

MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO LITOESTRATIGRÁFICA DAS ZONAS SÍSMICAS DO NORTE DE MINAS GERAIS - BRASIL

Maykon Fredson Freitas **Ferreira**¹, Luís Ricardo Fernandes da **Costa**², Manoel Reinaldo **Leite**³

(1 – Universidade Estadual de Montes Claros - Unimontes, maykon.ferreira@unimontes.br, <https://orcid.org/0000-0002-9849-4007>, 2 - Universidade Estadual de Montes Claros - Unimontes, luís.costa@unimontes.br, <https://orcid.org/0000-0001-8593-861X>, 3 – Universidade Estadual de Montes Claros – Unimontes, manoel.leite@unimontes.br, <https://orcid.org/0000-0003-3744-5903>)

Resumo: O Norte de Minas Gerais é uma região que apresenta alta intensidade de sismos para os padrões de uma região intraplaca. Pensando nisso, este estudo buscou mapear as principais zonas de atividade sísmica dessa região e investigar em quais estruturas litoestratigráficas e tectônicas elas estão sendo geradas. As técnicas utilizadas para criar as zonas sísmicas foram adaptadas de Ferreira et al. (2024), utilizando-se a interpolação dos epicentros dos sismos com a função Kernel presente no software de análise espacial ArcGIS 10.5. Os dados litoestratigráficos utilizados para o overlay foram retirados do mapa geológico de Minas Gerais elaborado por Silva et al. (2020). A partir dessa metodologia foram identificadas cinco zonas sísmicas no Norte de Minas, onde a atividade sísmica é mais intensa: Bonito de Minas, Itacarambi/Jaíba, Montes Claros, Riacho dos Machados e Santa Cruz de Salinas. As três primeiras estão localizadas na Província São Francisco, em um ambiente de bacia sedimentar do Grupo Bambuí e da Bacia Sanfranciscana. As duas últimas zonas estão localizadas em um ambiente de rochas dobradas da Província Mantiqueira, mais precisamente no Orógeno Araçuai. Os resultados deste trabalho são fundamentais para a compreensão do cenário sísmico do Norte de Minas.

Palavras-chave: Terremotos. Zonas Sísmicas. Litoestratigrafia.

MAPPING AND LITHOSTRATIGRAPHIC CHARACTERIZATION OF SEISMIC ZONES IN NORTHERN MINAS GERAIS – BRAZIL

Abstract: Northern Minas Gerais, Brazil, is a region marked by high earthquake intensity for intraplate standards. With this in mind, this study sought to map the main zones of seismic activity in this region and investigate the lithostratigraphic and tectonic structures in which they are generated. The techniques employed to create the seismic zones were adapted from Ferreira et al. (2024), using the interpolation of earthquake epicenters with the Kernel feature provided in the spatial analysis software ArcGIS 10.5. The lithostratigraphic data used for the overlay were taken from the geological map of the state of Minas Gerais, prepared by Silva et al. (2020). Using this methodology, five seismic zones were identified in Northern Minas Gerais, where seismic activity is most intense: Bonito de Minas, Itacarambi/Jaíba, Montes Claros, Riacho dos Machados, and Santa Cruz de Salinas. The former three are located in the São Francisco Province, in a sedimentary basin environment with several layers of rocks from the Bambuí Group and the São Francisco Basin. The latter two are located in an environment of folded rocks from the Mantiqueira Province, more precisely in the Araçuaí orogen. The results of this study are essential for the understanding of the seismic scenario of Northern Minas Gerais.

Keywords: Earthquakes. Seismic Zones. Lithostratigraphy.

CARTOGRAFÍA Y CARACTERIZACIÓN LITOSTRATIGRÁFICA DE ZONAS SÍSMICAS EN EL NORTE DE MINAS GERAIS - BRASIL

Resumen: El Norte de Minas Gerais es una región con una elevada intensidad sísmica según los estándares de una región intraplaca. Teniendo esto en cuenta, este estudio pretendía cartografiar las principales zonas de actividad sísmica de esta región e investigar qué estructuras litoestratigráficas y tectónicas las generan. Las técnicas utilizadas para crear las zonas sísmicas se adaptaron de Ferreira et al. (2024), utilizando la interpolación de epicentros de terremotos con la función Kernel presente en el software de análisis espacial ArcGIS 10.5. Los datos litoestratigráficos utilizados para la superposición se tomaron del mapa geológico de Minas Gerais elaborado por Silva et al. (2020). Basándose en esta metodología, se identificaron cinco zonas sísmicas en el Norte de Minas Gerais, donde la actividad sísmica es más intensa: Bonito de Minas, Itacarambi/Jaíba, Montes Claros, Riacho dos Machados y Santa Cruz de Salinas. Los tres primeros están situados en la provincia de São Francisco, en un entorno de cuenca sedimentaria con varias capas de rocas del Grupo Bambuí y de la Cuenca Sanfranciscana. Los dos últimos se sitúan en un entorno de rocas plegadas de la

Provincia Mantiqueira, más concretamente en el Orógeno Araçuaí. Los resultados de este trabajo son fundamentales para comprender el escenario sísmico del Norte de Minas Gerais.

Palabras clave: Terremotos. Zonas sísmicas. Litoestratigrafía.

Introdução

Diferentemente do que se pensa, ocorrem centenas de terremotos em áreas afastadas dos limites das placas tectônicas a cada ano, alguns dos quais têm efeitos catastróficos, por exemplo, Bai et al. (2023). Embora as causas dos terremotos nas bordas das placas tectônicas sejam bem compreendidas, as razões por trás dos terremotos intraplaca ainda demandam estudos mais aprofundados e explicações mais esclarecedoras (Yoshida, 2024).

A ocorrência de terremotos em regiões intraplacas é um fenômeno complexo que requer uma pesquisa detalhada sobre diversas estruturas geológicas. Em alguns casos, encontramos terrenos antigos e densos que se dobraram ao longo de bilhões de anos, apresentando alto nível de erodibilidade. Em contraste, há também terrenos jovens com predomínio de rochas sedimentares frágeis (Costa et al. 2023). A compreensão das estruturas geológicas que servem como palco para a ocorrência dos sismos é fundamental para a formulação de teorias sobre suas origens. No âmbito da geografia, o mapeamento da geoestrutura e das zonas epicentrais de sismos torna-se um componente essencial para se obter resultados satisfatórios.

O presente trabalho tem como objetivo mapear as zonas sísmicas do Norte de Minas Gerais e relacioná-las com a litoestratigrafia da região. De acordo com Ferreira et al. (2024), essa região apresenta cinco áreas com mais atividades sísmicas: Bonito de Minas, Itacarambi/Jaíba, Montes Claros, Riacho dos Machados e Santa Cruz de Salinas. Cada uma dessas áreas está situada em ambientes geológicos complexos, caracterizados por formações distintas e uma suscetibilidade variada a sismos. A pesquisa propõe realizar o mapeamento, análise e modelagem dessas estruturas, com o intuito de fornecer elementos que possam elucidar em quais condições os sismos ocorrem nessas localidades.

Ao realizar o mapeamento da distribuição espacial das estruturas geológicas e aprofundar as análises das relações com a atividade sísmica, esta pesquisa visa traçar um panorama dos elementos regionais que favorecem as condições em que os terremotos no Norte de Minas Gerais são gerados. Os resultados obtidos estabelecerão uma base de dados robusta, com potencial para formular políticas públicas, identificando áreas mais suscetíveis a sismos e contribuir para a mitigação de riscos para as populações locais.

O contexto geotectônico e litoestratigráfico do Norte de Minas

A região Norte de Minas Gerais apresenta diferentes configurações em termos de domínios geológicos, estando localizada entre duas áreas distintas: o Cráton do São Francisco e a faixa Araçuai. Essa região é caracterizada por uma complexa interação de diferentes estruturas geológicas que refletem a evolução tectônica ao longo do tempo.

Inicialmente, é fundamental entender a estruturação de um Cráton, que compreende a base geológica de grande parte da região Norte de Minas Gerais (Figura 1). De acordo com os estudos de Almeida et al. (1981), Brito-Neves et al. (1999), Alkmin (2004) e outros, os Crátons são regiões interiores e mais estáveis dos continentes, caracterizadas por um embasamento rochoso, geralmente com mais de 1 bilhão de anos, e que não foram afetadas pelas orogêneses do Fanerozóico. Nesse sentido, a estabilidade geológica refere-se à ausência de participação em fenômenos orogênicos, os quais envolvem colisões entre placas litosféricas e formação de cadeias montanhosas (Rodrigues et al. 2021).

