

Análise de *cluster* aplicada à delimitação de zonas sismogênicas em Minas Gerais

Jesus, F. A. N., UFMG e UNIBH; Salles, V., USP; Coelho, D. H., UNIVESP

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 4 a 6 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX 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

O objetivo deste trabalho foi sugerir e avaliar a aplicabilidade de uma metodologia estruturada, baseada em técnicas estatísticas de agrupamentos (*clusters*) e geoprocessamento de dados espaciais, para o mapeamento de possíveis zonas sismogênicas em Minas Gerais. Os resultados apresentaram uma boa correlação com zonas sismogênicas obtidas por outros autores, demonstrando que a combinação das técnicas de estatística multivariada (análise de *clusters*), e de geoprocessamento é uma metodologia objetiva para o mapeamento de zonas sismogênicas, mas que ainda carece de revisão por base na opinião de sismólogos especializados na temática. Sugere-se que, em trabalhos futuros, avalie-se a incorporação de mais parâmetros da região de interesse, tais como as características geológicas e estruturais, de forma que essas novas variáveis possam agregar mais diferenciação ou similaridade para os grupos resultantes.

Introdução

O risco sísmico é medido pela interação entre o perigo sísmico, depende de características regionais, e a vulnerabilidade de estruturas expostas a este perigo. Como mostrado por LOPES & NUNES (2011), a avaliação de ameaça sísmica no Brasil vem ganhando importância para grandes obras, como hidrelétricas e barragens de rejeito. Embora o nível de atividade sísmica no Brasil seja relativamente baixo em comparação aos países vizinhos, é importante que grandes obras de engenharia incorporem-no em seu mapa de risco.

Conforme pontuam LOPES & NUNES (2011), o mapa preliminar e regional da ameaça sísmica no Brasil, presente na NBR 15.421 ABNT (2006), é pouco representativo para o risco sísmico, necessária a realização de estudos mais atuais e com maior detalhamento acerca da ocorrência de sismos, ainda incipientes no Brasil, para melhorar o conhecimento dos efeitos sísmicos em diferentes regiões e para a construção de cenários sísmicos mais realistas.

Um dos principais parâmetros para a análise de ameaça sísmica é o conhecimento de zonas sismogênicas, i.e., a delimitação das potenciais fontes sísmicas de um região. Em muitos casos, não há um procedimento claro e consistente para delimitar a extensão dessas zonas Weatherill & Burton (2009), sendo necessária a opinião

de especialistas para construção de cenários nos projetos de avaliação de ameaça sísmica, o que faz com que os resultados sejam, de certa forma, subjetivos.

Neste caso, a definição de zonas sismogênicas de forma objetiva pode contribuir para o melhor entendimento da estabilidade geológica do território e aumentar a confiabilidade em projetos de estruturas especiais. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é avaliar a aplicabilidade de técnicas estatísticas de agrupamentos em dados históricos referentes a atividades sísmicas em Minas Gerais (e região adjacente), conforme apresenta a Figura 1, para identificar e delimitar possíveis zonas sismogênicas e sugerir uma metodologia estruturada de classificação dessas zonas.

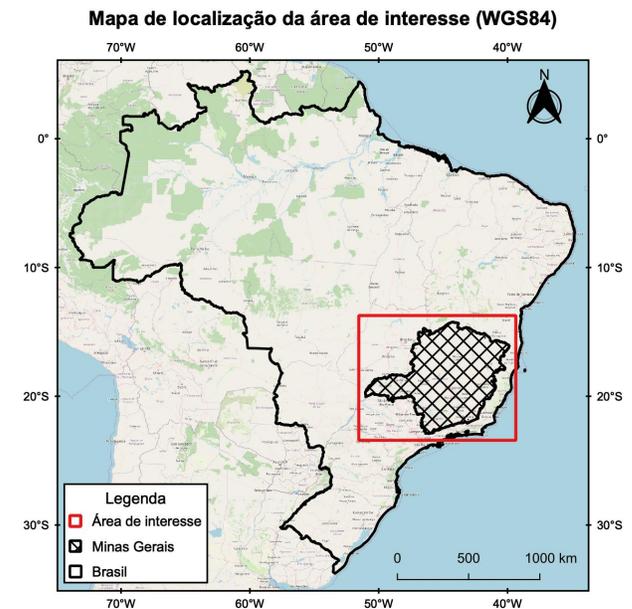


Figura 1 – Mapa de localização da área de interesse (com coordenadas em WGS84).

Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados dados do Catálogo Sísmico Brasileiro, do Centro de Sismologia da USP, publicado em 27 de janeiro de 2022. Este catálogo contém os sismos brasileiros registrados entre 1560 e 2020, composto por: catálogo original de Berrocal et al. (1984), diversas atualizações feitas nas últimas décadas em colaboração com vários grupos de Sismologia do Brasil, correção de sismos históricos, correções de erros em catálogos internacionais, revisão de sismos históricos e atualização de epicentros e magnitudes de sismos estudados com redes locais.

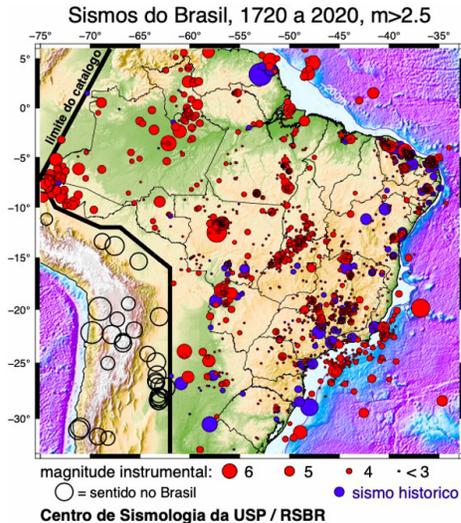


Figura 2 – Catálogo Sísmico Brasileiro, retirado de RSBR (2022).

No Catálogo Sísmico, cada registro de evento sísmico possui as seguintes informações: localização do sismo (latitude, longitude, estado da união e cidades mais próximas), data e hora de sua ocorrência, incluindo o fuso horário utilizado para referência, profundidade, magnitude, área afetada e intensidade máxima no epicentro. Contudo, para a análise proposta neste trabalho, foram excluídas algumas variáveis na etapa de preparação dos dados, reduzindo a quantidade de dados utilizados. A base de dados analisada contemplou as seguintes variáveis descritas na Tabela 1.

Campo	Significado
latit	Latitude do epicentro
longit	Longitude do epicentro
depth	Profundidade do hipocentro
mag	Magnitude na escala Richter regional

Tabela 1 – Variáveis utilizadas no projeto.

Antes das etapas de processamento, os dados passaram por três etapas de filtragem:

1. Optou-se pelo uso do catálogo “Clean”, no qual sismos com erros de localização acima de 100 km, eventos duvidosos, falsos e repetidos foram removidos pela própria equipe que trabalha para a Rede Sismográfica Brasileira (RSBR);
2. Sismos que tiveram sua magnitude calculada em magnitudes diferentes da Richter regional (mR) foram removidos; e
3. Sismos fora da área de interesse (retângulo vermelho destacado na Figura 1) foram removidos.

A Figura 3 apresenta os sismos, categorizados em função

da magnitude, utilizados para a análise de agrupamentos, totalizando 946 elementos amostrais.

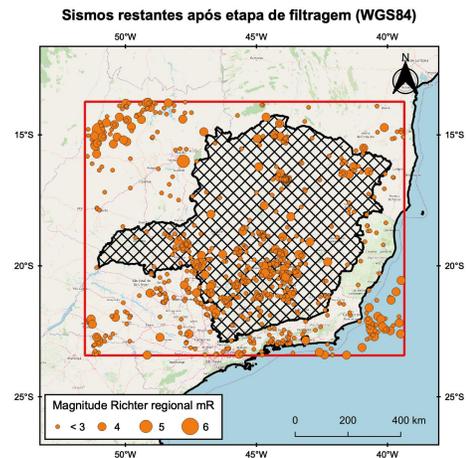


Figura 3 – Sismos selecionados para o processamento (946 elementos amostrais) após a etapa de filtragem (coordenadas em WGS84).

