

A utilização de infrassons na monitorização sismovulcânica. Estado da arte no arquipélago dos Açores

The use of infrasound in seismovolcanic monitoring. State of the art in the Azores archipelago

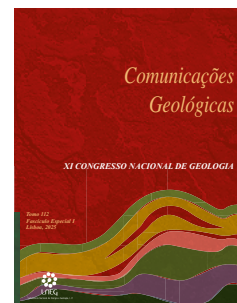
N. Wallenstein^{1*}, S. Matos¹, M. C. Jesus¹, A. Montalvo^{1,2}

DOI: <https://doi.org/10.34637/6rj-1447>

Recebido em 01/10/2023 / Aceite em 01/05/2024

Publicado online em abril de 2025

© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original
Original article

Abstract: The first references to infrasound records associated with explosive volcanic activity date back to the 1883 Krakatoa volcano eruption. Pioneer research works on infrasound associated with important volcanic eruptions were developed in the 60s to 80s of the 20th Century. However, it was with the signing of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) that infrasound studies have experienced a major development. The installation of the IS42 infrasound station on Graciosa Island, under the CTBT verification regime, allowed IVAR to start applying this research technique towards its integration in its monitoring networks. The detection of remote explosive eruptive activity (thousands of kilometres away) by IS42 station gave us good results. Moreover, the monitoring of the 2022 seismovolcanic crisis on São Jorge Island, with the installation of the SJ1 infrasound mobile array in conjunction with the IS42 station, has allowed us to integrate its results in the IVAR and CIVISA monitoring efforts.

Keywords: Seismovolcanic monitoring, infrasound, Azores, IS42, São Jorge.

Resumo: As primeiras referências a registos de infrassons associados a atividade vulcânica explosiva, remontam à erupção do vulcão Krakatoa em 1883. Os trabalhos pioneiros de investigação em infrassons foram desenvolvidos nas décadas de 60 a 80 do século XX. No entanto, foi com a assinatura do Tratado de Proibição Total de Ensaio Nucleares (CTBT) que os estudos em infrassons se começaram a destacar. A instalação da estação de infrassons IS42 na ilha Graciosa, no âmbito do regime de verificação do CTBT, permitiu ao IVAR iniciar a aplicação desta técnica de investigação com vista à sua integração nas suas redes de monitorização. Várias deteções de atividades eruptivas explosivas remotas (a milhares de quilómetros de distância) pela estação IS42 têm evidenciado bons resultados. Por outro lado, a monitorização da crise sismovulcânica de 2022 na ilha de São Jorge, com a instalação do *array* portátil de infrassons SJ1 em conjunto com a estação IS42, permitiu-nos integrar os seus resultados nos esforços de monitorização do IVAR e do CIVISA.

Palavras-chave: Monitorização sismovulcânica, infrassons, Açores, IS42, São Jorge

1. Introdução

As erupções vulcânicas explosivas são uma importante fonte de infrassons (Johnson *et al.*, 2004). No estudo da dinâmica eruptiva, as diferenças de pressão nos fluidos magmáticos são transferidas para as rochas encaixantes sob a forma de energia sísmica, dando origem a sinais de baixa frequência característicos da sismicidade vulcânica. Quando essas variações de pressão ocorrem em zonas muito superficiais, ou quando a conduta vulcânica já se encontra aberta é que a exsolução violenta dos gases vulcânicos produz perturbações atmosféricas que geram sinais acústicos de grande amplitude e baixa frequência (Fee e Matoza, 2013). Para além de ser possível monitorizar os sinais das perturbações acústicas provocadas pela interação entre as vibrações sísmicas superficiais e a atmosfera (sismo-acústicos), comparativamente aos sinais sísmicos, os sinais infrassônicos são mais eficazes na localização e caracterização dos episódios eruptivos explosivos e na quantificação das variações de pressão, os quais são gerados em processos vulcânicos internos e superficiais (Johnson e Ripepe 2011).

