Monitoramento sísmico e infrassônico da região de Sete Lagoas - MG

Lucas V. Barros[1], Darlan P. Fontenele[1], Juraci M. de Carvalho[1], Letícia G. Assunção[1],Ronnie Quintero[2], Diogo F. Albuquerque[3]

1. Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (UnB).
2. Vulcanological and Seismological Observatory – National University – Costa Rica
3. Sem vínculo institucional

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Foi Implantada em janeiro de 2024 uma rede sísmica de oito estações e um arranjo infrassônico de 4 elementos para monitorar uma sequência sísmica em andamento na região de Sete Lagoas – MG e para discriminar explosões de eventos tectônicos, pois na área existem muitas pedreiras que, sistematicamente, sem qualquer aviso, realizam explosões para remover calcário. Nas cavas dessas pedreiras já foram observados eventos cuja origem não se conhece: se tectônica, provavelmente eventos induzidos por liberação de tensões devido à grande quantidade de material sendo removido; se evento antrópico, provavelmente uma explosão em uma das nove pedreiras da região. Infelizmente, nos poucos dias de operação da rede e do arranjo não foram registrados eventos tectônicos nem explosões. No entanto, um evento incomum foi registrado em sensores infrassônicos e sísmicos, com formas de ondas nos sensores sísmicos e infrassônicos muito semelhantes e de difícil discriminação de sua origem. Neste trabalho, apresentamos e discutimos uma metodologia para identificar, discriminar e localizar eventos acústicos com base nos monitoramentos sísmico e infrassônico dessa região onde esses eventos coexistem.

Introdução

A região de Sete Lagoas, localizada no sudeste de Minas Gerais, vem apresentando nos últimos três anos uma sismicidade que tem assustado a população local e de cidades vizinhas, como são os casos de Matozinhos e Prudente de Morais. As máximas magnitudes observadas não excedem 3.0 na Escalas Richter, entretanto, como esses eventos ocorrem muito próximo de áreas povoadas, causam grande susto às populações, especialmente devido aos estrondos percebidos. Esta sismicidade foi estudada com dados da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR). Entretanto, devido às distâncias das estações da RSBR, a mais próxima dista 140 km das fontes desses eventos, as localizações não são precisas.

Próximo à região epicentral existe nove pedreiras em operação, cujas detonações geram registros muito semelhantes aos sismogramas dos sismos naturais. Além disso, essas pedreiras não fornecem informações sobre as suas atividades: dia, hora e carga das detonações. Por esta razão, o Observatório Sismológico da Universidade de Brasilia instalou, em janeiro de 2024, uma rede sismogáfica local de 8 estações e mais um arranjo infrassônico de 4 elementos (Figura 1), com o objetivo de realizar estudos mais detalhados sobre essas sismicidades natural e antropogênica.

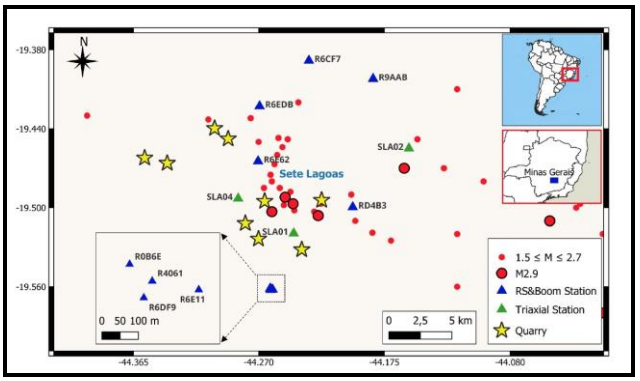

***Figura 1**: Mapa da área de Sete Lagoas mostrando a sismicidade (círculos vermelhos), a rede sísmica de oito estações (triângulos azuis: estação RSBoom, e triângulo verde, estação triaxial de banda larga) e arranjo infrassônica de quatro elementos (triângulos azuis). Estrela denota pedreiras ativas na região.*

A operação dessa rede vem recebendo a ajuda da Defesa Civil Municipal de Sete Lagoas, que periódicamente presta apoio logístico à UnB na operação e coleta de dados das estações, pois os dados são gravados no campo e, portanto, a necessidade de coleta a mais ou menos a cada 20 dias.

