

RELATÓRIO DE MÉTRICAS DE PREDIÇÃO

I
14 de dezembro de 2023

Análise de métricas obtidas para os eventos rede sismológica de
Itá/Machadinho.

UNIDADE RESPONSÁVEL

Cidades Infraestruturas e Meio Ambiente – CIMA
Seção de Obras Civis - SOC

PERÍODO DE ANÁLISE

Início: 1 de janeiro de 2020

Fim: 31 de dezembro de 2023

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

RESUMO

Neste Relatório são apresentados os resultados do monitoramento sismológico efetuado na área da Usina Hidrelétrica Salto Pilão, por meio da Estação Sismológica SP7, no período entre 01.12.2022 e 30.06.2023, permitindo acompanhar a sismicidade local e orientar a adoção de eventuais medidas mitigadoras. Durante o monitoramento sismológico local efetuado, a Estação SP7 registrou sessenta e sete (67) desmontes em obras/pedreiras na região. No período de referência do presente relatório não foi observada a ocorrência de evento sísmico induzido pela implementação do Empreendimento da UHE Salto Pilão. Foram detectados 4 sismos naturais, sendo 3 destes sismos locais próximos à estação SP7, e um evento regional próximo à cidade de Iguape – SP, no estado de São Paulo em 2023-06-16 11:22:00 (UTC) com magnitude 4.0 mR. Ressalta-se a contribuição que este monitoramento sismológico está dando para a confirmação e a determinação dos parâmetros de eventos ocorridos no território brasileiro, em especial aqueles com epicentros nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e regiões vizinhas. Assim, recomenda-se que a Estação SP7 seja mantida em funcionamento, possibilitando dar continuidade ao melhor conhecimento da sismicidade local e regional, além do necessário acompanhamento da operação da Usina Hidrelétrica Salto Pilão. **Palavras-chave:**

Sismologia; sismicidade; Salto Pilão; sismos induzidos; sismos naturais; detonações; UHE Salto Pilão.

CONTENTS

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	1
2 ATIVIDADES REALIZADAS E RESULTADOS OBTIDOS	1
2.1 Desenvolvimento e configuração do sistema	2
2.2 Testes e validação do Classificador	2
2.3 Implicações e futuras diretrizes	2
2.4 Análise de Eventos em Horários Não Comerciais	3
2.5 Documentação e divulgação	14
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	15
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

1 INTRODUÇÃO

Este Relatório integra o estudo sismológico em desenvolvimento pelo Consórcio Empresarial Salto Pilão - CESAP e o IPT, de acordo com a Proposta FIPT/IPT nº 59220/21 de 29 de junho de 2021 - “Monitoramento sismológico na área do AHE Salto Pilão, SC, entre julho/2021 e junho/2024”, em continuidade aos trabalhos iniciados em janeiro de 2007 (Carta Proposta CT-Obras/SG-233/06), referentes à implantação do programa de monitoramento da sismicidade induzida na Usina Hidrelétrica Salto Pilão - UHESP. O estudo visa o atendimento aos requisitos do Projeto Básico Ambiental - PBA deste empreendimento, em execução na bacia do rio Itajaí-Açu, nos municípios de Lontras, Ibirama e Apiúna, no Estado de Santa Catarina, dentro do Programa 3: Monitoramento dos Impactos Geológicos – Sub-Programa 3.2: Sismicidade Induzida, de acordo com a LAO – Licença Ambiental de Operação no 4.055/12 concedida pela Fundação do Meio Ambiente - FATMA do Estado de Santa Catarina, atualmente Instituto de Meio Ambiente de Santa Catarina - IMA.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados do monitoramento sismológico efetuado na área da Usina Hidrelétrica Salto Pilão, com a Estação Sismológica SP7, entre 01 de dezembro de 2022 e 30 de junho de 2023, permitindo acompanhar a sismicidade local e orientar a adoção de eventuais medidas mitigadoras, atendendo às exigências previstas no processo de licenciamento ambiental do empreendimento.

2 ATIVIDADES REALIZADAS E RESULTADOS OBTIDOS

Neste período de estudos, foi desenvolvido e implementado um Classificador Sismológico avançado, empregando redes neurais convolucionais para a classificação de espectrogramas de eventos sismológicos. Este algoritmo foi concebido para distinguir entre eventos naturais e antropogênicos, proporcionando uma ferramenta robusta para análises sismológicas detalhadas.

O Classificador Sismológico foi desenvolvido em Python e é mantido em um repositório no GitLab, sob a colaboração entre o Laboratório de Planetologia e Geociências da Universidade de Nantes, França, e o setor de Sismologia do IPT. O código desenvolvido permite desde a aquisição até a análise das métricas de desempenho do modelo.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

2.1 Desenvolvimento e configuração do sistema

O sistema foi estruturado para operar de maneira dinâmica e eficiente, permitindo a aplicação do algoritmo de classificação francês de forma integrada com os procedimentos de aquisição de dados sismológicos. A instalação e configuração do ambiente para o classificador foram automatizadas por meio de scripts, facilitando a reprodução e a execução em diferentes infraestruturas computacionais.

Para a coleta de dados, foi estabelecida uma pipeline que integra o download, a filtragem e o armazenamento dos dados sismológicos, utilizando catálogos do MOHO (IAG-USP) para garantir a obtenção de eventos naturais. A classificação dos eventos foi realizada considerando distintos períodos do dia para discernir entre eventos naturais e antrópicos, com uma análise adicional da forma de onda no software Snuffler.

2.2 Testes e validação do Classificador

O classificador foi testado utilizando um conjunto de dados rigorosamente selecionado, composto por eventos rotulados como naturais por especialistas. Esta fase de testes foi crucial para validar a precisão do classificador na discriminação entre eventos antrópicos e naturais, ajustando parâmetros e refinando o modelo conforme necessário.

Os resultados dos testes foram encorajadores, mostrando uma boa capacidade do modelo em identificar corretamente a natureza dos eventos sismológicos. As métricas de desempenho, como precisão e recall, foram calculadas e apresentaram resultados satisfatórios, reforçando a eficácia do classificador desenvolvido.

