

RELATÓRIO DE MÉTRICAS DE PREDIÇÃO

I

28 de maio de 2024

Análise de métricas obtidas para classificação de eventos da Rede
Sismológica Brasileira.

UNIDADE RESPONSÁVEL

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

PERÍODO DE ANÁLISE

Início: 2012

Fim: 2024

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

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.

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 reprodutibilidade 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.

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/1.54008_boxp

Figure 2 – 1.54008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall

Figure 3 – N sta recall 4.04008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall.

Figure 4 – N sta recall 2.04008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall

Figure 5 – N sta recall 04008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/7.04008_boxp

Figure 6 – 7.04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/04008_hist_e

Figure 7 – 04008 hist ev distance

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/4.04008_boxp

Figure 8 – 4.04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/0.754008_boxp

Figure 9 – 0.754008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/5.04008_boxp

Figure 10 – 5.04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/3.04008_boxp

Figure 11 – 3.04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall.

Figure 12 – N sta recall 0.54008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/04008_boxplo

Figure 13 – 04008 boxplot ev mag event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/dist_ev_cat_r

Figure 14 – Dist ev cat mag recall

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/9.04008_boxp

Figure 15 – 9.04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall.

Figure 16 – N sta recall 1.254008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall

Figure 17 – N sta recall 1.54008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/1.04008_boxp

Figure 18 – 1.04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/04008_dist_m

Figure 19 – 04008 dist mean snrs recall

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/1.254008_boxplot

Figure 20 – 1.254008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/2.04008_boxp

Figure 21 – 2.04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/04008_hist_e

Figure 22 – 04008 hist ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall.

Figure 23 – N sta recall 1.754008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/hist_ev_hour.

Figure 24 – Hist ev hour recall event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/8.04008_boxp

Figure 25 – 8.04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/04008_boxplo

Figure 26 – 04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall.

Figure 27 – N sta recall 3.04008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/1.754008_boxp

Figure 28 – 1.754008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall

Figure 29 – N sta recall 1.04008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall.

Figure 30 – N sta recall 0.254008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/dist_snrs_re

Figure 31 – Dist snrs recall

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/n_sta_recall.

Figure 32 – N sta recall 0.754008

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/region_corr.p

Figure 33 – Region corr

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/10.04008_boxp

Figure 34 – 10.04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/6.04008_boxp

Figure 35 – 6.04008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/0.254008_boxp

Figure 36 – 0.254008 boxplot ev distance event

/home/ggrrl/projetos/ClassificadorSismologico/arquivos/figuras/pos_process/0.54008_boxp

Figure 37 – 0.54008 boxplot ev distance event

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 adap-

tar 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.

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