

REVISÃO SISTEMÁTICA DOS CRITÉRIOS DE SIMILARIDADE NA IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS SÍSMICOS SEMELHANTES

SYSTEMATIC REVIEW OF SIMILARITY CRITERIA FOR IDENTIFYING SIMILAR SEISMIC EVENTS

REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LOS CRITERIOS DE SIMILITUD EN LA IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS SÍSMICOS SIMILARES



10.56238/revgeov17n1-013

Jaqueline Alexsandra Azevedo Ferreira

Mestrado em Matemática

Instituição: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

E-mail: Jaqueline_azevedo@ufrb.edu.brOrcid: <https://orcid.org/0000-0002-3184-6135>Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0964632956964410>

RESUMO

A identificação de eventos sísmicos semelhantes constitui um aspecto importante entender a dinâmica sísmica, e identificar recorrência de réplicas, enxames sísmicos e avaliar riscos geológicos. Este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre os métodos computacionais empregados na identificação de similaridade entre formas de onda sísmicas, com ênfase nos critérios de decisão e nas técnicas de processamento de sinais. A revisão foi conduzida a partir de buscas em bases de dados científicas, utilizando strings específicas relacionadas à medidas de similaridade de eventos sísmicos. A análise dos estudos selecionados evidencia que, apesar das limitações recorrentes associadas à dependência de limiares empíricos, da sensibilidade ao ruído e da dificuldade de garantir consistência e reprodutibilidade na classificação de eventos em grandes catálogos sísmicos, os métodos baseados em correlação cruzada são amplamente adotados. Conclui-se que a literatura aponta lacunas conceituais na modelagem da similaridade entre eventos sísmicos, indicando a necessidade de investigações matemáticas e computacionais futuras voltadas ao desenvolvimento de critérios mais consistentes e fundamentados para a curadoria automatizada de dados sísmicos.

Palavras-chave: Eventos Sísmicos Semelhantes. Similaridade de Formas de Onda. Revisão Sistemática.

ABSTRACT

The identification of similar seismic events constitutes an important aspect for understanding seismic dynamics, identifying the recurrence of aftershocks and seismic swarms, and assessing geological hazards. This work presents a systematic literature review on the computational methods employed for identifying similarity between seismic waveforms, with an emphasis on decision criteria and signal processing techniques. The review was conducted based on searches in scientific databases, utilizing specific strings related to seismic event similarity measures. The analysis of the selected studies evidences that, despite the recurrent limitations associated with the dependence on empirical thresholds, sensitivity to noise, and the difficulty of ensuring consistency and reproducibility in event

classification within large seismic catalogs, cross-correlation-based methods are widely adopted. It is concluded that the literature points to conceptual gaps in the modeling of similarity between seismic events, indicating the need for future mathematical and computational investigations aimed at developing more consistent and well-founded criteria for the automated curation of seismic data.

Keywords: Similar Seismic Events. Waveform Similarity. Systematic Review.

RESUMEN

La identificación de eventos sísmicos similares constituye un aspecto importante para comprender la dinámica sísmica, e identificar la recurrencia de réplicas, enjambres sísmicos y evaluar riesgos geológicos. Este trabajo presenta una revisión sistemática de la literatura sobre los métodos computacionales empleados en la identificación de similitud entre formas de onda sísmicas, con énfasis en los criterios de decisión y las técnicas de procesamiento de señales. La revisión se llevó a cabo a partir de búsquedas en bases de datos científicas, utilizando cadenas de búsqueda específicas relacionadas con medidas de similitud de eventos sísmicos. El análisis de los estudios seleccionados evidencia que, a pesar de las limitaciones recurrentes asociadas a la dependencia de umbrales empíricos, la sensibilidad al ruido y la dificultad de garantizar consistencia y reproducibilidad en la clasificación de eventos en grandes catálogos sísmicos, los métodos basados en correlación cruzada son ampliamente adoptados. Se concluye que la literatura señala lagunas conceptuales en el modelado de la similitud entre eventos sísmicos, indicando la necesidad de futuras investigaciones matemáticas y computacionales orientadas al desarrollo de criterios más consistentes y fundamentados para la curación automatizada de datos sísmicos.

