única estação infrassônica, localizada no Parque Nacional de Brasília (PNB), operada e mantida pelo Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS – UnB) em Parceria com a CTBTO (Organização do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares). Essa estação do IMS com código de identificação: I09BR (IS09), foi instalada em julho de 2001 com o objetivo de contribuir para a verificação do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBT) (Barros e Fontenele, 2002, p. 10).

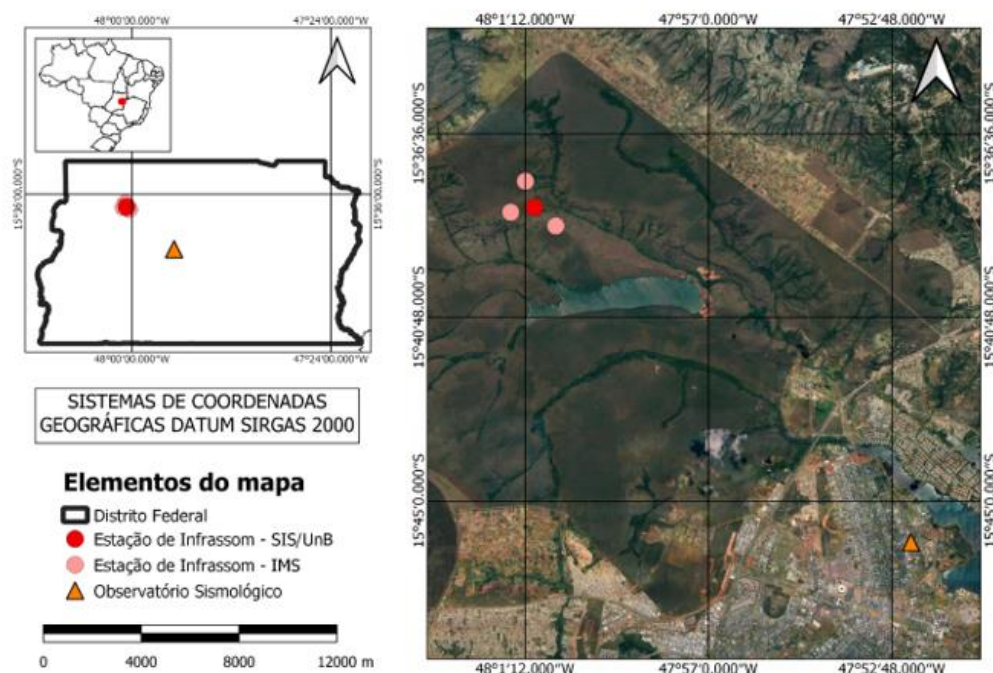


Figura 13- Estação infrassônica IS09 instalada no interior do Parque Nacional de Brasília, em que o triângulo representa o Observatório Sismológico, os três círculos rosas são os elementos do arranjo e o círculo vermelho, o elemento central da estação.

A estação infrassônica I09BR é composta por um arranjo de quatro elementos (Fig.13), dispostos nos vértices de um triângulo equilátero, com um elemento instalado no centro. Nesses elementos, estão instalados microbarômetros, capazes de detectar variações de pressão do ar provenientes de diversas fontes de infrassom. A determinação do azimute, ou da direção da frente de ondas é feita com base na diferença nos tempos de chegada da onda de infrassom em cada elemento do arranjo. A conversão do sinal analógico, detectado pelos microbarômetros para o formato digital é realizada por um digitalizador. Esse processo é crucial para a representação numérica e subsequente eficiente processamento dos dados.

Os dados detectados pelos quatro elementos do arranjo são transmitidos para o SIS – UnB no Campus Darcy Ribeiro onde são gravados, processados, analisados, armazenamento e retransmitidos para o Centro Internacional de Dados (IDC) em Viena, Áustria (Christie & Campus, 2009).

As formas de ondas dos eventos detectados nos 4 ou mais elementos de uma estação infrassônica são processados utilizando o algoritmo de Correlação Multicanal Progressiva (PMCC) (Cansi, 1995 e Le Pichon e Cansi, 2003). Esse algoritmo analisa as formas de

ondas registradas em elemento da estação para identificar os eventos infrassônicos eventualmente detectados.

A rede IMS é capaz de detectar qualquer teste nuclear com potência superior ou equivalente a 1 Kt de trinitrotolueno (TNT) (Christie et al., 2001).

CAPÍTULO 4 – PROCESSAMENTO DE DADOS INFRASSÔNICOS

Para criar o catálogo de bólidos e bolas de fogo detectados pelas estações infrassônicas na América do Sul e nas estações oceânicas próximas, foi utilizado um software desenvolvido pela French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA), em colaboração com a CTBTO. O programa se baseia no algoritmo de Progressive Multichannel Correlation (PMCC), originalmente proposto por Cansi (1995) e posteriormente aprimorado por Cansi e Le Pichon (2008).

O objetivo principal do PMCC é processar as formas de onda recebidas pelas estações infrassônicas da rede IMS (Mialle et al., 2018). Esse algoritmo é uma ferramenta importante para análise de dados infrassônicos (Le Pichon et al., 2009), funciona em 11 bandas de frequência diferentes, variando entre 0,07 e 4,0 Hz, e utilizando janelas temporais sequenciais (ver Figuras 14 e 15). A primeira etapa do processo é a detecção dos "pixels PMCC", que são escolhidos com base na qualidade da correlação e na consistência dos sinais. Esses pixels são agrupados em "famílias PMCC" (Fig.16), que compartilham características semelhantes dos sinais registrados (Le Pichon, Blanc, & Hauchecorne, 2009).

Para caracterizar as famílias PMCC, vários parâmetros são analisados, como azimute, velocidade de rastreamento horizontal, composição de frequências, consistência e valores de correlação. Outros parâmetros calculados incluem duração do sinal, estatísticas de Fisher (Fstat) e número de pixels dentro de cada família. As estatísticas de Fisher ajudam a avaliar a coerência direcional dos sinais infrassônicos, ou seja, se os sinais detectados possuem uma direção consistente ou são dispersos (Le Pichon, Blanc, & Hauchecorne, 2009). Além disso, a velocidade de rastreamento horizontal refere-se à velocidade com que as frentes de onda infrassônicas se propagam horizontalmente, o que é fundamental para entender a dinâmica do evento infrassônico.

Outros parâmetros importantes incluem:

- Velocidade aparente (em km/s), que representa a velocidade das frentes de onda infrassônicas.
- Duração da família de pixels (em segundos).
- Frequência média da família PMCC, que indica a frequência predominante nos sinais.
- Correlação entre as formas de onda dos sensores.
- Amplitude máxima (em Pa), que é o pico do sinal infrassônico.
- Tamanho da família PMCC, que se refere ao número de pixels dentro de cada família.
- Número de elementos do arranjo, que indica a quantidade de sensores utilizados (Barros et al., 2021).

Esses parâmetros são calculados para fornecer uma análise detalhada dos eventos infrassônicos e sísmicos. O algoritmo PMCC está implementado no software DTK-GPMCC, que faz parte do pacote NDC-in-a-Box, desenvolvido pela CTBTO. O DTK-GPMCC (Detection and Tracking Kit - Generalized Progressive Multi-Channel Correlation) é utilizado para detecção e rastreamento automáticos de eventos infrassônicos e sísmicos, aplicando a correlação multicanal progressiva para processar os sinais registrados pelas estações do IMS (International Monitoring System) (Cansi, 1995).

Esse software fornece informações detalhadas sobre a localização e as características dos eventos detectados. O DTK-GPMCC também é integrado a outros módulos do NDC-in-a-Box, permitindo uma análise ainda mais completa e precisa dos dados infrassônicos e sísmicos.

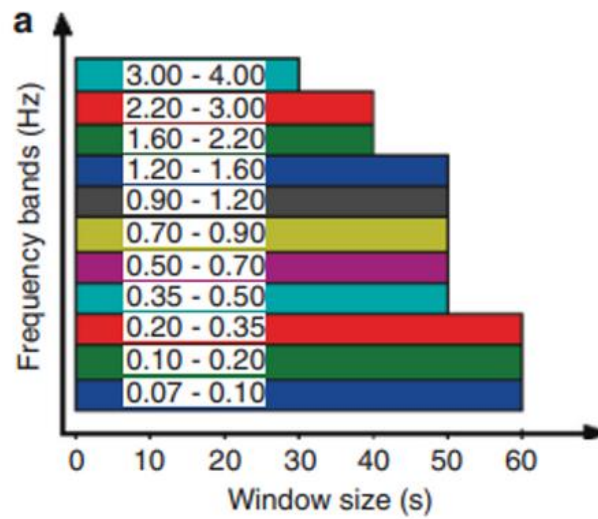


Figura 14- Duração das janelas de tempo para o processamento das formas de onda infrassônicas em função das 11 faixas de frequência. Fonte: Le Pichon et al., (2009).

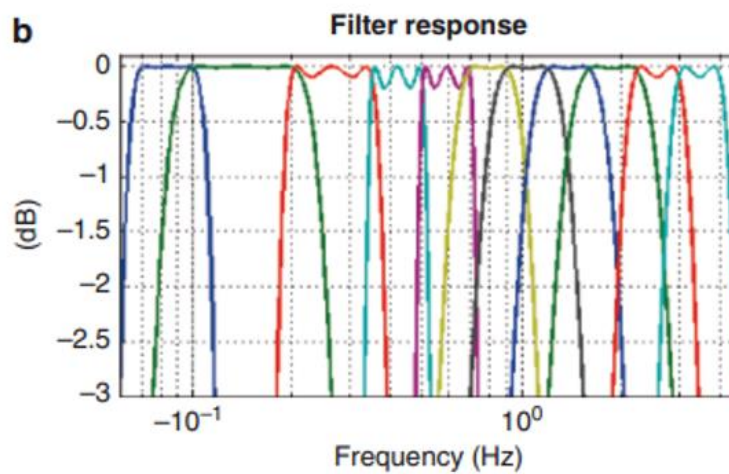


Figura 15- Curvas de resposta dos 11 filtros de Chebyshev utilizados na configuração PMCC. Fonte: Le Pichon et al., (2009).

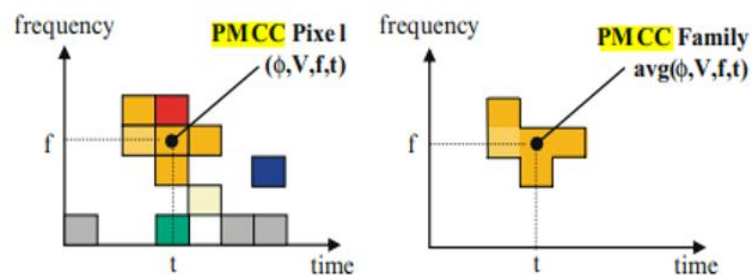


Figura 16- Família PMCC formada por pixels com características semelhantes de azimuth, velocidade de traço horizontal, frequência e tempo. Fonte: (Le Pichon., et al 2009).

CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA

O estudo foi realizado com base no banco de dados do **Center for Near-Earth Objects Studies (CNEOS)**, que fornece informações sobre latitude, longitude, hora do brilho máximo, energia emitida e velocidade dos bólidos e bolas de fogo detectados pelos sensores GLM (Geostationary Lightning Mapper). No período analisado (2018-2025), o GLM detectou **263 eventos** ao redor do mundo (Fig. 17).



Figura 17- Bólidos e bolas de fogo detectados no planeta terra pelos satélites GOES no período de 2018 a 2025 por satélites GOES.

Esses eventos foram buscados nos produtos do IDC, especificamente no SEL-3 (*Standard Event List*), onde apenas 14 eventos constavam. No entanto, ao analisar os registros das estações infrassônicas, verificou-se que outros eventos também foram detectados, desses ao todo foram **19** eventos que geraram ondas infrassônicas que foram detectadas pôr as estações deste estudo. Para confirmar a presença dessas ondas infrassônicas, foi necessário baixar e analisar as formas de onda de todas as estações sob estudo. Assim, foi realizado o download dos dados referentes a essas datas e analisado, por meio do software DTK-GPMCC do pacote NDC-IN-A-BOX, se as ondas infrassônicas dos respectivos eventos foram detectadas pelas estações da rede IMS localizadas na América do Sul. A análise considerou todas as estações sob estudo, incluindo aquelas situadas na América do Sul e em regiões oceânicas próximas (*ver Tabela 1*). A Figura 18 mostra as estações utilizadas neste estudo, bem como os respectivos eventos detectados.

Na sequência será feita uma apresentação sobre o satélite GOES, o sensor GLM e sobre os produtos do IDC (SEL-3), de onde as informações foram extraídas.



Figura 18- Eventos meteoróricos detectados por estações infrassônicas do IMS localizadas na América do Sul e regiões oceânicas.

5.1 Satélites GOES

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o banco de dados do Center for Near-Earth Object Studies (CNEOS), que contém informações sobre bólidos e bolas de fogo detectadas por sensores localizados nos Estados Unidos. Uma das ferramentas essenciais para a detecção desses eventos atmosféricos é o Geostationary Lightning Mapper (GLM) (Smith et al 2021), presente a bordo dos satélites meteorológicos GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites), operados pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Embora o GLM tenha sido projetado principalmente para monitorar relâmpagos, também é capaz de identificar bolas de fogo e bólidos devido à sua sensibilidade a emissões de luz intensa associadas a esses fenômenos (Smith et al 2021).

O GLM opera na faixa de luz visível e no espectro próximo ao infravermelho, o que lhe permite observar as rápidas e intensas mudanças de brilho, como aquelas causadas por relâmpagos, mas também os brilhos súbitos e intensos de bolas de fogo ou bólidos. As informações obtidas pelo GLM são valiosas para o estudo de eventos atmosféricos

extremos, fornecendo dados sobre a frequência e a distribuição geográfica desses fenômenos. O site GLM Bolidos disponibiliza esses dados para análise, permitindo o acompanhamento desses eventos celestes (NASA, 2023).

