

Localização relativa dos sismos da Guiana ocorridos em 1965 (4.8 mb) e em 2021 (6.0 mb)

José Alexandre Araújo Nogueira¹, Marcelo Sousa de Assumpção¹, Universidade de São Paulo¹

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 terremoto da Guiana de 31 de Janeiro de 2021 foi um dos maiores eventos sísmicos intra-placa ocorridos na América do Sul desde 1955. A magnitude medida pelo Centro de Sismologia da USP foi de mb 6.0. O epicentro deste tremor foi realocado a partir de correções do seu tempo de chegada pelos resíduos de uma de suas maiores réplicas (mb 4.8, de 26/03/2021) usada como referência para realocar o tremor principal. A partir do mesmo método, realocamos outro tremor em 1965 (mb 4.8), ocorrido bem próximo ao local do evento de 2021. Esse método permitiu-nos posicionar esses epicentros na área setentrional do embasamento de rochas proterozóicas do Escudo das Guianas, distando cerca de 60km ao Sul da Bacia de Takutu.

Introdução

De acordo com os noticiários e relatos da população pela plataforma de monitoramento do IAG, os tremores de terra gerados pelo terremoto de 2021 foram sentidos em Roraima, Manaus e em Georgetown, capital da Guiana. Os registros de terremotos nesta região não são algo inédito. De acordo com o Boletim Sísmico Brasileiro, na fronteira Roraima/Guiana, além do recente sismo de 2021, já ocorreram outros dois sismos, em 1964 (mb 4.3) e 1965 (mb 4.8) (**Fig. 1**). Em Boa Vista-RO, tremores também foram sentidos em 1928 e 1953, porém temos poucas informações sobre ambos. Uma das características básicas do estudo sísmológico é a determinação precisa dos epicentros. Considerando a importância de se estudar e localizar com precisão os sismos dessa região, e reconhecendo que a localização tradicional é imprecisa por conta da escassez de estações em regiões de baixa sismicidade, como o Brasil, utilizaremos o método de localização relativa para aperfeiçoar localizações epicentrais antecedentes. A localização epicentral precisa possibilita um estudo de mais detalhes sobre a estrutura da falha sísmogênica, como a orientação e comprimento da ruptura. Deste modo, podemos estudar os campos de tensão da região. Na (**Fig. 1**) podemos observar que os epicentros realocados parecem estar alinhados com as falhas SW-NE do embasamento (2.0 G.a) e da Bacia de Takutu, sugerindo a possibilidade desses eventos serem nucleados nessa mesma estrutura geológica. Os dois eventos aqui estudados (1965 e 2021) ficam na região central do Escudo das Guianas. O Escudo das Guianas

corresponde a parte norte do Cráton do Amazonas. A área de estudo pertencente à Província Tapajós-Parima proposta por Santos et al. (2006), com idades variando entre 2,03 e 1,88 Ga., representada por rochas graníticas, metamórficas de alto grau e sedimentares siliciclásticas, estas últimas na bacia de Takutu (**Fig. 1**).

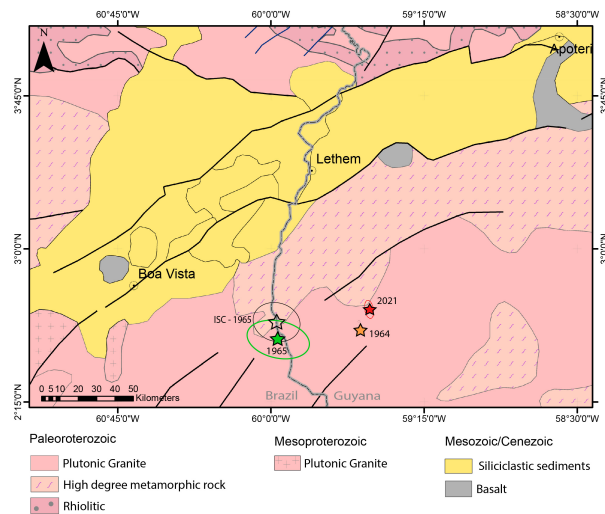


Figura 1 – Epicentros of the 1965 (black open star: Located by the ISC; Green star: Relocated in the present work), 1964 (orange star, ISC location) and 2021 events (red stars). Map background shows lithology from the Brazilian Geologic Survey (CPRM).