Palabras clave: Eventos Sísmicos Similares. Similitud de Formas de Onda. Revisión Sistemática.



1 INTRODUÇÃO

A identificação de eventos sísmicos semelhantes (como réplicas e enxames de terremotos) desempenha um papel importante na avaliação de riscos geológicos, no que diz o respeito a evolução das falhas e na compreensão da dinâmica sismológica, no que diz o respeito ao mecanismo de ruptura. Nesse sentido, a análise comparativa de formas de onda sísmicas constitui uma ferramenta fundamental para a investigação da similaridade entre eventos e para a construção de catálogos sísmicos mais consistentes.

Culturalmente, os especialistas em Geociência têm realizado a identificação de eventos sísmicos semelhantes por meio de inspeções visuais ou de métodos baseados em correlação cruzada entre registros sísmicos. Embora essas abordagens tenham se mostrado eficazes em diferentes aplicações, elas dependem de critérios empíricos, variações na propagação das ondas, levantamento macrossísmico e análises exaustivas dos pares de eventos sísmicos. Isso impõe limitações quando aplicadas a ambientes com elevado nível de ruído ou com grandes volumes de dados.

Nas últimas décadas, o aumento da disponibilidade de dados sísmicos impulsionou o desenvolvimento de métodos automatizados para a detecção de eventos semelhantes. Apesar do progresso observado, a literatura ainda apresenta uma diversidade de critérios e estratégias de decisão, muitas vezes pouco comparáveis entre si, o que evidencia a ausência de um consenso conceitual sobre a definição e a modelagem da similaridade entre eventos sísmicos.

Diante desse cenário, torna-se relevante realizar uma revisão sistemática da literatura que permita uma síntese dos métodos existentes, identifique suas principais vantagens e limitações e avalie a necessidade de novas abordagens. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão sistemática das abordagens empregadas na identificação de eventos sísmicos semelhantes, destacando os métodos utilizados e os desafios recorrentes apontados na literatura. Ao reunir e organizar esse conhecimento, busca-se fornecer subsídios para a avaliação da necessidade (ou não) do desenvolvimento de novos critérios ou estruturas conceituais para a análise de similaridade entre formas de onda sísmicas.

2 METODOLOGIA

Este trabalho foi conduzido como uma revisão sistemática da literatura (SAMPAIO; MANCINI, 2007), com o objetivo de identificar, analisar e comparar os principais métodos empregados na literatura para a identificação de eventos sísmicos semelhantes a partir da comparação de formas de onda.

2.1 TIPO DE REVISÃO

Esta pesquisa se estrutura como uma revisão sistemática da literatura (SAMPAIO; MANCINI,



2007) que avalia o estado da arte de forma qualitativa e discute a suficiência das abordagens atualmente empregadas, com ênfase nos critérios de similaridade utilizados, suas vantagens e limitações.

2.2 BASES DE DADOS CONSULTADAS

A busca bibliográfica foi realizada nas seguintes bases de dados científicas, selecionadas por sua relevância e abrangência na área de sismologia e processamento de sinais:

- Web of Science
- Scopus
- Google Scholar

Além dessas fontes, documentos técnicos e materiais institucionais de órgãos oficiais, como o United States Geological Survey (USGS), foram considerados quando relevantes para a contextualização conceitual.

2.3 ESTRATÉGIA DE BUSCA E STRINGS

As seguintes strings de busca foram aplicadas, com adaptações conforme a sintaxe de cada base:

("seismic event similarity" OR "waveform similarity" OR "repeating earthquakes")
AND ("cross-correlation" OR "template matching" OR "matched filter")

As buscas contemplaram publicações entre **2000 e 2025**, período que abrange o desenvolvimento e a consolidação das principais abordagens utilizadas na área.