5.2 Produtos do IDC (SEL-3)

O estudo focalizou os meteoroides que penetraram na atmosfera durante o período de 2018-2025, utilizando dados divulgados pelo CNEOS. A busca por sinais infrassônicos foi realizada em estações específicas da América do Sul e adjacências em ilhas oceânicas do Atlântico e Pacífico, incluindo I09BR, I41PY, I01AR, I02AR, I08BO, I13CL, I14CL, I20EC, I21FR, I25FR, I49GB, I50GB e I11CV (Tabela 1). Esta pesquisa, realizada no site do CTBTO com dados do SEL3 (Lista de eventos padrão 3- contém o SEL 2 refinado com quaisquer outros dados de chegada tardia), visou identificar bólidos e bolas de fogo que geraram ondas infrassônicas. Dos eventos registrados entre 2018-2025, apenas **19** produziram sinais infrassônicos que chegaram às estações mencionadas. Isso se deve aos fenômenos de propagação atmosférica, a altura em que ocorreu o evento e a energia associada. A localização das estações também influencia, pois, a distância da fonte até os microbarógrafos pode afetar a detecção.

O processo de desenvolvimento do catálogo envolveu inicialmente a elaboração de scripts para buscar dados no IDC, seguido pelo download dessas informações para, posteriormente, utilizar o software DTK-GPMCC no processamento dos dados e análise para identificar os possíveis bólidos. Finalmente, um catálogo foi compilado, tabulando parâmetros como frequência, velocidade, azimute da frente de ondas e duração das detecções.

Para melhor compreensão, será apresentada a análise detalhada de alguns desses bólidos.

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DE SINAIS INFRASSÔNICOS

6.1 Bólido do dia 28/07/2022

No dia 28 de julho de 2022, um evento ocorreu a sudeste da Ilhas Galápagos (Equador), gerando ondas infrassônicas detectadas por três estações do IMS: I20EC (Fig.19) no Equador e I08BO (Fig.20) na Bolívia e I09BR (Fig.21) no Brasil. O evento foi registrado pelos sensores GLM às 01:36 UTC (Tempo Universal Coordenado). De acordo

com o banco de dados da CNEOS, o bólido associado estava viajando a uma velocidade de 29,9 km/s.

Ao analisar os dados de infrassom registrados pela estação IS20 no Equador, sendo a estação mais próxima, com aproximadamente 670 km de distância, foram identificados sinais de infrassom (Fig.19). A frente de ondas infrassônicas atingiu a estação 39 minutos após a sua detecção pelo sensor GLM, cujo brilho máximo foi observado na Ilhas Galápagos. O evento foi registrado às 2:15 UTC (Tempo Universal Coordenado), próximo ao horário previsto para a chegada da frente de onda.

A frente de ondas apresentou um back-azimute de $147,2^\circ$, com o azimuth calculado da estação até a localização fornecida para o bólido de 149° graus. Os sensores microbarográficos indicaram uma frequência de 0,843 Hz, enquanto a frente de onda estava a uma velocidade de 0,347 km/s e com uma duração de 280 segundos.

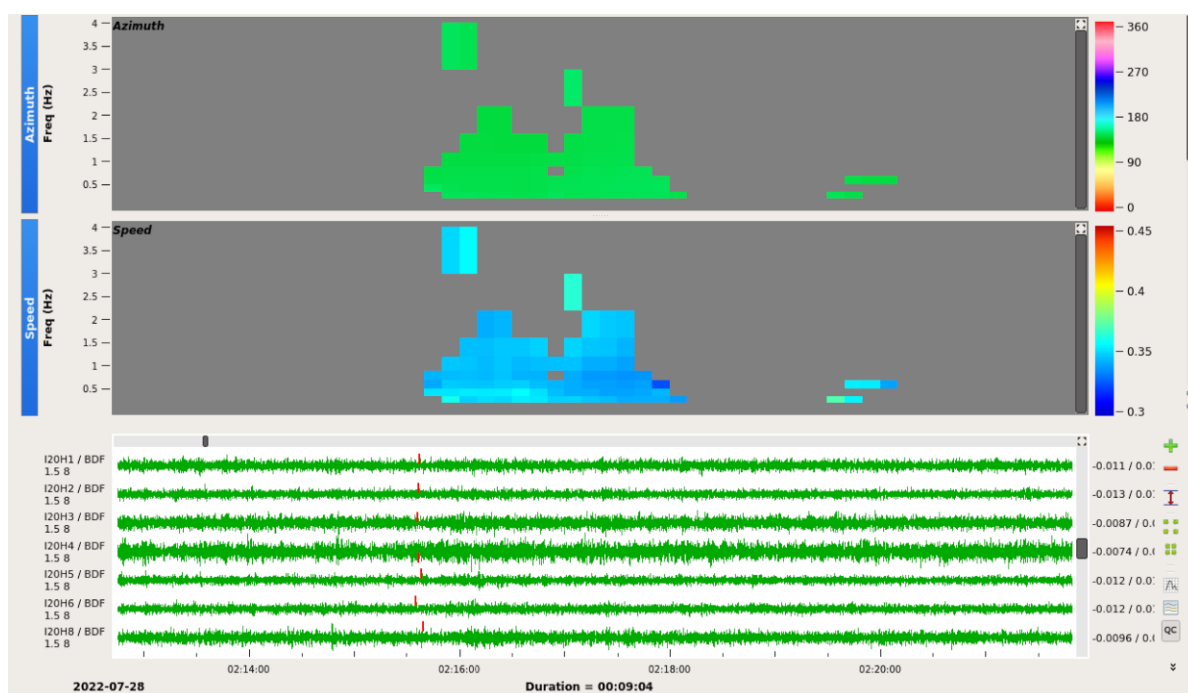


Figura 19- Sinal de infrassom gerado pelo bólido do dia 28 de julho de 2022, detectado na estação I20EC, localizada no Equador. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior).

Às 03:45 UTC, a frente de onda atingiu a estação IS08(Bolívia), localizada a 2378 Km do ponto de origem do evento (Fig. 20). Em conformidade com a estimativa de 01:57 para a propagação da onda até a estação, a chegada ocorreu com uma pequena variação temporal, alguns minutos depois. O back azimuth, registrado pelo DTK-GPMCC foi de $294,2^\circ$ graus, apresentando uma proximidade notável com o azimuth calculado da fonte até

a estação de 298° graus. A frente de ondas, com duração de 420 segundos, exibiu uma frequência de 0.850 Hz e uma velocidade aparente de 0,337 km/s.

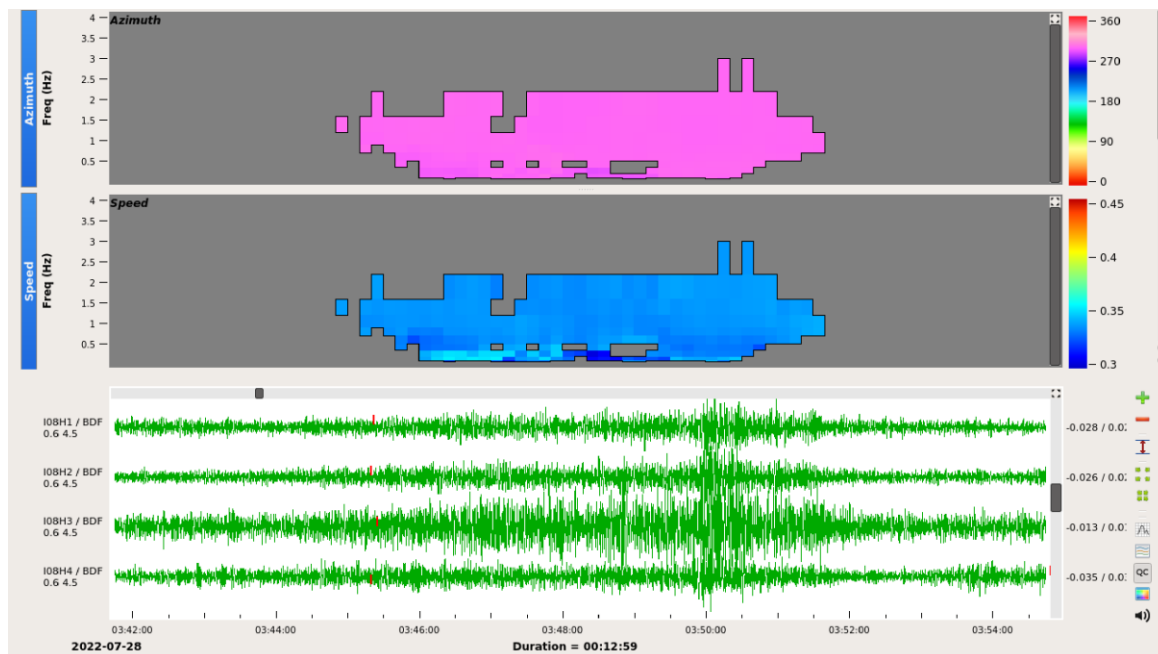


Figura 20- Sinal de infrassom gerado pelo bólido do dia 28 de julho de 2022, detectado na estação I08BO, localizada na Bolívia. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior).

O sinal recebido pela estação I09BR apresentou-se com menor clareza (Fig.21). O evento em questão ocorreu a uma distância de 4452 Km (quilômetros) da fonte. A onda levaria cerca (03:38) para atingir a estação, chegando por volta das 05:40 UTC nos sensores microbarógrafos. Na análise horária, tornou-se possível distinguir duas famílias com back azimutes distintos: uma marcada por 277° *graus*, caracterizada por um menor número de pixels, e outra com 137° *graus*.

A interpretação aponta para a possibilidade de o evento associado ao bólido corresponder ao back-azimute 277° *graus*, alinhando-se de maneira coerente com o azimute calculado da fonte até a estação de Brasília 278° *graus*. Este evento exibiu uma frequência de 0,561 Hz, inferior à observada em outras estações, apresentando também uma velocidade aparente de 0,354 km/s, com uma duração total de 390 segundos.

A localização da explosão que gerou a onda infrassônica foi estimada por meio da triangulação dos raios azimutais das estações, resultando nas coordenadas de Latitude $8^\circ 4.878'S$ e Longitude $85^\circ 26.328'O$ (Fig.22).

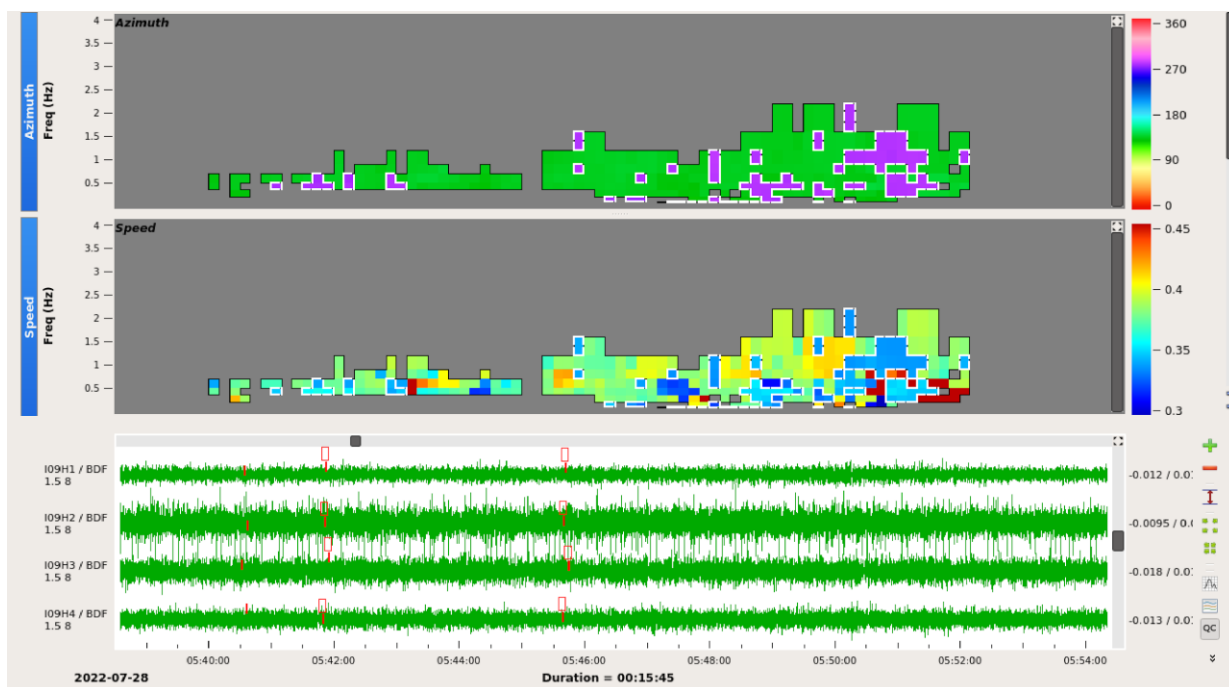


Figura 21- Sinal de infrassom referente ao bólido do dia 28 de julho de 2022, detectado na estação I09BR, localizada em Brasília-DF. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior).

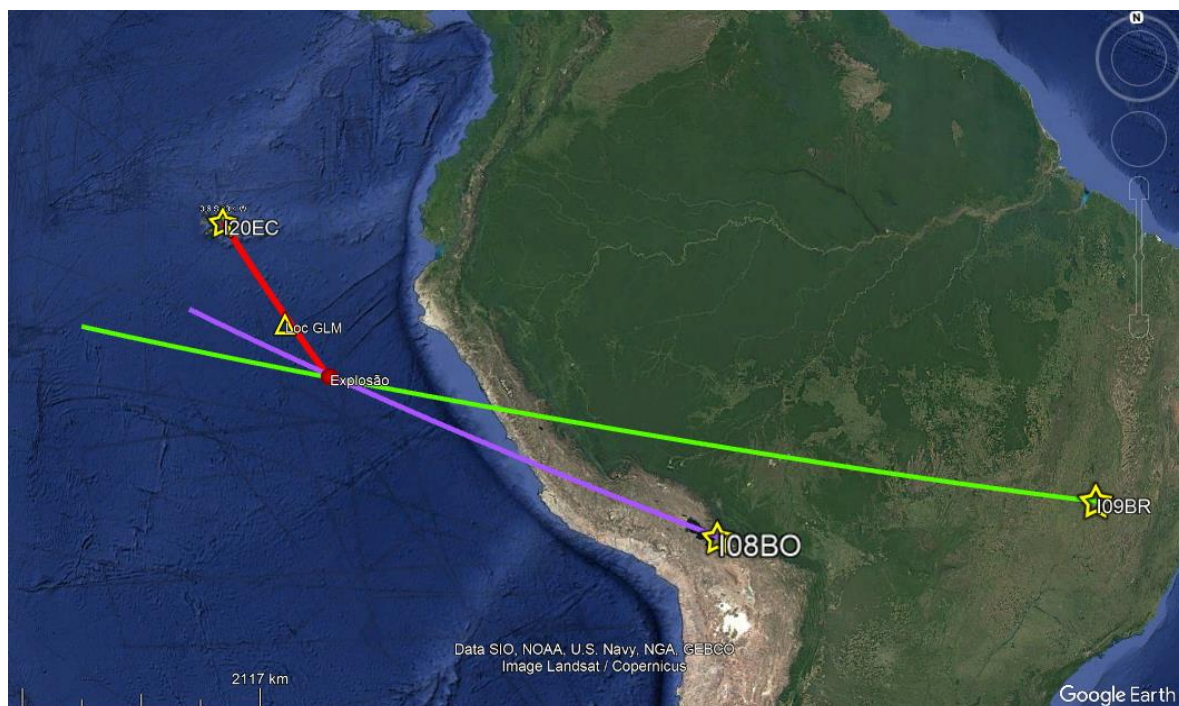


Figura 22- Localização da explosão do bólido de 28 de julho de 2022. A bolinha vermelha indica a posição estimada da explosão, enquanto o triângulo amarelo representa a localização registrada pelo sensor GLM. As estrelas amarelas correspondem às estações de monitoramento, e as linhas mostram os raios azimutais dessas estações apontando para a fonte do evento.