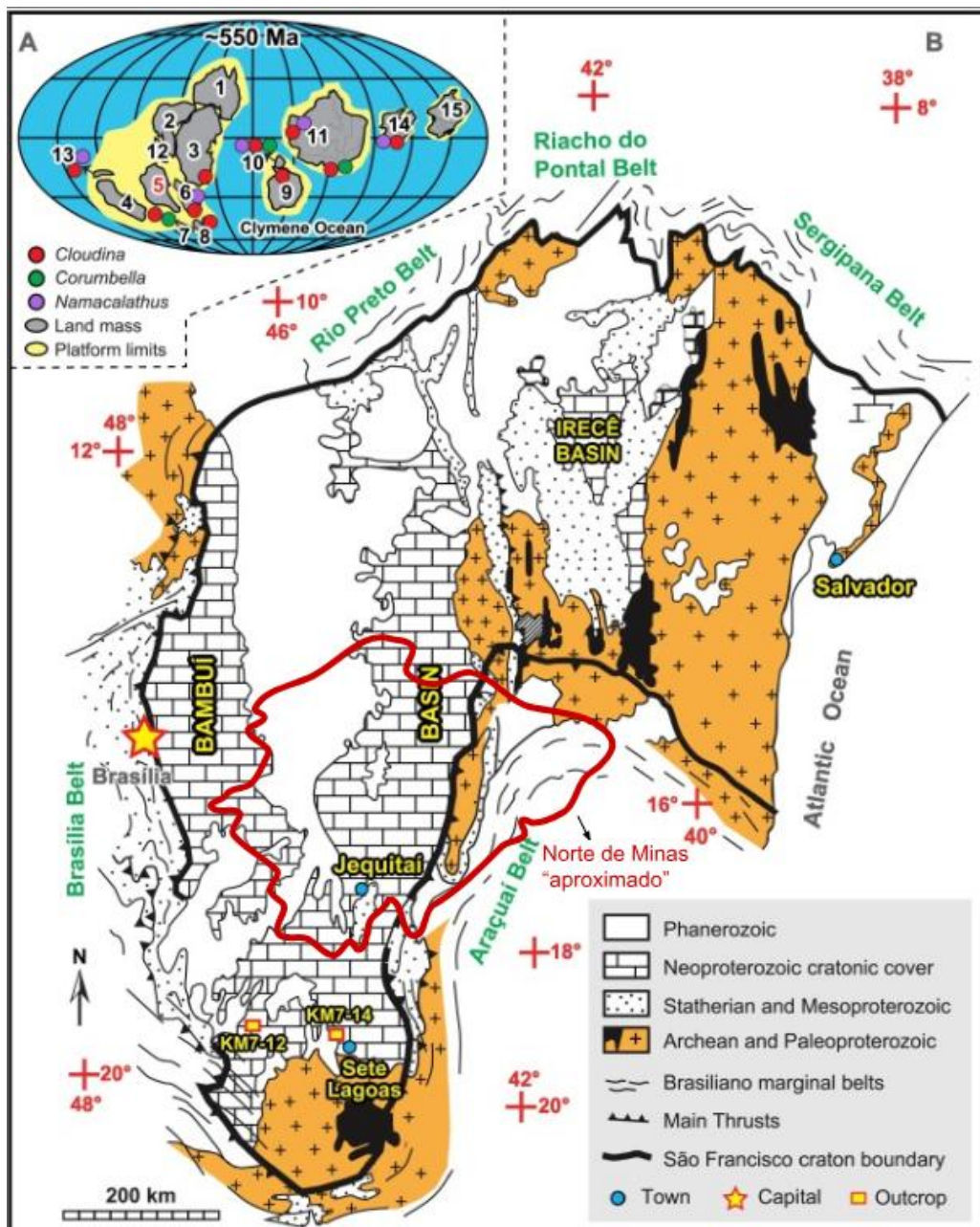
Em particular, o Cráton São Francisco, juntamente com seu equivalente na África, o Cráton do Congo, representam remanescentes dos antigos continentes do Arqueano/Paleoproterozóico (Caxito e Alkmin et al. 2023). Esses paleocontinentes sofreram uma série de colisões continentais ocorridas durante o Neoproterozóico e o Cambriano, contribuindo para a constituição da porção ocidental do supercontinente Gondwana (Moores, 1995), (Alkmin e Martins-Neto, 2001).

O Cráton São Francisco faz parte da plataforma Sul-americana que não foi envolvida nos processos orogênicos do evento brasileiro, durante o Neoproterozóico. O seu substrato é constituído, em grande parte, por rochas arqueanas e também uma parte significativa de rochas paleoproterozóicas (Almeida, 1977), (Almeida, 1981). Esse Cráton possui idade superior a 1,8 bilhão de anos que aflora nas porções sul e leste e em seu interior estão as coberturas sedimentares Proterozóico-Fanerozóicas, geralmente pouco deformadas (Alkmin, 2004).

A porção sul do Cráton é denominada por Alckmin e Martins-Neto (2001) de bacia sedimentar do São Francisco, sendo atuante em pelo menos quatro estágios distintos no tempo posterior a 1,8 bilhão de anos, cobrindo uma área de aproximadamente 500.000 Km² situada nos Estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás. A espessura média das unidades de preenchimento, juntas, podem chegar a 900 metros, com localidades obtendo máximas de 5.000 metros. Conforme Alkmin e Martins-Neto (2001), foram identificadas quatro unidades

litoestratigráficas maiores: o Supergrupo Espinhaço de idade paleo/mesoproterozóica, o Supergrupo São Francisco de idade neoproterozóica, os sedimentos paleozóicos do grupo Santa Fé e as unidades cretácicas dos grupos Areado, Mata da Corda e Urucuia.

Figura 1:Cráton do São Francisco e deformações tectônicas nas suas margens.



Fonte: Adaptado de Cui et al., (2020).

Às margens do Cráton ocorreu acreção de material geológico e formação dos cinturões orogênicos durante os eventos brasilianos-panafricanos (Almeida, 1977), (Alkmin,

2004). Esse sistema orogênico brasileiro-panafricano refere-se a cadeias de montanhas antigas que foram elevadas devido a colisões entre placas litosféricas, ocorridas há cerca de 630 a 541 milhões de anos, marcando o final da Era Neoproterozóica e o período pré-Cambriano (Alkmin, 2018). Portanto, o Cráton São Francisco, por ser uma estrutura estável, se viu cercado por deformações orogênicas, se destacando a faixa Brasília (a oeste e sul), os cinturões Rio Preto, Riacho do Pontal e Sergipano (ao norte) e o cinturão Araçuaí (a leste) (Alkmin e Martins-Neto, 2001), (Uhlein et al., 2023).

O Norte de Minas possui uma porção de terrenos antigos a leste que corresponde a um ambiente dobrado da província Mantiqueira, mais especificamente o Orógeno Araçuaí. Durante o Evento Brasileiro, o Orógeno Araçuaí foi formado como parte do extenso sistema montanhoso e o ápice de seu soerguimento ocorreu entre 580 e 570 milhões de anos atrás, conforme abordado em Pedrosa-Soares et al. (2007). Situada ao longo da margem do Cráton do São Francisco, a região é caracterizada pela predominância de rochas metassedimentares de baixo a médio grau metamórfico. Em seu núcleo cristalino, há uma predominância de rochas metamórficas de alto grau e granitos, cuja disposição espacial é consideravelmente mais complexa (Pedrosa-Soares et al. 2007), (Gonçalves et al. 2019).

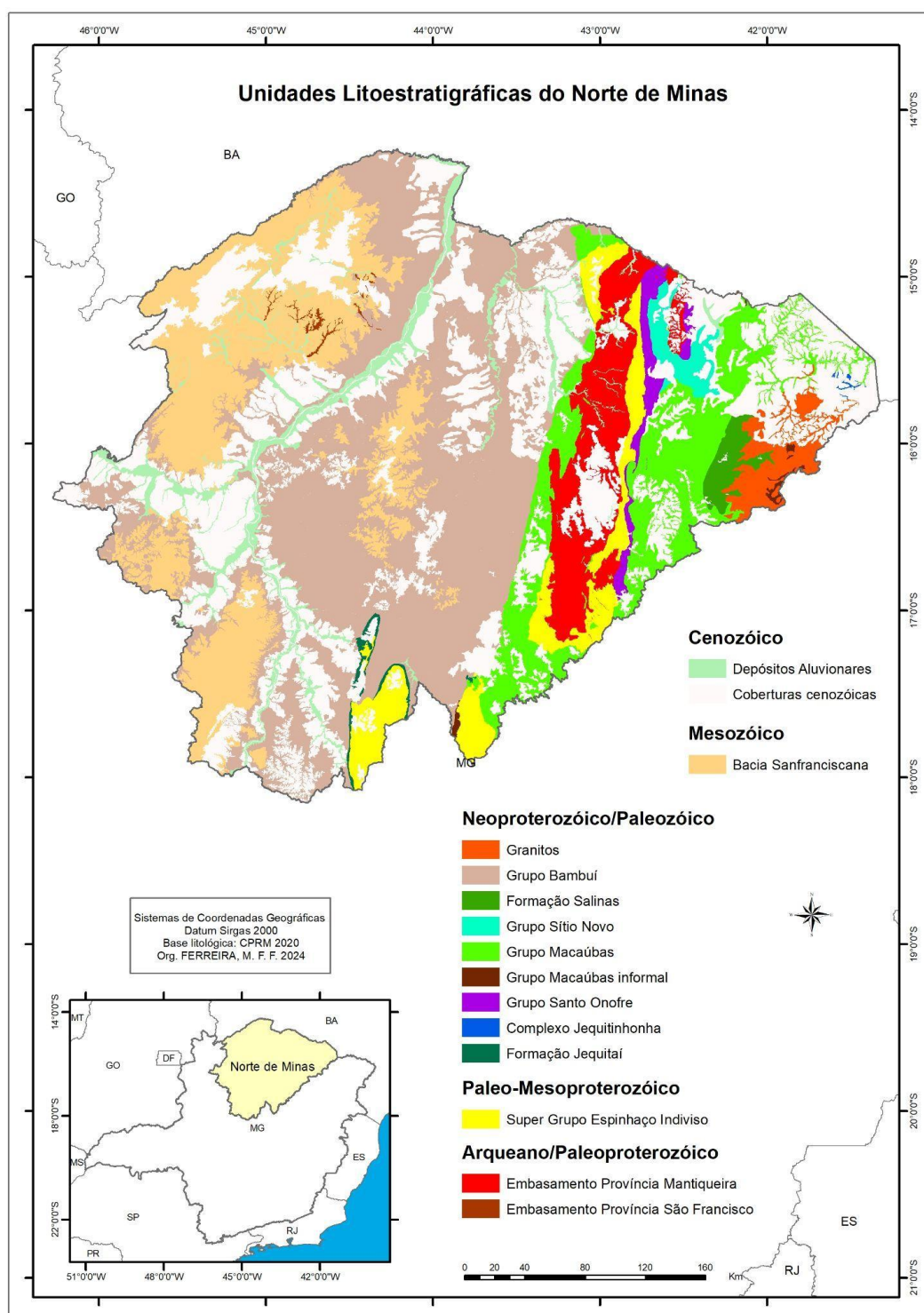
Em resumo, os limites do Cráton e os cinturões que os circundam, são, na maioria dos casos, caracterizados por mudanças de estilos tectônicos. Nessas faixas brasileiras, as rochas arqueanas e paleoproterozóicas que constituem o seu embasamento estão presentes nas coberturas dobradas. Já no interior do Cráton estão presentes coberturas sedimentares em diferentes estágios, além dos afloramentos do embasamento arqueano (Alkmin e Martins-Neto, 2001).