2.4 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO

Foram incluídos na revisão os estudos que atenderam aos seguintes critérios:

- Artigos revisados por pares;
- Trabalhos que utilizam dados sísmicos reais;
- Estudos que empregam comparação de formas de onda para identificação de eventos semelhantes;
- Publicações que descrevem explicitamente o critério ou métrica de similaridade adotada;
- Artigos publicados em inglês.

2.5 CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO

Foram excluídos da análise:

- Trabalhos puramente teóricos sem aplicação a dados sísmicos;
- Estudos que não apresentam descrição clara do critério de decisão ou similaridade;



- Artigos duplicados entre as bases consultadas;

2.6 PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ESTUDOS

O processo de seleção dos estudos foi conduzido em três etapas sucessivas:

- (i) leitura dos títulos;
- (ii) leitura dos resumos;

Na etapa final, apenas os estudos que atendiam integralmente aos critérios de inclusão foram considerados para análise qualitativa. As informações extraídas de cada artigo incluíram o tipo de dado analisado, o método empregado, a métrica de similaridade, o critério de decisão e as principais vantagens e limitações identificadas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 CORRELAÇÃO CRUZADA

A correlação cruzada é o método mais tradicional e amplamente empregado na identificação de eventos sísmicos semelhantes, sendo utilizada para quantificar o grau de similaridade entre formas de onda registradas por uma ou mais estações sismográficas. Nesse contexto, eventos são considerados semelhantes quando o coeficiente máximo de correlação cruzada entre seus sinais ultrapassa um determinado limiar previamente estabelecido. Estudos clássicos demonstram que essa abordagem é eficaz para a identificação de microterremotos repetidos e para a análise de agrupamentos sísmicos associados a uma mesma fonte ou falha geológica (CHENG et al., 2007; LI et al., 2007).

Alguns trabalhos aplicaram essa técnica com sucesso em diferentes contextos geológicos, evidenciando sua capacidade de revelar padrões de repetição sísmica e estimar parâmetros físicos relevantes, como taxas de deslizamento em falhas ativas (LI et al., 2011). No entanto, apesar de sua ampla adoção, a correlação cruzada clássica apresenta limitações importantes, especialmente no que se refere à sensibilidade ao ruído, à dependência do alinhamento temporal entre os sinais e à escolha empírica do limiar de decisão, que pode influenciar o número de eventos classificados como semelhantes (BACHMANN et al., 2007; ZHU et al., 2021).

3.2 DETECTORES DE SINAIS REPETIDOS

Além da correlação, outros estudos têm empregado abordagens baseadas em *templates* para a identificação de eventos sísmicos semelhantes. Formas de ondas sísmicas previamente detectadas por sismógrafos são utilizadas como modelos (*templates*), sendo comparadas de maneira sistemática com registros sísmicos contínuos online ou com conjuntos de eventos, por meio de medidas de correlação cruzada ou distâncias euclidianas. Essa estratégia tem se mostrado particularmente eficiente para a



detecção de enxames sísmicos, permitindo a identificação automática de ocorrências com elevada similaridade temporal e espectral (SKOUMAL; BRUDZINSKI; CURRIE, 2016).

O uso de detectores específicos, como o *Repeating Signal Detector*, amplia a aplicabilidade do *template* ao possibilitar a análise de grandes volumes de dados com maior eficiência computacional. Trabalhos recentes demonstram que essa abordagem é capaz de revelar sequências de eventos repetidos que não seriam facilmente identificadas por inspeção manual (TEPP, 2018; CHAMBERLAIN et al., 2020). No entanto, os métodos e ferramentas baseados em *template* também apresentam limitações relacionadas à escolha dos *templates*, à definição de limiares de correlação, uma vez que eventos com características distintas das formas de onda previamente selecionadas podem não ser identificados, por questões ambientais externas ao evento naquele instante, restringindo a abrangência da análise.

Além dos métodos descritos, especialistas utilizam *templates* em ferramentas computacionais para a identificação automatizada de eventos sísmicos semelhantes. O PyMPA (Python Matching Phase Algorithm) é um pacote voltado à correspondência automática de fases sísmicas (PYMPA DEVELOPERS, 2025), enquanto o SCDetect consiste em um módulo do ambiente SeisComP baseado em correlação cruzada para a detecção de terremotos a partir de formas de onda (SCDETECT DEVELOPERS, 2025). Essas ferramentas evidenciam a predominância de abordagens baseadas em correlação cruzada e limiares empíricos.