6.2 Bólido do dia 06/12/2019

No dia 06 de dezembro de 2019, às 10:28 UTC, um bólido teve seu brilho máximo identificado pelo sensor GLM no litoral, próximo à Fortaleza, sendo detectado por três estações de infrassom: I09BR (Fig.23) no Brasil, I41PY (Fig.24) e I08BO (Fig.25) na Bolívia. Segundo o CNEOS, este bólido viajava a uma velocidade de 19,5 Km/s.

A estação mais próxima, I09BR, estava a 1788 Km da fonte, e a frente de onda levaria (01:27). O evento foi registrado às 11:53 UTC pelos sensores microbarógrafos, apresentando os seguintes parâmetros: frequência de 1,046 Hz, back azimuth de 39 ° graus, azimuth calculado 39.23 ° graus, velocidade aparente de 0,346 Km/s e duração de 800 segundos.

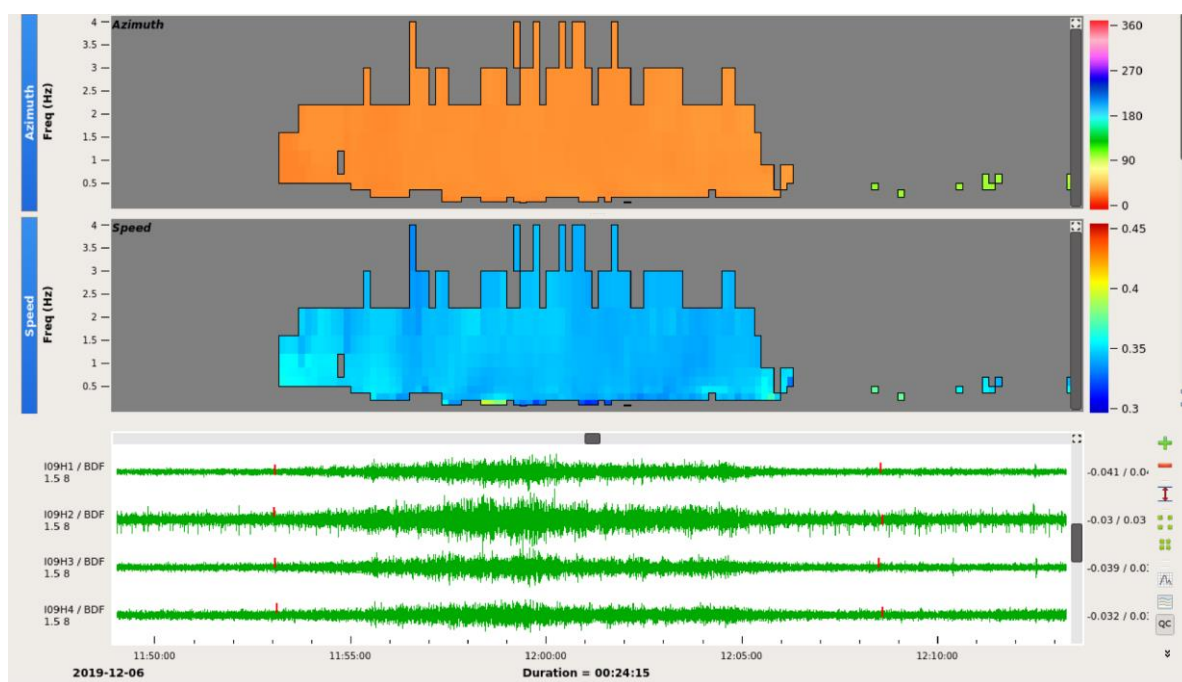


Figura 23- Sinal de infrassom referente ao bólido dia 06/12/2019, detectado na estação I09BR, localizada em Brasília-DF. Dados do back-azimuth médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior).

Na estação I41PY, localizada no Paraguai a aproximadamente 3299 Km da fonte, a onda levaria (02:41) para atingir a estação (Fig.24). O evento foi registrado nos sensores às 13:21 UTC, com um back azimuth de 39° graus e azimuth calculado de 39.5° graus da estação até a fonte. A frente de onda apresentou uma velocidade de 0.349 Km/s, frequência de 1.156 Hz e duração de 830 segundos.

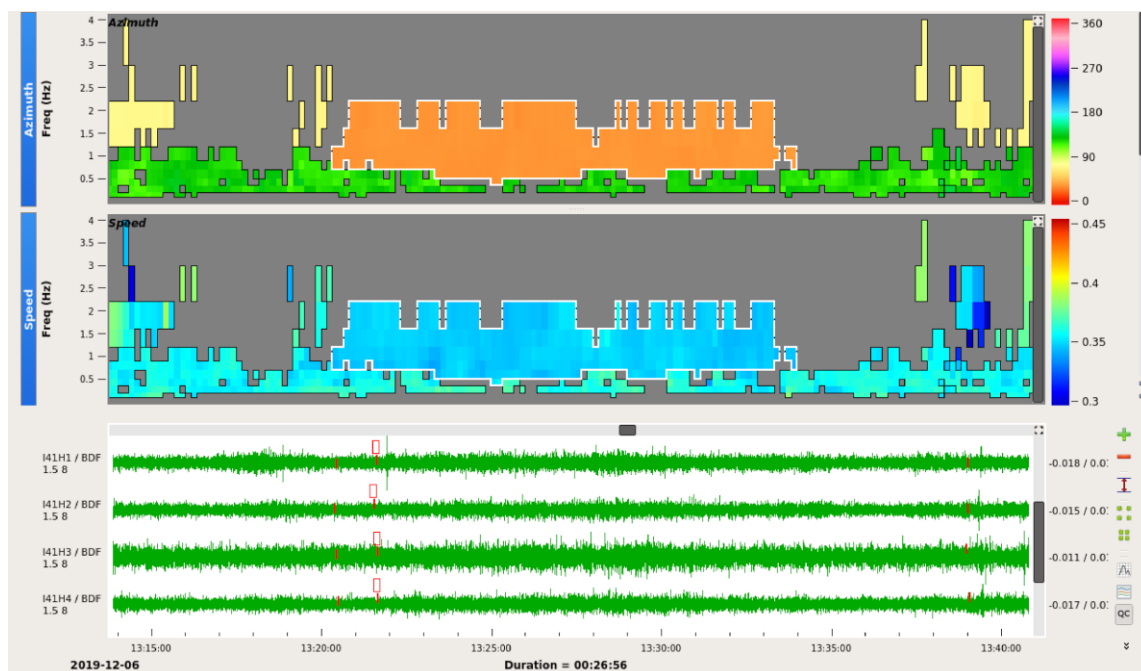


Figura 24-Sinal de infrassom referente ao bólido do dia 06/12/2019, detectado na estação I41PY, localizada no Paraguai. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior).

Na estação mais distante, I08BO, localizada na Bolívia a aproximadamente 3614 Km da fonte, foi registrado um sinal às 13:39 UTC (Fig.25). O horário coincide com a estimativa do tempo em que a frente de onda demoraria para alcançar a estação, estimado em (02:57). O back azimuth foi 67° graus, com azimuth calculado 68° . O evento apresentou uma frequência de 1.298 Hz, velocidade aparente de 0.341 Km/s e duração de 370 segundos.

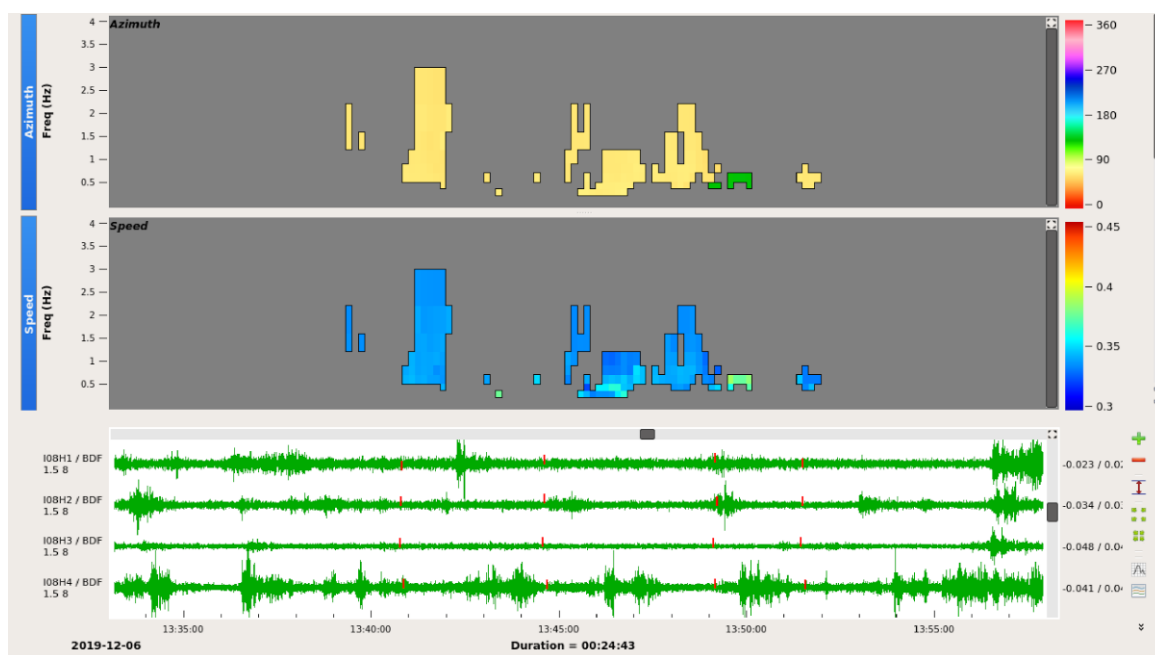


Figura 25- Sinal de infrassom referente ao bólido do dia 06/12/2019, detectado na estação I08BO localizada na Bolívia. Dados do back-azimute médio (retângulo superior), velocidade média de fase (retângulo inferior) e sinal no domínio do tempo (parte inferior).

6.3 Análise de formas de ondas de evento meteórico próximo à estação

No dia 21 de abril de 2022, ocorreu um evento meteórico com brilho máximo detectado às 22:15 UTC, a uma altitude de 28,4 km, viajando a uma velocidade de 12,7 km/s. A localização do evento foi próxima à estação I02AR (Argentina), a aproximadamente 145 km de distância. Dessa forma, a onda infrassônica levaria cerca de 7 minutos para atingir a estação e, conforme esperado, foi registrada exatamente às 22:22 UTC.

Diferente da maioria dos eventos analisados, que ocorreram em regiões oceânicas ou distantes das estações, este evento apresentou um sinal mais nítido no domínio do tempo. Isso contrasta com sinais de eventos que percorreram trajetórias atmosféricas mais longas, os quais geralmente apresentam formas de onda reverberantes. Nesse caso, a onda teve um percurso mais direto até a estação. O evento foi detectado exclusivamente pela estação I02AR (Fig.26), com uma frequência de 1,149 Hz, velocidade de 0,373 km/s e azimute de 229° (Fig.27), coincidindo com o azimute calculado da fonte até a estação.

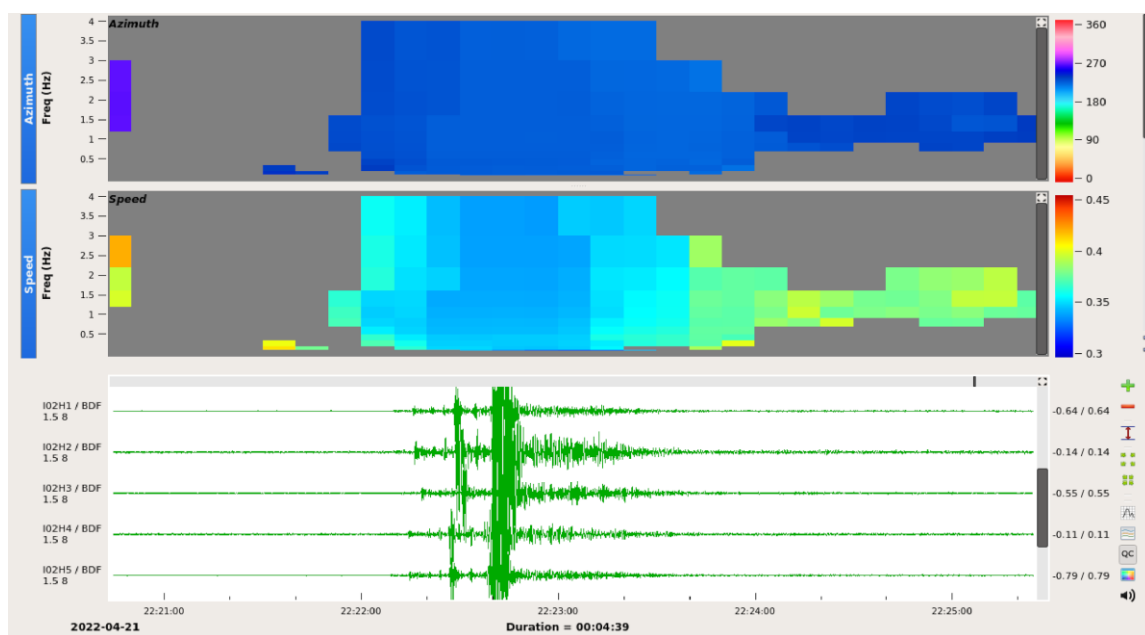


Figura 26- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 21/04/2022, detectado na estação I02AR, localizada na Argentina a cerca de 145 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimuth médio (229°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.373 km/s).