Metodologia/Problema Investigado

Utilizamos o software HYPOCENTER (Lienert, 1994), para determinação de epicentros de tele-sismos, e o modelo de velocidades regional para o Brasil (Assumpção & Ardito, 2010). Usando um evento com epicentro bem conhecido (evento de referência), os seus resíduos de tempo de chegada ($t_{res} = t_{obs} - t_{pred}$) podem ser usados como correções de estação na re-localização de um outro sismo não tão bem localizado (evento alvo). Subtraindo-se os resíduos (t_{res} do evento de referência) do tempos de chegada do evento alvo, podemos compensar possíveis variações laterais de velocidade na crosta e manto, não contempladas em modelos 1D de velocidade, e dessa forma melhorar a localização do evento alvo em relação ao evento de referência.

Evento 2021

Para o sismo mais recente da região, 31 de Janeiro de 2021 utilizamos como referência uma réplica (mb 4.8 em

26-03-2021), bem localizada a partir de 4 estações locais instaladas pelo IAG-USP e pelo Serviço Geológico da Guiana logo após a ocorrência do sismo principal (mb 6.0) de 31-Jan-2021. Ou seja, utilizamos uma das réplicas para localizar o maior sismo da série. As estações em comum que registraram ambos os eventos, réplica (referência) e principal (alvo), estão na **Fig. 2**. Posteriormente confrontamos os resultados da realocização com os dados de deslocamento de solo por satélite InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) obtidos para esse sismo.

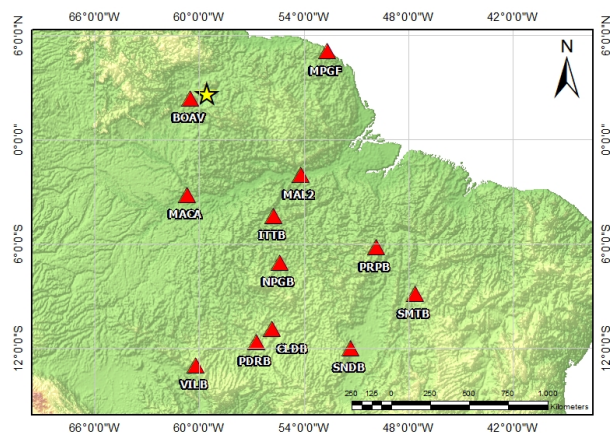


Figura 2 – Yellow star shows location of Guyana 2021 earthquake sequence. Red triangles are stations used for relative location. All stations recorded both events: the main earthquake (target, mb 6.0) and the reference earthquake (largest aftershock, mb 4.8).

Evento 1965

Para realocar o sismo de 1965, utilizamos como referência o terremoto principal de 2021 bem definido pelos dados InSAR. Para ambos os sismos, utilizamos as leituras de chegada do International Seismological Centre (ISC). Usamos as estações em comum ou próximas (menos de 100km uma da outra), que registraram ambos eventos. Essas estações estão dispostas na **Fig. 3**.

Resultados

Evento 2021

Fixando o epicentro e hora de origem da maior réplica (referência, mb 4.8), obtidos por uma rede local, temos os resíduos por estação (**Tab. 1**). Os tempos de chegada originais para o evento alvo (mb 6.0) e seus resíduos da localização são mostrados na **Tab. 2**. Os tempos de chegada do sismo alvo (mb 6.0) corrigidos, assim como os resíduos minimizados graças à correção pelos resíduos do evento de referência (mb 4.8) são expostos na **Tab. 3**. Finalmente, o resultado da realocização epicentral relativa do maior sismo da série de 2021 é plotada na **Fig. 4**, e seu epicentro é comparado com o epicentro obtido pelos dados de satélite InSAR.