3.3 MÉTODOS DE AGRUPAMENTO (CLUSTERING) APLICADOS À SIMILARIDADE SÍSMICA

Além das abordagens baseadas em comparações diretas entre pares de eventos, alguns estudos têm empregado métodos de agrupamento (*clustering*) para organizar conjuntos de eventos sísmicos semelhantes com base em medidas de similaridade entre formas de onda. Nessa perspectiva, a métrica de correlação cruzada é aplicada em algoritmos de agrupamento com o objetivo de identificar grupos de eventos associados a uma mesma fonte sísmica ou a mecanismos de ruptura semelhantes (WALDHAUSER; SCHAFF, 2007; BACHMANN et al., 2007).

Essas abordagens permitem uma análise mais global das relações entre eventos, reduzindo a dependência de comparações pontuais. Estudos recentes demonstram que técnicas de *clustering* podem revelar estruturas internas nos dados sísmicos que não são evidentes por meio de métodos baseados exclusivamente em limiares de correlação, contribuindo para a compreensão da organização espacial e temporal da sismicidade (WALDHAUSER; SCHAFF, 2021; GAO; KAO; LIU, 2023).

3.4 ABORDAGENS BASEADAS EM APRENDIZADO DE MÁQUINA NA IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS SÍSMICOS SEMELHANTES

Abordagens baseadas em aprendizado de máquina têm sido exploradas para a identificação e



classificação de eventos sísmicos semelhantes, principalmente em contextos caracterizados por sinais complexos e com grandes volumes de dados sísmicos. Esses métodos utilizam técnicas de aprendizado supervisionado para extrair características relevantes das formas de onda sísmicas, permitindo a comparação automática entre eventos a partir de representações que são aprendidas dos dados, e neste caso, não restringem-se a métricas de similaridade definidas explicitamente (LI et al., 2018).

Os modelos de aprendizado de máquina podem apresentar maior robustez frente a ruídos e variações nas condições de propagação das ondas sísmicas, quando comparados a métodos tradicionais baseados exclusivamente em correlação cruzada. Além disso, essas abordagens têm sido aplicadas com sucesso na classificação e no agrupamento de eventos sísmicos, ampliando a capacidade de detecção de padrões complexos e não lineares nos dados (SI et al., 2023). No entanto, apesar de seu potencial, os métodos baseados em aprendizado de máquina apresentam limitações relevantes, como a dependência de grandes conjuntos de dados rotulados, a menor interpretabilidade física dos resultados e a dificuldade de generalização para regiões ou contextos geológicos distintos daqueles utilizados no treinamento, o que impõe desafios à sua aplicação sistemática em estudos de similaridade sísmica.

4 RESULTADOS

A aplicação da estratégia de busca definida nesta revisão sistemática resultou inicialmente em um conjunto amplo de estudos relacionados à identificação de eventos sísmicos semelhantes. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e da remoção de duplicatas, foi obtido um conjunto final de materiais considerados relevantes para a análise. Esses estudos abrangem métodos clássicos baseados em correlação cruzada, distância euclidiana, técnicas de detecção de sinais repetidos e abordagens mais recentes baseadas em aprendizado de máquina.

Os estudos selecionados utilizam, de forma predominante, métodos baseados na comparação direta das formas de onda sísmicas, com destaque para a correlação cruzada como medida de similaridade. Trabalhos clássicos e amplamente citados empregam esse coeficiente para identificar eventos repetidos ou semelhantes, explorando o alinhamento temporal das ondas e a maximização do valor de correlação. Além disso, foram identificadas abordagens que combinam a correlação cruzada com métodos de pré-processamento, como filtragem espectral, visando reduzir a influência de ruídos e variações externas.