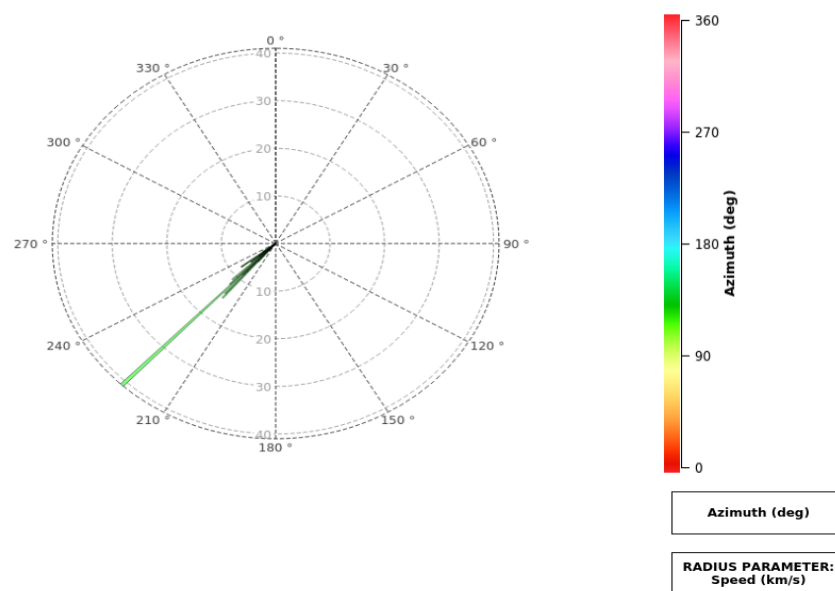


Figura 27- Polar Plot da estação I02AR referente ao back-azimuth da frente de onda do bólido do dia 21 de abril de 2022.

6.4 Bólidos mais energéticos

6.4.1 Bólido do dia 22/06/2019 – 6 Kt

Dos eventos meteóricos estudados, dois apresentaram energias superiores a 1 Kt de TNT, indicando que possuíam massas mais elevadas. Os bólidos em questão foram registrados em 22/06/2019 e 07/02/2022, com energias estimadas em 6 Kt e 7 Kt, respectivamente. Esses valores foram calculados a partir da luz visível emitida, utilizando os sensores GLM, que detectam flashes óticos de alta intensidade na atmosfera.

O evento de 22/06/2019 ocorreu no Mar do Caribe, a aproximadamente 523 km da Ilha de Guadalupe, onde está localizada a estação I25FR. No entanto, essa estação não estava em funcionamento no dia do evento, impossibilitando a obtenção dos dados. De acordo com o satélite GOES, o brilho máximo foi detectado às 21h30 UTC a uma altitude de 25 km e viaja a 19,5 km/s. Esse evento foi registrado por duas estações analisadas neste estudo: I20EC (Fig. 28), I08BO (Fig. 29).

A estação mais próxima I20EC (Fig. 28), localizada a aproximadamente 3.130 km da fonte. O sinal foi detectado às 00h14 UTC, o que está de acordo com o tempo estimado para a propagação da onda até o local. No entanto, no domínio do tempo, o sinal apresenta baixa nitidez, o que pode ser atribuído ao longo percurso atmosférico percorrido antes de sua detecção. A frequência registrada foi de 1,296 Hz, com um back-azimute de 54,5° e uma velocidade de propagação da frente de onda de 0,352 km/s com duração do sinal de 1130 segundos.

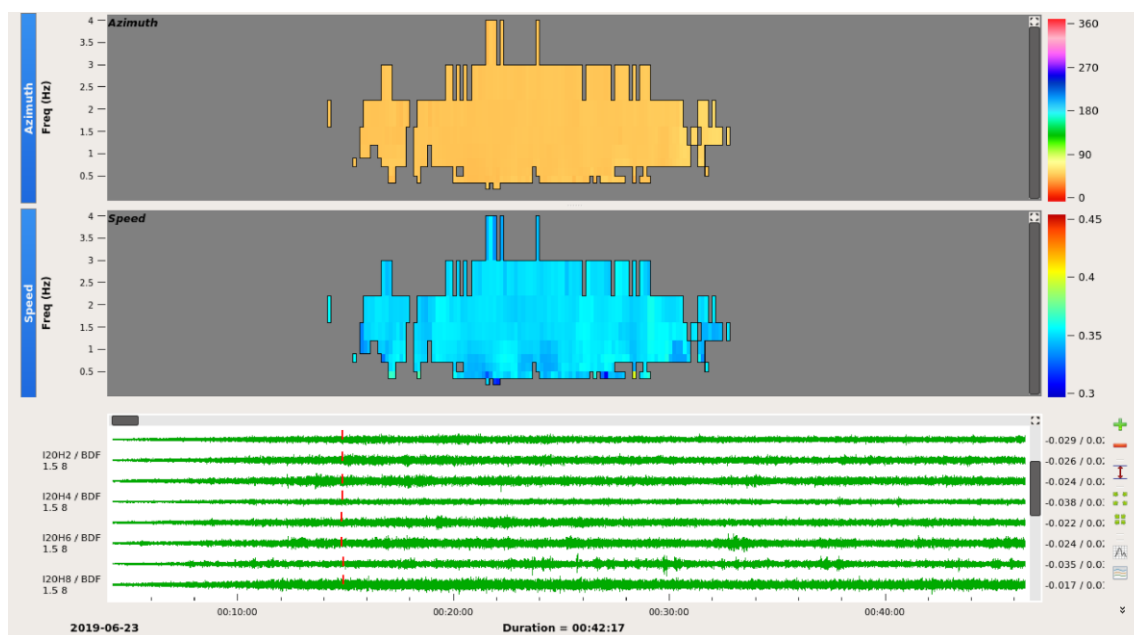


Figura 28- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 22/06/2019, detectado na estação I20EC, localizada na Ilha Galápagos a cerca de 3130 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (54,5°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.352 km/s).

A outra estação que detectou a onda infrassônica gerada pelo evento foi a I08BO (Fig. 29) a cerca de 3439 km da fonte a onda chegou a estação às 00:38 UTC, com frequência de 0,699 Hz e velocidade de 0,339 km/s com duração do sinal de 710 segundos.

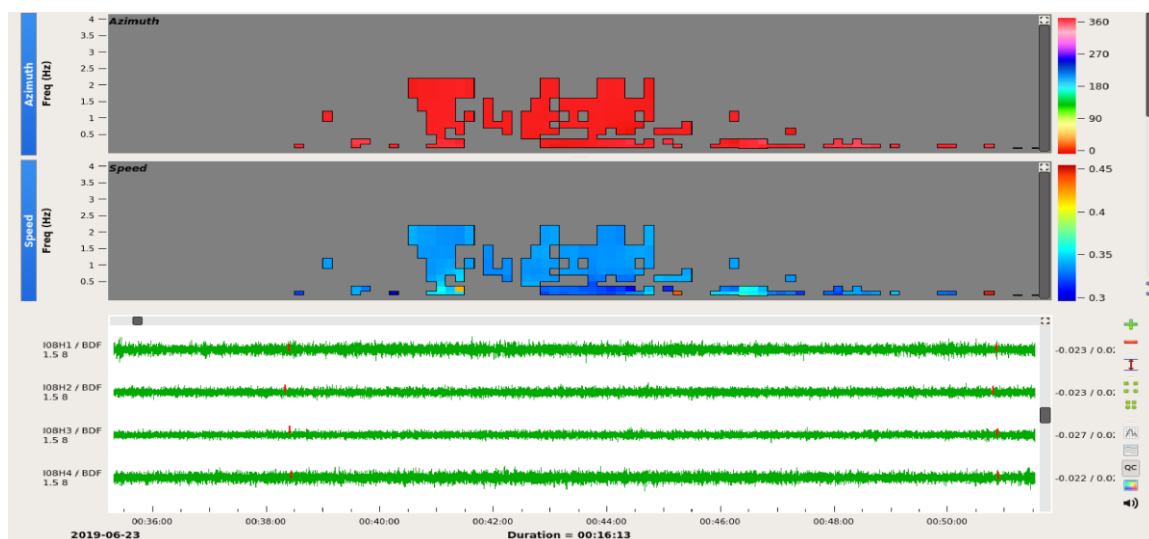


Figura 29- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 22/06/2019, detectado na estação I08BO, localizada na Bolívia a cerca de 3439 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio ($0,64^\circ$) e, no retângulo inferior está a informação do back-azimute médio ($0,64^\circ$) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.339 Km/s).

6.4.2 Bólido do dia 07/02/2022- 7 Kt

O bólido mais energético analisado neste estudo ocorreu em 7 de fevereiro de 2022 no Oceano Atlântico Sul, a leste da costa da África, com o brilho máximo detectado às 20:15 UTC. O evento foi registrado a uma altitude de 32,4 km, com velocidade de 21,5 km/s e energia estimada em 7 Kt (CNEOS, 2024). O fenômeno gerou ondas infrassônicas que foram detectadas por quatro estações sob este estudo (I50GB, I49GB, I09BR e I08BO) a distâncias variáveis da fonte, permitindo uma análise detalhada da propagação do sinal através da atmosfera.

A estação I50GB, localizada na Ilha Ascensão a 3.333 km da fonte, registrou o sinal associado ao evento às (Fig.30). A onda levou 163 minutos para alcançar a estação, chegando às 23:16 UTC, com um back-azimute de $135,4^\circ$, indicando a direção da fonte do evento. A frequência do sinal registrada foi de 0,95 Hz, dentro do intervalo típico para ondas infrassônicas de grande magnitude, como eventos de bólidos de alta energia. Sinais de baixa frequência, como este, tendem a viajar longas distâncias com menor atenuação, pois suas propriedades de propagação são mais favoráveis para grandes trajetos. A

velocidade média de fase foi de 0,354 km/s, o que é coerente com as ondas infrassônicas que se propagam na troposfera. A duração do sinal foi de 1130 segundos, que é uma indicação de que o evento gerou uma onda com alta energia inicial, capaz de manter o sinal por um período considerável. A duração longa do sinal pode ser explicada pela intensidade do evento, em que a onda infrassônica gerada teve uma propagação sustentada por um tempo maior devido à grande energia do bólido.

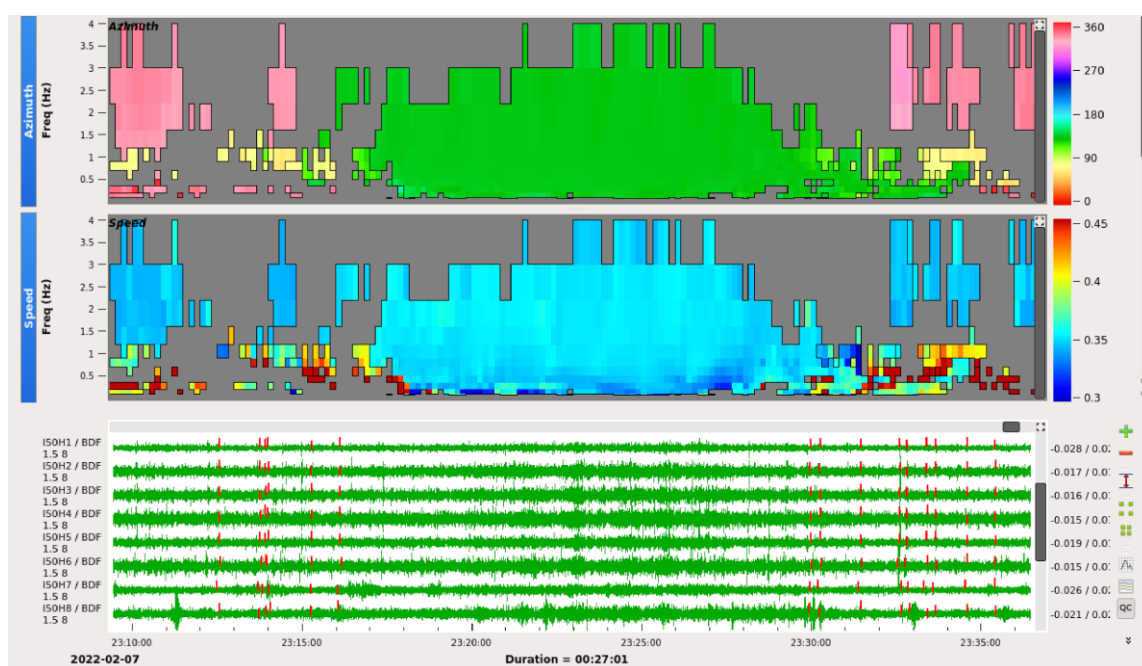


Figura 30- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 07/02/2022, detectado na estação I50GB, localizada a cerca de 3300 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (135°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.354 km/s).

Na estação I49GB localizada na Ilha Tristan da Cunha, a 2182 km de distância da fonte, o sinal levou 106 minutos para se propagar até a estação chegando às 22:20 UTC na estação, com um back-azimute de 67,7° (Fig.31). A frequência registrada foi de 0,720 Hz. A velocidade de propagação foi de 0,352 km/s, o que reflete uma leve desaceleração da onda à medida que ela percorre distâncias maiores. A duração da frente de onda foi de 410 segundos, mais curta que em I50GB. Esse comportamento pode ser atribuído à dispersão da energia do sinal com a distância percorrida, que resulta em uma atenuação mais acentuada da onda conforme se afasta da fonte.