Nesse contexto geológico, o Norte de Minas Gerais abriga uma diversidade de áreas que se distribuem em diferentes estruturas, incluindo zonas de transição entre o Cráton São Francisco e a faixa Araçuaí (Costa et al. 2023). De oeste a leste, encontram-se rochas sedimentares neoproterozóicas e coberturas fanerozóicas que se sobrepõem ao Cráton São Francisco, transitando para ambientes da faixa Araçuaí com predomínio de rochas metamórficas formadas durante os eventos tectônicos associados à Orogenia Araçuaí, há cerca de 600 a 500 milhões de anos atrás.

No mapa geológico de Minas Gerais (Silva et al. 2020) é apresentado o cenário geológico de Minas Gerais e através desse, destacou-se as diversas estruturas litoestratigráficas da região Norte do Estado (Figura 2). Dentro da província São Francisco,

que corresponde ao Cráton de mesmo nome, foram identificadas as seguintes estruturas: Embasamento da província de idade arqueana, Formação Jequitai e Grupo Bambuí de idade neoproterozóica e a Bacia Sanfranciscana do mesozóico.

Figura 2: Unidades litoestratigráficas do Norte de Minas Gerais



Organização: Autores (2024).

No contexto da província Mantiqueira, encontram-se rochas associadas ao Orógeno Araçuaí, sendo subdivididas nos seguintes domínios tectono-estratigráficos: Embasamento da província com idade arqueano/paleoproterozóico, Supergrupo Espinhaço Indiviso do paleo-mesoproterozóico, Complexo Jequitinhonha, Grupo Santo Onofre, Grupo Macaúbas Informal, Grupo Macaúbas, Grupo Sítio Novo e Formação Salinas da Era neoproterozóica e por fim, os granitos do neoproterozóico/paleozóico. Em todos os contextos geológicos do Norte de Minas se observam as coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas e os depósitos aluvionares do Cenozóico.

Materiais e Métodos

A coleta de dados foi iniciada com a obtenção de registros de eventos sísmicos das bases de dados do catálogo sísmico brasileiro, elaborado pela Rede Sismográfica Brasileira (RSBR). Esse catálogo contou com a participação do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB), do Observatório Nacional (ON), do Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo (USP) e da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Além dos dados provenientes do catálogo sismológico, também obtivemos informações da Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes). Essas informações foram então processadas no ArcGIS 10.5, uma plataforma amplamente utilizada para análises espaciais.

As coordenadas dos eventos sísmicos foram utilizadas para plotar os vetores de pontos no formato shapefile, representando cada sismo ocorrido na região. Esses shapefiles foram então filtrados para extrair apenas os eventos localizados no Norte de Minas Gerais, assegurando que a análise fosse específica para a área de interesse. Nessa primeira etapa, utilizando o ArcGis 10.5, os pontos foram mapeados para permitir uma visualização precisa da distribuição dos eventos sísmicos.

Após a espacialização dos pontos, foi aplicada a técnica de densidade de Kernel. Essa abordagem permitiu identificar áreas com maior atividade sísmica, gerando um mapa de densidade que destacou as zonas mais propensas a eventos sísmicos na região estudada. Segundo Kawamoto (2012), a técnica de Kernel consiste em um estimador probabilístico de intensidade do processo pontual não paramétrico por meio de uma função Kernel, utilizando as ocorrências da variável na área, através de um sistema de coordenadas.

Conforme apontado por Kawamoto (2012), o estimador de densidade de Kernel é capaz de contar todos os pontos dentro de um determinado raio de influência, ponderando a distância de cada um em relação à localização de interesse. De acordo com o autor, a maior densidade é observada nas áreas em que ocorre a sobreposição de dois ou mais raios de influência, o que resulta em uma superfície matricial. Nessa superfície, o valor para cada pixel é calculado como a soma dos valores Kernel sobrepostos, dividida pela área de cada raio de pesquisa.

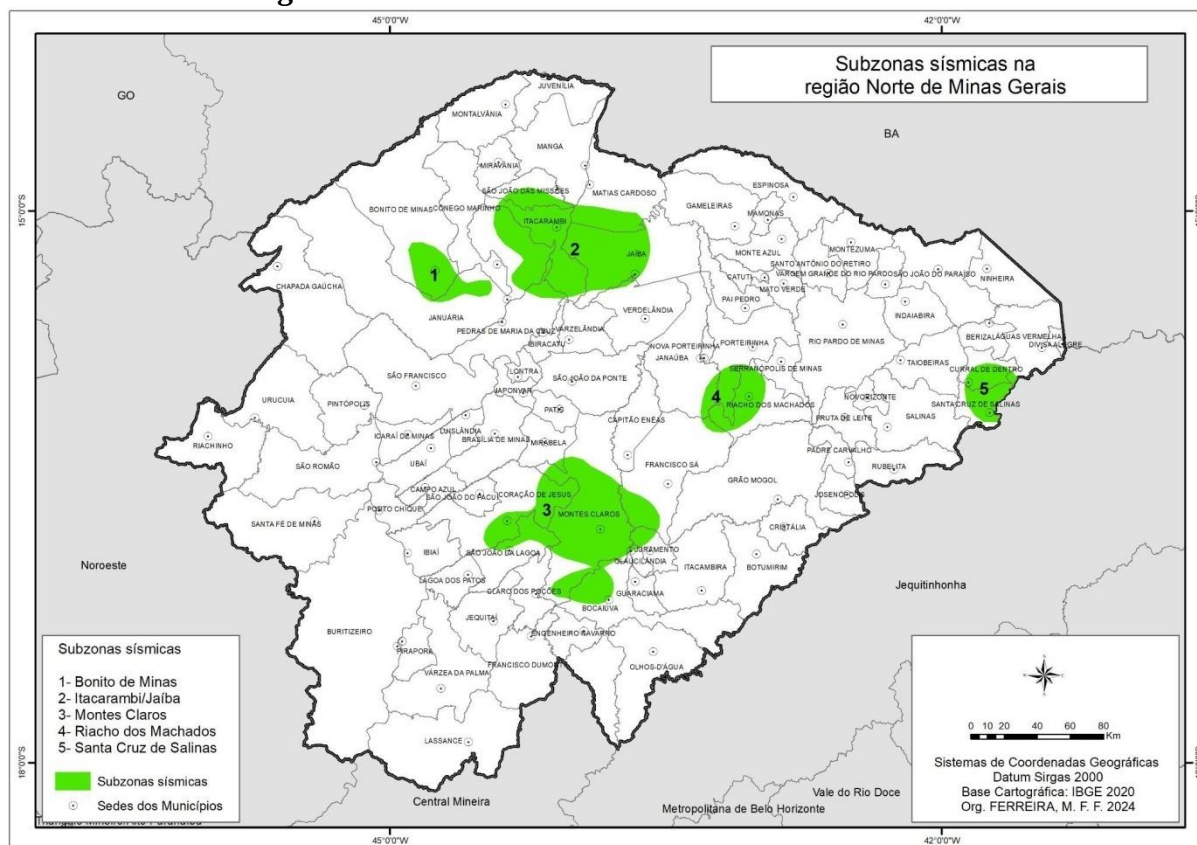
Em seguida, os dados litológicos foram incorporados ao estudo, obtidos do mapa geológico de Minas Gerais, fornecido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (Silva et al. 2020). Utilizando as ferramentas de sobreposição de temas, um overlay de dados litológicos e das zonas sísmicas foi organizado, permitindo a identificação de padrões entre a sismicidade e os tipos de rochas predominantes.

Resultados e discussão

Nesta seção, apresentamos os resultados e discussões derivados do estudo que mapeou as principais Subzonas sísmicas no Norte de Minas Gerais. Baseado no trabalho de Ferreira et al. (2024), este estudo adaptou e reconfigurou as áreas de abrangência das Subzonas sísmicas, destacando regiões-chave como Bonito de Minas, Itacarambi/Jaíba, Montes Claros, Riacho dos Machados e Santa Cruz de Salinas (Figura 03). Exploramos a distribuição e as características litoestratigráficas de cada subzona sísmica mapeada, fornecendo elementos para o entendimento científico dos fenômenos sísmicos nessa região.

As Subzonas representam áreas específicas onde a atividade sísmica mostrou maior concentração. Esse mapeamento minucioso desempenhou um papel crucial na identificação das regiões focais da atividade sísmica, permitindo uma compreensão mais precisa das áreas geográficas que são mais propensas a abalos sísmicos.