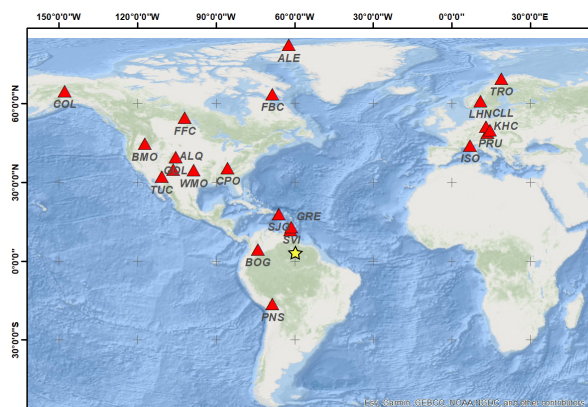


Figura 3 – Common stations used for the relative location between the 1965 and 2021 earthquakes. Station names are the stations operating in 1965.

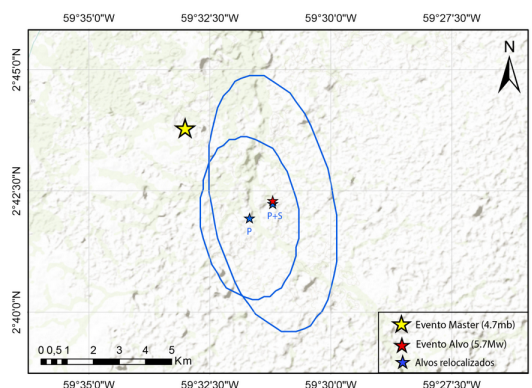


Figura 4 – Mainshock of the 2021 series (2021-01-31, mb 6.0, target), located from the largest aftershock (2021-03-26, mb 4.8) used as a reference. Yellow Star is the reference epicenter determined by a local network. The red star is the location of the main event based on InSAR data. The two blue stars are the epicenters of the main event (target), relocated with station corrections, using only P arrivals or P+S arrivals.

Tabela 1 – Tabela com os tempos de chegada e resíduos por estação para a réplica (mb 4.8) bem localizada e usada como referência para realocização do sismo principal de 2021. A coluna de resíduos será usada para correção dos tempos de chegada por estação do sismo alvo de 2021. Depth and location (loc) are at the top of the table. "F" denotes fixed parameters.

| Depth: 2.2km F | | loc: 2.730 -59.550 F | | 1.9 rms |
|----------------|-------|----------------------|-------|---------|
| Station | Phase | Arrival (hh mm ss) | | Residue |
| BOAV | EP | 15 58 | 1.62 | -1.09 |
| BOAV | ES | 15 58 | 14.97 | -2.33 |
| MACA | EP | 15 59 | 12.18 | -1.29 |
| MACA | EP | 16 0 | 19.38 | -1.04 |
| MAL2 | EP | 15 59 | 27.96 | -1.76 |
| MPGF | EP | 15 59 | 28.76 | -2.85 |
| MPGF | ES | 16 0 | 48.61 | -3.38 |
| ITTB | EP | 15 59 | 39.23 | -2.39 |
| NPGB | EP | 16 0 | 12.75 | -3.94 |
| PRPB | EP | 16 0 | 47.14 | -4.57 |
| CLDB | EP | 16 0 | 58.80 | -4.79 |
| PDRB | EP | 16 1 | 5.45 | -4.92 |
| VILB | EP | 16 1 | 19.87 | -4.96 |
| SMTB | EP | 16 1 | 31.60 | -6.48 |
| SNDB | EP | 16 1 | 33.25 | -7.23 |

Evento 1965

O terremoto de 1965 foi localizado, na época, por estações da rede global, e suas leituras e epicentros estão resumidos no catálogo do ISC, usado aqui neste trabalho. O epicentro do ISC (**Fig. 1**) está quase 30 km a W do sismo de 2021. Como havia poucas estações na América do Sul em 1965 (**Fig. 3**), surge a dúvida se o evento de 1965 poderia ter ocorrido na mesma falha sismogênica que rompeu em 2021. Essa questão pode ser estudada com a localização relativa entre os sismos de 1965 (alvo) e de 2021 (referência).