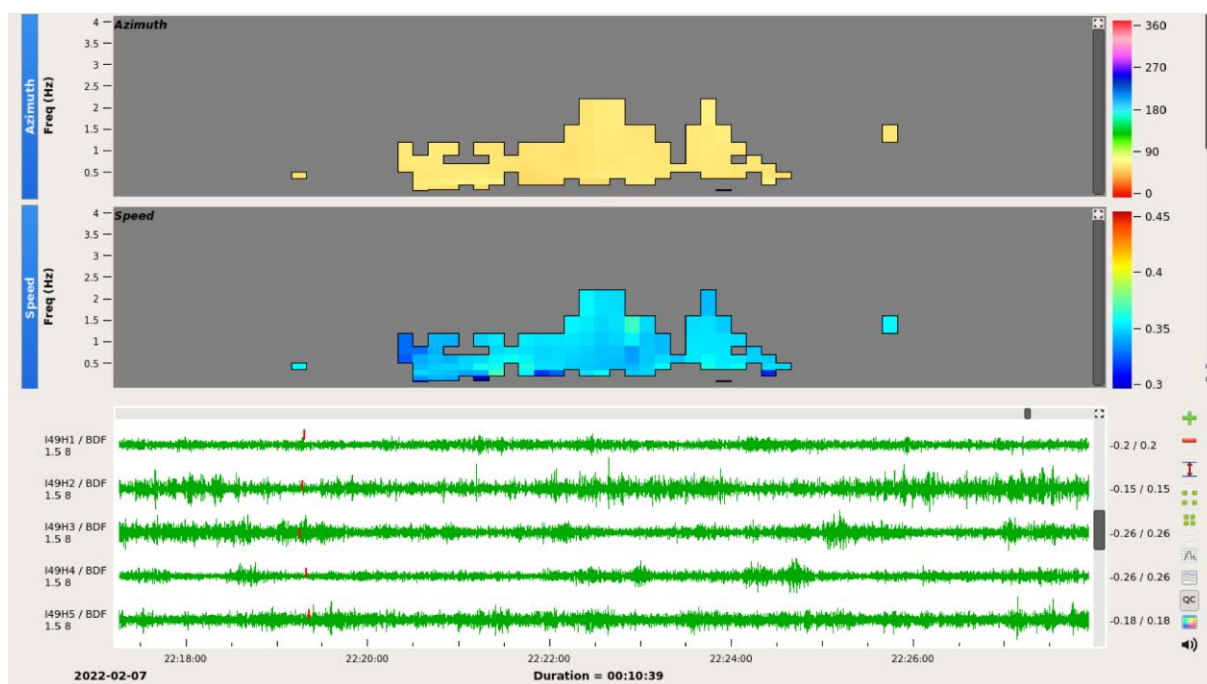


Figura 31- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 07/02/2022, detectado na estação I49GB, localizada na Ilha Tristan da Cunha a cerca de 2182 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (66°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.352 km/s).

A estação I09BR, localizada a 5975 km da fonte, registrou o sinal após 4 horas e 52 minutos (292 minutos), com um back-azimute de 113° (Fig.32). A frequência do sinal foi de 0,495 Hz, que é uma frequência intermediária, evidenciando uma dissipação progressiva das componentes de alta frequência da onda ao longo do trajeto. A velocidade de propagação foi de 0,338 km/s, o que é esperado para ondas infrassônicas que percorrem longas distâncias e interagem com diferentes camadas da atmosfera. A duração foi de 1220 segundos, o que indica que, apesar da atenuação da onda, a energia do evento ainda permitiu a propagação do sinal por um período prolongado.

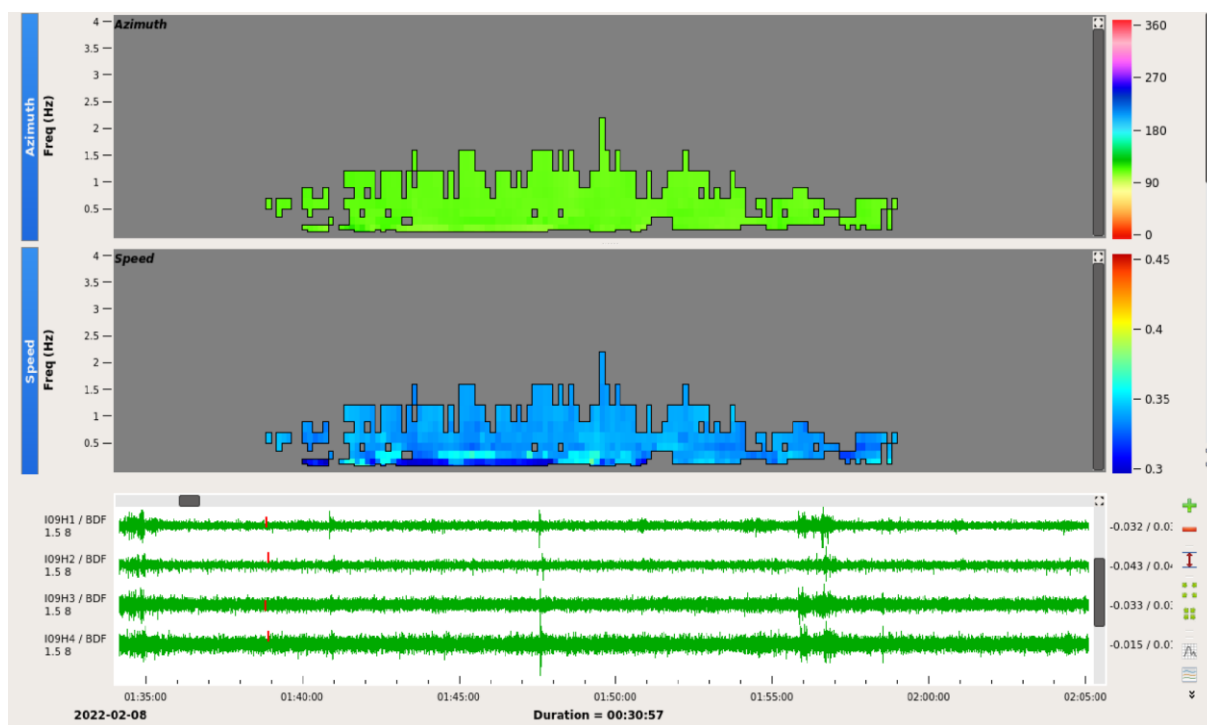


Figura 32- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 07/02/2022, detectado na estação I09BR, localizada em Brasília a cerca de 5975 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (113°) e, no retângulo inferior está a informação do back-azimute médio (113°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.338 km/s).

Na estação I08BO, localizada a 8000 km da fonte, o sinal chegou após 6:29, às 03:30 UTC, com um back-azimute de 110° (Fig.33). A frequência do sinal foi de 0,498 Hz, próxima à observada em I09BR, sugerindo uma componente de baixa frequência predominante. O fato de o sinal ter uma duração de 1230 segundos reflete a característica das ondas infrassônicas de baixa frequência, que têm a capacidade de viajar longas distâncias sem perder muita energia, permitindo que o sinal se mantenha por um tempo considerável. A maior duração do sinal pode ser explicada pela grande energia liberada pelo bólido e sua capacidade de gerar uma onda infrassônica persistente.

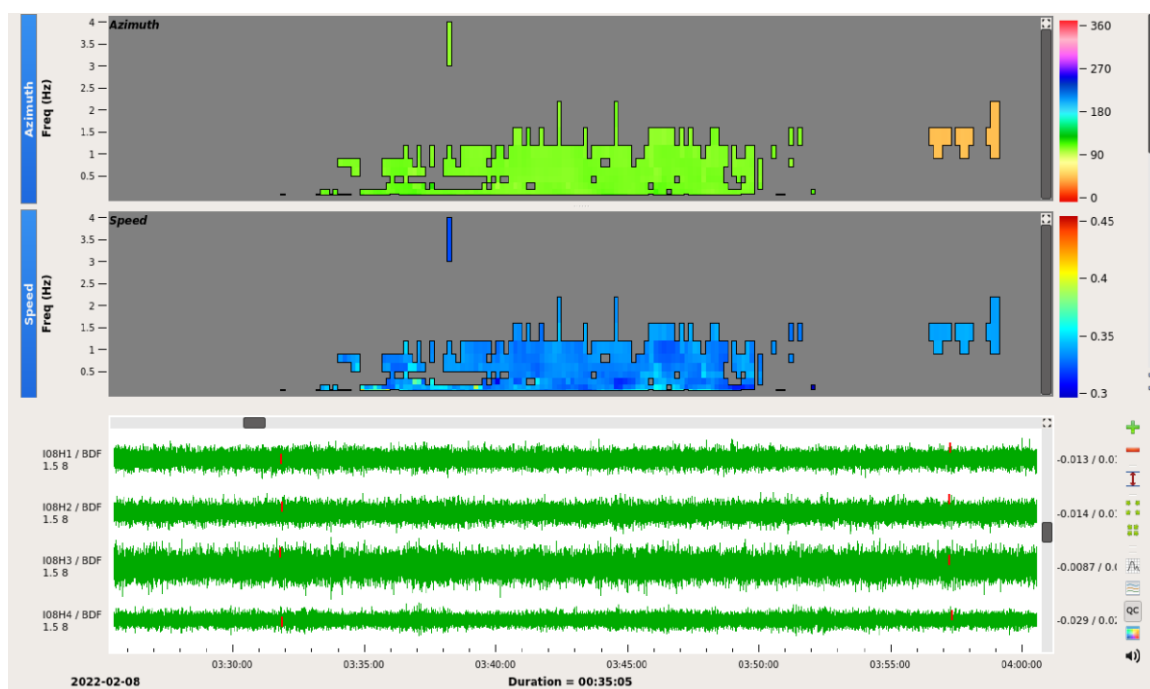


Figura 33- Sinal de infrassom gerado pelo bólido de 07/02/2022, detectado na estação I08BO, localizada na Bolívia a cerca de 7955 km de distância da fonte. No retângulo superior está a informação do back-azimute médio (110°) e, no retângulo inferior está a informação do back-azimute médio (110°) e, no retângulo inferior está a informação da velocidade média de fase (0.338 km/s).

A localização da explosão que gerou a onda infrassônica foi estimada por meio da triangulação dos raios azimutais, resultando nas coordenadas de Latitude $27^\circ 37.705'S$ e Longitude $8^\circ 23.961'L$ (Fig.34).

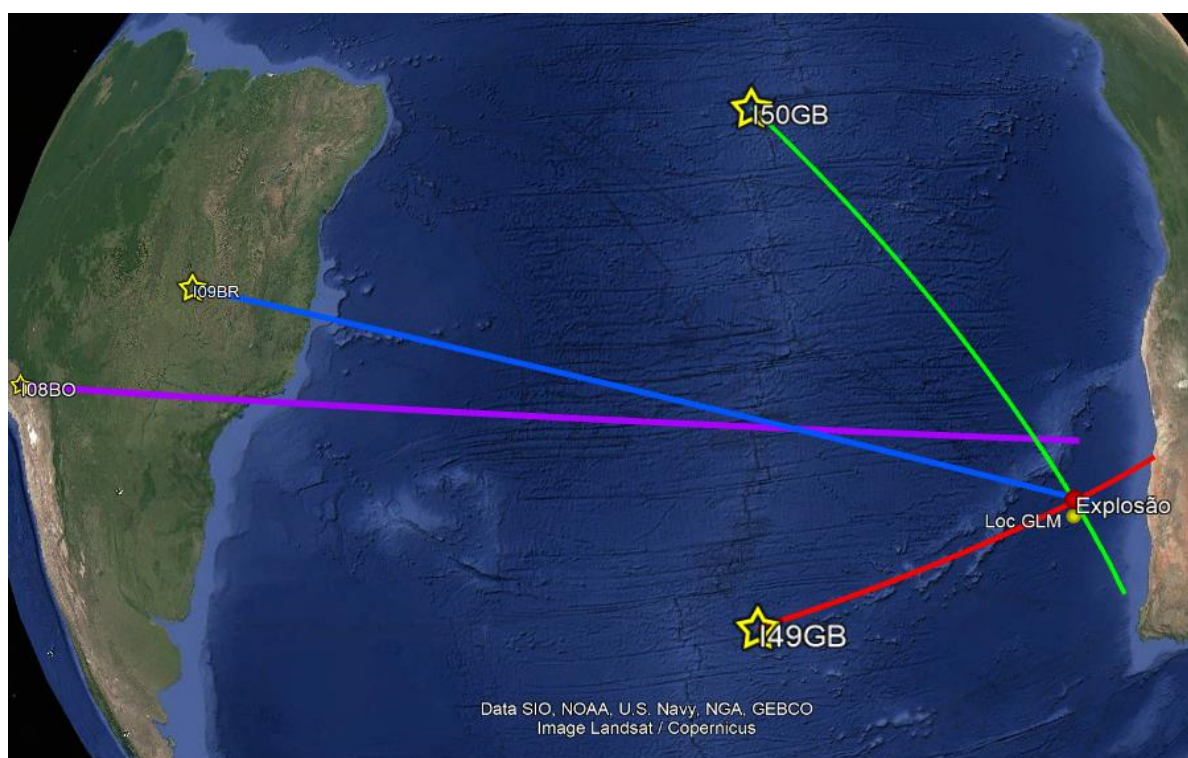


Figura 34- Localização da explosão do bólido em 07 de fevereiro de 2022. A bolinha vermelha indica a posição estimada da explosão, enquanto a bolinha amarela representa a localização registrada pelo sensor GLM. As estrelas amarelas correspondem às estações de monitoramento, e as linhas mostram os raios azimutais dessas estações apontando para a fonte do evento.

Embora o sinal tenha sido detectado pela estação da Bolívia, seu back-azimute não está alinhado com os das outras estações, impossibilitando sua utilização na triangulação. Esse desalinhamento pode estar associado a diversos fatores, como a longa distância entre a fonte e a estação, que aumenta a possibilidade de refrações nas camadas atmosféricas ao longo do percurso das ondas. Além disso, efeitos da propagação atmosférica e eventuais limitações operacionais da estação podem ter influenciado a precisão do back-azimute.