Figura 03: Subzonas sísmicas no Norte de Minas Gerais



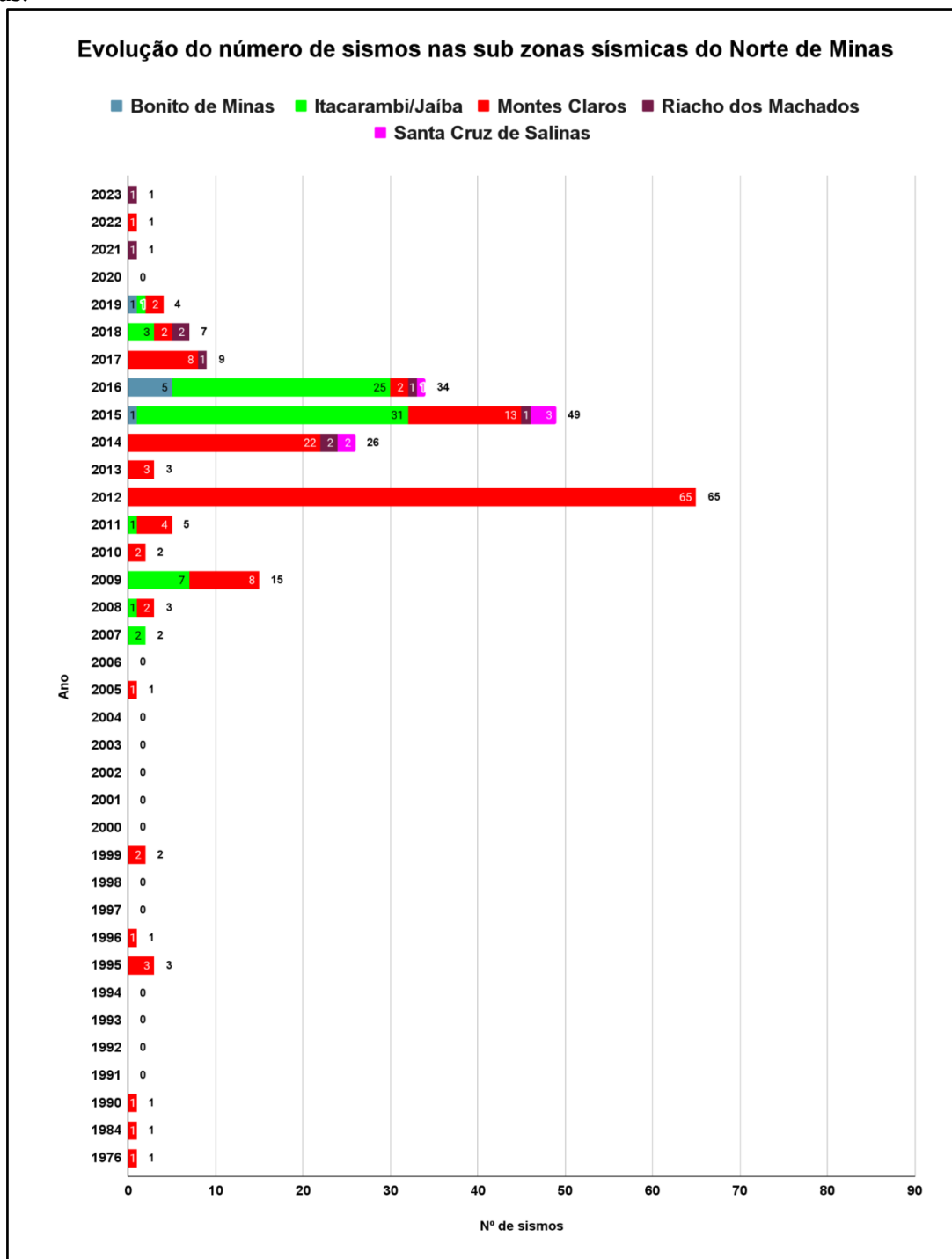
Organização: Autores (2024).

A Figura 04 representa a evolução da ocorrência de sismos nas Subzonas sísmicas do Norte de Minas. Notavelmente, observa-se um período de ativação sísmica entre os anos de 2007 e 2019, evidenciados pelo aumento tanto na quantidade de sismos registrados quanto na diversidade de locais onde ocorreram. Destaca-se que as Subzonas de Montes Claros e Itacarambi/Jaíba emergem como as principais áreas afetadas, registrando um número significativamente maior de eventos sísmicos. Essas Subzonas, portanto, emergem como locais de interesse devido às suas anomalias no padrão de atividade sísmica na região do Norte de Minas.

Observa-se que o primeiro registro catalogado dentro de uma Subzona no Norte de Minas ocorreu em 1976, em Montes Claros. Contudo, foi a partir de 2007 que a incidência de sismos aumentou consideravelmente, atingindo seu pico até o ano de 2019. Posteriormente, nota-se uma tendência na estabilização no número de ocorrências desses eventos, evidenciada pela diminuição na quantidade de sismos após o ano de 2019 (Figura 05). É importante ressaltar que essa estabilização não implica na ausência futura de atividades sísmicas nessa

região. Pode-se estar apenas diante de um período de alívio de tensões nas rochas, seguido pelo acúmulo gradual de novas tensões, o que corrobora com a teoria do "rebote elástico", descrita por Henry Fielding Reid em 1910.

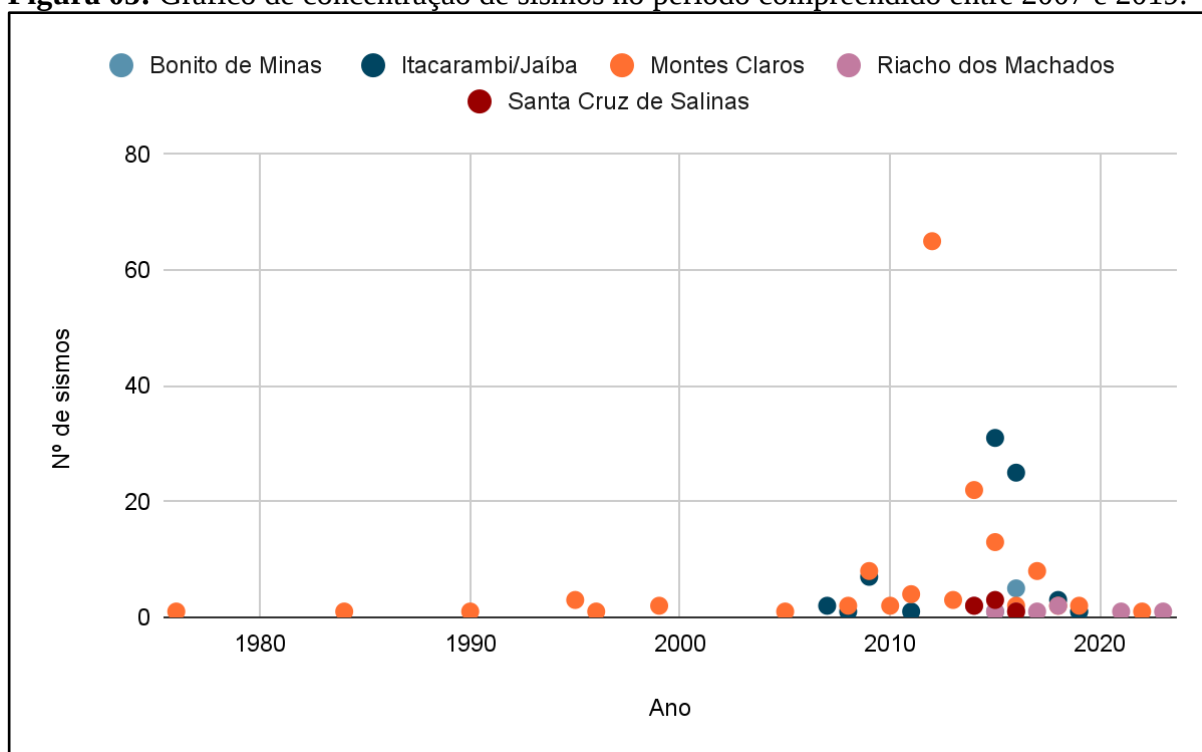
Figura 04: Gráfico de progressão da quantidade de sismos nas zonas sísmicas do Norte de Minas.



Organização: Autores (2024).

As Subzonas sísmicas representam áreas geográficas onde a incidência de sismos é mais pronunciada. Essas áreas estão inseridas em diferentes contextos geológicos, o que resulta na geração de sismos em diversos ambientes litoestratigráficos (Figura 06). Em particular, as Subzonas Bonito de Minas, Itacarambi/Jaíba e Montes Claros estão localizadas no Cráton São Francisco, enquanto as Subzonas Riacho dos Machados e Santa Cruz de Salinas estão localizadas no Orógeno Araçuaí. Essa distribuição geológica das Subzonas sísmicas oferece conhecimentos importantes sobre a relação entre a atividade sísmica e a estrutura geológica subjacente na região do Norte de Minas.

Figura 05: Gráfico de concentração de sismos no período compreendido entre 2007 e 2019.