Foi com a assinatura do Tratado de Proibição Total de Ensaio Nucleares (CTBT), em 1996, e com a decisão da instalação de 60 estações de infrassons no Sistema Internacional de Monitorização (IMS), do regime de verificação da Comissão Preparatória da Organização do Tratado de Proibição Total de Ensaio Nucleares (CTBTO), que o conhecimento obtido pelo estudo dos infrassons associado a diferentes tipos de fontes se desenvolveu consideravelmente (Campus e Christie, 2010, Matoza e Fee, 2018). O Sistema Internacional de Monitorização (IMS) é uma rede global composta por 337 estações baseadas em 4 tecnologias complementares entre si: sísmica, hidroacústica, infrassons e radionuclídeos. Para detetar ondas sonoras de baixa frequência (abaixo do limiar do nível audível humano) que se propagam pela atmosfera, a rede de infrassons será composta por 60 estações de monitorização distribuídas pelo globo, das quais 53 já estão certificadas, entre as quais se encontra a estação IS42, localizada na Ilha Graciosa, Açores, certificada desde dezembro de 2010. A localização estratégica da estação IS42, no meio do Oceano Atlântico Norte, permite monitorizar uma vasta e importante região onde se registam infrassons com origem em fontes naturais e antropogénicas, com destaque para eventos atmosféricos extremos.

2. Estações de infrassons nos Açores

Atualmente nos Açores estão instalados dois *arrays* de infrassons, nomeadamente a estação do IMS IS42, na ilha Graciosa e o *array* portátil SJ1, na ilha de São Jorge (Figura 1).

¹ Universidade dos Açores, Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR), Rua da Mãe de Deus, 9500-321 Ponta Delgada, Açores, Portugal

² Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA), Rua da Mãe de Deus, 9500-321 Ponta Delgada, Açores, Portugal

* Autor correspondente/Corresponding author: nicolau.mb.wallenstein@azores.gov.pt

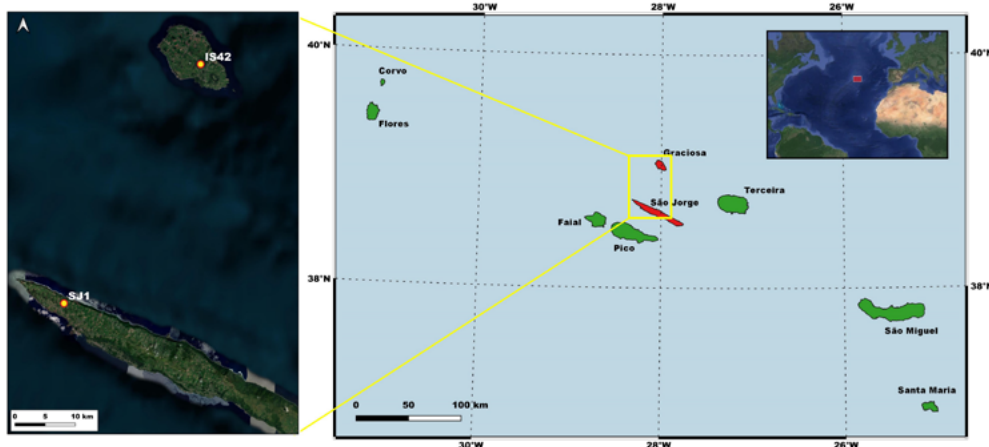


Figura 1. Localização dos arrays de infrassons IS42 e SJ1 nas ilhas Graciosa e São Jorge, no arquipélago dos Açores.
 Figure 1. Location of the IS42 and SJ1 infrasound arrays on Graciosa and São Jorge Islands in the Azores archipelago.

2.1. Estação IS42, Graciosa

Integrada no IMS (Figura 2), a estação de infrassons IS42 foi instalada numa área com uma densa cobertura florestal. Trata-se de um *array* de 8 microbarómetros de pressão absoluta, com capacidade de detetar diferenças de pressão na atmosfera inferiores a 1 mPa, estando ligados por fibra óptica ao Edifício Central (CF), numa geometria pentagonal exterior com abertura de 1875 m e triangular interior de 200 m (Figura 3 e 4), de modo a poder garantir o registo de diferentes comprimentos de onda e a utilização de um maior número de tripletos para a detecção de sinais coerentes. No CF, os dados são autenticados e transmitidos, via satélite, para o Centro Internacional de Dados (IDC) em Viena, Áustria (Wallenstein *et al.*, 2011).