Adicionalmente, foram realizados ajustes baseados nos resultados dos testes, incluindo a otimização da captura de dados e do pré-processamento, para melhorar a acurácia das classificações.

2.3 Implicações e futuras diretrizes

Os avanços alcançados com o desenvolvimento deste classificador sismológico abrem novas perspectivas para a análise de dados sismológicos no Brasil. Com a capacidade de discriminar de forma eficiente entre eventos naturais e antropogênicos, o classificador é uma ferramenta valiosa para o monitoramento ambiental e para a pesquisa geológica.

Recomenda-se a continuidade do desenvolvimento do sistema, com atualizações regulares do modelo e a integração de novas técnicas de análise de dados sismológicos. Além disso, é crucial manter a colaboração entre instituições de pesquisa nacionais e internacionais para aprimorar constantemente as capacidades de monitoramento sismológico do país.

A implementação do classificador em outras regiões e para diferentes tipos de dados sismológicos também será explorada, visando expandir sua aplicabilidade e contribuir para um conhecimento mais profundo da dinâmica sismológica regional e global.

2.4 Análise de Eventos em Horários Não Comerciais

Uma parte significativa do estudo envolveu a análise de eventos sismológicos registrados em horários não comerciais, definidos como o período entre as 23:00 UTC e 11:00 UTC. Este intervalo foi escolhido considerando as diferenças de fuso horário entre as várias regiões do Brasil, que abrangem de -3 UTC a -5 UTC. A análise focou em identificar características distintivas dos eventos naturais e antropogênicos ocorridos neste período.

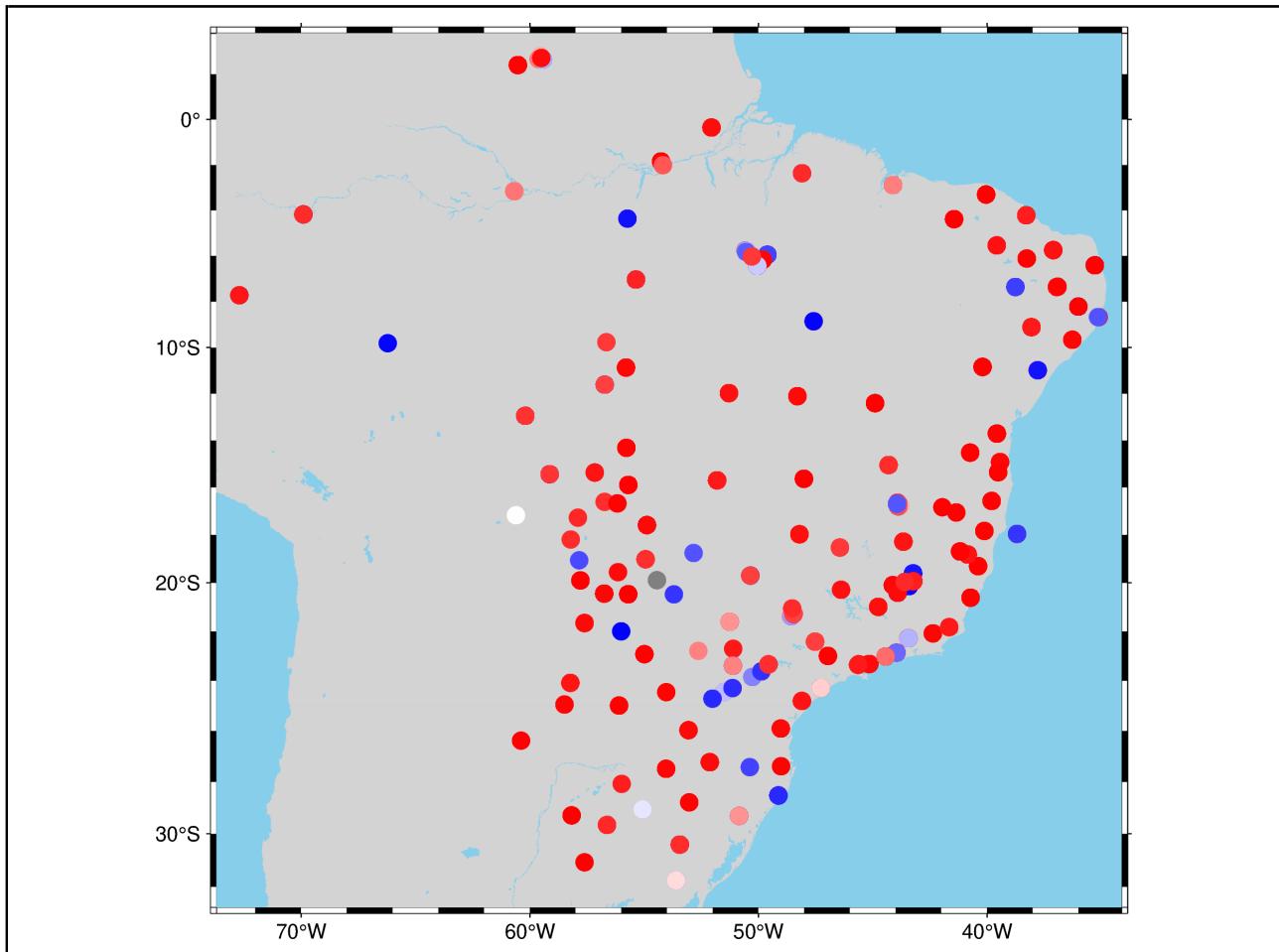
Os dados foram processados e visualizados usando uma série de scripts Python desenvolvidos para filtrar, analisar e plotar informações sismológicas detalhadas. Os gráficos resultantes, como distribuições de probabilidade natural, boxplots de distância por natureza do evento e matrizes de correlação, ajudaram a ilustrar diferenças significativas nas características dos eventos registrados durante o horário não comercial.

Especificamente, a distribuição de *prob_nat* (probabilidade de um evento ser natural) para eventos naturais mostrou-se distinta daquela para eventos antropogênicos, com eventos naturais tendendo a ter valores mais altos de probabilidade. Além disso, a análise de recall por número de estações envolvidas no registro dos eventos revelou que um maior número de estações frequentemente correlaciona-se a uma classificação mais precisa entre eventos naturais e antropogênicos.