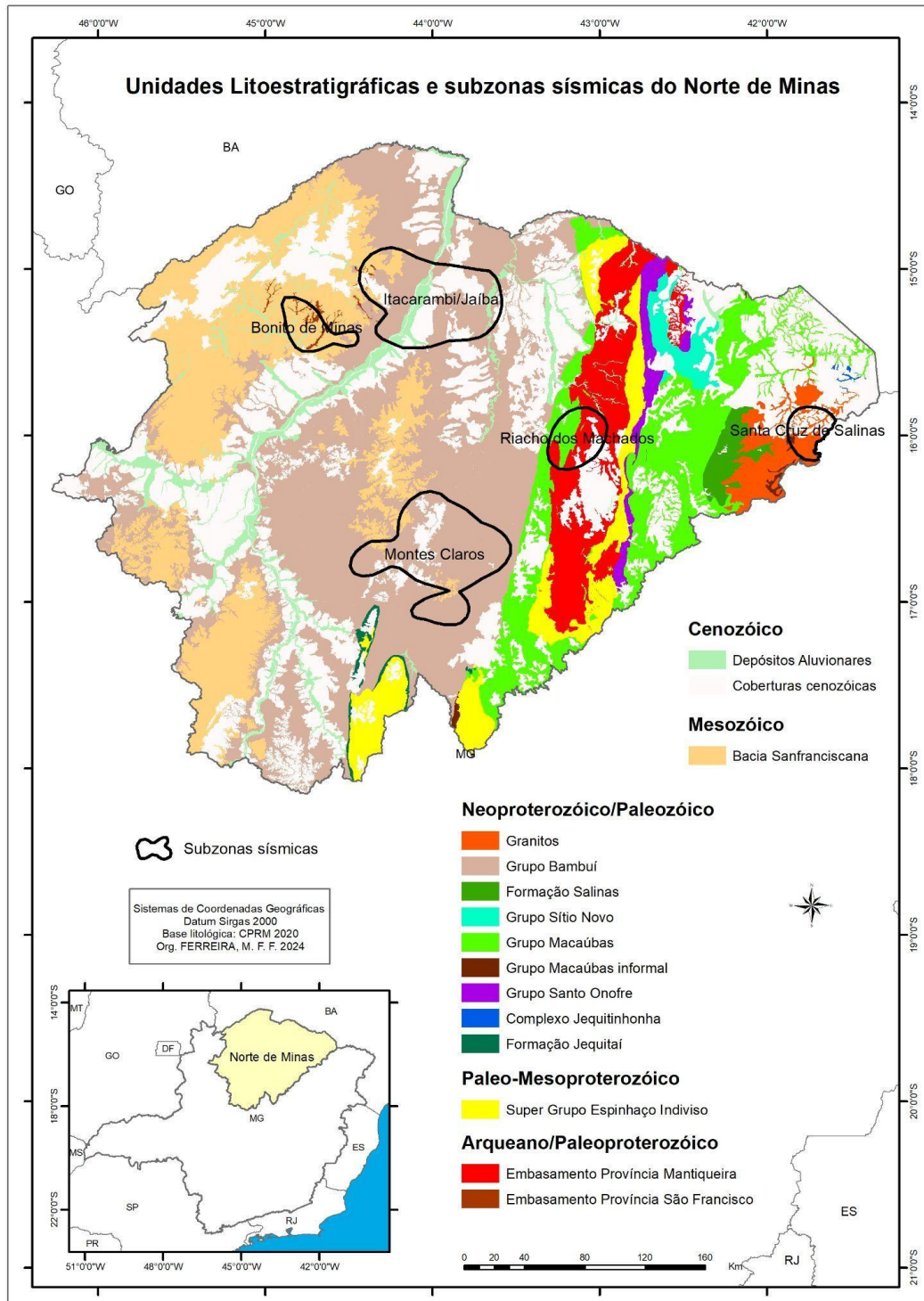


Organização: Autores (2024).

Os sismos gerados nas Subzonas Bonito de Minas, Itacarambi/Jaíba e Montes Claros ocorrem em um ambiente geológico estável, com pouca deformação e uma camada significativa de rochas sedimentares sobrepostas a um Cráton. Por outro lado, os sismos das Subzonas Riacho dos Machados e Santa Cruz de Salinas ocorrem em um ambiente geológico com rochas antigas, dobradas e com pouca cobertura de sedimentos. Em termos de litoestratigrafia, observa-se que as três primeiras Subzonas estão localizadas no Grupo

BambuÍ e na bacia Sanfranciscana da província São Francisco, enquanto as duas últimas estão localizadas no embasamento do Orógeno Araçuaí, no Grupo Macaúbas e nos granitos da província Mantiqueira.

Figura 06: Subzonas sísmicas sobrepostas às unidades litoestratigráficas do Norte de Minas Gerais.



A Subzona Bonito de Minas surgiu como resultado de uma série de sete eventos sísmicos registrados a partir do ano de 2015. Durante esse período, houve um sismo em 2015 com magnitude de 1,8 na escala Richter, seguido por cinco ocorrências em 2016 com magnitudes que variaram entre 1 e 1,9 e, posteriormente, um evento em 2019 com magnitude de 3,7. É notável que a maioria desses sismos teve como epicentro o município de Bonito de Minas, concentrando-se especialmente nas proximidades de sua sede. Esse município abriga uma população total de 10.204 pessoas, conforme os dados mais recentes do censo do IBGE, com uma densidade demográfica de 2,59 habitantes por quilômetro quadrado.

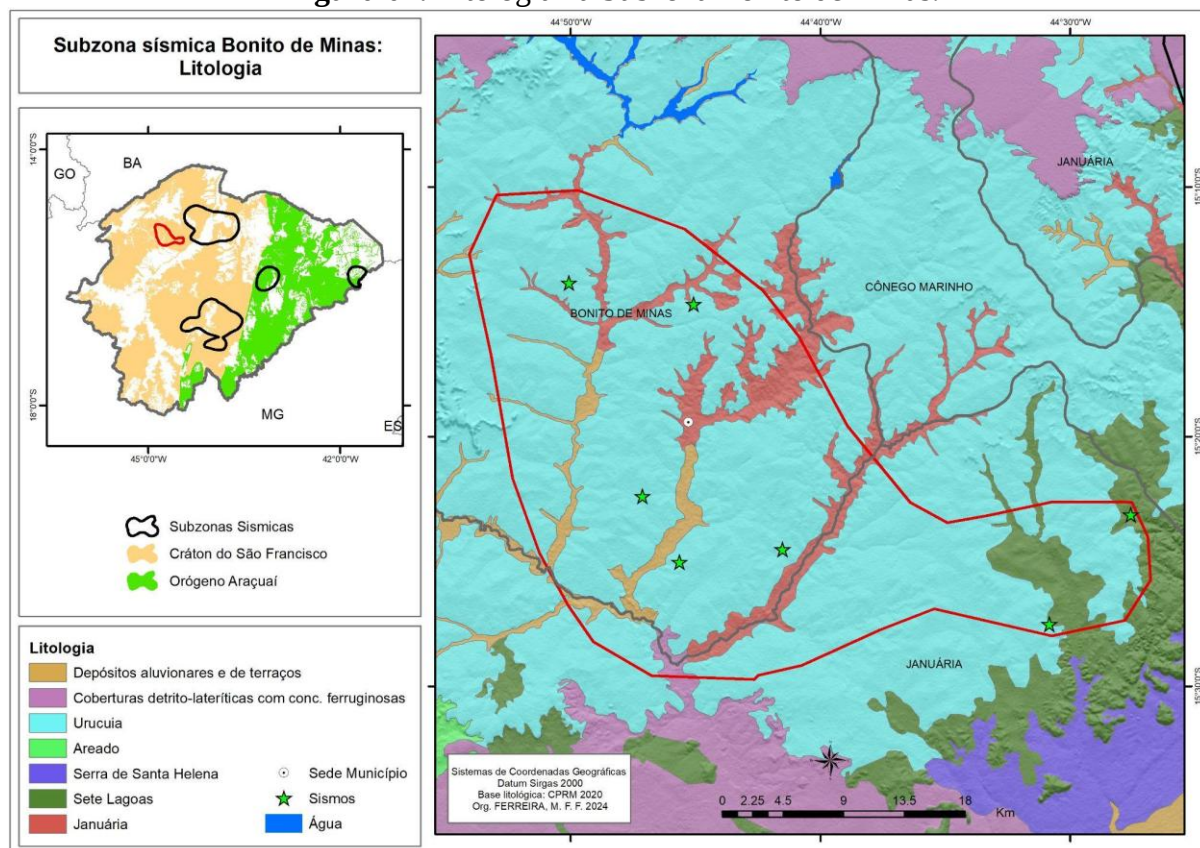
Essa Subzona possui uma área de 925 quilômetros quadrados e está localizada em uma estrutura geológica caracterizada pela presença do embasamento da província do São Francisco, uma porção do grupo Bambuí e da bacia Sanfranciscana (Figura 07). O embasamento da província do São Francisco é composto pelo Complexo Januária, formado no mesoarqueano, contendo rochas ígneas como granodiorito, ortogneise, rocha metaultramáfica e anfibolito. Esse complexo constitui um afloramento do embasamento da província, possivelmente elevado devido à atividade de falhas normais sinsedimentares, que resultaram em subsidência diferencial e afundamento em todas as direções a partir dessa região (Martinez, 2007).

Os sismos nessa Subzona ocorrem no "Alto de Januária", uma área de elevação do embasamento cristalino. A leste do afloramento do Complexo Januária, em direção ao rio São Francisco, pode-se observar um pequeno afloramento da formação Sete Lagoas, seguido pela sucessão sedimentar composta pelas coberturas cretácicas do Grupo Urucuaia, além dos depósitos aluvionares do cenozóico.

A Subzona de Itacarambi/Jaíba cobre uma extensão territorial de 4.421 quilômetros quadrados e foi delimitada devido a uma sucessão de setenta e um eventos sísmicos registrados entre 2007 e 2019. Em 2007, ocorreram dois sismos, um de magnitude 4,9 e outro de magnitude 3,8. Em 2008, houve um tremor de magnitude 3,8. No ano de 2009, uma sequência de sete eventos ocorreu, com magnitudes variando entre 2 e 2,9. Em 2011, um sismo de magnitude 2,3 foi registrado. Já em 2015, doze eventos foram registrados, com magnitudes entre 1 e 1,9, além de dezenove eventos com magnitudes entre 2 e 2,9. No ano de 2016, um evento de magnitude 3 foi observado, assim como dez eventos com magnitudes

entre 2 e 2,9, e catorze eventos com magnitudes entre 1 e 1,9. Por sua vez, em 2017, ocorreram três sismos com magnitudes entre 2 e 2,9, seguido por um sismo de magnitude 2,1 em 2019.

Figura 07: Litologia na Subzona Bonito de Minas.