Figura 3. Localização da estação IS42, na ilha Graciosa, e geometria do array.
 Figure 3. Location of IS42 station on Graciosa Island and array geometry.

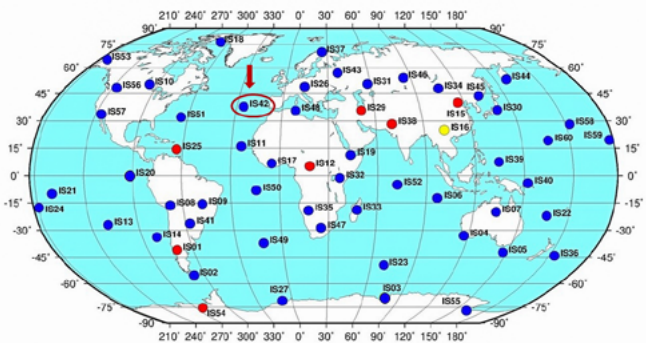


Figura 2. Rede de estações de infrassons IMS. Certificadas (pontos azuis); em construção (pontos amarelos); e ainda não instaladas (pontos vermelhos).
 Figure 2. IMS infrasound stations network. Certified (blue dots); under construction (yellow dots); and not yet installed (red dots).

2.2. Array portátil SJ1, São Jorge

A 3 de abril de 2022, no decurso da crise sismovulcânica na ilha de São Jorge, e em colaboração com investigadores da Universidade de Florença, foi instalado na zona dos Rosais, um *array* portátil de infrassons (SJ1) composto por 4 transdutores de pressão diferencial, configurados espacialmente numa geometria triangular com um elemento no centro e uma abertura de 130 m (Figura 5 e 6). Juntamente com a estação IS42, tem contribuído para a monitorização do Sistema Vulcânico Fissural de Manadas (Jesus *et al.*, 2023).



Figura 4. Detalhes da estação IS42.
 Figure 4. Details of the IS42 station.

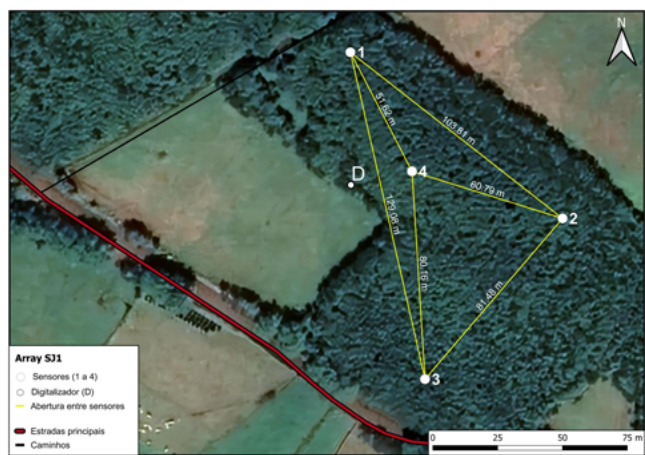


Figura 5. Configuração do array SJ1.

Figure 5. SJ1 array configuration.



Figura 6. Instalação do array SJ1.

Figure 6. SJ1 array deployment.

3. Detecção de erupções vulcânicas remotas

Desde 2011, várias erupções vulcânicas explosivas foram detetados pela estação IS42. Em maio de 2011, foram registados vários eventos que decorreram durante a erupção do vulcão Grímsvötn (Figura 7) (Matos *et al.*, 2019a, 2023). Entre maio e agosto de 2011, foram registados pela IS42 (Figura 8) um conjunto de episódios paroxismais, no vulcão Etna, os quais foram posteriormente utilizados para caraterizar e verificar a coerência entre as deteções numa estação local de infrassons, com os registos de longa distância da estação IS42. No mesmo vulcão, foram detetados pela estação IS42, em maio de 2016, sinais da alteração do tipo de atividade explosiva, desde a fase estromboliana à emissão de fontes de lava e atividade explosiva intensa (Matos *et al.*, 2019b, 2023). Exemplos de explosões paroxismais violentas têm sido registadas pela estação IS42, como foi o caso do evento ocorrido em julho 2019, no vulcão Stromboli, em Itália (Figura 9) (Matos *et al.*, 2020), e, mais recentemente, a erupção do vulcão Hunga Tonga e Hunga Ha’apai, no Oceano Pacífico, em janeiro de 2022, (Figura 10), a qual foi registada em todas as estações da rede IMS (Matoza *et al.*, 2022). Neste último caso, a estação IS42 registou sinais infrassónicos com