A **Tab. 4** mostra as leituras dos tempos de chegada e resíduos do sismo de 2021 nas estações comuns ao evento de 1965. Os tempos de chegada do sismo principal de 31-Jan-2021 (referência), e os resíduos obtidos a partir do epicentro fixado em local conhecido (dados InSAR) estão na **Tab. 5**. Por fim, a tabela **Tab. 6** mostra os resultados dos tempos de chegada do sismo de 1965 corrigidos pelo resíduo do sismo principal de 2021, assim como seus resíduos na realocização. Um mapa com os epicentros da realocização relativa do sismo de 1965 é apresentado na **Fig. 5**.

Discussão e Conclusões

Evento de 2021

O epicentro realocado do sismo principal de 2021 concorda muito bem com a localização mais precisa obtida

Tabela 2 – Tempos de chegada e resíduos do sismo principal de 2021 localizado sem correção de estação

| Depth: 0km F | | loc: 2.739 -59.489 | | 1.1 rms |
|--------------|-------|--------------------|-------|---------|
| Station | Phase | Arrival (hh mm ss) | | Residue |
| BOAV | EP | 19 5 | 32.69 | 0.8210 |
| BOAV | ES | 19 5 | 46.31 | -1.00 |
| MACA | EP | 19 7 | 49.19 | 1.47 |
| MAL2 | EP | 19 6 | 58.99 | 1.54 |
| MPGF | EP | 19 6 | 59.75 | 0.69 |
| MPGF | ES | 19 8 | 18.25 | -0.77 |
| ITTB | EP | 19 7 | 9.98 | 0.38 |
| NPGB | EP | 19 7 | 43.50 | -1.24 |
| PRPB | EP | 19 8 | 17.73 | -1.72 |
| CLDB | EP | 19 8 | 29.36 | -2.40 |
| PDRB | EP | 19 8 | 35.84 | -2.76 |
| VILB | EP | 19 8 | 49.66 | -3.60 |
| SMTB | EP | 19 9 | 1.62 | -4.23 |
| SNDB | EP | 19 9 | 3.96 | -4.50 |

com dados InSAR, apesar da grande incerteza mostrada pela elipse de erro (**Fig. 4**). O erro na realocização relativa é de poucos km. A distância entre o epicentro realocado e sua maior réplica (mb 4.8) nos mostra que a falha de 2021 possui um trend NW-SE e cerca de 5km de extensão (**Fig. 4**). Além disso, os cálculos da realocização (**Tab. 3**) mostram uma redução do resíduo médio das estações, comparado à localização tradicional mostrada na (**Tab. 2**). Esse teste com o sismo de 2021 demonstra que a realocização relativa usando resíduos das estações telessísmicas fornece melhores epicentros do que a localização original.

Evento de 1965

O epicentro realocado do sismo de 1965 está a menos de 20 km do epicentro original e continua bem distante do sismo de 2021. Isso mostra que o evento de 1965 não ocorreu na mesma falha geológica do sismo de 2021 e é, portanto, um evento independente.

A partir do mapa litogeológico da (**Fig. 1**) observamos que os epicentros de 1965, 1964 e 2021 parecem formar um trend de direção SW-NE, mesma direção das falhas regionais e das falhas de bordo da bacia. Porém, como mencionamos, o evento de 2021 possui sua falha geradora de orientação SE-NW. Então esse aparente alinhamento entre os 3 eventos não é significativo.

Os resíduos rms e as elipses de erro das realocizações são menores do que os erros dos epicentros originais, indicando que o método de correção de estações telessísmicas usando resíduos de um sismo de referência é útil para melhorar epicentros de sismos distantes.

Tabela 3 – Localização do sismo principal de 2021 (sismo Alvo, mb 6.0) após a correção dos tempos de chegada pelos resíduos do evento de referência da (Tab. 1)

| Depth: 0km F | | loc: 2.704 -59.520 | 0.5 rms |
|--------------|-------|--------------------|---------|
| Station | Phase | Arrival (hh mm ss) | Residue |
| BOAV | EP | 19 5 33.78 | -0.01 |
| BOAV | ES | 19 5 48.64 | -0.02 |
| MACA | EP | 19 6 44.74 | 0.58 |
| MAL2 | EP | 19 7 0.75 | 0.61 |
| MPGF | EP | 19 7 2.60 | 0.30 |
| MPGF | ES | 19 8 21.63 | -1.05 |
| ITTB | EP | 19 7 12.37 | 0.30 |
| NPGB | EP | 19 7 47.44 | 0.28 |
| PRPB | EP | 19 8 22.30 | 0.17 |
| CLDB | EP | 19 8 34.15 | 0.05 |
| PDRB | EP | 19 8 40.76 | -0.15 |
| VILB | EP | 19 8 54.62 | -0.84 |
| SMTB | EP | 19 9 8.10 | -0.41 |
| SNDB | EP | 19 9 11.19 | 0.25 |