De maneira complementar, Figura 4 apresenta um fluxograma das etapas de processamento realizadas para análise de agrupamentos.



Figura 4 – Fluxograma de etapas de processamento e análise realizadas

As ferramentas utilizadas para o processamento foram o ambiente do RStudio e o sistema de informação geográfica QGIS.

Resultados

Número de agrupamentos

A definição do número de agrupamentos foi baseada nos seguintes critérios:

- Comportamento do nível de fusão;
- Análise gráfica do dendrograma de agrupamentos;
- Comportamento do coeficiente R^2 ; e
- Comportamento da estatística Pseudo-F.

A Figura 5 apresenta o gráfico de comportamento do nível de fusão, em relação à distância euclidiana dos eventos, obtido a partir do Método de Ward. Já a Figura 6 apresenta o gráfico de comportamento do nível de fusão, em relação à raiz quadrada da distância euclidiana dos eventos, também obtido a partir do Método de Ward.

Ao considerar o critério de identificação de pontos de salto acentuado no nível de fusão dos agrupamentos, na Figura

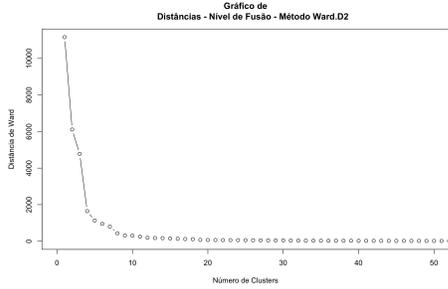


Figura 5 – Gráfico do nível de fusão (distância) obtido através do Método de Ward.

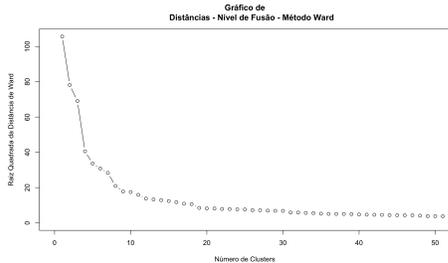


Figura 6 – Gráfico do nível de fusão (raiz quadrada da distância) obtido através do Método de Ward.

5 e na Figura 6, nota-se que o número ideal de grupos está contido entre 4 e 18.

A Figura 7 apresenta o gráfico do coeficiente R^2 (soma dos quadrados), em função do número de grupos gerados ao longo dos passos de agrupamento. Já a Figura 8 apresenta o gráfico da estatística Pseudo-F em função do número de grupos, gerados a partir dos mesmos passos de agrupamento.

Com relação ao coeficiente de determinação R^2 (Figura 7), nota-se que a partir de 8 grupos o crescimento passou a ser lento e a partir de 12 grupos o valor supera o valor de 90%. Neste caso, o valor de 10 agrupamentos estaria dentro de uma região com crescimento estável do coeficiente R^2 e com valor muito próximo de 90%. Enquanto a estatística Pseudo-F apresenta um pico para valores de k acima de 8, que permanecem elevados até k menores do que 20.

Portanto, com base nos saltos acentuados no nível de fusão observados, no aumento do coeficiente de determinação R^2 e aumento do valor da estatística Pseudo-F, optou-se pelo o uso de 10 agrupamentos, i.e., definiu-se o valor de k como 10.

Agrupamento de sismos resultantes

Na Figura 9, que apresenta o resultado da classificação dos sismos após a definição do agrupamento em 10 grupos (k=10), nota-se que os grupos apresentam uma distribuição espacial majoritariamente homogênea entre si, i.e., eventos classificados dentro de um mesmo grupo tendem a ficar distribuídos espacialmente próximos. Visualmente, nota-se que apenas alguns elementos

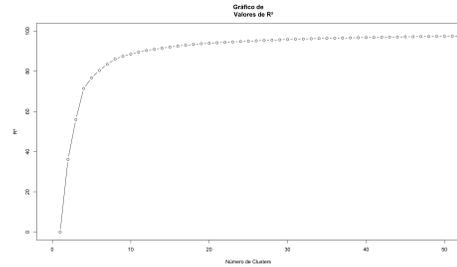


Figura 7 – Gráfico dos valores do coeficiente R^2 em função do número de grupos.