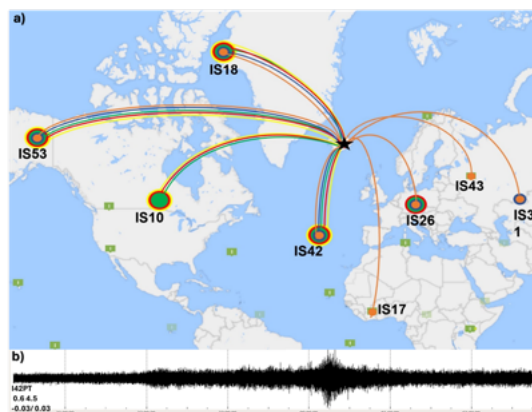


Figura 7. a) Azimutes inversos dos vários eventos (cores) registados nas várias estações do IMS da erupção vulcânica de Grímsvötn, em maio de 2011; b) Forma de onda do evento do dia 21 de maio (Matos *et al.*, 2019a).

Figure 7. a) Back azimuths of various events (colors) recorded at various IMS stations from the Grímsvötn volcanic eruption, in May 2011; b) Waveform of the May 21st event (Matos *et al.*, 2019a).

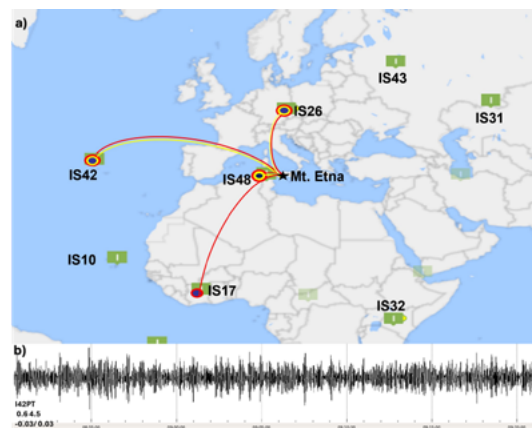


Figura 8. a) Azimutes inversos registados nas várias estações da IMS da atividade vulcânica explosiva do vulcão Etna entre maio e agosto de 2011; b) Forma de onda do evento do dia 25 de julho (Matos *et al.*, 2019b).

Figure 8. a) Back azimuths recorded at various IMS stations of Etna’s volcano explosive volcanic activity between May and August 2011; b) Waveform of the July 25th event (Matos *et al.*, 2019b).



Figura 9. Localização do evento paroxismal no vulcão Stromboli a 3 de julho de 2019, através dos azimutes inversos registados nas várias estações da IMS (Matos *et al.*, 2020).

Figure 9. Location of the paroxysmal volcanic event at Stromboli volcano on July 3, 2019, using the back azimuths recorded at various IMS stations (Matos *et al.*, 2020).