Os histogramas de recall ajustados para a hora do dia destacaram a precisão da classificação durante os horários não comerciais, refletindo a eficácia do algoritmo em identificar corretamente a natureza dos eventos sob condições variáveis de ruído ambiental e atividade humana.

Todas essas análises são cruciais para entender a dinâmica sismológica em horários menos típicos para atividades humanas, oferecendo insights sobre a influência de fatores naturais isolados das interferências antrópicas. Os resultados estão detalhados nos Apêndices A e

Figure 1 – Mapa do Brasil mostrando pontos de interesse e os epicentros dos eventos classificados como detonações e sismos. Foram detectados um total de sessenta e sete (67) eventos associados a detonações no período, classificados a partir do horário de ocorrência e da forma de onda, além do plano de fogo fornecido, com magnitudes mínima e máxima de 0.4 e 3.0 MLv, respectivamente.



Fonte: IPT

B, onde figuras e tabelas fornecem uma representação visual e quantitativa das descobertas.

A validação destes resultados foi facilitada pela utilização de scripts automatizados que permitiram uma reproduzibilidade eficiente e a geração de outputs consistentes para análises subsequentes e revisões de estudo.

Este foco em eventos durante períodos não comerciais não apenas enriquece a compreensão da sismicidade natural mas também aprimora as metodologias de monitoramento e análise sismológica em condições controladas de ruído.