Alguns estudos utilizaram janelas deslizantes para identificar possíveis eventos, enquanto outros propõem detectores específicos para sinais recorrentes, capazes de identificar múltiplas ocorrências de eventos semelhantes ao longo de grandes volumes de dados sísmicos.

Além dos métodos clássicos, parte dos trabalhos analisados explora técnicas de agrupamento e algoritmos de aprendizado de máquina para a identificação de eventos sísmicos semelhantes. Abordagens incluem métodos não supervisionados, como clustering baseado em distâncias, bem como



modelos supervisionados voltados à classificação de eventos sísmicos observados previamente. Em geral, esses métodos utilizam características extraídas das formas de onda ou representações no domínio do tempo e da frequência, buscando automatizar o processo de identificação de padrões recorrentes em logs catálogos sísmicos extraídos de diferentes estações sísmicas.

A análise dos estudos evidencia que os critérios de similaridade adotados na literatura variam consideravelmente, sendo predominantemente baseados em medidas quantitativas entre pares de eventos, como coeficientes de correlação, distâncias no espaço de características ou métricas derivadas de transformadas espectrais. Embora esses critérios permitam a identificação de eventos semelhantes em diferentes contextos, observa-se que não há consenso quanto a um modelo unificado para a representação da similaridade entre múltiplos eventos, o que resulta na coexistência de abordagens diversas, adaptadas a objetivos e conjuntos de dados específicos.

Tabela 1: Síntese comparativa dos principais métodos utilizados na identificação de eventos sísmicos semelhantes na literatura.

Autor(es)	Ano	Método principal	Critério de similaridade	Tipo de dados analisados
Bachmann et al.	2007	Correlação cruzada	Coeficiente de correlação máxima entre formas de onda alinhadas temporalmente	Registros sísmicos de eventos naturais
Li et al.	2007	Correlação cruzada e agrupamento espacial	Similaridade de formas de onda associada à proximidade espacial	Microterremotos ao longo de falhas ativas
Cheng et al.	2007	Correlação cruzada	Alta correlação entre eventos repetidos	Microterremotos registrados no Japão
Zhu et al.	2021	Reavaliação da correlação cruzada	Correlação cruzada com ajustes de pré-processamento	Catálogos sísmicos regionais
Skoumal et al.	2016	Repeating Signal Detector (RSD)	Similaridade baseada em correlação e recorrência temporal	Enxames sísmicos



Tepp	2018	Detector de sinais repetidos	Identificação de padrões recorrentes no sinal	Dados sísmicos contínuos
Li et al.	2011	Correlação cruzada	Similaridade de eventos repetidos para estimativa de taxas de deslizamento	Microterremotos profundos
Gonzales & Wintz	1987	Processamento digital de sinais	Distância Euclidiana	Imagens digitais discretas
Li et al.	2018	Aprendizado de máquina	Similaridade no espaço de características	Dados sísmicos classificados automaticamente
USGS	2024	Análise observacional	Crítérios físicos e temporais	Eventos sísmicos e réplicas

Fonte: Autores.

5 DISCUSSÕES

A análise dos estudos selecionados nesta revisão sistemática evidencia a predominância de técnicas baseadas na métrica correlação cruzada. Isso confirma a relevância dessa métrica como ferramenta fundamental para a comparação de formas de onda, principalmente em contextos que envolvem eventos repetidos ou réplicas sísmicas. No entanto, a forma como essa métrica é empregada varia significativamente entre os estudos, tanto em termos de pré-processamento quanto na definição de limiares de decisão.

O uso de parâmetros empíricos é um aspecto recorrente identificado na literatura. Eles são frequentemente ajustados de acordo com a geologia local. Embora essa flexibilidade permita adaptar os métodos a diferentes contextos geológicos, ela introduz subjetividade no processo de identificação de eventos semelhantes, dificultando a comparação direta entre estudos e a reprodutibilidade dos resultados em cenários diferentes. Essa limitação é muito relevante em análises envolvendo grandes catálogos sísmicos, onde pequenas variações nos parâmetros podem resultar em classificações muito distintas.