Sismicidade prévia na região de Sete Lagoas

A sismicidade anterior à instalação da rede local na região de Sete Lagoas e entorno, conforme o Catálogo Sísmico Brasileiro, é apresentada na Figura 2. Os dados utilizados nas análises são provenientes da RSBR, principalmente das estações mais próximas a Sete Lagoas, DIAM (143 km), BSCB (178 km) e PMNB (253 km). As localizações foram feitas com quatro ou mais fases, com precisão que pode variar entre 2-10 km, dependendo da qualidade das fases registradas. O retângulo na Figura 2 mostra uma área com alinhamento sísmico, sugerindo que os eventos vêm ocorrendo ao longo de um trend de orientação NW-SE. As detonações realizadas nas pedreiras da região dificultam em muito as

análises para discriminar eventos artificias (explosões) de eventos naturais (tectônicos). Portanto, também foram registrados no período muitos eventos de origem artificial provenientes dessas explosões. Esses eventos artificiais não estão plotados no mapa geológico da região mostrado na Figura 2, em que se observa os eventos ocorrendo na transição do Cráton do São Francisco com a Bacia de Três Marias-Bambui.

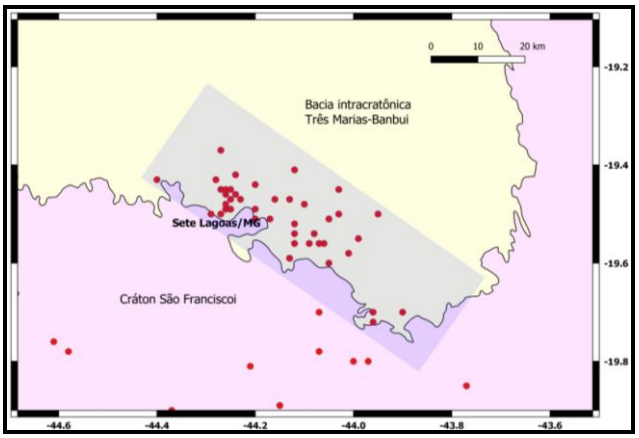

***Figura 2**: Mapa com a sismicidade observada na região de Sete Lagoas e vizinhanças. Observa-se um alinhamento sísmico NW-SE na borda da Bacia Intracratônica de Três Marias-Banbui, inserida no Cráton São Francisco*.

Instrumental utilizados e dados

A rede de instrumentos é composta por sensores sísmicos uniaxiais, microbarômetros e sismômetros triaxiais de banda larga. As estações RS&Boom são compostas por um sensor sísmico e um sensor infrassônico, ambos montados no mesmo aparelho, cuja resposta em frequência é de 1 – 44 Hz. O instrumento de banda larga tem resposta de 120 s a 100 Hz. Todos os dados foram amostrados a 100 sps. Nesta primeira fase de operação da rede sísmica local e do arranjo infrassônico, apenas um evento não categorizado foi registrado, i.é., um evento cuja origem se desconhece, devido aos seus sinais não terem assinatura de um evento tectônico e nem antropogênico (explosão em pedreira). O evento foi registrado no dia 27 de janeiro, às 16h22 UTC, por todos os sensores (infrassônicos e sísmicos), exceto na estação triaxial de banda larga, SLA04, estação gruta, a única instalada em ambiente de rocha sã, próximo a um morro voltado para N-S (Figura1). Portanto, o único dado a ser analisado e discutido no presente trabalho está mostrado na Figura 3, registros das formas de ondas detectadas pelos sensores sísmicos (EHZ) e infrassônicos (HDF). Os dois traços superiores são as compenentes verticais nas estações de banda larga SLA02- HHZ e SLA01-HHZ.