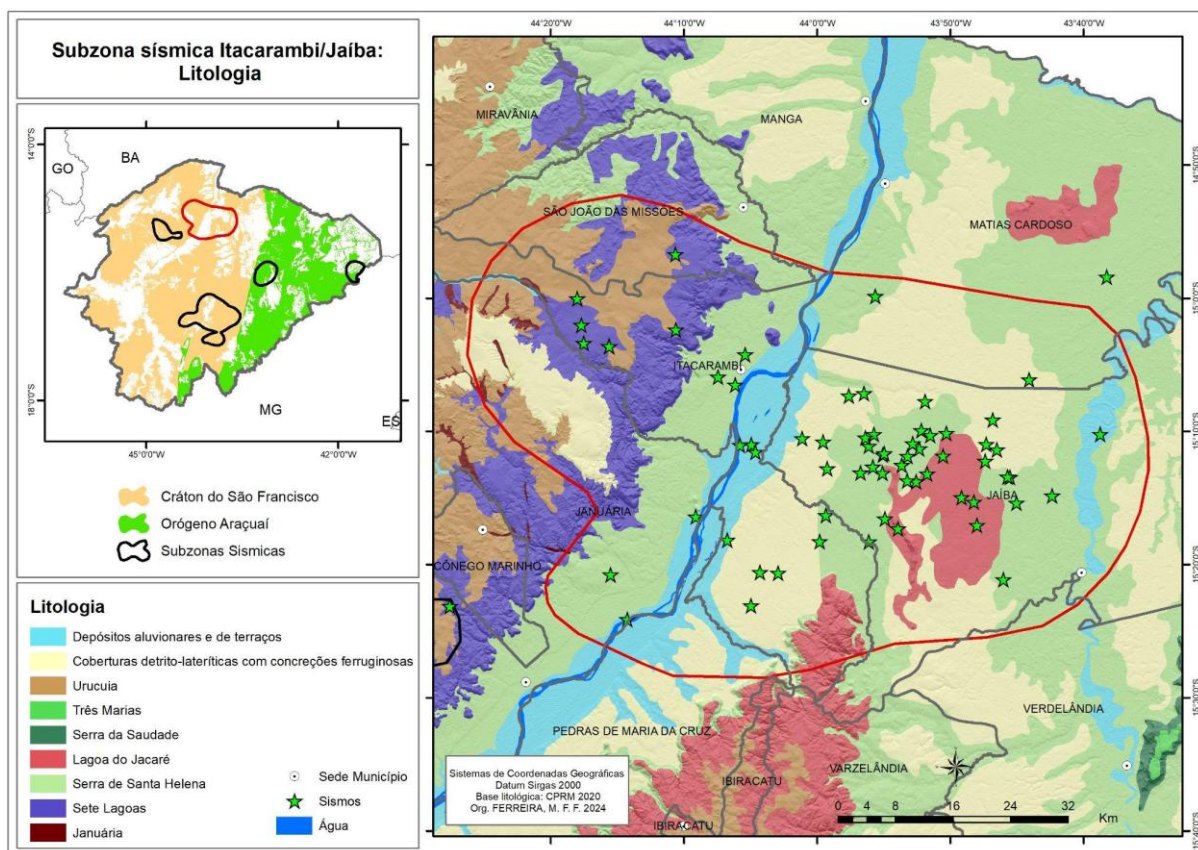


Organização: Autores (2024).

Salienta-se que, conforme descrito por Chimpliganond et al. (2009), o maior tremor alcançou a magnitude de 4,9 em 09 de dezembro de 2007 na comunidade de Caraíbas, município de Itacarambi. Esse sismo causou uma vítima fatal e feriu seis pessoas, além de ter danificado setenta e seis edificações. Juntamente com outros eventos sísmicos, teve sua ocorrência concentrada na região oeste da Subzona, ao longo da margem esquerda do rio São Francisco, onde as rochas não foram afetadas pelos dobramentos brasileiros que delimitam o cráton São Francisco. Nessa área, podemos observar afloramentos do embasamento da província São Francisco, além de uma sequência de rochas sedimentares sobrepostas ao cráton, como a formação Sete Lagoas e uma parte do Grupo Urucuia. Também são

encontradas algumas coberturas cenozóicas, especificamente no "alto de Januária", onde a espessura das camadas de sedimentos é reduzida (Figura 08).

Figura 08: Litologia na Subzona Itacarambi/Jaíba



Organização: Autores (2024).

Chimpliganond et al. (2009) estudaram a sismicidade de Caraíbas, Itacarambi, bem como o mecanismo focal dos eventos, e concluíram que os terremotos ocorreram ao longo de uma ruptura de falha principal com cerca de 3 km de comprimento por 2 km de largura, mergulhando 40° para sudeste. As profundidades focais variam de aproximadamente 0,3 a 1,2 km, e a sismicidade é provavelmente resultado da reativação de falhas pré-existentes no embasamento do Cráton do São Francisco, com direções NE–SW e NNE–SSW, em resposta ao atual campo de tensões compressivas E–W.

O rio São Francisco estabelece uma divisão na espessura do Grupo Bambuí mapeado na Subzona Itacarambi/Jaíba. Grande parte dos sismos dessa Subzona ocorre na margem direita do rio São Francisco, onde a espessura das camadas de rochas das formações Serra de

Santa Helena, Lagoa do Jacaré e das coberturas cenozóicas é maior. Esses sismos ainda não foram estudados de forma aprofundada em relação aos mecanismos focais, e, portanto, as características estruturais geradoras dos eventos não são bem estabelecidas. Provavelmente, os sismos são gerados por falhas e fraturas semelhantes às ocorridas em Bonito de Minas.

A maior parte dos eventos sísmicos ocorreu no município de Jaíba, totalizando quarenta e um registros, enquanto Itacarambi apresentou vinte e quatro ocorrências. Os demais sismos tiveram como epicentro municípios vizinhos. Jaíba, com uma população total de 37.660 habitantes, exibe uma densidade demográfica de 14,29 habitantes por quilômetro quadrado, ao passo que Itacarambi registra uma população de 17.208 pessoas, com densidade de 14,04 habitantes por quilômetro quadrado.

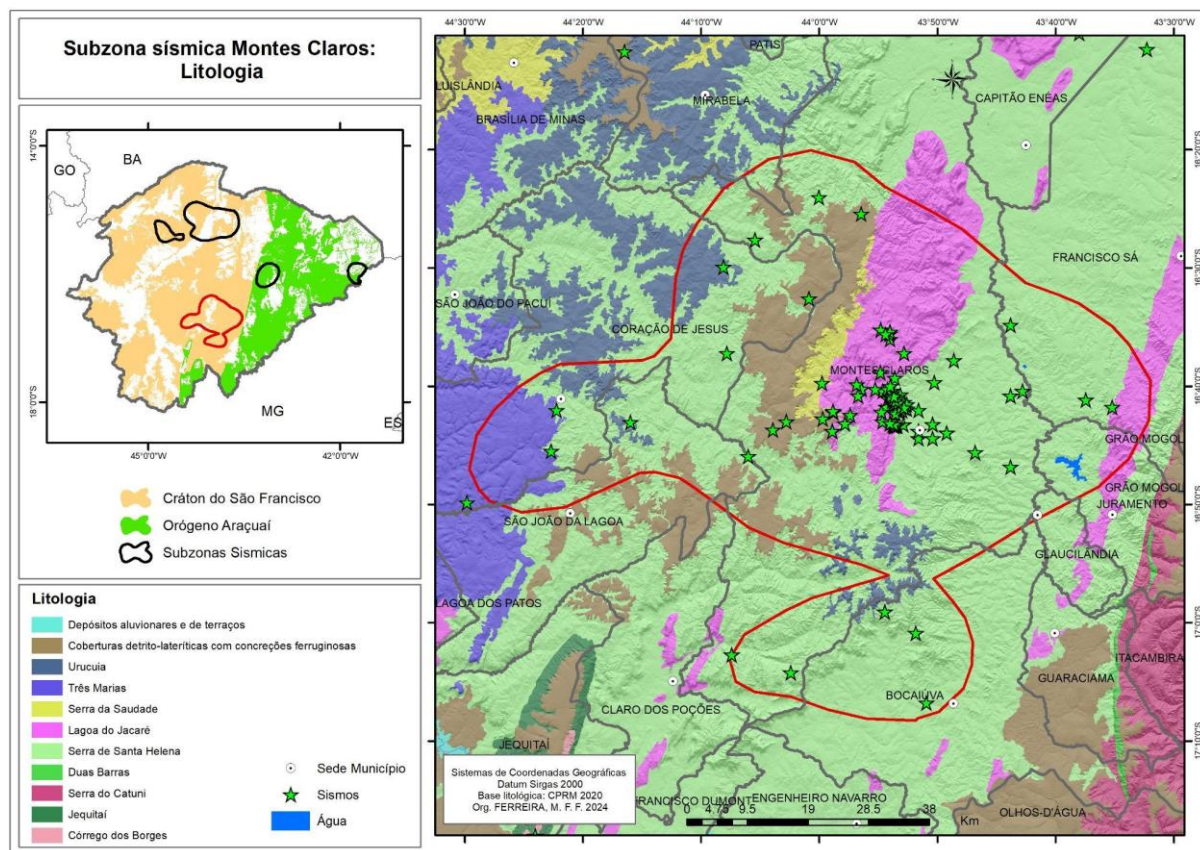
A Subzona Montes Claros foi identificada a partir da análise de cento e quarenta e quatro eventos sísmicos registrados no período de 1976 a 2022. O evento de maior magnitude, atingindo 4,2 na escala Richter, ocorreu em 19 de maio de 2012. Em todo esse período teve quarenta e seis eventos com magnitudes que variaram entre 0 e 0,9, trinta e cinco eventos com magnitudes que variaram entre 1 e 1,9, cinquenta e um eventos com magnitudes que variaram entre 2 e 2,9, onze eventos com magnitudes que variaram entre 3 e 3,9 e um evento com magnitude 4,2. É relevante observar que a grande maioria desses eventos teve como epicentro o município de Montes Claros, sobretudo em sua área urbana, totalizando cento e trinta e duas ocorrências. Esse município abriga uma população significativa, contando com 414.240 habitantes, e apresenta uma densidade demográfica considerável, estimada em 115,39 habitantes por quilômetro quadrado.

Essa Subzona está localizada na porção centro-sul da região Norte de Minas e está inteiramente dentro do Grupo Bambuí. Nela, estão presentes as formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade, compostas principalmente por calcários, siltitos e argilitos. Também há uma pequena porção da Formação Três Marias e do Grupo Urucuia. Observa-se que a maior concentração de sismos ocorre no contato entre a Formação Lagoa do Jacaré e a Formação Serra de Santa Helena (Figura 09). Estruturalmente, a zona é dominada por lineamentos NE, incluindo falhas de empurrão e falhas reversas.