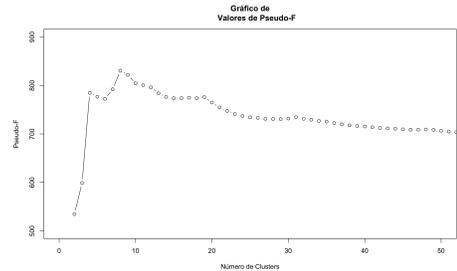


Figura 8 – Gráfico dos valores da estatística Pseudo-F em função do número de grupos.

amostrais do grupo 6 (verde) encontram-se inseridos entre os conjuntos formados por outras classes (1, 2 e 7).

Classificação dos sismos após análise de agrupamento (WGS84)

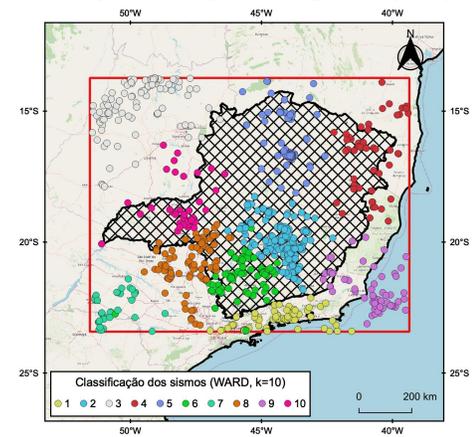


Figura 9 – Classificação dos sismos após análise de agrupamentos (coordenadas em WGS84).

Adicionalmente, para a delimitação das zonas sismogênicas através de uma metodologia objetiva, baseado no trabalho de Weatherill & Burton (2009), optou-se pelo uso da técnica de geoprocessamento "Diagramas de Voronoi". Neste caso, foram calculadas as posições dos pontos médios de cada agrupamento e, através do algoritmo de cálculo dos polígonos de Voronoi disponível no programa QGIS, foram estimadas zonas (partições) respectivas a cada classe, apresentadas na Figura 10.

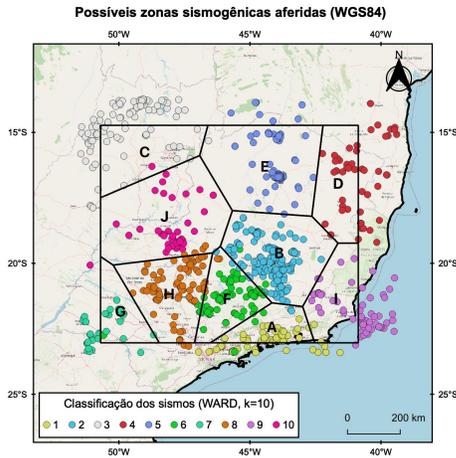


Figura 10 – Zonas sismogênicas aferidas através da técnica de Diagramas de Voronoi (coordenadas em WGS84).

Comparação com estudos de outros autores

Para avaliar a classificação de sismos e as zonas sismogênicas aferidas, utilizou-se o trabalho de Schweig (2013) como referência, no qual a autora traz um capítulo sobre os conceitos de sismicidade e discute sobre as características da sismicidade brasileira. A Figura 11, retirada do trabalho de Schweig (2013), apresenta as zonas sismogênicas do Brasil, adaptadas do trabalho de Mito (1993).