Observou-se também que a maioria das abordagens trata a similaridade entre eventos por pares, sem considerar a estrutura global das relações estabelecidas entre múltiplos eventos em um mesmo banco de dados. Essa característica pode levar a detalhes que podem não ser bem observados a respeito de comparações entre formas de ondas sísmicas, como a ausência da relação de transitividade da similaridade entre os eventos sísmicos, o que dificulta a interpretação dos agrupamentos. Embora técnicas de agrupamento e métodos baseados em aprendizado de máquina tenham sido propostos como



alternativas para lidar com essa questão, tais abordagens frequentemente apresentam desafios adicionais relacionados à escolha de parâmetros adequados.

Outro ponto relevante refere-se à sensibilidade dos métodos de identificação de eventos sísmicos semelhantes às condições de aquisição dos dados e à presença de ruídos externos. Diferenças na localidade de instalação das estações e nas características de propagação das ondas podem afetar significativamente as medidas de similaridade, mesmo entre eventos originados em uma mesma fonte sísmica. Com o objetivo de mitigar esses efeitos, diversos estudos adotam estratégias de pré-processamento, incluindo filtragem espectral para redução de ruído e alinhamento temporal das formas de onda antes do cálculo das métricas de similaridade (BACHMANN et al., 2007; BARANI; FERRETTI, 2007). Abordagens mais recentes, como métodos de agrupamento de formas de onda multicanais, também incorporam essas etapas de filtragem, normalização e alinhamento como forma de melhorar a robustez das comparações entre eventos (CASTELLANOS; VAN DER BAAN, 2015). Apesar desses avanços, identificou-se que ainda não há consenso na literatura quanto a um procedimento padrão capaz de garantir desempenho consistente em diferentes cenários sísmicos, especialmente quando considerados grandes catálogos e condições variáveis de aquisição e ruído (ZHU et al., 2021). De forma geral, os resultados desta revisão indicam que, apesar dos avanços alcançados nas últimas décadas, ainda persistem lacunas metodológicas na modelagem da similaridade entre eventos sísmicos. A ausência de critérios unificados e de estruturas formais que capturem adequadamente as relações entre múltiplos eventos sugere a necessidade de investigações adicionais voltadas ao desenvolvimento de abordagens mais consistentes. Nesse contexto, esta análise crítica contribui para o entendimento do estado da arte e estabelece uma base sólida para futuras pesquisas que busquem aprimorar os critérios de identificação de formas de onda sísmicas semelhantes.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma revisão sistemática da literatura voltada às técnicas de identificação de eventos sísmicos semelhantes. A síntese dos estudos evidenciou que, embora exista uma variedade de abordagens disponíveis, a maioria dos métodos se baseia em comparações diretas entre pares de eventos, frequentemente fundamentadas em medidas de correlação cruzada e em critérios empíricos de decisão que dependem da geologia local.

Os resultados vistos nesta revisão sistemática indicaram que as abordagens apresentam limitações recorrentes relacionadas à sensibilidade ao ruído, à dependência das condições de aquisição dos dados e à inconsistência na classificação de eventos similares quanto a forma de ondas sísmicas ao longo de grandes catálogos sísmicos. Além disso, a ausência de estruturas conceituais unificadas para a modelagem da similaridade entre múltiplos eventos contribui para inconsistências na interpretação dos agrupamentos e na comparação entre diferentes estudos. Observa-se que a



identificação de eventos sísmicos semelhantes permanece dependente da complexidade dos dados analisados. Assim, futuras investigações podem se beneficiar da incorporação de abordagens interdisciplinares que explorem conceitos matemáticos aplicados à normalização, interpolação e filtragens de ruídos de formas de onda sísmicas, de modo a promover uma padronização mais consistente dos dados e possibilitar comparações mais justas entre eventos. Essa integração entre Geociências, Matemática e Computação representa um caminho promissor para o aprimoramento dos critérios de similaridade e para o desenvolvimento de ferramentas computacionais mais robustas na análise sísmica.