As variações nas frequências e durações observadas nas diferentes estações estão relacionadas aos fenômenos de atenuação e dispersão da onda infrassônica à medida que ela se propaga pela atmosfera. As ondas de baixa frequência, como as observadas nas estações I50GB e I08BO, são menos suscetíveis à atenuação, o que permite que viajem por distâncias muito maiores, mantendo sua intensidade e duração por um período mais longo. Isso é particularmente relevante para eventos como o bólido de 7 de fevereiro de 2022, que liberou uma quantidade significativa de energia (7 Kt), o que possibilitou a geração de ondas infrassônicas de baixa frequência com grande alcance.

Por outro lado, à medida que a onda se afasta da fonte, as frequências mais altas são progressivamente atenuadas, o que explica o aumento das frequências detectadas nas estações mais distantes, como em I49GB e I09BR. Essa mudança na frequência é um reflexo da dissipação de energia nas componentes de alta frequência da onda, um fenômeno que ocorre frequentemente em grandes distâncias de propagação de sinais infrassônicos.

A duração dos sinais está diretamente relacionada à energia do evento e à natureza das ondas infrassônicas. Sinais mais longos, como os registrados nas estações I50GB e I08BO, indicam uma propagação eficaz de ondas de baixa frequência, capazes de viajar grandes distâncias. O bólido analisado, com uma energia estimada de 7 Kt, foi suficientemente energético para gerar ondas infrassônicas que mantiveram sua duração e intensidade ao longo das longas distâncias percorridas.

CAPÍTULO 7 – CATÁLOGO

Para a elaboração do catálogo, foi realizada uma pesquisa no site da NASA <[cedneo.jpl.nasa.gov/fireball](https://cdneo.jpl.nasa.gov/fireball)> onde se verificou a ocorrência de 267 eventos de bólidos ao redor do mundo detectados por sensores GLM, referentes ao período de pesquisa, 2018 a 2025. Desses, somente 19 foram detectados pelas estações infrassônicas do IMS da América do Sul (Tabela 3). A maioria desses eventos teve suas localizações registradas nos oceanos Pacífico e Atlântico (Figura 13).

Tabela 3- 19 Bólidos detectados por sensores GLM e estações do IMS localizadas na América do Sul e Ilhas Oceânicas.

Data/hora de brilho máximo (UT)	Lat °	Long °	Altitude(km)	Velocidade(km/s)	Vx	Vy	Vz	Energia Irradiada (J)	Energia de impacto total (kt)
10/11/2024 16:31:52	59.8°S	73.6°W	43					5.7e10	0,18
05/10/2024 12:27:48	55.9°S	102.4°W	39,5	13,1	0	7,5	10,7	2.7e10	0,095
22/01/2023 17:11:43	3.5°N	76.2°W	61					2.0e10	0,073
16/10/2023 17:14:52	6,5°S	65,4° W	35,3	19,8	-12,2	14,9	-4,8	3.0e10	0,1
22/07/2022 00:16:19	23,3°S	20,5°W	32,7	17,4	-7,1	15,5	-3,3	6.0e10	0,19
28/07/2022 01:36:08	6,0°S	86,9°W	37,5	29,9	-17,1	23,5	-7,2	25.1e10	0,68
21/04/2022 22:15:28	55.5°S	68.9°W	28,4	12,7	-4,2	11,6	3,2	3.9e10	0,13
06/03/2022 15:06:15	4.1°S	99,5 °W						2.0e10	0,073
07/02/2022 20:06:26	28,7°S	11.4°E	26,5	13,1	-8,9	-7,3	-6,3	348.0e10	7
28/01/2022 05:04:45	4,5°S	73,9 °W	37					34.1e10	0,9
09/06/2021 05:43:59	17.9S	55.3°W						2.3e10	0,082
18/10/2020 10:52:43	11,4°S	135,8°W	36	16,4	15,6	1,5	4,9	3.6e10	0,12
21/10/2020 06:38:49	29,7°S	93,9°W	39					2.7e10	0,095
23/03/2020 16:51:51	24,4°S	67,9°W	25					13.3e10	0,39
06/12/2019 10:19:57	3,3°S	37,7°W	19,5					4.6e10	0,15
22/06/2019 21:25:48	14,9°N	66,2°W	25	14,9	-13,4	6	2,5	294.7e10	6
17/09/2018 01:08:02	6,8°S	27,8° W						15.0e10	0,43
21/02/2018 01:28:03	13.5S	37.1°W	31,5	13,1	-0,9	13,1	-0,4	7.1e10	0,22
12/02/2018 02:15:19	15.9°S	58.9°W						3.9e10	0,13

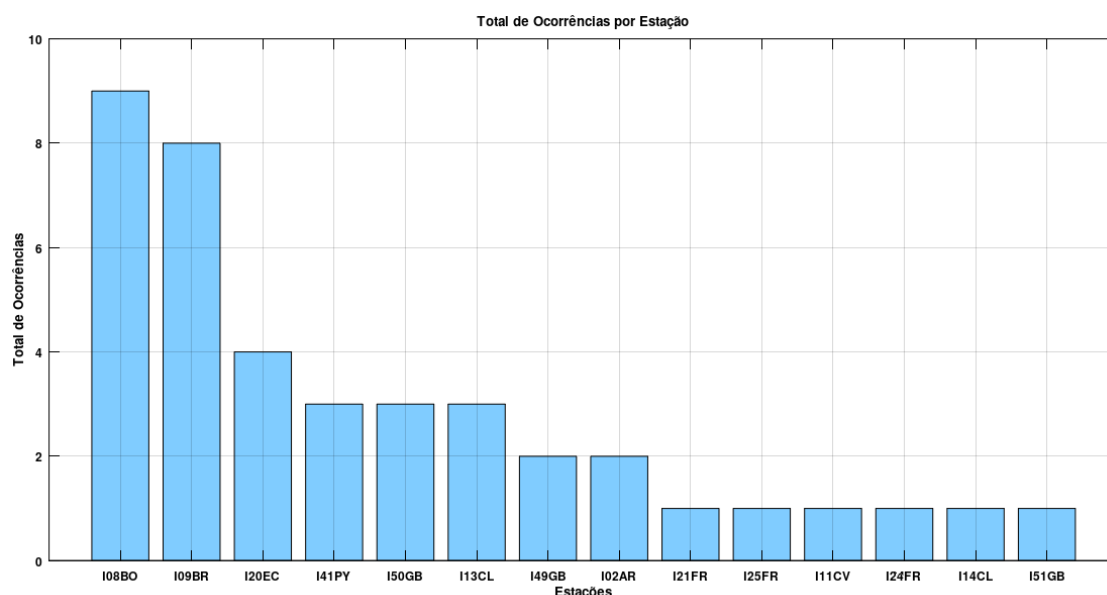
Fonte: (CNEOS,2024)

Vale ressaltar que as estações localizadas em regiões oceânicas I49GB e I50GB e I21FR e I24FR, pertencentes ao reino Unido e França, respectivamente, foram utilizadas devido às suas proximidades geográficas com os eventos. Ainda assim, 6 eventos ocorreram em regiões continentais, e felizmente nenhum deles resultou em danos, provavelmente se desintegraram em altas altitudes. É relevante mencionar que o evento ocorrido em 06/12/2019 teve sua proximidade com a costa brasileira. Além disso, o evento do dia 16/10/2023 ocorreu próximo ao Amazonas, Brasil; o evento que aconteceu no dia 28/01/2022, ocorreu próximo ao Peru; e no dia 23/03/2020 ocorreu próximo a San Pedro de Atacama, Chile.

A estação I08BO, localizada na Bolívia, destacou-se ao registrar 9 detecções de eventos infrassônicos de bólidos e bolas de fogo. A estação I09BR com 8 detecções, I41PY, I50GB e I13CL contribuíram com 3 detecções cada a estação I20EC contribuiu com 4 detecções. Em contrapartida, as estações I11CV, I21FR, I25FR, I24FR, I14CL, e I51GB apresentaram uma detecção apenas (Gráfico 1).

As estações da Argentina I02AR e I49GB detectaram dois eventos.

Gráfico 1- Quantidade de bólidos e bolas fogo detectados por estações do IMS sob este estudo.



Os dezenove eventos foram processados e analisados no software DTK-GPMCC e a partir daí foram extraídas informações de tais eventos como chegada da frente de onda na estação, velocidade aparente, frequência, back-azimute, distância e duração (Tabela 4).

CÁPITULO 8 – CÁLCULO DA ENERGIA DAS ONDAS INFRASSÔNICAS

Para estimar a energia liberada pelos 19 eventos infrassônicos meteóricos analisados, foram utilizadas inicialmente duas equações empíricas amplamente conhecidas, que são empregadas para descrever a propagação das ondas sonoras geradas por explosões atmosféricas e eventos de impacto de meteoros.

A equação 8, desenvolvida pelo AFTAC (Clauter & Blandford, 1998), permite calcular a energia ***E_s*** a partir das amplitudes infrassônicas registradas. Nesta equação, ***P*** representa a amplitude de pico das ondas infrassônicas, expressa em pascals, enquanto ***Δ*** corresponde à distância angular entre a fonte e o receptor, medida em graus. Essa relação é amplamente utilizada para estimar a energia liberada por explosões atmosféricas, incluindo as geradas por bólidos.

$$\log E_s = 2 \log P + 2,94 \log \Delta - 1,84 \quad (8)$$

Outra abordagem, baseada em observações de testes de armas nucleares realizadas pela França (Blanc et al., 1997), apresenta uma formulação alternativa. Na equação 9, ***P*** representa a amplitude infrassônica, também em Pascal, enquanto ***R*** refere-se à distância entre a fonte e o receptor, expressa em quilômetros. Essa relação fornece outra perspectiva para a estimativa da energia liberada, considerando distâncias lineares.

$$\log E_s = 2 \log P + 3,52 \log R - 10,62 \quad (9)$$

Uma terceira relação empírica amplamente aplicada para explosões atmosféricas vincula a amplitude máxima infrassônica ao rendimento da explosão ***W*** (em quilotons). A equação 10 leva em conta a amplitude máxima ***P***, expressa em Pascal, o rendimento ***W***, em quilotons (Kt), e a distância ***R***, em quilômetros. Essa relação é essencial para estimar a pressão gerada por explosões atmosféricas, incluindo aquelas resultantes de detonações nucleares ou químicas, sendo uma ferramenta fundamental para avaliar a magnitude desses eventos (Whitaker, 1995; Clauter & Blandford, 1998).

$$\log E_s = 3,37 - 0,68W - 1,36 \log R \quad (10)$$

A aplicação dessas equações visa estimar a energia dos 19 eventos meteóricos analisados, com base nas medições de pressão infrassônica obtidas. Para aqueles eventos detectados por mais de uma estação foi realizada a média das energias obtidas.

A propagação do infrassom na atmosfera terrestre não ocorre de forma puramente linear, pois as ondas podem ser afetadas pela estrutura da atmosfera e pela curvatura da Terra. As fórmulas (8) e (9) são frequentemente utilizadas para estimar a energia liberada por eventos infrassônicos: uma baseada no intervalo angular Δ (em graus) e outra baseada na distância linear entre fonte e estação.

A equação (9) assume que a relação entre a amplitude infrassônica e a energia segue uma dependência puramente esférica, considerando apenas a atenuação geométrica e a dissipação da onda à medida que viaja na atmosfera (Edwards et al., 2004). No entanto, essa equação não leva em conta a curvatura da Terra nem os efeitos atmosféricos que podem canalizar ou desviar a propagação do infrassom. Por outro lado, a equação 8 que utiliza o intervalo angular Δ incorpora a geometria esférica da Terra, representando a separação entre a fonte e o receptor em termos do ângulo subtendido no centro do planeta (Edwards et al., 2004). Esse parâmetro pode ser obtido a partir da distância R por meio da relação:

$$\Delta = \frac{R}{111,19} \quad (11)$$

Onde **111.19 km** equivale aproximadamente a **1°** de arco na superfície terrestre. A consideração do intervalo angular torna essa abordagem mais realista, pois o infrassom frequentemente se propaga por longas distâncias seguindo trajetórias curvas, guiadas por camadas atmosféricas estáveis, como a estratosfera. Assim, a equação 8 está mais alinhada com a física da propagação do infrassom e tem sido amplamente utilizada para analisar eventos atmosféricos, como testes nucleares e bólidos.

Dessa forma, embora ambas as equações busquem estimar a energia com base na amplitude infrassônica registrada, a abordagem baseada em Δ é mais representativa da realidade física da propagação do infrassom na atmosfera terrestre, porém os resultados encontrados com as duas fórmulas foram muito discrepantes. E com a fórmula 10 os valores de energias deram muito maiores.

Os resultados obtidos a partir dessas três equações apresentaram discrepâncias significativas, conforme ilustrado no (Gráfico 2). Observa-se que:

- A Equação 10 (em vermelho) forneceu as maiores estimativas de energia para a maioria dos bólidos analisados, com valores que chegam a 4,905 kt para o bólido 16. Essa equação é tradicionalmente aplicada em detonações nucleares e químicas, o que pode explicar a superestimação quando aplicada a eventos meteóricos.

- A Equação 9 (em preto) apresentou os menores valores de energia, com estimativas inferiores a 0,1 Kt para a maioria dos eventos. Esse método baseia-se em testes nucleares franceses, podendo não capturar adequadamente as características das explosões atmosféricas de meteoros.

- A equação 8 (em azul) forneceu resultados intermediários, com valores que variam entre 0,005 Kt e 1,85 Kt. Por considerar a distância angular, essa abordagem incorpora a geometria esférica da Terra, oferecendo uma estimativa mais realista da propagação do infrassom em distâncias longas.

A propagação do infrassom na atmosfera terrestre é influenciada por fatores como a estrutura atmosférica, ventos estratosféricos, temperatura e a curvatura da Terra. A equação 8, ao utilizar, considera parcialmente esses efeitos, enquanto as demais equações assumem uma propagação mais linear.

Embora as três equações sejam amplamente utilizadas, os resultados demonstram que a equação 8 pode oferecer estimativas mais equilibradas para eventos meteóricos, considerando a geometria da Terra e a propagação atmosférica do infrassom. A discrepância entre os resultados destaca a necessidade de calibração das equações para aplicações específicas, levando em conta as condições atmosféricas locais e as características dos eventos analisados.

Gráfico 2- Comparação das energias estimadas pelas equações 8,9 e 10.