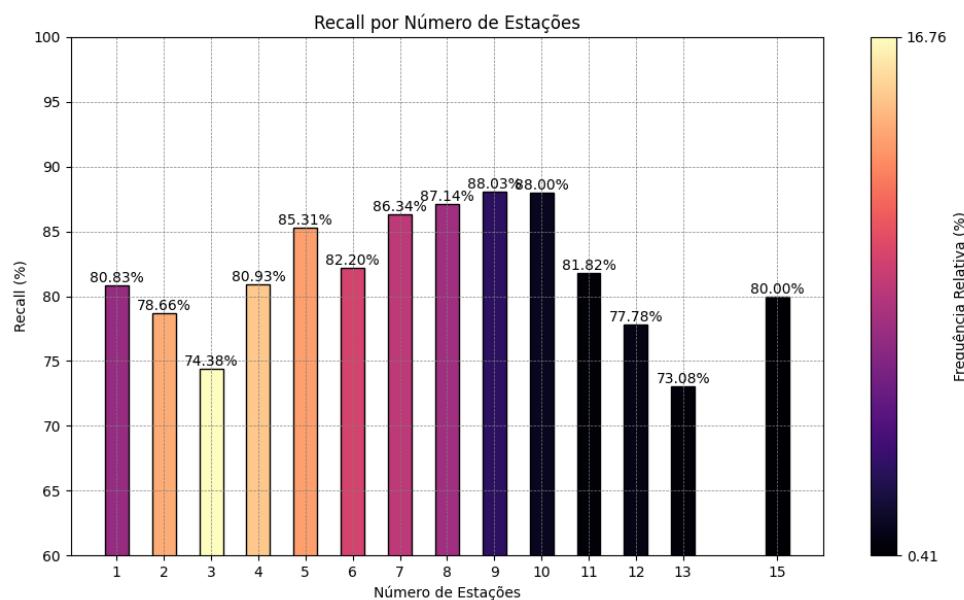


Figure 2 – Dist ev num stations recall

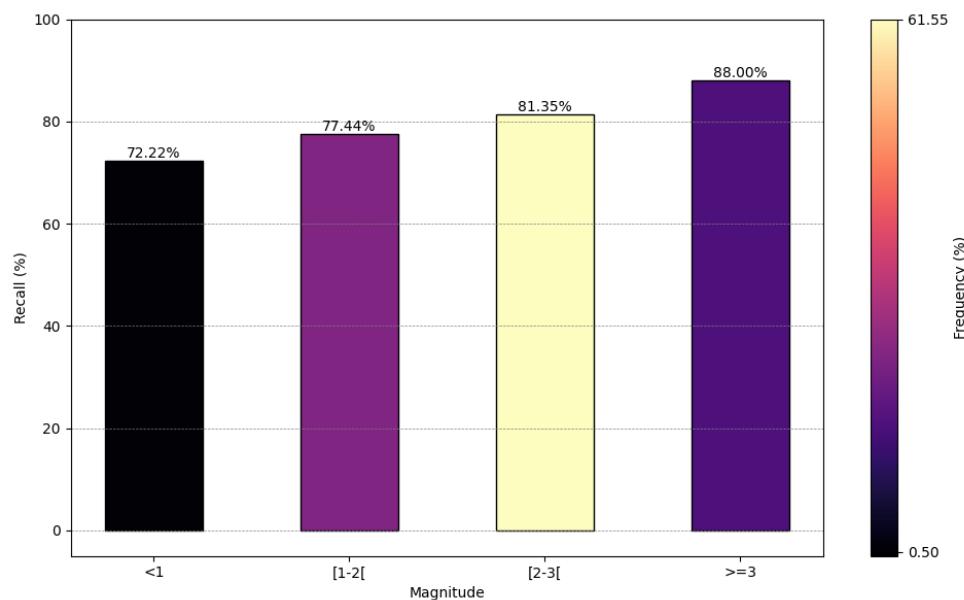


Figure 3 – Dist ev cat mag recall

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

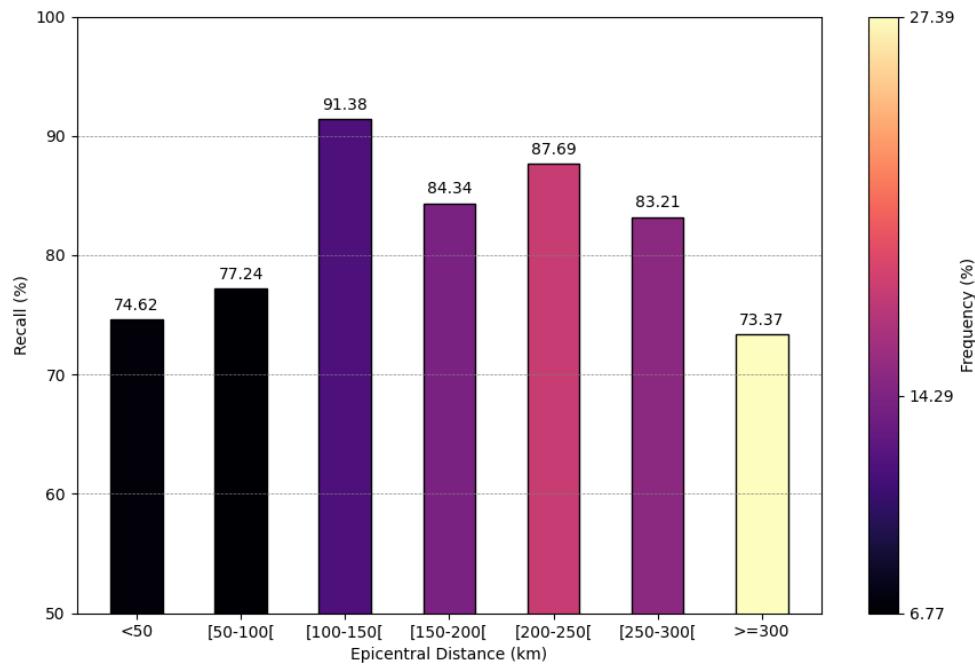


Figure 4 – Hist ev distance

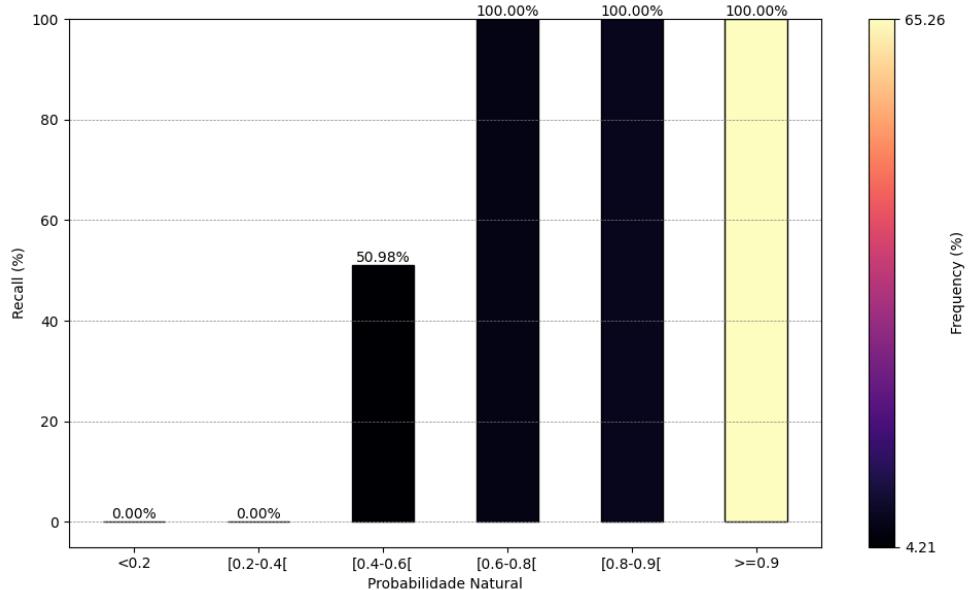


Figure 5 – Dist prob nat recall

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

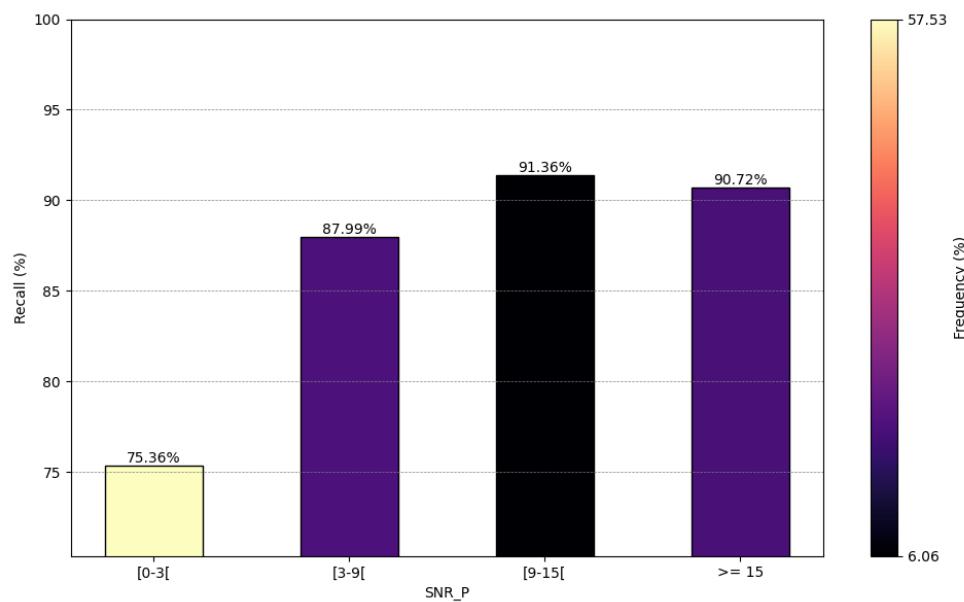


Figure 6 – Dist snrs recall

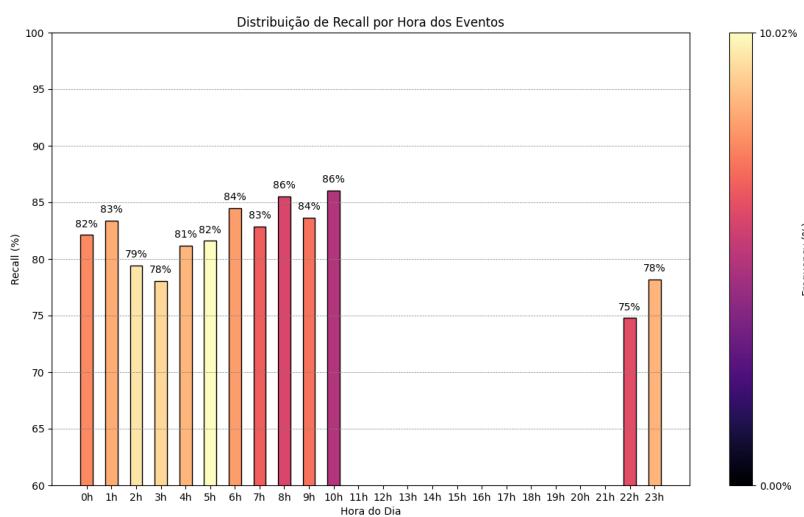


Figure 7 – Hist ev hour recall

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

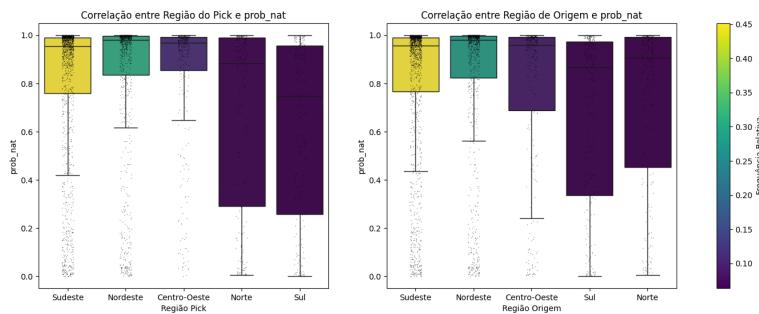


Figure 8 – Region corr

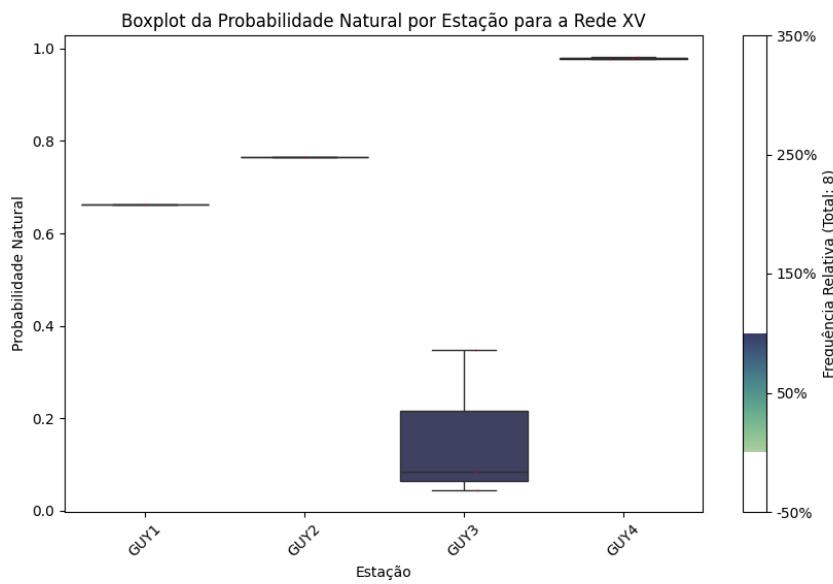


Figure 9 – Boxplot xv

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

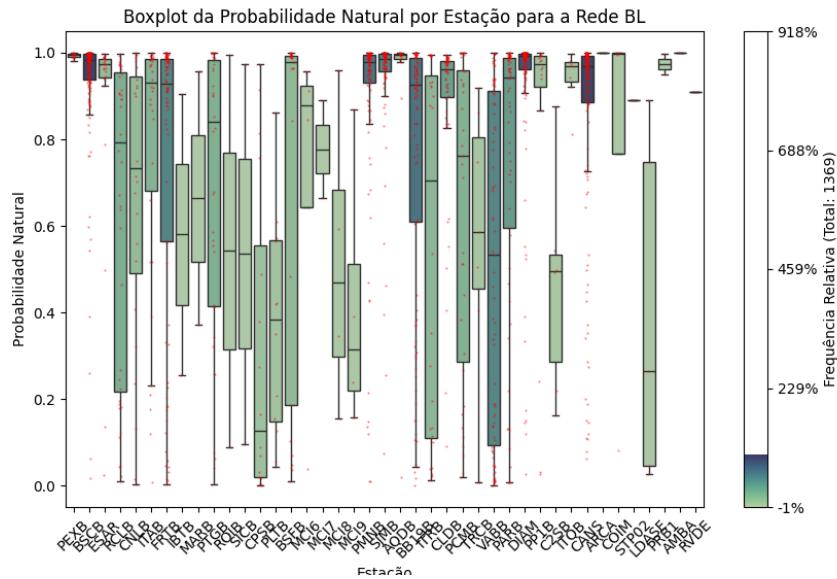


Figure 10 – Boxplot bl

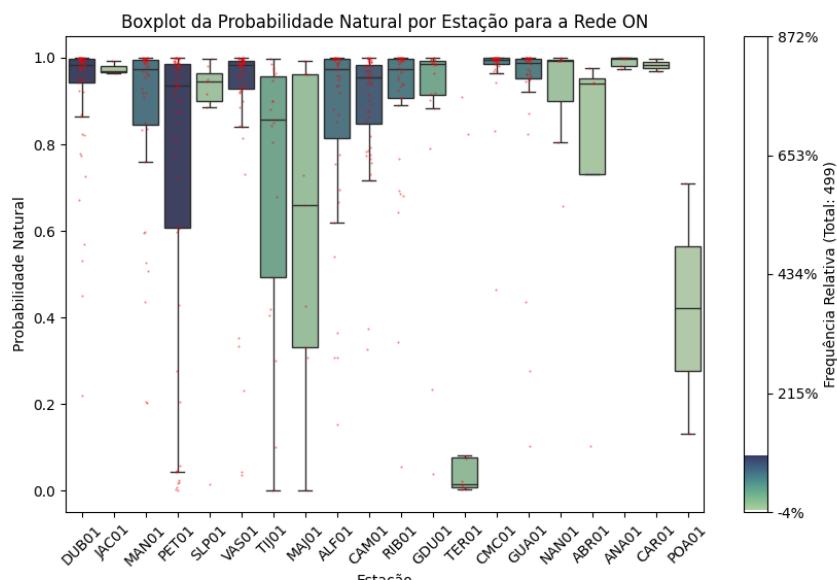


Figure 11 – Boxplot on

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

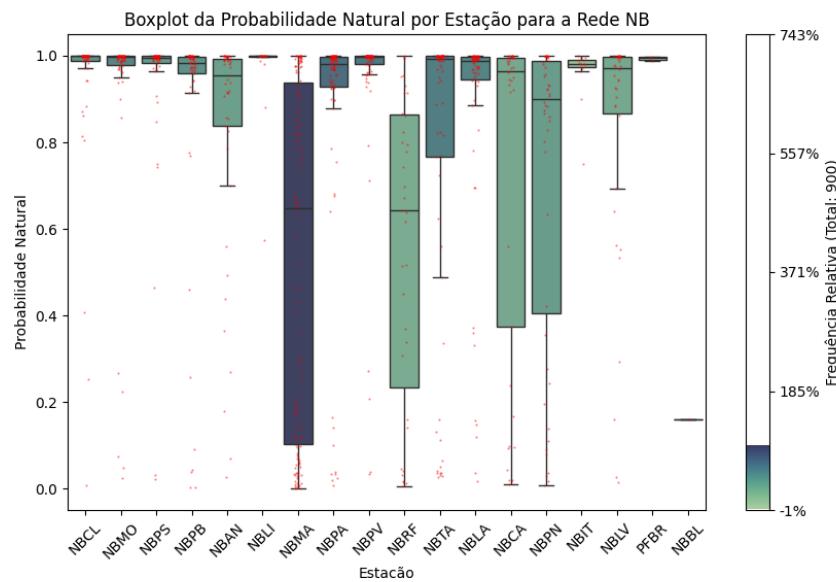


Figure 12 – Boxplot nb

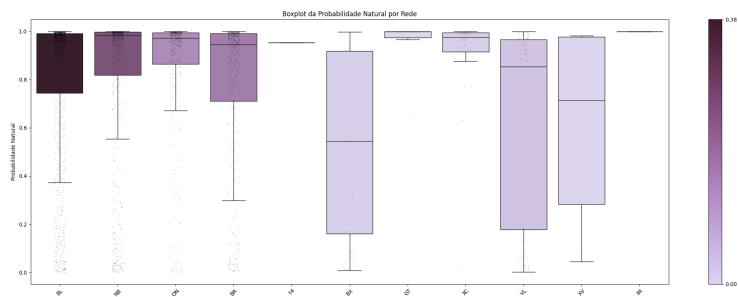


Figure 13 – Boxplot rede

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