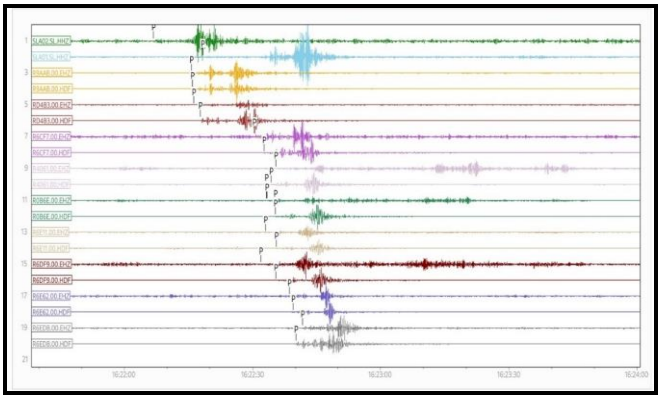

***Figura 3**: Sinais detectados por sensores infrassonicos (traços HDF) e sísmicos (traços EHZ) em nove instrumentos raspberry. Os sinais com traços de mesma cor se referem a sensores colocalizados (infrassom HDF e sísmico EHZ). Observe as pequenas diferenças no conteúdo de frequência e assinaturas dos sinais sísmicos e infrassonicos (traços de mesma cor). Os dois primeiros traços estão relacionados às componentes verticais de duas estações triaxiais de banda larga (SLA01/SL.HHZ e SLA02/SL.HHZ).*

METODOLOGIA/PROBLEMA INVESTIGADO

O evento foi registrado ao mesmo tempo por sensores sísmicos e infrassônicos, como pode ser observado na Figura 3. Traços de mesma cor referem-se ao sinal registrado pela mesma estação: HDF – sinal infrassonico e EHZ – sinal sísmico. O evento foi sentido por muitos moradores das cidades vizinhas de Sete Lagoas e Prudente de Morais, que chegaram a comparar suas sensações e percepções com com aquelas observadas em outros eventos já percebidos na região. Em 46 pontos investigados nas cidades de Sete Lagoas e Prudente de Morais foi constatado que para 14 pessoas entrevistadas nada foi sentido; para 15 foi ouvido apenas um estrondo sem, no entanto, ter sido sentido qualquer tremor no solo; para 2 foram observados ruídos e vibrações em portas, janelas e paredes; outros nove apenas disseram que sentiram. Para 3 apenas o tremor foi sentido e 1 único observador notou o estrondo e o tremor.

O evento não foi detectado pela Rede Brasileira de Observação de Meteoros (BRAMON), rede nacional dedicada ao monitoramento e estudo de meteoros e bólidos no Brasil, que utiliza câmeras de vídeo para registrar a entrada de meteoros na atmosfera terrestre, analisando dados para determinar as trajetórias, origens e características físicas desses objetos. Além disso, não foram observados flashes no dia e horário de registro do evento, embora as condições metereológicas do dia não propiciassem a detecção de possível bólido devido a densidade de nuvens, pois estava nublado, o que pode ter encoberto o seu rastro luminoso.

Análise e interpretação dos dados

Os sinais registrados no arranjo de 4 elementos, com duração de 3 minutos e 50 segundos, foram analisados com o software DTK-GPMCC (Cansi, 1995) e os resultados são mostrados na Figura 4. O retângulo superior mostra famílias PMCC, conjuntos de pixels semelhantes que possuiem os mesmos atributos (azimute, velocidade e frequência). No eixo y está a escala de frequência (Hz) dos sinais infrassônicos e no eixo x está o tempo (UTC). A escala em cores, à direita representa o azimute médio da frente de ondas. O retângulo central mostra a velocidade média da frente de ondas infrassônicas que chega à estação e a barra em cores representa sua velocidade média. Os traços inferiores são os sinais infrassônicos gravados nos quatro elementos do arranjo.
Como pode ser observado na janela central, a velocidade de propação das ondas é de cerca de 0.4 km/s, compatível com a velocidade de propagação do som na atmosfera, o que nos leva a concluir que o evento gerou sinais acústicos.