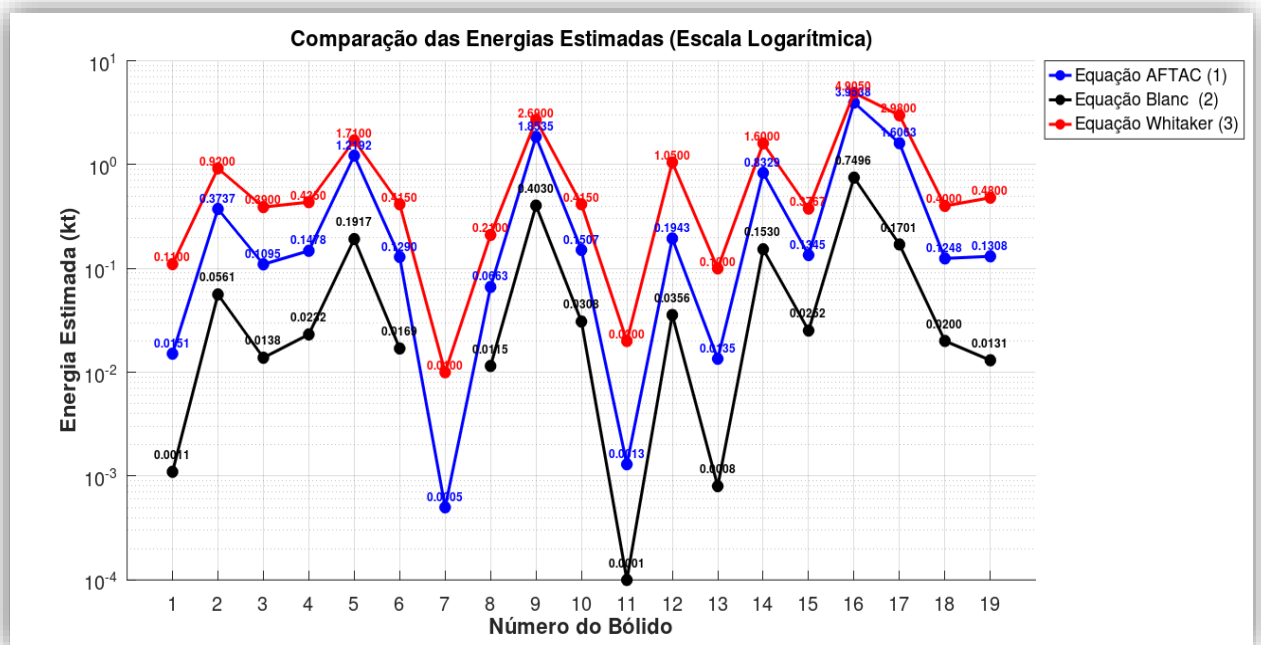


Tabela 4- Catálogo de eventos infrassônicos gerados por bólidos e bolas de fogo detectados por estações do IMS. Nas três últimas colunas são apresentados os valores de energia estimados por cada fórmula. Eventos detectados por mais de uma estação foram feitas as médias das suas respectivas energias.

Nº	ESTAÇÃO	DATA DO EVENTO	HORA DO EVENTO	HORA CHEGADA	LAT	LONG	DISTÂNCIA KM	VELOCIDADE KM/S	BACK AZIMUTH	FREQUÊNCIA HZ	DURAÇÃO	Amp (MáX) Pa	Equação (8)	Equação (9)	Equação (10)
1	I02AR	10/11/2024	16:31	17:10	-59,8	-73,6	677	0,342	212,1	1.928	70	0,072	0,0151	0,0011	0,11
2	I02AR	05/10/2024	12:27	14:20	-55,9	-102,4	2207	0,367	247,7	1.078	210	0,063	0,3737	0,0561	0,92
3	I20EC	22/01/2023	17:11	18:50	-3,5	-76,2	1635	0,368	73	1.109	550	0,053	0,1095	0,0138	0,39
4	I09BR	16/10/2023	17:16	19:19	-6,26	-65,66	2174	0,352	297,4	1.017	160	0,023	0,1478	0,02315	0,435
	I41PY	16/10/2023	17:16	19:23	-6,26	-65,66	2413	0,366	333	0.702	660	0,045			
5	I20EC	28/07/2022	01:39	02:15	-5,58	-87,41	668	0,347	147,2	0,843	280	0,083	1,219233	0,191666667	1,71
	I08BO	28/07/2022	01:39	03:45	-5,58	-87,41	2378	0,337	294,2	0,85	420	0,175			
	I09BR	28/07/2022	01:39	05:45	-5,58	-87,41	4452	0,354	277,1	0,561	390	0,008			
6	I49GB	22/07/2022	00:19	01:52	-23,36	-19,12	1698	0,337	337,4	1,236	160	0,032	0,12895	0,01695	0,415
	I50GB	22/07/2022	00:19	01:57	-23,36	-19,12	1767	0,353	197,7	0,843	160	0,066			
7	I02AR	21/04/2022	22:15	22:22	-55,5	-68,9	145	0,373	229,4	1,149	610	0,129	0,0005	0	0,01
8	I20EC	06/03/2022	15:05	16:09	-3,6	-100,02	1157	0,352	251,8	1,827	80	0,007	0,0663	0,0115	0,21
	I13CL	06/03/2022	15:05	17:40	-3,6	-100,02	2828	0,355	21,1	1,308	120	0,026			
9	I09BR	07/02/2022	20:15	01:38	-28,6	8,65	5975	0,338	113	0,495	1220	0,037	1,853525	0,402975	2,69
	I08BO	07/02/2022	20:15	03:31	-28,6	8,65	7955	0,338	110	0,498	1230	0,016			
	I49GB	07/02/2022	20:15	22:20	-28,6	8,65	2182	0,352	66,18	1,041	90	0,176			
	I50GB	07/02/2022	20:15	23:16	-28,6	8,65	3333	0,354	135,4	0,95	1130	0,06			
10	I08BO	28/01/2022	05:04	06:25	-3,49	-75,43	1627	0,339	332,9	0,548	72	0,035	0,1507	0,0308	0,415
	I25FR	28/01/2022	05:04	07:30	-3,49	-75,43	2601	0,351	215,2	1,036	890	0,017			
	I14CL	28/01/2022	05:04	08:04	-3,49	-75,43	3408	0,357	6,2	0,569	400	0,024			
	I13CL	28/01/2022	05:04	09:06	-3,49	-75,43	4555	0,354	63,16	1,158	590	0,02			
11	I09BR	09/06/2021	05:43	06:24	-17,9	-55,3	816	0,347	250,9	1,025	440	0,016	0,0013	0,0001	0,02
12	I08BO	21/10/2020	06:40	09:21	-29,33	-93,6	2957	0,337	234,6	1,079	730	0,036	0,1943	0,0356	1,05
	I41PY	21/10/2020	06:40	09:21	-29,33	-93,6	3583	0,344	255,1	1,14	240	0,016			

13	I21FR	18/10/2020	10:56	11:23	-11,05	-136,39	485	121,2	0,85	0,349	300	0,111	0,0135	0,0008	0,1
14	I08BO	23/03/2020	16:54	17:42	-23,92	-68,39	936	177,3	0,698	0,346	390	0,241	0,8329	0,15295	1,6
	I13CL	23/03/2020	16:54	20:35	-23,92	-68,39	4157	92,44	1,098	0,354	1190	0,045			
15	I41PY	06/12/2019	10:28	13:24	-2,48	-38,83	3299	39,63	1,023	0,349	710	0,032	0,134533	0,025233333	0,376667
	I08BO	06/12/2019	10:28	13:44	-2,48	-38,83	3556	68,6	0,818	0,341	370	0,013			
	I09BR	06/12/2019	10:28	11:53	-2,48	-38,83	1788	38,61	1,046	0,346	800	0,022			
16	I20EC	22/06/2019	00:15	00:14	14,72	-67,5	3130	54,5	1,296	0,352	1130	0,115	3,95385	0,74955	4,905
	I08BO	22/06/2019	21:30	00:38	14,72	-67,5	3439	0,6	0,699	0,339	710	0,113			
17	I09BR	21/02/2018	01:28	02:30	-13,5	-37,1	1210	0,378	78,7	0,744	510	0,316	1,6063	0,1701	2,98
18	I50GB	17/09/2018	01:12	02:31	-7,13	-27,39	1428	277.7	1.66	0.352	190	0,056	0,124775	0,020025	0,4
	I09BR	17/09/2018	01:12	03:25	-7,13	-27,39	2449	66.37	0.49	0.360	340	0,042			
	I11CV	17/09/2018	01:12	03:29	-7,13	-27,39	2497	190.4	0.668	0.351	460	0,032			
	I08BO	17/09/2018	01:12	05:27	-7,13	-27,39	4622	84.010	0.352	1.66	190	0,008			
19	I09BR	12/02/2018	02:15	03:31	-15,9	-58,9	1166	268	0,344	0.400	500	0,086	0,1308	0,01305	0,48
	I08BO	12/02/2018	02:15	03:07	-15,9	-58,9	1032	90.5	0.339	0.986	380	0,124			

CAPÍTULO 9 – DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Neste trabalho verificou-se que os estudos e conhecimento sobre as formas de ondas e sinais gerados por meteoroides ainda são escassos. Por ser uma área repleta de dúvidas, há muito a se aprender e muitos dados a serem estudados. Toneladas de material meteórico caem na atmosfera terrestre todos os dias e são registrados por satélites, câmeras e pelas estações infrassônicas do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS), particularmente designadas para a verificação e cumprimento do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBT), mas também sensíveis à entrada de meteoroides na atmosfera.

O trabalho consistiu na elaboração de um catálogo de eventos de bólidos e bolas de fogo registrados nas estações da América do Sul, como a I09BR localizada em Brasília, a I08BO na Bolívia, duas estações do Chile com localizações oceânicas (I13CL e I14CL), a estação I20EC do Equador e duas estações na Argentina (I02AR e I27AR). Como a maioria dos eventos estudados ocorreu em regiões oceânicas, foram incluídas também estações da França, Grã-Bretanha e Cabo Verde, localizadas em ilhas oceânicas: Estações I21FR, I24FR, I25FR (França); Estações I49GB e I50GB (Grã-Bretanha) e, por fim, a estação I11CV em Cabo Verde.

A geração de ondas infrassônicas neste estudo está relacionada ao momento do brilho máximo de um meteoro, que corresponde à maior luminosidade que ele pode atingir. Quando o meteoróide atravessa as camadas da atmosfera, que possuem propriedades diferentes, ele viaja com velocidades variáveis. Em velocidades supersônicas, ao entrar em camadas com temperaturas menores, como a termosfera inferior e a mesosfera, a frente do meteoróide colide com as partículas do ar, ocasionando o aquecimento e a desintegração da rocha espacial. Nesse momento, é gerada a onda de choque balística que se propaga como ondas infrassônicas. Devido às suas frequências muito baixas e comprimentos de onda longos, essas ondas podem percorrer longas distâncias com baixa atenuação, sendo detectadas a milhares de quilômetros de distância. É importante ressaltar que a ablação do meteoróide não é a única fonte de ondas infrassônicas, pois a própria trajetória do meteoróide pode gerar ondas de choque balísticas, além da sua explosão.

O catálogo foi feito a partir da busca de eventos registrados pelos satélites GOES-16 e GOES-17, que possuem o Geostationary Lightning Mapper (GLM). Embora projetado para mapear relâmpagos, o GLM também registra o brilho máximo de meteoros. O Centro de Estudos de Objetos Próximos à Terra (CNEOS) disponibiliza um banco de dados de eventos de bólidos e bolas de fogo. A partir desses dados, foram identificados eventos detectados por

estações de infrassom para analisar a capacidade desses arranjos infrassônicos em registrar as frentes de onda dos bólidos. Dos dezoito eventos estudados, seis ocorreram em regiões continentais e o restante em áreas oceânicas. A maioria dos eventos apresentou formas de onda reverberatórias, possivelmente devido à distância entre o evento e o sensor infrassônico, além de fenômenos de propagação atmosférica. Vale destacar que a assinatura das formas de ondas associadas a meteoros ainda está em fase de discussão na comunidade científica.

A estação de Brasília (I09BR) detectou 8 dos eventos de bólidos, sendo o mais recente em 16/10/2023, ocorrido no Amazonas, Brasil. Para demonstrar a capacidade das frentes de onda percorrerem longas distâncias, o bólido de 07/02/2022, que ocorreu no Oceano Atlântico Sul, foi detectado pela estação I08BO a uma distância de aproximadamente 7.955 km. A estação I08BO foi a que mais detectou eventos nos últimos seis anos, com um total de 9 detecções de bólidos e bolas de fogo.

A estimativa da energia liberada pelos 19 eventos meteóricos, através de ondas infrassônicas, demonstrou resultados significativamente discrepantes entre as três equações aplicadas (AFTAC, Blanc e Whitaker). A equação 10 de Whitaker (1995) apresentou valores de energia substancialmente superiores em comparação às outras duas, sugerindo uma possível superestimação quando aplicada a eventos de menor escala, como os bólidos analisados. Por outro lado, a equação 9 de Blanc et al. (1997), baseada em testes nucleares franceses, resultou em valores inferiores e com maior variabilidade, o que pode indicar limitações na aplicação para eventos atmosféricos de natureza diferente.

A equação 8 do AFTAC (Clauter & Blandford, 1998), que incorpora o intervalo angular Δ , demonstrou maior coerência com a física da propagação do infrassom na atmosfera, considerando a curvatura da Terra e os efeitos atmosféricos. Apesar disso, as diferenças observadas entre os resultados indicam que fatores como a heterogeneidade da atmosfera, condições meteorológicas locais e a geometria específica de cada evento podem influenciar significativamente as estimativas.

Portanto, embora a abordagem baseada no intervalo angular ofereça resultados mais alinhados com a propagação do infrassom em grandes distâncias, é recomendável que futuras análises integrem dados adicionais, como observações ópticas ou sísmicas, para aprimorar a precisão das estimativas de energia. Ademais, o desenvolvimento de modelos que considerem variáveis atmosféricas dinâmicas pode contribuir para reduzir as discrepâncias identificadas neste estudo.

Em suma, a detecção precisa de eventos de bólidos e bolas de fogo por meio de estações de infrassom tem implicações significativas para a segurança e a compreensão científica. A capacidade de registrar e analisar as frentes de ondas desses bólidos pode fornecer insights valiosos para a prevenção de impactos de meteoros na Terra, bem como para a compreensão da dinâmica e distribuição desses eventos. Considerando a dispersão geográfica e os fatores que influenciam a detecção, este estudo também pode contribuir para o aprimoramento de estratégias de monitoramento e alerta precoce.