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). Queremos agradecer também a equipe do Centro de Sismologia da USP.

Referências

Assumpcao, M. Ardito, Júlio Barbosa, José. (2010). An improved velocity model for regional epicentre determination in Brazil. 1-6. 10.22564/4simbgf2010.201.

Lienert, B. R. HYPOCENTER 3.2- A Computer Program for Locating Earthquakes Locally, Regionally and Globally, Hawaii Institute of Geophysics Planetology, Honolulu, 1994.

Santos J.O.S. , Hartmann L.A., Faria M.S.G. , Riker S.R.L., Souza M.M., Almeida M.E. , McNaughton N.J. 2006. A compartimentação do Cráton Amazonas em Províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. In: Simpósio de Geologia, 9., Belém. Resumo Expandido.. SBG-Núcleo Norte. 1 CD-ROM.

Tabela 4 – Tempos de chegada e resíduos do sismo de 2021 com hipocentro fixo. A coluna de resíduos será usada para correção dos tempos de chegada do sismo alvo de 1965. A segunda coluna mostra as estações correspondentes para o sismo de 1965 que não operam mais atualmente.

| Depth: 3km F | | loc: 2.705 -59.520 F | 1.1 rms | |
|--------------|-----|----------------------|-------------|---------|
| Station | sta | Phase | Arrival | Residue |
| GRGR | GRE | EP | 19 7 32.30 | -0.30 |
| SVB | SVI | EP | 19 7 45.30 | -1.50 |
| ROSC | BOG | EP | 19 8 42.20 | -3.59 |
| SJG | SJG | EP | 19 9 9.10 | 1.44 |
| LPAZ | PNS | EP | 19 9 56.80 | 1.04 |
| LPAZ | PNS | ES | 19 13 47.60 | -1.70 |
| U49A | CPO | EP | 19 13 1.25 | -0.43 |
| WMOK | WMO | EP | 19 13 56.12 | -1.12 |
| ANMO | ALQ | EP | 19 14 39.51 | -1.12 |
| ISCO | GOL | EP | 19 14 52.20 | 0.46 |
| FRB | FBC | EP | 19 15 30.00 | -0.19 |
| FFC | - | EP | 19 15 36.11 | -0.74 |
| BMO | BMO | EP | 19 15 59.50 | -0.16 |
| BNI | ISO | EP | 19 16 36.29 | 0.81 |
| KHC | - | EP | 19 17 7.80 | 0.17 |
| CLL | - | EP | 19 17 8.40 | 0.42 |
| PRU | - | EP | 19 17 12.70 | 0.42 |
| NOA | LHN | EP | 19 17 16.20 | 0.47 |
| ALE | - | EP | 19 17 22.32 | -0.92 |
| TRO | - | EP | 19 17 43.29 | 0.61 |
| COLA | COL | EP | 19 17 59.57 | -0.15 |
| QSP | SPA | EP | 19 18 27.44 | -0.30 |

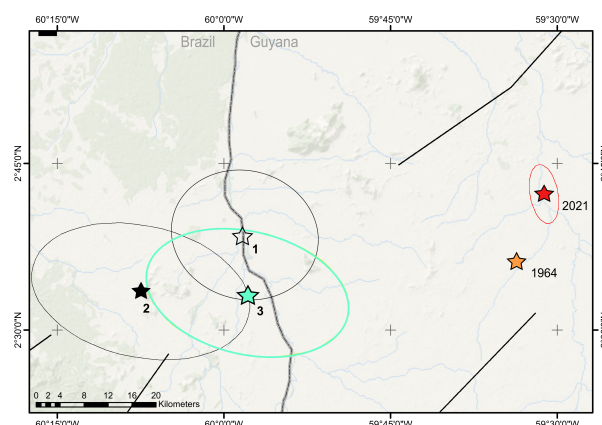


Figura 5 – 1965 earthquake (green star). The epicenter numbers are, 1: Original location by ISC, 2: Traditional location for this work, 3: Relative location by the 2021 earthquake. Red and orange stars show the 2021 and 1964 earthquake respectively. Black lines correspond to regional faults.