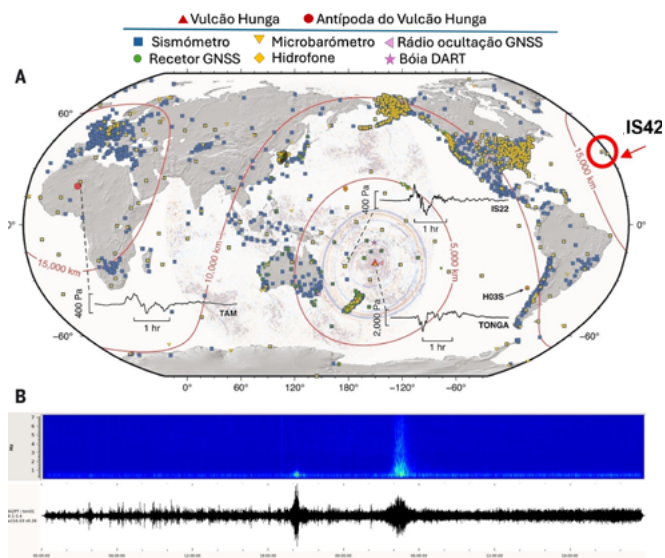


Figura 10. (a) Observações sismoacústicas globais da erupção do vulcão Hunga Tonga e Hunga Ha'apai, em janeiro de 2022 (adap. Matoza *et al.*, 2022); (b) Detecções da estação IS42.

Figure 10. (a) Global seismoacoustic observations of the Hunga Tonga and Hunga Ha'apai volcano eruption in January 2022 (adap. Matoza *et al.*, 2022); (b) Detections at the IS42 station.

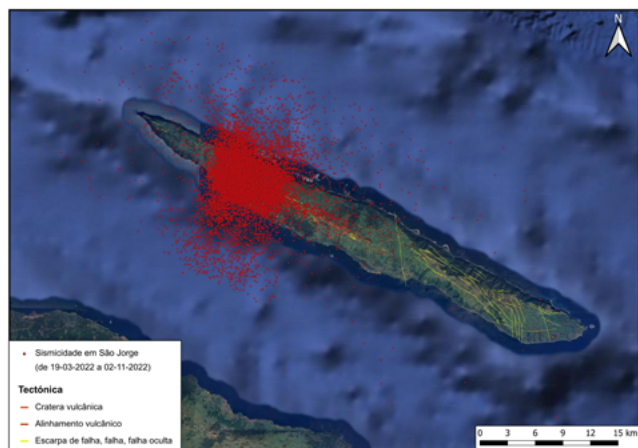


Figura 11. Atividade sísmica em São Jorge desde 19/03/2022 a 02/11/2022 (CIVISA, 2022).

Figure 11. Seismic activity on São Jorge Island from 19/03/2022 to 02/11/2022 (CIVISA, 2022).

diferentes tempos de chegada, com evidência de propagação de ondas provenientes de ambos os hemisférios (este e oeste) (Figura 10).

4. Crise sismovulcânica na ilha de São Jorge

A 19 de março de 2022 foi observado um aumento brusco da atividade sísmica e a evidência de deformação crustal na ilha de São Jorge (Figura 11), os quais foram relacionados com uma possível reativação do Sistema Vulcânico Fissural de Manadas, onde ocorreram as erupções históricas subaéreas de 1580 e 1808 (Madeira, 1998; Wallenstein *et al.*, 2018, Zanon e Viveiros, 2019).

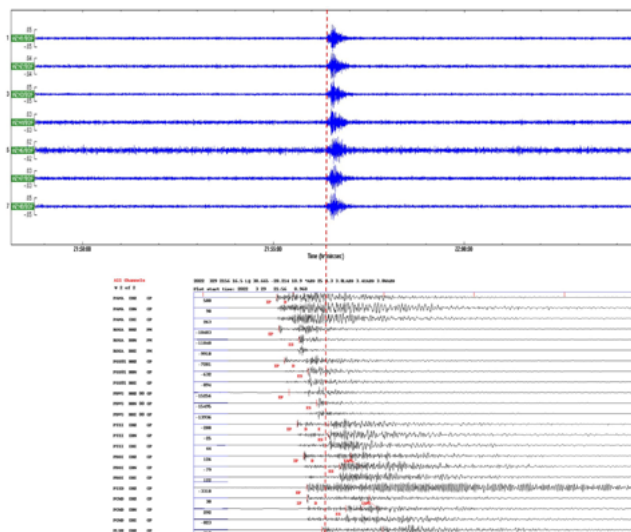


Figura 12. Formas de onda do sismo de 29 de março (21:56:24 UTC) registado na estação IS42 e na rede de estações sísmicas do CIVISA.