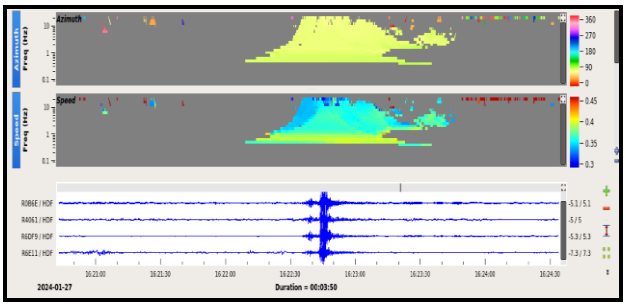

Figura 4: *Sinal infrassônico detectado pelos quatro elementos do arranjo infrassônico provisório instalado em Sete Lagoas – MG. Observe a estabilidade do azimute 90°. O valor da velocidade varia de 300 a 400 m/s, com média de 350 m/s. É menor para frequências maiores.*

Localização do evento

Normalmente, a localização de eventos acústicos é feita mediante a utilização de três arranjos infrasssônicos, cada um fornecendo um azimute e a fonte é localizada no ponto de cruzamento dos três raios azimutais. Entretanto, só dispomos de dados de um único arranjo.

Neste trabalho, foram usados três métodos de localização de fontes acústicas, adaptados da localização de terremotos: método iterativo (Geiger, 1912), método da hiperbole (Pujol, 2004; Bormann, Klinge, & Wendt, 2014) e método azimutal mediante o emprego de um arranjo infrassônico. Neste caso apenas a direção da frente de ondas é determinada. No caso de sinais sísmicos a distância S-P complementa a localização.

Método iterativo

O método interativo desenvolvido por Geiger (1912) para localização hipocentral de terremotos, usa as primeiras chegadas da fase P em um conjunto de estações de uma rede sísmográfica e, minimizando iterativamente uma função objetivo, definida como a diferença entre os tempos observados e teóricos de chegada das ondas sísmicas a cada estação. O processo iterativo começa em um ponto fixo, por exemplo, na estação onde as ondas chegaram primeiro, e é adicionado um pequeno passo nas coordenadas x, y, z e t (Δx, Δy, Δz, Δt), ou seja, este valor incremental é adicionado às coordenadas atuais ($x + \Delta x$, $y + \Delta y$, $z + \Delta z$, $t + \Delta t$) e dai o ponto que se procura movimenta-se ao longo de uma superfície paraboloidal e estima-se o valor da função objetivo. O hipocentro é encontrado para o mínimo da função objetivo.

No caso da localização de evento infrassônico devemos adaptar o modelo de velocidade, pois as ondas acústicas viajam pela atmosfera a uma velocidade muito inferior, por exemplo, a velocidade da onda P na crosta (5,0 - 8,0 km/s). Ondas infrassônicas, que são ondas sonoras de baixa frequência (f < 20 Hz) se propagam pela atmosfera a aproximadamente 340 m/s (0,34 km/s) a 20°C e ao nível do mar, variando ligeiramente com a temperatura e a altitude. Para eventos sísmicos em um meio homogêneo usamos camadas com velocidades constantes e diferentes. Aqui usamos apenas uma camada com profundidade negativa. Os ajustes são feitos baseados no método dos mínimos quadrados para minimizar a função objetivo, serão feitos com base na velocidade do som na atmosfera.