Tabela 5 – Tempos de chegada e resíduos de uma localização do sismo de 1965 sem correção de estações. Tempos de chegada retirados do catálogo do ISC

| Depth: 3km F | | loc: 2.558 -60.125 | 1.4 rms |
|--------------|-------|--------------------|---------|
| Station | Phase | Arrival (hh mm ss) | Residue |
| GRE | EP | 19 39 8.00 | -2.96 |
| SVI | EP | 19 39 23.00 | -2.20 |
| BOG | EP | 19 40 15.00 | 2.18 |
| SJG | EP | 19 40 47.50 | 2.01 |
| PNS | EP | 19 41 33.70 | 1.93 |
| PNS | ES | 19 45 20.00 | -2.89 |
| CPO | EP | 19 44 33.00 | 0.59 |
| WMO | EP | 19 45 32.00 | -0.62 |
| ALQ | EP | 19 46 16.50 | 0.45 |
| GOL | EP | 19 46 27.30 | 0.36 |
| TUC | EP | 19 46 32.80 | 0.59 |
| FBC | EP | 19 47 09.00 | -0.65 |
| FFC | EP | 19 47 14.00 | -0.86 |
| BMO | EP | 19 47 36.00 | -0.71 |
| ISO | EP | 19 48 18.90 | 1.24 |
| KHC | EP | 19 48 50.00 | 0.64 |
| CLL | EP | 19 48 50.00 | 0.37 |
| PRU | EP | 19 48 54.80 | 1.20 |
| LHN | EP | 19 48 56.70 | 0.65 |
| ALE | EP | 19 49 2.00 | -0.93 |
| TRO | EP | 19 49 23.30 | -0.07 |
| COL | EP | 19 49 37.90 | -0.04 |
| SPA | EP | 19 50 5.50 | -0.26 |

Tabela 6 – Localização do sismo de 1965 com correção dos tempos de chegada pelos resíduos do evento referência da (Tab. 4). A profundidade foi fixada em 3 km por falta de resolução.

| Depth: 3km F | | loc: 2.556 -59.965 | 1.3 rms |
|--------------|-------|--------------------|---------|
| Station | Phase | Arrival (hh mm ss) | Residue |
| GRE | EP | 19 39 8.30 | -2.97 |
| SVI | EP | 19 39 24.50 | -0.88 |
| BOG | EP | 19 40 18.59 | 3.72 |
| SJG | EP | 19 40 46.06 | -0.07 |
| PNS | EP | 19 41 32.66 | 0.31 |
| PNS | ES | 19 45 21.70 | -2.33 |
| CPO | EP | 19 44 33.43 | 0.39 |
| WMO | EP | 19 45 33.12 | -0.27 |
| ALQ | EP | 19 46 16.68 | -0.14 |
| GOL | EP | 19 46 26.84 | -0.78 |
| TUC | EP | 19 46 33.68 | 0.65 |
| FBC | EP | 19 47 09.19 | -0.46 |
| FFC | EP | 19 47 14.74 | -0.50 |
| BMO | EP | 19 47 36.16 | -1.14 |
| ISO | EP | 19 48 18.09 | 1.19 |
| KHC | EP | 19 48 49.83 | 1.14 |
| CLL | EP | 19 48 49.58 | 0.59 |
| PRU | EP | 19 48 54.02 | 1.07 |
| LHN | EP | 19 48 56.23 | 0.69 |
| ALE | EP | 19 49 2.92 | 0.07 |
| TRO | EP | 19 49 22.69 | -0.31 |
| COL | EP | 19 49 38.05 | -0.13 |
| SPA | EP | 19 50 5.80 | 0.15 |