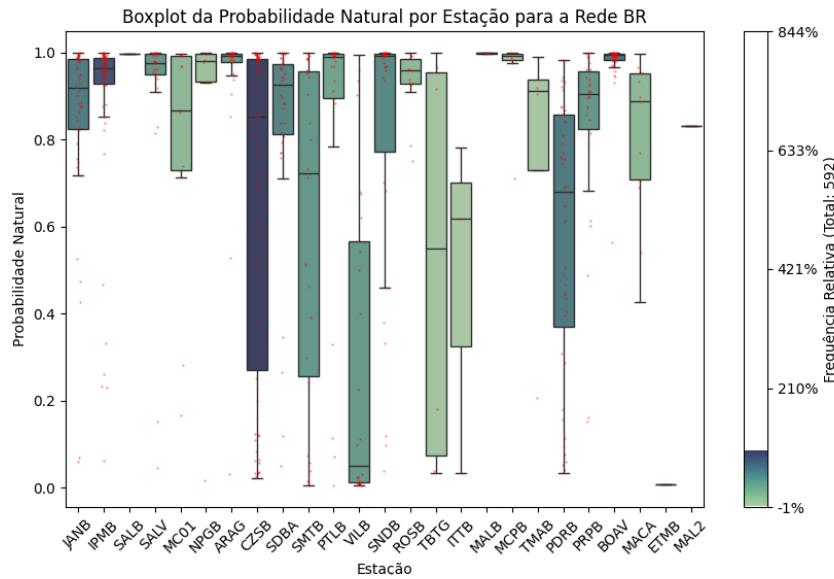


Figure 14 – Boxplot br

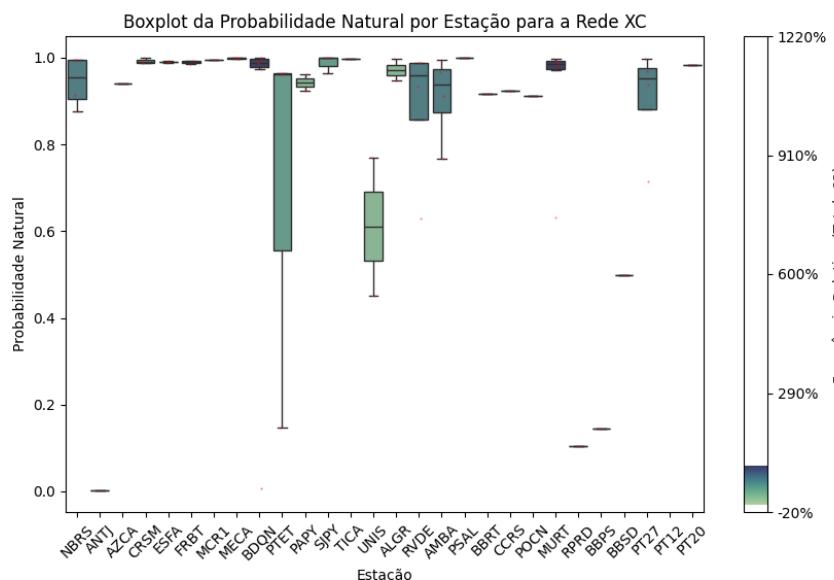


Figure 15 – Boxplot xc

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

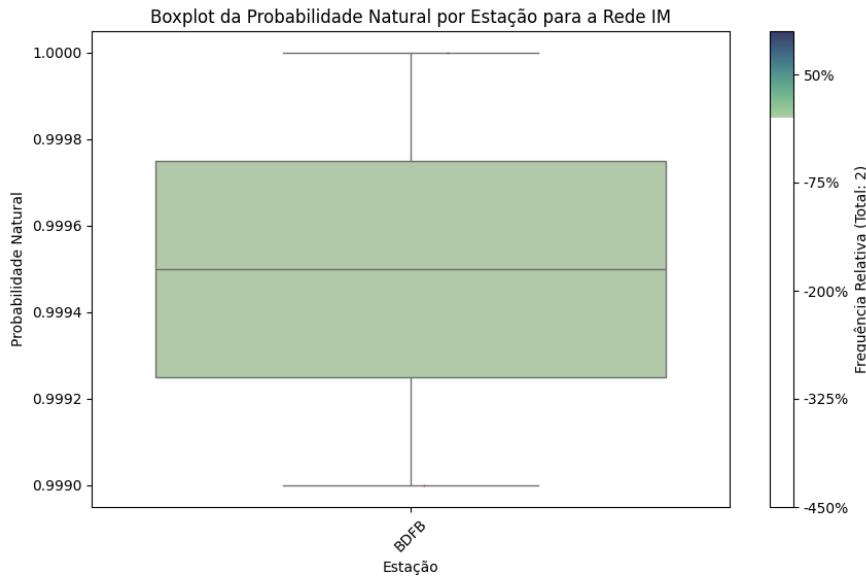


Figure 16 – Boxplot im

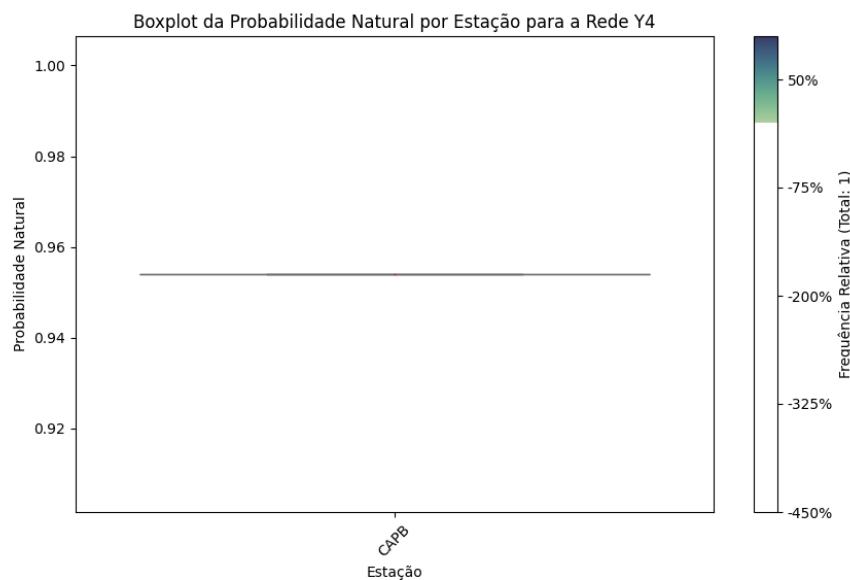


Figure 17 – Boxplot y4

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

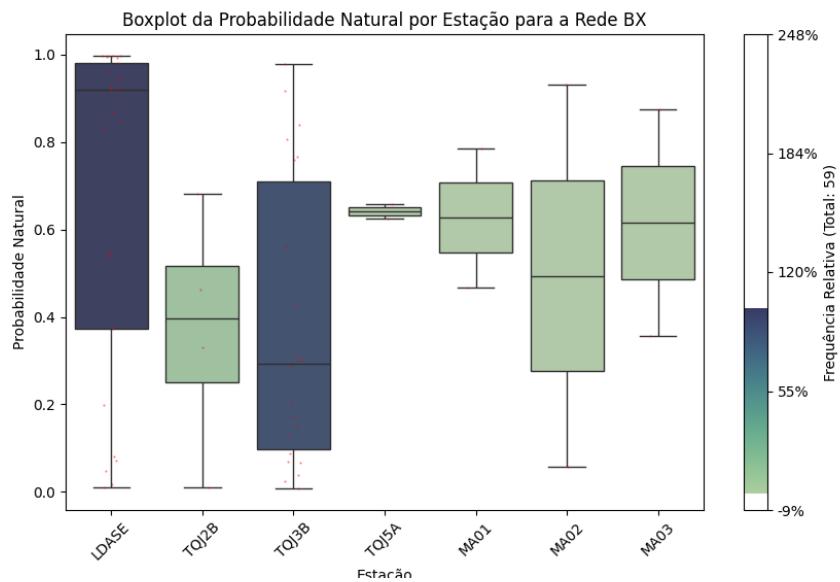


Figure 18 – Boxplot bx

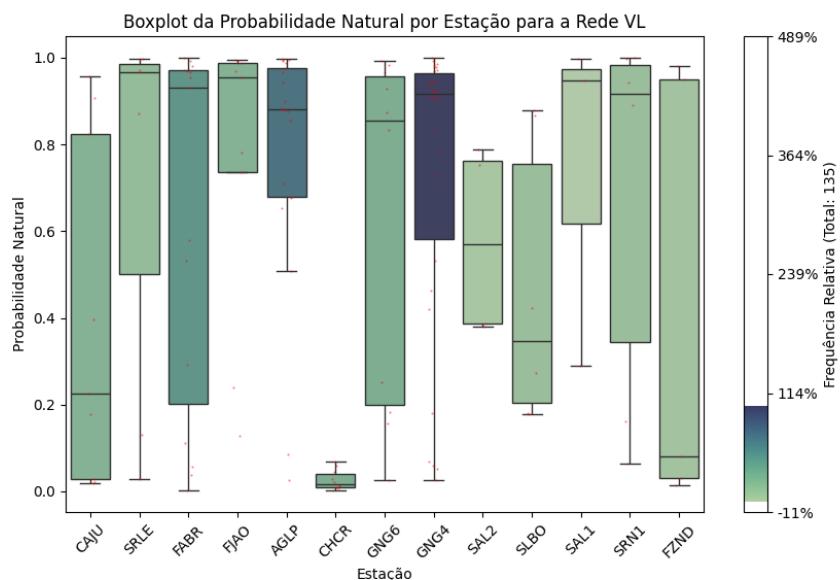


Figure 19 – Boxplot vl

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

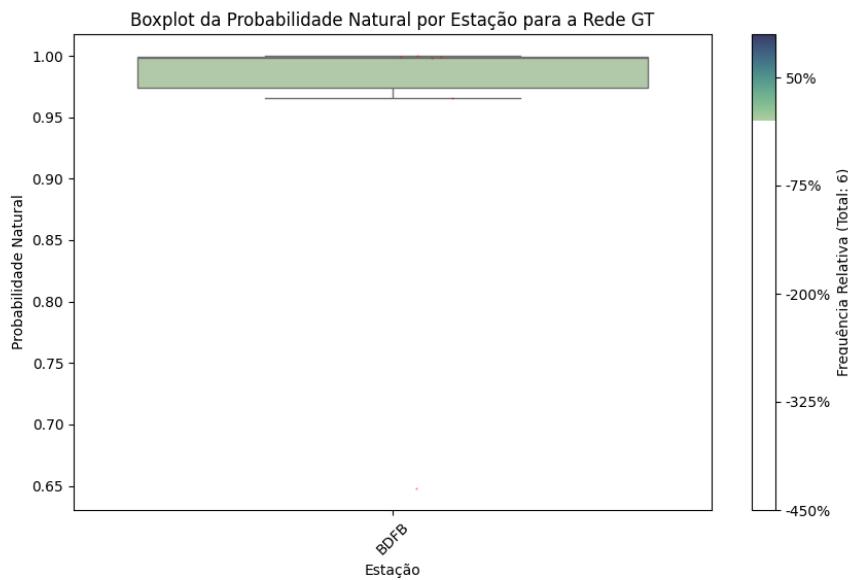


Figure 20 – Boxplot gt

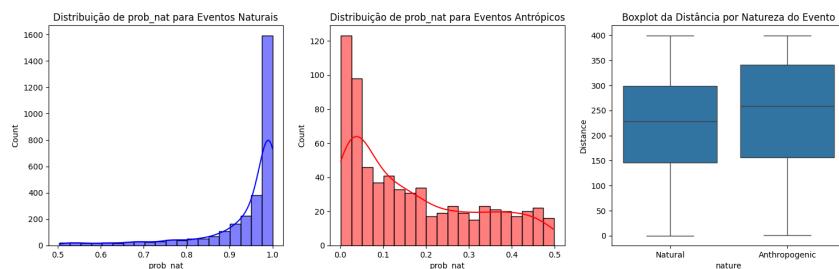


Figure 21 – Boxplot dist

2.5 Documentação e divulgação

Todos os códigos e algoritmos desenvolvidos estão devidamente documentados e disponíveis publicamente no repositório do projeto. A documentação inclui guias de instalação, configuração e utilização do sistema, permitindo que outros pesquisadores e técnicos possam utilizar e adaptar o classificador para suas necessidades específicas.