O software Hypocenter (Lienert, 1995) foi utilizado para localização hipocentral. O evento foi localizado fora da rede, com um gap mazimutal de 320 graus, coordenadas -19.454 -44.154, a 320 metros da estação SLA02 (Figura 5).

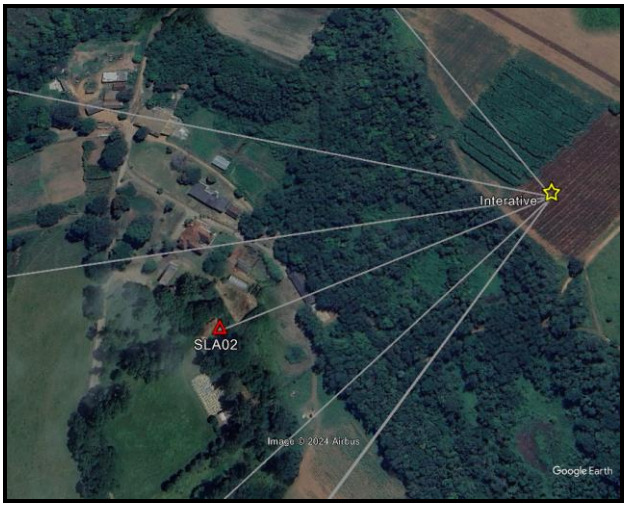

Figura 5*: Localização do evento pelo método iterativo, usando o software hupocenter e dados de 7 estações. A estrela indica a localização (-19.454 -44.154) epicentral. A figura só mostra 6 raios porque dois são colineares. Existem duas estações alinhadas.*

Método de localização epicentral da hipérbole

Este método é usado quando se tem apenas informações de chagada da onda P em diferentes estações, no mínimo três chegadas. Neste estudo foi substituído o tempo de chegada da onda P pelo primeiro tempo de chegada da onda acústica. Portanto, devemos usar os tempos de chegada das ondas sonoras em cada estação em vez do tempo de chegada das ondas P, pois estamos tratando com ondas acústicas. Estes tempos estão apresentados na Tabela 1. A abordgem do método aqui apresentado está baseada em (Pujol 2004; Bormann, Klinge, & Wendt, 2014).

SLA02	2024Jan27 16:22:07
R9AAB	2024Jan27 16:22:16
RD4B3	2024Jan27 16:22:18
R6CF7	2024Jan27 16:22:31
SLA01	2024Jan27 16:22:33
R0B6E	2024Jan27 16:22:35
R6DF9	2024Jan27 16:22:35
R6E11	2024Jan27 16:22:35
R6E62	2024Jan27 16:22:40
R6EDB	2024Jan27 16:22:41

Tabela 1- Tempos de chegadas das ondas acústicas às diversas estações da rede de Sete Lagoas.

Sejam d1, d2, ..., dn as distâncias entre as estações 1, 2 e n e a fonte, onde d1 = V(t1 - T0), d2 = V(t2 - T0) e dn = V(tn - T0), T0 é o tempo de origem e V a velocidade de propagação de ondas acústicas, igual a 0.343 km/s.

$$d1 = V\,(t1 - T0) \qquad (1)$$
$$d2 = V\,(t2 - T0) \qquad (2)$$

As distâncias, não conhecidas, são os parâmetros a serem determinados. Subtraindo (1) de (2) obtemos (3)

$$d1 - d2 = V(t1 - t2) \qquad (3).$$

O lado direito da Equação 3 é conhecido, pois t1 e t2 são dados observacionais. Portanto, o evento que gerou ondas acústicas ocorreu ao longo de uma curva que satisfaz a seguinte condição: a diferença entre as distâncias de dois pontos fixos (os locais de registro, estações R6EDB e R6DF9, por exemplo) para qualquer ponto da curva é constante, que é a definição de uma hipérbole. Embora uma hipérbole tenha dois ramos, seria fácil determinar qual deles é relevante, pois um dos dois tempos registrados geralmente será menor que o outro. Se fossem iguais, a fonte estaria ao longo de uma linha reta perpendicular à linha que une os dois locais de registro. Uma vez identificado o ramo apropriado, ele pode ser desenhado em um mapa.