Conforme Agurto-Detzel et al. (2014), a sismicidade de Montes Claros é originada em aproximadamente 0,5 e 1,5 quilômetros de profundidade, em uma falha reversa orientada a N-NW com mergulho para E dentro do embasamento cratônico. O mecanismo focal composto por inversão de formas de onda mostrou que as tensões compressivas na área têm orientação

E-W e atuam em toda a porção norte de Minas Gerais, incluindo aquelas observadas nas Subzonas Bonito de Minas e Itacarambi/Jaíba.

Figura 09: Litologia na Subzona Montes Claros.



Organização: Autores (2024).

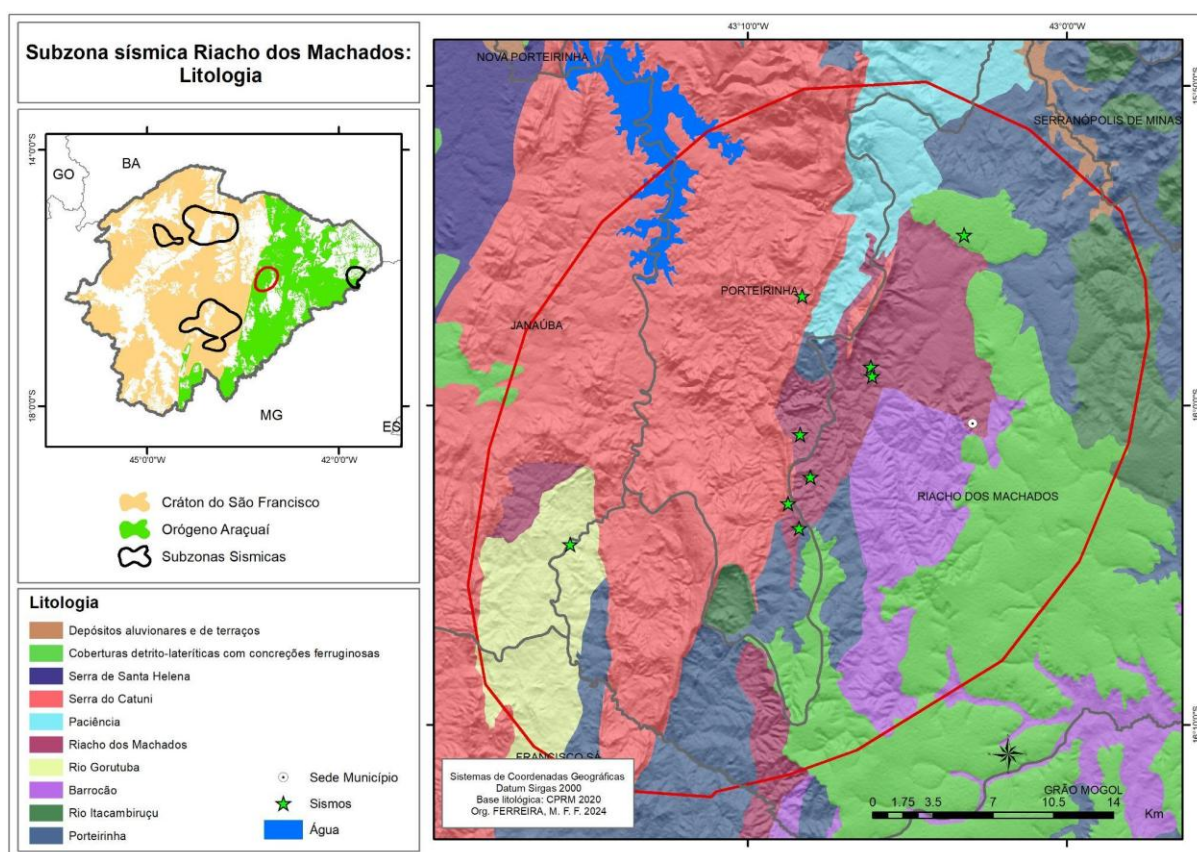
A Subzona Riacho dos Machados foi identificada a partir da ocorrência de nove eventos sísmicos registrados entre 2014 e 2023. O maior evento atingiu a magnitude de 2,6 na escala Richter, ocorrido em 15 de junho de 2023. Em 2014, foram registrados dois eventos, com magnitudes de 2,1 e 2,2. No ano de 2015, houve um evento de magnitude 2,3, seguido por um evento de magnitude 1,4 em 2016. Em 2017, foi registrado um evento de magnitude 2, e em 2018 ocorreram dois eventos, com magnitudes de 2,1 e 1,9. Por fim, em 2021, houve um sismo de magnitude 2,5 e, em 2023, outro evento de magnitude 2,6.

É importante destacar que a maioria desses eventos teve como epicentro áreas próximas aos limites dos municípios de Riacho dos Machados e Porteirinha. No entanto, os

sismos foram mais frequentes nas proximidades da cidade de Riacho dos Machados, cujo município possui uma população de 8.756 habitantes e uma densidade demográfica de 6,66 habitantes por quilômetro quadrado.

Diferente das Subzonas já citadas, a Subzona Riacho dos Machados está localizada na província Mantiqueira se estabelecendo em uma porção do seu embasamento e do grupo Macaúbas. Os sismos estão concentrados principalmente no contato da formação Serra de Catuni com rochas do tipo metaconglomerado polimítico, mármore, filito, xisto e metadiamictito do grupo Macaúbas e da Sequência metavulcanos sedimentar Riacho dos Machados, que inclui micaxisto e ortoanfibolito do embasamento da província (Figura 10).

Figura 10: Litologia da Subzona Riacho dos Machados.



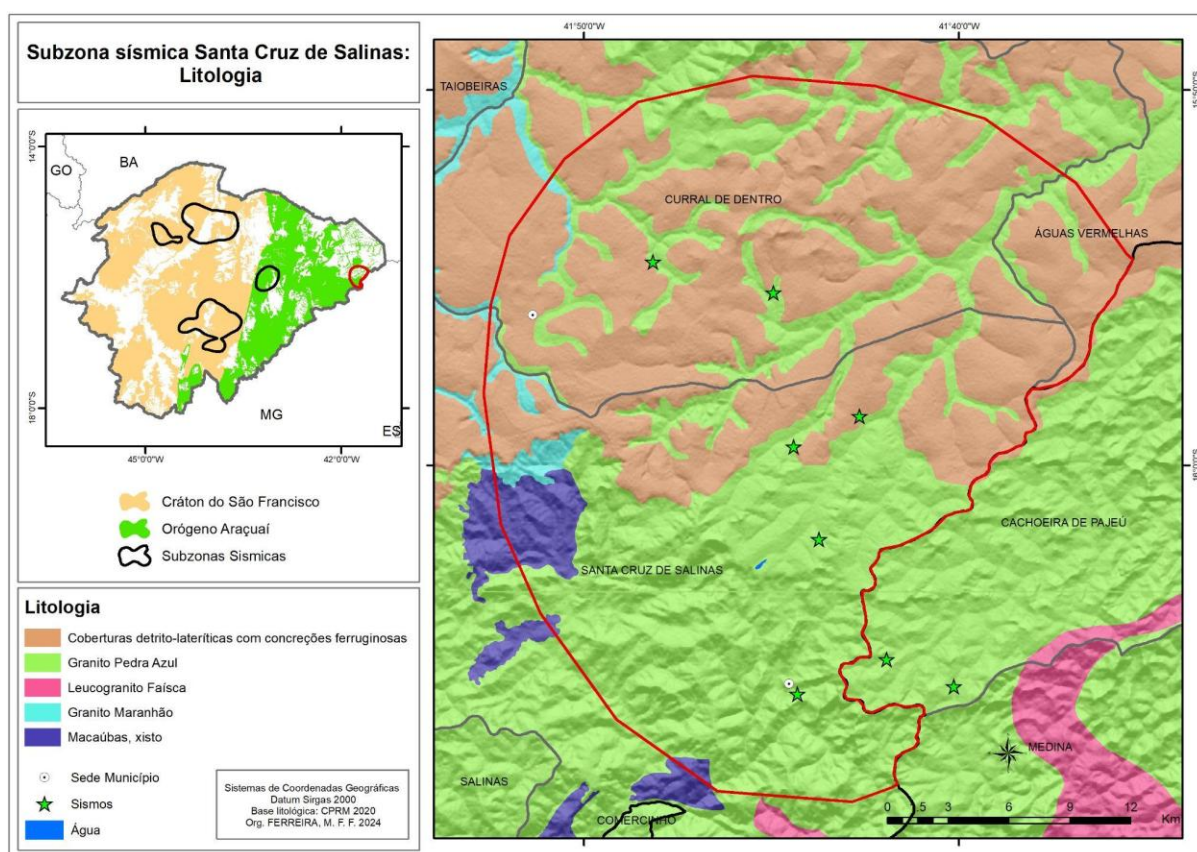
Organização: Autores (2024).

A Subzona Santa Cruz de Salinas foi delimitada com base na ocorrência de seis eventos sísmicos registrados no período entre 2014 e 2016. Em 2014 ocorreram dois eventos com magnitudes 2,5 e 2,3, já em 2015 foram três sismos com magnitudes 2,8, 2,4 e 2, por fim,

em 2016 foi registrado um evento com magnitude 1,8. É relevante ressaltar que a maior parte desses eventos teve como epicentro o município de Santa Cruz de Salinas, totalizando quatro ocorrências, enquanto os dois eventos restantes ocorreram em Curral de Dentro. Santa Cruz de Salinas abriga uma população de 3.910 pessoas e possui uma densidade demográfica de 6,63 habitantes por quilômetro quadrado.

Essa Subzona sísmica é caracterizada pela predominância da Suíte Granito Pedra Azul, composta por rochas do tipo monzogranito e sienogranito. Sobre essas rochas, encontram-se coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas do período Cenozóico. A Subzona respeita os limites da região Norte de Minas, no entanto, sismos também ocorrem além desses limites, atingindo municípios do Vale do Jequitinhonha, como Cachoeira do Pajeú, vizinho à Santa Cruz de Salinas (Figura 11).