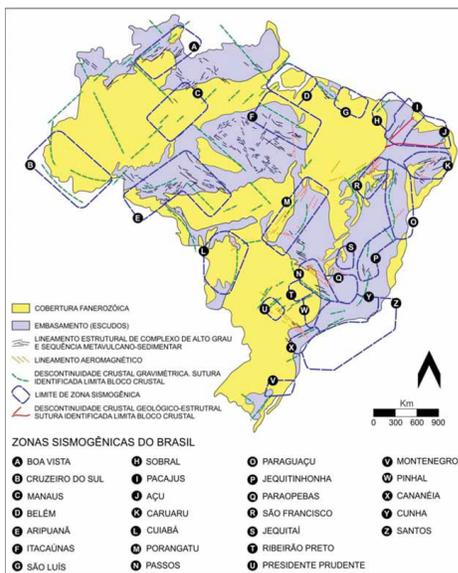


Figura 11 – Zonas sismogênicas do Brasil, retirado de Schweig (2013).

Ressalta-se que as comparações, feitas através da sobreposição espacial, foram feitas de forma aproximada, devido à indisponibilidade dos dados em formato espacial (vetores das delimitação da zonas) dos trabalhos de Mito (1993) e Schweig (2013). Dessa

maneira, tais comparações estão sujeitas a possíveis inconsistências quanto à localização e à geometria das zonas sismogênicas.

Na Figura 12, a qual apresenta a sobreposição dos sismos classificados em relação ao mapa das zonas sismogênicas do Brasil segundo Schweig (2013) (Figura 11), notam-se algumas características de correlação visualmente significativas:

1. A maioria dos sismos da classe 1 estão contidos na zona Y (Cunha);
2. Os sismos da classe 2 tendem a se concentrar na região superior da zona Q (Paraopeba);
3. A maioria dos sismos da classe 3 estão contidos na zona M (Porangatu);
4. Os sismos da classe 4 tendem a se concentrar em uma porção da zona P (Jequitinhonha);
5. Os sismos da classe 5 tendem a se concentrar na região superior da zona S (Jequitai);
6. Os sismos da classe 7 tendem a se concentrar em uma porção da zona U (Presidente Prudente);
7. Os sismos da classe 9 tendem a se concentrar em uma porção da zona Z (Santos); e
8. Os sismos das classes 6 e 8, de maneira geral, estão permeando mais de uma zona sismogênica. No caso da classe 6, a sobreposição ocorre com as zonas N, Q, W (Pinhal) e Y. Já no caso da classe 8, a sobreposição ocorre com as zonas N, T (Ribeirão Preto) e W.

Comparação da classificação dos sismos com zonas sismogênicas do Brasil

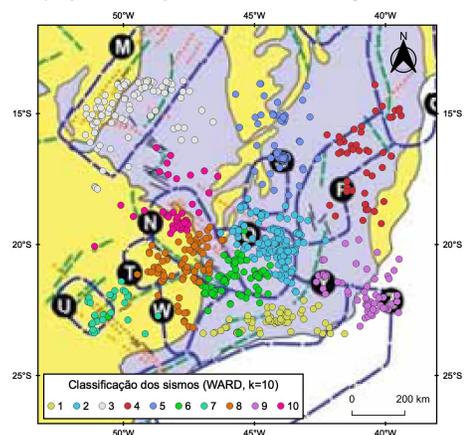


Figura 12 – Comparação da classificação dos sismos com as zonas sismogênicas do Brasil segundo Schweig (2013) (coordenadas em WGS84).

Na Figura 13, que apresenta a sobreposição das zonas sismogênicas aferidas neste trabalho em relação ao mapa das zonas sismogênicas do Brasil (Figura 11), notam-se algumas características de correlação visualmente significativas:

1. As zonas auferidas A e I aparentemente podem estar associadas à zona sismogênica Y;
2. A zona auferida C aparentemente pode estar associada à zona sismogênica M;
3. A zona auferida D aparentemente pode estar associada à zona sismogênica P;
4. A zona auferida E aparentemente pode estar associada à zona sismogênica S;
5. A zona auferida G aparentemente pode estar associada à zona sismogênica U; e
6. A zona auferida H aparentemente pode estar associada às zonas sismogênicas T e W;