A Figura 6 mostra a localização da fonte para o caso de Sete Lagoas, onde o evento foi registrado por toda a rede. Foram selecionados três pares de tempo de chegadas de forma a gerar as três hipérboles representadas na Figura 6, sua interseção comum representa a localização da fonte. No caso, próxima à estação SLA02.

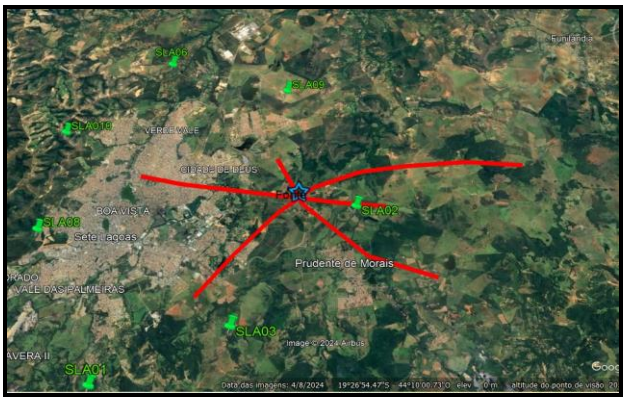

Figura 6: Hipérboles de localização da fonte. Foram utilizadas as diferenças de tempos de chegadas em três estações da rede infrassônica e, a partir desses, foram traçadas três hiperboles, o ponto de cruzamento das três se refere à localização da fonte (estrela azul).

A Figura 7 mostra as duas localizações feitas com ambos os métodos: método iterativo, estrela amarela, método da hipérbole, estrela azul. As duas localizações estão afastadas em cerca de 2 km.

Figura 7: *Mapa de localização das estações sísmicas e infrassônica da rede de Sete Lagoas – MG, com indicação das localizações da fonte obtida pelo método iterativo, estrela amarela e pelo método das hipérboles, estrela azul.*

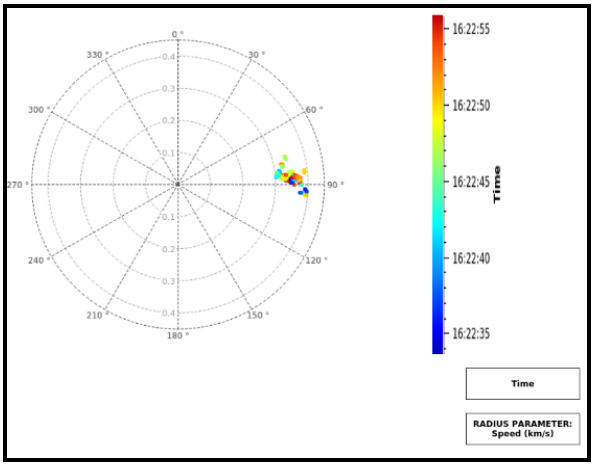

Figura 8: *Diagrama de roseta mostrando a variação temporal do azimute. Valor médio 90 graus. As velocidades variam com os tempos de chegadas das ondas de 0.3 km/s a 0.4 km/s. Como era de se esperar, as menores velocidades chegam depois.*

Discussão

Um dado inicialmente intrigante é o fato de algumas pessoas terem sentido o chão tremer, sem no entanto as estações sísmicas terem registrado nenhum sinal sísmico, i.é., vibrações do chão, ou seja, não foram registrados sinais sísmicos nas estações, apenas sinais acústicos, devido ao acoplamento infrassônico/sísmico. Isto foi comprovado pela determinação das velocidades de propagação das ondas, cujos valores indicam a presença de apenas ondas acústicas.

Ondas acústicas excitando sensores sísmicos.