Figura 11: Litologia da Subzona Santa Cruz de Salinas.



Organização: Autores (2024).

Diante da análise da litoestratigrafia nas áreas onde se encontram as Subzonas sísmicas no Norte de Minas, percebemos que existem três Subzonas em uma estrutura geológica com terrenos jovens com predomínio de rochas sedimentares frágeis, é o caso das Subzonas Bonito de Minas, Itacarambi/Jaíba e Montes Claros. Embora esses sismos ocorram no embasamento cratônico do São Francisco, existe uma grossa camada de rochas sedimentares sobrepondo as falhas e fraturas geradoras dos sismos. Por outro lado, existem duas Subzonas em terrenos antigos e densos que se dobraram ao longo de bilhões de anos, apresentando alto nível de erodibilidade. Nesse ambiente estão as Subzonas Riacho dos Machados e Santa Cruz de Salinas que afloram no Orógeno Araçuai.

Conclusões

- Em suma, a metodologia adotada neste estudo proporcionou uma compreensão mais profunda das zonas sísmicas do Norte de Minas Gerais, além de fornecer respostas sobre as relações entre sismicidade e litologia na região. Esses resultados têm implicações importantes para o entendimento dos processos geológicos locais e podem contribuir significativamente para a mitigação de riscos sísmicos em áreas similares. O uso eficaz de ferramentas como o ArcGIS 10.5 demonstra a relevância da análise espacial na pesquisa geocientífica.
- Este estudo identificou cinco áreas com maior concentração de atividade sísmica na região Norte de Minas Gerais, derivadas do trabalho realizado por Ferreira et al. (2024), e denominadas Subzonas sísmicas. Essas Subzonas foram nomeadas como Bonito de Minas, Itacarambi/Jaíba, Montes Claros, Riacho dos Machados e Santa Cruz de Salinas, destacando-se como as áreas mais suscetíveis a futuros eventos sísmicos.
- Os sismos observados nessas Subzonas apresentaram um notável aumento no período entre 2007 e 2019, seguido por uma significativa diminuição na frequência dos tremores. Esse comportamento pode indicar um alívio de tensões na região Norte de Minas e um gradual acúmulo de novas tensões, potencialmente gerando novos sismos no futuro. Portanto, é essencial manter um monitoramento contínuo dos tremores no Norte de Minas, especialmente nas principais Subzonas mapeadas, para minimizar possíveis perdas.

- As Subzonas sísmicas, inseridas em diferentes contextos geológicos, resultam na ocorrência de sismos em variados ambientes litoestratigráficos. A análise da distribuição geológica dessas Subzonas proporciona elucidacões sobre a correlaçaõ entre a atividade sísmica e a estrutura geológica subjacente no Norte de Minas, auxiliando no monitoramento e compreensãõ das futuras atividades sísmicas na região.

•

Referências bibliográficas

- Agurto-Detzel, H., Assumpção, M., Ciardelli, C., Albuquerque, D. F., Barros, L. v., & França, G. S. L. (2015). The 2012-2013 Montes Claros earthquake series in the São Francisco Craton, Brazil: New evidence for non-uniform intraplate stresses in mid-plate South America. *Geophysical Journal International*, 200(1), 216–226. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu333>
- Alkmim, F. F., & Martins-Neto, M. A. (2001). A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In C. P. Pinto, & M. A. Martins-Neto.(Eds.), *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais* (pp. 9-30). Belo Horizonte SBG/MG.
- Alkmim, F. F. (2004). O que faz de um Cráton um Cráton? O Cráton do São Francisco e as Revelações Almeidianas ao Delimitá-lo. In V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro, & B. B. de Brito Neves. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (pp. 6-24). São Paulo: Beca. <https://repositorio.usp.br/item/001773288>
- Alkmim, F. F. (2018). História Geológica de Minas Gerais. In A. C. S. Pedrosa, E. Voll, & E. C. Cunha. (Eds.), *Recursos Minerais de Minas Gerais On line: Síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração de Minas Gerais*. (pp. 1-35). Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODENGE). <http://recursomineralmg.codemge.com.br/>
- Almeida, F. F. M. (1977). O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7, 349-363.
- Almeida, F. F. M. de. (1981). O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. *Simpósio Do Cráton Do São Francisco e Suas Faixas Marginais*. (pp. 1-10). Salvador: SBG – Núcleo Bahia.

- Bai, Y., Liu, C., Lay, T., Cheung, K. F., & Yamazaki, Y. (2023). Fast and slow intraplate ruptures during the 19 October 2020 magnitude 7.6 Shumagin earthquake. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37731-2>
- Brito Neves, B. B. de, Campos Neto, M. da C., & Fuck, R. A. (1999). From Rodinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes*, 22(3), 155-166. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1999/v22i3/002>
- Caxito, F. de A., & Alkmim, F. F. (2023). The role of V-shaped oceans and ribbon continents in the Brasiliano/PanAfrican assembly of western Gondwana. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28717-7>
- Chimpliganond, C., Assumpção, M., von Huelsen, M., & França, G. S. (2010). The intracratonic Caraíbas-Itacarambi earthquake of December 09, 2007 (4.9 mb), Minas Gerais State, Brazil. *Tectonophysics*, 480(1–4). <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.016>
- Costa, L. R. F. da, Sena Souza, J. P., Baggio Filho, H., Cavalcanti, J. A. D., & Leite, M. R. (2024). Geomorfologia da Mesorregião Norte de Minas Gerais – Brasil. *Revista Da ANPEGE*, 19(40). <https://doi.org/10.5418/ra2023.v19i40.17870>
- Cui, H., Warren, L. V., Uhlein, G. J., Okubo, J., Liu, X. M., Plummer, R. E., Baele, J. M., Goderis, S., Claeys, P., & Li, F. (2020). Global or regional? Constraining the origins of the middle Bambuí carbon cycle anomaly in Brazil. *Precambrian Research*, 348, 105861. <https://doi.org/10.1016/J.PRECAMRES.2020.105861>
- Gonçalves, G. O., Lana, C., Buick, I. S., Alkmim, F. F., Scholz, R., & Queiroga, G. (2019). Twenty million years of post-orogenic fluid production and hydrothermal mineralization across the external Araçuaí orogen and adjacent São Francisco craton, SE Brazil. *Lithos*, 342–343. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.04.022>
- Kawamoto, M. T. (2012). *Análise de técnicas de distribuição espacial com padrões pontuais e aplicação a dados de acidentes de trânsito e a dados de dengue de Rio Claro – SP* (Dissertação de Mestrado). Botucatu, SP: Universidade Estadual Paulista.
- Ferreira, M. F. F., Leite, M. R., & Fernandes da Costa, L. R. (2024). Mapeamento de zonas sísmicas no estado de Minas Gerais - Brasil. *Revista Verde Grande: Geografia E Interdisciplinaridade*, 6(01), 387–414. <https://doi.org/10.46551/rvg26752395220241387414>

- Martinez, M. I. (2007). *Estratigrafia e Tectônica do Grupo Bambuí no Norte do Estado de Minas Gerais* (Dissertação de Mestrado). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.
- Moore, E. M. (1995). A Tectonic Amalgamation: Geology of Western Gondwana (2000-500 Ma). Pan-African-Brasiliano Aggregation of South America and Africa. Roland Trompette. Balkema, Brookfield, VT, 1994. xii, 350 pp., illus. \$99 or Dfl. 175. Translated from the French by Albert V. Carozzi. *Science*, 268(5207), 134–135. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.268.5207.134>
- Pedrosa - Soares, A. C.; Noce, C. M.; Alkmim, F. F.; Silva, L. C.; Babinski, M.; Cordani, U. G.; Castañeda, C. (2007). Orógeno Araçuai: Síntese do Conhecimento 30 anos após Almeida 1977. *Geonomos*, 15(1), 1 - 16. DOI: 10.18285/geonomos.v15i1.103.
- Rodrigues, R. T., Alkmim, F. F. de, Reis, H. L. S., & Piatti, B. G. (2021). The role of tectonic inheritance in the development of a fold-thrust belt and superimposed rift: An example from the São Francisco basin, eastern Brazil. *Tectonophysics*, 815, 228979. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2021.228979>
- Silva, M. A.; Pinto, C. P.; Pinheiro, M. A. P.; Marinho, M. S.; Lombello, J. C.; Pinho, J. M. M. P.; Goulart, L. E. A.; Magalhães, J. R. (2020). *Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. Projeto Geologia do Estado de Minas Gerais*. Escala 1:1.000.000. Belo Horizonte, 1 mapa. CPRM. <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/21828>
- Uhlein, A., Uhlein, G. J., Caxito, F. de A., & Moura, S. A. (2024). Wrapping a Craton: A Review of Neoproterozoic Fold Belts Surrounding the São Francisco Craton, Eastern Brazil. In *Minerals* (Vol. 14, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/min14010043>
- Yoshida, M. (2024). Dynamic conditions for large shallow intraslab earthquakes: four categories of subduction zones. *Geoscience Letters* 2024 11:1, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S40562-024-00361-7>

Publisher: Universidade Federal de Jataí. Instituto de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFJ. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores: Maykon Fredson Freitas Ferreira: Conceituação, Curadoria de dados, Investigação, Edição do artigo, Escrita – rascunho original; Luis Ricardo Fernandes da

Costa: Validação, Escrita – revisão; Manoel Reinaldo Leite: Análise formal de dados.
Declaramos ainda ciência das Diretrizes Gerais da Geoambiente On-line.

Financiamento: Gestão Superior e Departamento de Geociências da Universidade Estadual de Montes Claros e Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Conflito de interesse: Os autores declaram que não possuem interesses financeiros ou não financeiros relevantes relacionados a este trabalho.