Figure 12. Waveforms of the March 29 earthquake (21:56:24 UTC) recorded at the IS42 station and by the CIVISA seismic stations network.

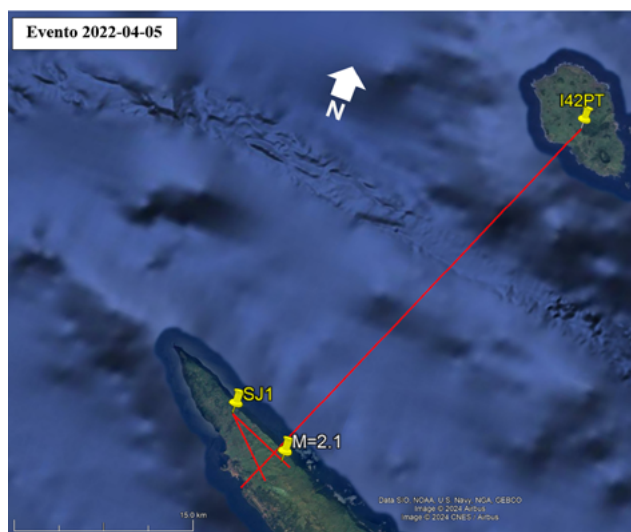


Figura 13. Evento sismoacústico: projeção dos azimutes inversos da IS42 e do SJ1 (com progressão para sul) (Matos *et al.*, 2023); pin: localização do epicentro pela rede do CIVISA.

Figure 13. Seismoacoustic event: projection of the back azimuths from IS42 and SJ1 (with progression southwards) (Matos *et al.*, 2023); pin: location of the epicentre by the CIVISA network.

4.1. Detecções da IS42 e do SJ1

Para além de um evento sísmico, registado pela estação IS42 a 29 de março de 2022 (Figura 12), a 5 de abril, às 21:23:32 UTC, um sismo de magnitude 2,1 (Richter) e uma profundidade de ~ 0 km foi registado pela rede sísmica do CIVISA. Este evento, muito superficial, gerou um sinal sismoacústico detetado pelo *array* SJ1 e pela estação IS42 (Figura 13). O evento foi registado no *array* SJ1, com um azimute inverso médio de N117°, velocidade aparente de 340 ms⁻¹, frequência de 2,4 Hz e amplitude de 0,1 Pa. Na estação IS42 registou-se com um azimute inverso médio de N203°,

velocidade aparente de 350 ms⁻¹, frequência de 2,5 Hz e amplitude de 0,02 Pa. No *array* SJ1 foi possível acompanhar a propagação da perturbação barométrica provocada pelo sismo à superfície, com especial incidência em cones de escória localizados para sul (Figura 13) (Matos *et al.*, 2023).

5. Considerações finais

A crescente utilização, nas últimas décadas, de técnicas de infrassons na monitorização vulcânica é o reconhecimento da sua utilidade no acompanhamento e caracterização de erupções vulcânicas explosivas próximas e na deteção remota de atividade eruptiva em vulcões pouco monitorizados. A estação de infrassons IS42, do IMS, localizada na ilha Graciosa desde 2010, tem vindo a demonstrar o seu potencial na deteção de erupções vulcânicas remotas e, mais recentemente, em atividade sismovulcânica próxima. Os dados obtidos pelo *array* portátil SJ1, instalado na ilha de São Jorge para o acompanhamento da crise sismovulcânica, iniciada em 2022, permitiram constatar a importância do alargamento da rede de estações de infrassons nos Açores, estando em curso o processo de aquisição de mais um *array*, a instalar nos próximos meses.

Agradecimentos

A manutenção e operação da estação IS42 são suportadas pelo contrato CTBTO N.º 2012-1694. O *array* SJ1 foi cedido pelos colegas Emanuelle Marchetti, Duccio Gheri e Giacomo Belli, da Universidade de Florença (UniFI), que colaboraram na sua instalação e processamento de dados. Os trabalhos de campo em São Jorge foram suportados pelo IVAR e CIVISA.