As modernas estações sísmicas, de alta sensibilidade, amplas faixas dinâmica e de ampla resposta em frequências, embora designados para detectar ondas sísmicas, vibrações do solo causadas por terremotos, explosões e atividades vulcânicas, podem, também, detectar sinais infrassônicos, devido ao acoplamento infrassônico-sísmico. O infrassom são ondas acústicas com frequências abaixo de 20 Hz, que estão abaixo do limite da audição humana. Essas ondas podem ser geradas por várias fontes, naturais e antropogênicas, incluindo atividades vulcânicas, explosões, tempestades, terremotos e até mesmo por grandes ondas oceânicas como os microbaroms e ocean surf.
Essas ondas também são geradas por variações na pressão do ar causadas por meteoros, que são fenômenos luminosos resultantes da interação de meteoroides (fragmentos de asteroides, corpos rochosos e metálicos) e cometas (compostos de gelo, poeira e gases) com as camadas atmosféricas (Brown et al., 2008; Le Pichon et al., 2008; Arrowsmith et al., 2008). Frequentemente, esses meteoros não atingem o solo, não gerando meteoritos. Ao entrar na atmosfera terrestre em alta velocidade (11.2–72.8 km/s) (Ceplecha et al., 1998), o meteoroide interage com as camadas atmosféricas, ao se aproximar de camadas mais densas começa a se desintegrar devida a alta compressão do ar. Esse fenômeno de perda de massa é acompanhado por espetáculo luminoso conhecido como meteoro. Durante este processo é formada a onda de choque que se propaga como infrassom. Quando um meteoro de maior massa consegue atingir camadas mais inferiores da atmosfera terrestre, estratosfera por exemplo, não consegue resistir a alta compressão do ar e por isso explode, na maioria das vezes acompanhado de estrondo sônico.
Essas ondas com diferentes fontes e origens, que se propagam pela atmosfera, atingem o solo, causam pequenas vibrações que podem ser detectadas por sismômetros sensíveis devido ao acoplamento do infrassom com sensores sísmicos, fenômeno em que ondas de infrassom, ao atingirem a superfície terrestre, geram pequernas vibrações no solo que podem ser detectadas por sensores sísmicos. Esse acoplamento ocorre quando as ondas de infrassom interagem com o solo, convertendo parte da energia sonora em energia vibracional. Portanto, o acoplamento ocorre porque a energia do infrassom se transforma em energia vibracional no solo, que é então detectada pelos sismômetros, como foi o caso para o evento de 27 de janeiro em todas as estações sísmicas, exceto na estação SLAO4 (gruta), onde há afloramento rochoso, que reduz o acoplamento, bem como uma serra que serve de anteparo, barrando as ondas acústicas que chegariam ao solo da estação.
Esse acoplamento é importante em vários contextos científicos e de monitoramento, como na detecção de testes nucleares, onde tanto sinais sísmicos quanto infrassônicos são gerados. Ao analisar os dados de ambos os tipos de sensores, podemos obter uma melhor compreensão da fonte do evento. Em resumo, o acoplamento do infrassom com sensores sísmicos é o processo pelo qual as ondas de infrassom geram vibrações no solo que podem ser detectadas por sismômetros.
Considerando as semelhanças nas características das duas fontes de infrassom, rompimento da barreira do som por aeronaves supersônicas e um bólido atingindo camadas inferiores da atmosfera, um argumento favorável a que fonte infrassônica ter sido um bólido são duas: a primeiro, o rompimernto da barreira do som por uma aeronave supersônica quase sempre é percebido visualmente e, devido as condições meteriológicas desfavorável no dia, as nuvens podem ter encoberto o seu rastro luminoso, impedindo que as câmeras da BRAMON detectassem e pessoas visualizassem o fenômeno. A Figura 9 mostra o sinal infrassônico registrado na estação I09BR referente ao bólido do dia 09/06/2021, detectado no norte do Mato Grosso do Sul, cujas características são muito semelhantes àquelas observadas na Figura 4.