Por fim, planeja-se expandir a pesquisa para incluir um número ainda maior de eventos de bólidos, a fim de aprofundar a compreensão e validar as descobertas. O contínuo desenvolvimento dessa área de estudo contribuirá para o avanço do conhecimento sobre a interação de meteoroides com a atmosfera e suas consequências para o meio ambiente e a sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, L. W.; ALVAREZ, W.; ASARO, F.; MICHEL, H. V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. **Science**, v. 208, n. 4448, p. 1095-1108, 1980.

AMERICAN METEOR SOCIETY. **Fireball and Bolide Classification**. Disponível em: www.amsmeteors.org. Acesso em: jan. 2024.

ANDERSON, J. D. **Hypersonic and High Temperature Gas Dynamics**. AIAA Education Series, 2006.

ARROWSMITH, S. J.; REVELLE, D. O.; EDWARDS, W.; BROWN, P. Global detection of infrasonic signals from three large bolides. **Earth Moon Planets**, v. 102, n. 1-4, p. 357-363, 2008. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78419-9_50

BARROS, L. V.; FONTENELE, D. P. **IS09 Infrasound Station – International Monitoring System, Final Report – Site Preparation, Construction, and Installation**. 2002. 254 p.

BARROS, L. V.; NERI, B. L.; CARVALHO, J. M.; FONTENELE, D. P. **A participação brasileira no sistema de verificação do tratado de proibição total de testes nucleares**. Tubarão (SC): Copiart, 2020. 152 p.

BLANC, E.; MILLIES-LACROIX, J. C.; ISSARTEL, L. P.; PEREZ, S. Detection of nuclear explosions in the atmosphere. **Chocs**, v. 17, p. 23-24, 1997.

BLANDFORD, R. R.; CLAUTER, D. A. **Capability Estimation of Infrasound Networks**. AFTAC Report, 1995.

BOWMAN, H. S.; BEDARD, A. J. Observations of infrasound and subsonic disturbances related to severe weather. **Geophysical Journal International**, v. 26, n. 1-4, p. 215-242, 1971.

BROWN, P.; REVELLE, D. O.; SILBER, E. A.; EDWARDS, W. N.; ARROWSMITH, S.; JACKSON, L.; TANCREDI, G.; EATON, D. Analysis of a crater-forming meteorite impact in

Peru. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, E09007, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JE003105>

BROWN, P.; SPALDING, R. E.; REVELLE, D. O.; TAGLIAFERRI, E.; WORDEN, S. P. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. **Nature**, v. 420, p. 314-316, 2002.

BROWN, P.; WHITAKER, R. W.; REVELLE, D. O.; TAGLIAFERRI, E. Multi-station infrasonic observations of two large bolides: Signal interpretation and implications for monitoring of atmospheric explosions. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 13, p. 1636, 2002. <https://doi.org/10.1029/2001GL013778>

BROWN, P.; WILLIAMS, I. S.; GRAHAM, M. M.; SEVASTYANOV, V. V. The Tunguska event: Investigations of the 1908 explosion in Siberia. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 2345-2363, 2002.

CAMPBELL-BROWN, M. D.; KOSCHNY, D. Model of the ablation of faint meteors. **Astronomy & Astrophysics**, v. 418, n. 3, p. 751-760, 2004. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041001-1>

CANSI, Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. Method. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 9, p. 1021-1024, 1995. <https://doi.org/10.1029/95GL00468>

CARRY, B. Density of asteroids. **Planetary and Space Science**, v. 73, n. 1, p. 98-118, 2012.
CENTER FOR NEAR-EARTH OBJECT STUDIES (CNEOS). **Fireballs**. Jet Propulsion Laboratory, NASA. Disponível em: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>. Acesso em: 12 jan. 2024.

CEPLECHA, Z.; BOROVÍČKA, J.; GRAHAM ELFORD, W.; REVELLE, D. O.; HAWKES, R. L.; PORUBCAN, V.; ŠIMEK, M. Meteor Phenomena and Bodies. **Space Science Reviews**, v. 84, p. 327-471, 1998.

CEPLECHA, Z.; BOROVÍČKA, J.; SPURNÝ, P. Dynamical behaviour of meteoroids in the atmosphere derived from very precise photographic records. **Astronomy & Astrophysics**, v. 357, p. 1115-1122, 2000.

CHRISTIE, D. R.; CAMPUS, P. The IMS Infrasound Network: Design and Establishment of Infrasound Stations. In: LE PICHON, A.; BLANC, E.; HAUCHECORNE, A. (Eds.). **Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies**. Springer Netherlands, 2009. p. 29-75. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5_2

CHRISTIE, D. R.; VELOSO, J. A. V.; CAMPUS, P.; BELL, M.; HOFFMANN, T.; LANGLOIS, A.; MARTYSEVICH, P.; DEMIROVIC, E.; CARVALHO, J. Detection of atmospheric nuclear explosions: the infrasound component of the International Monitoring System. **Kerntechnik**, v. 66, n. 3, p. 96-101, 2001. <https://doi.org/10.1515/kern-2001-0058>

CLAUTER, D. A.; BLANDFORD, R. R. Capability Modeling of the Proposed International Monitoring System 60-Station Infrasonic Network. In: **Proceedings of the Infrasound Workshop for CTBT Monitoring**, Santa Fe, New Mexico, 1998. p. 1-10.

DAVIS, M. H. **Introduction to Wave Phenomena**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

DROLSHAGEN, G.; KOSCHNY, D.; DROLSHAGEN, S.; KRETSCHMER, J.; POPPE, B. Mass accumulation of Earth from interplanetary dust, meteoroids, asteroids and comets. **Planetary and Space Science**, v. 143, p. 21-27, 2017.

DUTTON, J. A. **Atmospheric Science: An Introductory Survey**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2002.

EARTH HOW. **Exosphere: the outermost layer of the atmosphere**. Disponível em: <https://earthhow.com/exosphere/>. Acesso em: 19 jan. 2025.

EDWARDS, W. N.; BROWN, P.; REVELLE, D. O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic waves. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, p. 1136-1160, 2006.

EVERS, L. G.; HAAK, H. W. Listening to sounds from an exploding meteor and oceanic waves. **Geophysical Research Letters**, v. 30, p. 41-44, 2001. <https://doi.org/10.1029/2000GL011859>

GEORGES, T. M. Infrasound from Convective Storms: Examining the Evidence. **Reviews of Geophysics**, v. 11, n. 3, p. 571-594, 1973.

GLADYSHEVA, O. G. The Structure of the Tunguska Comet. **Earth and Planetary Science**, v. 3, n. 1, p. 1-8, 2023. <https://doi.org/10.36956/eps.v3i1.924>

GOSSARD, E. E.; HOOKE, W. H. **Waves in the atmosphere: Atmospheric gravity waves and infrasonic waves**. New York: Dover Publications, 1975.

JACOBSON, M. Z. **Introduction to atmospheric chemistry**. 2. ed. Princeton: Princeton University Press, 2011.

KALINOWSKI, A. et al. Interactions of Meteoroids with Earth's Atmosphere. **International Journal of Meteor Science**, 2009.

KALINOWSKI, M.; GOODFELLOW, M. R. E.; LE PICHON, A. (Eds.). **Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies**. Springer Science & Business Media, 2010.

LE PICHON, A.; BLANC, E.; HAUCHECORNE, A. **Infrasound monitoring for atmospheric studies**. Springer Netherlands, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5>

LE PICHON, A.; CANSI, Y. PMCC for infrasound data processing. **Inframatics**, v. 2, p. 1-9, 2003.

LE PICHON, A.; CERANNA, L.; VERGOZ, J. Incorporação de modelagem numérica nas estimativas da capacidade de detecção da rede de infrassom IMS. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, D5, 2012.

LE PICHON, A.; VERGOZ, J.; BLANC, E.; GUILBERT, J.; CERANNA, L.; EVERS, L.; BRACHET, N. Avaliação do desempenho da rede de infra-sons do Sistema Internacional de Monitorização: Cobertura geográfica e variabilidades temporais. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, D08112, 2009.

LIN, T. L.; LANGSTON, C. A. Thunder-induced ground motions: 1. Observations. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 114, B4, 2009.

MIALLE, P. et al. **Infrasound Sources**. Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization. Vienna, 2019.

NASA. **115 years ago: The Tunguska Asteroid Impact Event**. Disponível em: <https://www.nasa.gov/history/115-years-ago-the-tunguska-asteroid-impact-event/>. Acesso em: 19 jan. 2025.

NASA. **Asteroids, comets & meteors**. NASA Science, [s.d.]. Disponível em: <https://science.nasa.gov/asteroids-comets-meteors/>. Acesso em: 5 out. 2024.

NERI, B. L. **Deteção e interpretação de sinais de infrassom com a Estação Infrassônica de Brasília – I09BR**. 2019. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

ÖPIK, E. J. Atomic collisions and radiation of meteors. **Acta Comment Univ Tartuensis**, v. 26, p. 1-39, 1933.

ÖPIK, E. J. Basis of the physical theory of meteors. **Acta Comment Univ Tartuensis**, v. 33, p. 1-66, 1937.

PIERCE, A. D. **Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications**. New York: McGraw-Hill, 1981.

PIERCE, A. D. The effect of altitude on the detection of meteor explosions by infrasound. **Geophysical Research Letters**, v. 16, n. 10, p. 1137-1140, 1989.

REVELLE, D. O. On meteor-generated infrasound. **Journal of Geophysical Research**, v. 81, p. 1217-1229, 1976.

REVELLE, D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 822, p. 284-302, 1997.

REVELLE, D. O. NEO fireball diversity- energetics-based entry modeling and analysis techniques, near-Earth objects: our celestial neighbors- opportunities and risk. In: MILANI, A.; VALSECCHI, G. B.; VOKROUHLICKY, D. (Eds.). **Proceedings IAU Symposium No. 236**, 2006. p. 95-106.

SCHULTE, P. et al. The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. **Science**, v. 327, n. 5970, p. 1214-1218, 2010.

SMITH, J. C. et al. An automated bolide detection pipeline for GOES GLM. **arXiv**, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2106.09189>.

THE WEATHER STATION EXPERTS. **Camadas da atmosfera**. Disponível em: <https://theweatherstationexperts.com/pt/camadas-da-atmosfera/>. Acesso em: 19 jan. 2025.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2006.

WHIPPLE, F. J. W. The Great Siberian meteor and the waves, seismic and aerial, which it produced. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 56, p. 287-304, 1930.

WHIPPLE, F. L. Photographic meteor studies I. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 79, p. 499-548, 1938.

16 GLOSSÁRIO

Ablação: Processo pelo qual um material sólido é removido devido à interação com seu ambiente, geralmente envolvendo altas temperaturas, pressões ou fricção. No contexto dos meteoroides, a ablação ocorre quando o meteoróide entra na atmosfera terrestre a altas velocidades, causando aquecimento intenso devido ao atrito e resultando na vaporização e perda de material da superfície do meteoróide.

Asteroides: Pequenos corpos rochosos que orbitam o Sol, principalmente no cinturão de asteroides entre Marte e Júpiter.

Bolas de fogo: Meteoros muito brilhantes causados por meteoroides maiores que entram na atmosfera da Terra. O termo é frequentemente usado de forma intercambiável com "bólide."

Bólidos: Meteoros muito brilhantes que explodem na atmosfera, produzindo uma grande quantidade de luz e som. Geralmente, têm magnitude aparente de -4 ou mais brilhantes.

Coefficiente de Arrasto: Valor que descreve a resistência do ar em relação ao movimento de um objeto. Influencia a desaceleração do meteoróide devido à interação com a atmosfera.

Cometas: Corpos celestes compostos principalmente de gelo, poeira e rochas, que desenvolvem uma cauda brilhante quando se aproximam do Sol.

CNEOS (Center for Near-Earth Object Studies): Centro de pesquisa da NASA dedicado ao estudo e monitoramento de objetos próximos à Terra, como asteroides e cometas.

Densidade Atmosférica: Quantidade de massa de ar por unidade de volume. Afeta a interação do meteoróide com a atmosfera.

Equações Diferenciais: Equações matemáticas que descrevem como uma quantidade muda em relação a outra. No contexto dos meteoroides, descrevem como a velocidade e a massa do meteoróide mudam durante a interação com a atmosfera.

Força de Arrasto Atmosférico: Força que atua sobre um objeto em movimento na atmosfera devido à resistência do ar. Desempenha um papel crucial na desaceleração e ablação do meteoróide.

GLM (Geostationary Lightning Mapper): Instrumento em satélites geoestacionários que monitora a atividade de relâmpagos na Terra, auxiliando na previsão de tempestades severas.

IMS (International Monitoring System): Sistema global de monitoramento estabelecido pela CTBTO para verificar o cumprimento do CTBT, monitorando atividades sísmicas, acústicas, radiométricas e atmosféricas.

Infrassom: Ondas sonoras de baixa frequência que ocorrem abaixo do limite da audição humana, muitas vezes geradas por eventos como explosões de meteoroides na atmosfera.

Meteoritos: Meteoroides que sobrevivem à passagem pela atmosfera da Terra e atingem a superfície do planeta.

Meteoroides: Pequenos fragmentos de rocha ou metal que viajam pelo espaço e podem entrar na atmosfera da Terra, onde são conhecidos como meteoros.

Meteoros: Meteoroides que entram na atmosfera da Terra e produzem um rastro luminoso devido ao atrito com o ar.

NASA (National Aeronautics and Space Administration): Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos, responsável por programas espaciais civis, pesquisa aeroespacial e exploração espacial.

Satélites GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites): Satélites meteorológicos geoestacionários operados pela NOAA, essenciais para previsão do tempo, monitoramento de tempestades e eventos climáticos extremos.

Teoria do Movimento de Meteoroides de Corpo Único: Descreve o movimento e a ablação de um meteoróide que entra na atmosfera terrestre.

Velocidades Hipersônicas: Refere-se a velocidades muito altas, entre 11,2 e 72,8 km/s, nas quais os meteoroides entram na atmosfera terrestre.