Referências

- Campus, P., Christie, D., 2010. Worldwide Observations of Infrasonic Waves. In: Le Pichon, A., Blanc, E., Hauchecorne, A. (Eds.), *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Springer, Dordrecht, 181-230.
- Fee, D., Matoza, R., 2013. An Overview of Volcano Infrasound: From Hawaii to Plinian, Local to Global. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **249**: 123-139.
- Jesus, M.C., Belli, G., Gheri, D., Matos, S., Wallenstein, N., Montalvo, A., Marchetti, E., 2023. 2022 São Jorge Island (Azores) seismovolcanic crisis: deployment of a mobile infrasound array (SJ1) for local monitoring purposes. ITW 2022: Infrasound Technology Workshop, Ponta Delgada.
- Johnson, B. J., Aster, R., Kyle, P., 2004. Volcanic eruptions observed with infrasound. *Geophysical Research Letters*, **31**: L17604.
- Johnson, B. J., Ripepe, M., 2011. Volcano infrasound: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **206**: 61-69.
- Madeira, J., 1998. Estudos de Neotectónica nas ilhas do Faial, Pico e S. Jorge: uma contribuição para o conhecimento geodinâmico da junção tripla dos Açores. Tese de doutoramento. Universidade de Lisboa.
- Madeira, J., Brum da Silveira, A., 2003. Active tectonics and first paleoseismological results in Faial, Pico and S. Jorge islands (Azores, Portugal). *Annals of Geophysics*, **46**(5): 733-761.
- Matos, S., Gheri, D., Belli, G., Jesus, M.C., Wallenstein, N., Marchetti, E., 2023. 2022 São Jorge Island (Azores) seismovolcanic crisis: infrasound radiation by low magnitude earthquakes. ITW 2022: Infrasound Technology Workshop, Ponta Delgada.
- Matos, S., Wallenstein, N., Marchetti, E., Ripepe, M., 2020. Location of Stromboli volcano July 2019 paroxysm event based on long-range infrasound detections in several IMS stations, EGU General Assembly 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10156>.
- Matos, S., Wallenstein, N., Campus, P., 2019a. Analysis of multiple detections of May 2011 Grímsvötn (Iceland) eruptive activity at different IMS infrasound stations and its correlation with local source observations. CTBT: Science and Technology 2019 Conference Book of abstracts, 6, Vienna, Austria.
- Matos, S., Wallenstein, N., Campus, P., Marchetti, E., Ripepe, M., 2019b. Analysis of multiple detections of Mount Etna eruptive activity at different IMS infrasound stations compared with near source observations. CTBT: Science and Technology 2019 Conference Book of abstracts, 7, Vienna, Austria.
- Matos, S., Wallenstein, N., Campus, P., Ripepe, M., 2023. Infrasonic Long-Range Observations at IS42: Study cases of Grímsvötn (Iceland), Mt. Etna and Stromboli Volcanoes (Italy). In: Malheiro, A., Fernandes, F., Chaminé, H. (Eds.), *Advances in Natural Hazards and Volcanic Risks: Shaping a Sustainable Future Proceedings of the 3rd International Workshop on Natural Hazards (NATHAZ'22), Terceira Island-Azores 2022*, Springer, Cham, 93-96.
- Matoza, R. S., Fee, D., 2018. The inaudible Rumble of Volcanic Eruptions. *Acoustics Today*, **14-1**: 17-25.
- Matoza *et al.* (2022). Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. **377**(6601): 95-100.
- Wallenstein, N., Gaspar, J. L., Kramer, A., Carvalho, J., Campus, P., Haralabus, G., Gregório, J., Mialle, P., IS42 Team, 2011. IS42 Graciosa (Azores): A new IMS certified infrasound station in the North Atlantic. EGU General Assembly 2011.
- Wallenstein, N., Duncan, A., Coutinho, R., Chester, D., 2018. Origin of the term nuées ardentes and the 1580 and 1808 eruptions on São Jorge Island, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **358**: 165-170.
- Zanon, V., Viveiros, F., 2019. A multi-methodological re-evaluation of the volcanic events during the 1580 CE and 1808 eruptions at São Jorge Island (Azores Archipelago, Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **373**: 51-67.