Conclusão

Pelos depoimentos das 46 pessoas entrevistadas e, considerando as características dos sinais infrassônicos gerados por aeronaves surpersônicas, fica clara a ocorrência de um estrondo, semelhante àqueles gerados no instante do rompimento da barreira do som por uma

aeronave supersônica, cujo deslocamento de ar, geralmente faz janelas e portas vibrarem. A estabilidade do azimute da frente de ondas, como foi o caso, compatível a 2 graus, que é uma possivel característica de sinais infrassônicos originados do rompimento da barreira do som e quando o avião não tem a sua trajetória mudada. Este tipo de sinal também pode ser gerado por bólidos entrando nas camadas inferiores da atmosfera terrestre, quando também é emitido um estrondo, semelhnte ao bum do rompimento da barreira do som.

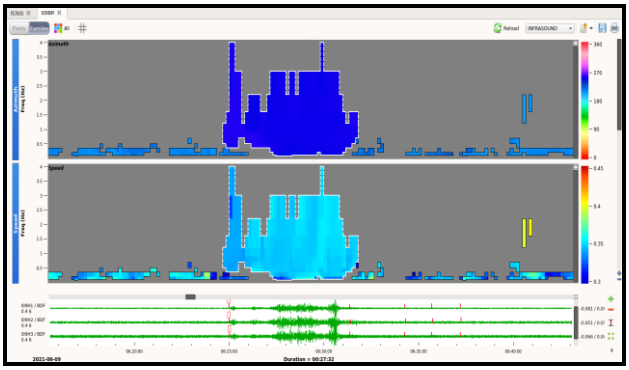

***Figura 9**: Sinal infrassônico registrado na estação I09BR referente ao bólido do dia 09/06/2021, cujo brilho máximo foi detectado às 5:43 UTC no norte do Mato Grosso do Sul (Azimute =250.8 graus, Velocidade = 0.347km/s, Duração = 440 segundos e frequência = 1,025 hz).*

Agradecimentos

Os autores agradecem a Defesa Civil Municipal da cidade de Sete Lagoas pela ajuda na instalação, operação e coleta de dados da rede de monitoramento sísmico e infrasônico, na pessoa do Comandante Sérgio Andrade e do agente Wilton Carlos.

Referências

Arrowsmith, S. J., ReVelle, D. O., Edwards, W., & Brown, P. (2008). Global detection of infrasonic signals from three large bolides. Earth Moon Planets, 102(1-4), 357-363. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78419-9_50

Bormann, P., Klinge, K., Wendt, S. Data analysis and seismogram interpretation. In: NMSOP-2: New Manual of Seismological Observatory Practice. DOI:10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch11.<http://slidepdf.com/reader/full/pujol-20049/12>.

Bowman, H., & Bedard, A. (2010). Observations of infrasound and subsonic disturbances related to severe weather. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 26, 215–242.

Brown, P., ReVelle, D. O., Silber, E. A., Edwards, W. N., Arrowsmith, S., Jackson, L., Tancredi, G., & Eaton, D. (2008). Analysis of a crater-forming meteorite impact in Peru. Journal of Geophysical Research, E09007. https://doi.org/10.1029/2008JE00310

Cansi, Y. (1995). An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. Method. Geophysical Research Letters, 22(9), 1021–1024. https://doi.org/10.1029/95GL00468

Lienert, B. R., & Havskov, J. (1995). A computer program for locating earthquakes both locally and globally. Seismol. Res. Lett. 66(5), 26–36.

PUJOL, J. Earthquake location tutorial. Seismological Research Letters, v. 75, n. 171, p. 63-74, 2004.

ReVelle, D. O. (1976). On meteor-generated infrasound. Journal of Geophysical Research, 81(7), 1217–1230. https://doi.org/10.1029/JA081i007p01217.