Os resultados obtidos e as metodologias empregadas foram submetidos para publicação em periódicos especializados e apresentados em conferências nacionais e internacionais, contribuindo para a disseminação do conhecimento e das inovações desenvolvidas no âmbito deste projeto.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Continuará sendo dada ênfase à formação de parcerias estratégicas e ao engajamento da comunidade científica, visando fortalecer a rede de pesquisa em sismologia no Brasil e promover o uso de tecnologias avançadas na análise de fenômenos sismológicos.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o monitoramento sismológico realizado no período de 01.12.2022 a 30.06.2023, tem-se que:

- Em síntese, o funcionamento da Estação SP7 pôde ser considerado satisfatório. Um detalhamento maior do funcionamento da estação para o período englobado por este relatório pode ser obtido analisando-se os boletins sísmicos no Anexo A, que contêm os gráficos de completeza diários para cada mês no período.
- Na área de influência do empreendimento foram registrados sessenta e sete (67) desmontes com magnitudes entre 0.4 e 3.0 (MLv), sendo quatorze (19) destes relacionados a detonações nas proximidades das pedreiras Azza e Daclande, e os restantes em outras áreas (Figura 2, Apêndice A).
- Foram detectados três pequenos sismos locais próximos à estação SP7, com magnitudes entre 0.2 e 0.9 MLv. O maior destes pequenos eventos foi registrado em 2023-05-26 18:31:02 (UTC).
- Foi detectado um sismo regional natural no território brasileiro, próximo à cidade de Iguape – SP, em 2023-06-16 11:22:00 (UTC). O sismo teve magnitude 4.0 mR .
- Durante o monitoramento sismológico local efetuado com a Estação SP7 não foram registrados sismos induzidos oriundos da operação do reservatório.
- A orientação e procedimentos apresentados no Relatório IPT no 115 463-205 – “Análise dos registros obtidos entre 1º de junho e 30 de novembro de 2009, na Estação Sismológica SP7, SC”, emitido em janeiro de 2010, e no Relatório IPT no 120 081-205 – “Análise dos registros obtidos entre 1º de junho e 30 de novembro de 2010 na Estação Sismológica SP7, Salto Pilão, SC e síntese das atividades e dos resultados do monitoramento sismológico”, emitido em janeiro de 2011, quanto à ocorrência de provável tremor de terra sentido pela população local ou ocorrências anômalas na área do empreendimento, devem ser mantidos.

O monitoramento instrumental possibilita determinar o epicentro, quantificar o tamanho (a magnitude), definir a origem do evento e, se for o caso, em função da análise do comportamento

espaço-temporal da atividade, tomar medidas mitigatórias.

Assim, pelos resultados do monitoramento sismológico realizado com a Estação SP7, em função das características operacionais do registrador-sismômetro e de sua localização, considera-se de muita valia manter esta estação em funcionamento para dar continuidade no conhecimento da sismicidade local e regional.

No monitoramento realizado não foi observada a ocorrência de evento sísmico associado à implementação do Empreendimento da UHE Salto Pilão. A continuidade do monitoramento sismológico na área do empreendimento permitirá acompanhar eventual ocorrência local.

Mantidas as atuais características da sismicidade, local e regional, para a continuidade do monitoramento sismológico devem ser mantidos os atuais procedimentos adotados para operação, coleta e análise dos dados, com periodicidade mensal. Além disso, continuam válidas as orientações a serem adotadas no caso de ocorrer evento local sentido pela população e de eventuais anomalias na obra tais como deslocamentos de rochas e estampidos associados.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.