Assim, a síntese crítica conduzida nesta revisão sistemática reforça a importância de investigações futuras voltadas ao desenvolvimento e à avaliação de critérios de similaridade mais consistentes, interpretáveis e fundamentados teoricamente, capazes de lidar com a heterogeneidade das formas de onda sísmicas coletadas pelas estações sismológicas. Nesse sentido, este trabalho fornece um panorama do estado da arte e estabelece uma base conceitual para pesquisas subsequentes que busquem avançar na curadoria e na análise automatizada de dados sísmicos.



REFERÊNCIAS

- BACHMANN, C. et al. Analysis of seismic event similarity using cross-correlation. *Geophysical Journal International*, v. 168, n. 2, p. 459–473, 2007.
- BARANI, S.; FERRETTI, G. The waveform similarity approach to identify dependent events in instrumental seismic catalogues. *Geophysical Journal International*, v. 168, n. 1, p. 100–108, 2007.
- CASTELLANOS, J.; VAN DER BAAN, M. Multi-channel waveform clustering for seismic event analysis. *Journal of Seismology*, v. 19, n. 2, p. 273–289, 2015.
- CHENG, X.; NIU, F.; SILVER, P. G.; HORIUCHI, S.; TAKAI, K.; IIO, Y.; ITO, H. Similar microearthquakes observed in western Nagano, Japan, and implications for rupture mechanics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 112, n. B4, 2007.
- GAO, D.; KAO, H.; LIU, J. Identification of repeating earthquakes: controversy and rectification. *Seismological Research Letters*, v. 94, n. 6, p. 2655–2665, 2023.
- KANASEWICH, E. R. **Time sequence analysis in geophysics**. Edmonton: University of Alberta Press, 1981.
- LI, L.; CHEN, Q. F.; CHENG, X.; NIU, F. Spatial clustering and repeating of seismic events observed along the 1976 Tangshan fault, North China. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 23, 2007.
- LI, L.; CHEN, Q. F.; NIU, F.; SU, J. Deep slip rates along the Longmen Shan fault zone estimated from repeating microearthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 116, n. B9, 2011.
- LI, W.; NAKSHATRA; NARVEKAR, N.; RAUT, N.; SIRKECI, B.; GAO, J. Seismic data classification using machine learning. In: *2018 IEEE Fourth International Conference on Big Data Computing Service and Applications*, San Jose, CA, USA, 2018. Proceedings. IEEE, 2018. Disponível em: <https://doi.org/DOI>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- PYMPA DEVELOPERS. *PyMPA — Python Matching Phase Algorithm*. Disponível em: <https://pympa37.readthedocs.io/en/latest/index.html>. Acesso em: 18 dez. 2025.
- SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, São Carlos, v. 11, n. 1, p. 83–89, 2007.
- SCDETECT DEVELOPERS. *SCDetect: SeisComP package for waveform cross-correlation based earthquake detection*. Disponível em: <https://scdetect.readthedocs.io/en/stable/>. Acesso em: 11 dez. 2025.
- SKOUMAL, R. J.; BRUDZINSKI, M. R.; CURRIE, B. S. An efficient repeating signal detector to investigate earthquake swarms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 121, n. 8, p. 5880–5897, 2016.
- SMITH, S. W. **The scientist and engineer's guide to digital signal processing**. San Diego: California Technical Publishing, 1997.
- TEPP, B. Repeating signal detection using the repeating signal detector algorithm. *Seismic Detection Methods*, v. 15, n. 1, p. 15–29, 2018.
- USGS. *What is an earthquake and what causes them to happen?* Disponível em: <https://www.usgs.gov/faqs/what-earthquake-and-what-causes-them-happen>. Acesso em: 05 dez. 2025.
- VAN ETTEN, W. C. *Introduction to random signals and noise*. New York: John Wiley & Sons, 2006.



WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Cross-correlation*. 2025. Disponível em:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-correlation>. Acesso em: 12 mar. 2025.

ZHU, T. et al. Reassessing cross-correlation for seismic event identification. *Journal of Seismology*, v. 25, n. 3, p. 789–802, 2021.