Comparação da zonas sismogênicas auferidas com zonas sismogênicas do Brasil

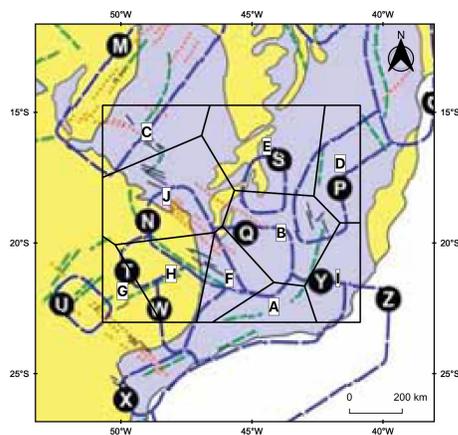


Figura 13 – Comparação das zonas sismogênicas auferidas neste trabalho com as zonas sismogênicas do Brasil segundo Schweig (2013) (coordenadas em WGS84).

As demais zonas auferidas encontram-se entre regiões de contato das zonas sismogênicas pré-estabelecidas. Entretanto, a base de dados utilizada para delimitar as possíveis zonas sismogênicas no estado de Minas Gerais (e regiões próximas) é mais recente e, por consequência, incorpora um número maior de eventos, o que poderia trazer um resultado mais refinado. Adicionalmente, ressalta-se que a metodologia utilizada para auferir os limites das zonas sismogênicas baseia-se num algoritmo matemático, podendo ser reavaliada com base na opinião de sismólogos especializados no tema.

Discussões e Conclusões

A partir dos resultados e análises realizadas neste trabalho, foi possível concluir que:

- A técnica de agrupamentos, através do método Ward, produziu classes distintas que fomentaram a delimitação de zonas sismogênicas de Minas Gerais e regiões adjacentes;

- Os sismos classificados apresentaram associações aparentes com as zonas sismogênicas retiradas de estudos prévios;
- As zonas sismogênicas auferidas neste trabalho também apresentaram associações aparentes com as zonas sismogênicas retiradas de estudos prévios;
- As divergências observadas entre as zonas sismogênicas auferidas e as retiradas de estudos prévios possivelmente ocorreram devido à diferença de escala de mapeamento e ao uso de uma base de dados mais atualizada que, por consequência, incorpora um número maior de eventos quando comparado aos estudos de outros autores. Também existem questões que podem estar relacionadas à subjetividade da opinião dos sismólogos que trabalharam nos estudos de outros autores; e
- A combinação das técnicas de estatística multivariada e geoprocessamento se demonstrou uma metodologia objetiva viável para o mapeamento de zonas sismogênicas;

A metodologia utilizada neste trabalho para delimitação das zonas sismogênicas se baseou em um algoritmo matemático e poderia ser reavaliada com base na opinião de sismólogos especializados no tema e alteração nos parâmetros do modelo (variáveis de entrada, número de grupos etc.). Adicionalmente, sugere-se que, em trabalhos futuros, a avaliação dos resultados incorpore a ótica da caracterização geológica da região de interesse, incluindo novas variáveis que poderão agregar mais diferenciação ou similaridade para os grupos.

Referências

- ABNT, 2006. Projeto de estruturas resistentes a sismos, Norma brasileira ABNT NBR 15.421.
- Berrocal, M., J. et al., 1984. Sismicidade do Brasil, Rede Sismográfica Brasileira.
- LOPES, A. E. D. V. & NUNES, L. C., 2011. Intensidades sísmicas de terremotos: formulação de cenário sísmico no Brasil, Revista USP, (91): 90–103.
- Medeiros, A., 2020. Diagrama de Voronoi no QGIS.
- Mioto, J., 1993. Sismicidade e zonas sismogênicas do Brasil, Tese de Doutorado, vol. 2.
- RSBR, R. S. B., 2022. Catálogo sísmico brasileiro.
- Schweig, C., 2013. Caracterização tectonoestratigráfica da porção adjacente ao epicentro do sismo São Vicente na bacia de Santos, Dissertação de Mestrado.
- Weatherill, G. & Burton, P. W., 2009. Delineation of shallow seismic source zones using k-means cluster analysis, with application to the Aegean region, Geophysical Journal International, vol. 176(2): 565–588.