

# Expansão Do Sistema Microsísmico Da Mina Pilar Correlacionado Ao Aprofundamento Das Atividades

João Alberto de Alencar Arrais Machado

Engenheiro Pleno, EroBrasil Caraíba, Jaguarari, Brasil, joao.machado@erobr.com

Daniel Santos de Santana

Coordenador de Geotecnia, EroBrasil Caraíba, Jaguarari, Brasil, daniel.santana@erobr.com

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo demonstrar o plano de expansão do sistema microsísmico da Mina Pilar, pertencente à EroBrasil, considerando a capacidade de cobertura dos eventos sísmicos em correlação com o aprofundamento da mina subterrânea ao longo dos anos. A avaliação da cobertura do sistema microsísmico é feita através do software IMS Vantage, utilizando a ferramenta *sensitivity analysis*. Esta análise permite avaliar a capacidade de captação de eventos de menores magnitudes em determinadas regiões da mina bem como o erro na localização dos eventos conforme distanciamento do raio de cobertura dos sensores. Também é possível avaliar cenários com inserção de novos sensores e substituição de sensores defeituosos. Este estudo comprovou a necessidade de aquisição de novas estações sísmicas em aderência ao plano de produção, de forma a garantir cobertura dos eventos sísmicos nos níveis mais profundos conforme aprofundamento da lavra, o que representará ganhos significativos na segurança das atividades, visto que o monitoramento destas ocorrências através de um sistema microsísmico moderno auxilia na identificação de instabilidades de escavações em regiões específicas. Com as informações obtidas pela microsísmica, são tomadas decisões de interdição de áreas instáveis, minimizando assim a exposição ao risco de colaboradores no subsolo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Evento Sísmico, Sistema Microsísmico, Monitoramento, Cobertura, Expansão

**ABSTRACT:** This work aims to present the expansion plan for the microseismic system at Pilar Mine (EroBrasil company), regarding the capacity to cover seismic events in correlation with the deepening of the underground mine over the years. The coverage assessment of the microseismic system is carried out using the IMS Vantage software through the sensitivity analysis tool. This analysis allows to evaluate the ability to capture smaller seismic events in certain areas of the mine as well as the error in locating events as it moves away from the sensors' coverage radius. It is also possible to evaluate scenarios with the insertion of new sensors and replacement of defective sensors. This study proved the need to acquire new seismic stations in compliance with the production plan, in order to guarantee coverage of seismic events at deeper levels as the mine goes deeper, which will represent a significant gain in the safety of activities, since monitoring these occurrences through a modern microseismic system helps in identifying excavation instabilities in specific area. Through the information obtained by the microseismic system, decisions can be made to reduce personal exposure in areas under instabilities risks.

**KEYWORDS:** Seismic Event, Microseismic System, Monitoring, Coverage, Expansion

## 1. INTRODUÇÃO

Em obras de engenharia de abertura de escavações, tais como túneis, galerias e poços, a alteração do campo de tensões virgens é esperada a partir da indução de novos esforços no maciço. A redistribuição de tensões funciona muitas vezes como o gatilho para que ocorram processos de fraturamento na rocha ou movimentações em planos de fraqueza pré-existentes. Associado a esses mecanismos de ruptura, pode ocorrer a geração de ondas mecânicas no interior da rocha, que se configuram como sismos, em escala de intensidade muito inferior quando comparados aqueles de origem tectônica.

Larsson (2004) cita que um evento sísmico é uma liberação súbita de energia potencial armazenada na rocha que é irradiada em forma de ondas sísmicas que se propagam no meio. Há dois principais tipos de eventos sísmicos: um deles está associado a causas naturais, ou seja, movimentos em grandes descontinidades geológicas; e o segundo está associado à mineração, sendo este comumente associado a rochas com elevada rigidez (módulo de elasticidade).

No ambiente de mineração, a captação das micro movimentações da rocha associadas às ocorrências de eventos sísmicos pode ser realizada por meio de um sistema de monitoramento, cujo arranjo e distribuição espacial precisam estar espaçados de tal maneira que seja capaz de garantir a melhor cobertura de dados, identificação do comportamento das ondas sísmicas e apropriação adequada da localização da fonte da energia sísmica. A qualidade dos dados obtidos por meio do sistema microssísmico implica diretamente no gerenciamento de risco geotécnico.

## 2. SISTEMA MICROSSÍSMICO

O sistema microssísmico é composto por sensores (geofones) que são instalados dentro do maciço rochoso em locais estrategicamente selecionados para comportar a captação da distribuição das ondas. Estes dispositivos captam a vibração da rocha através do seu mecanismo interno, que é composto de uma espiral que movimenta juntamente com a rocha e enviam os dados para as estações sísmicas (figura 1), que por sua vez sincronizam e enviam as informações para o servidor na superfície.

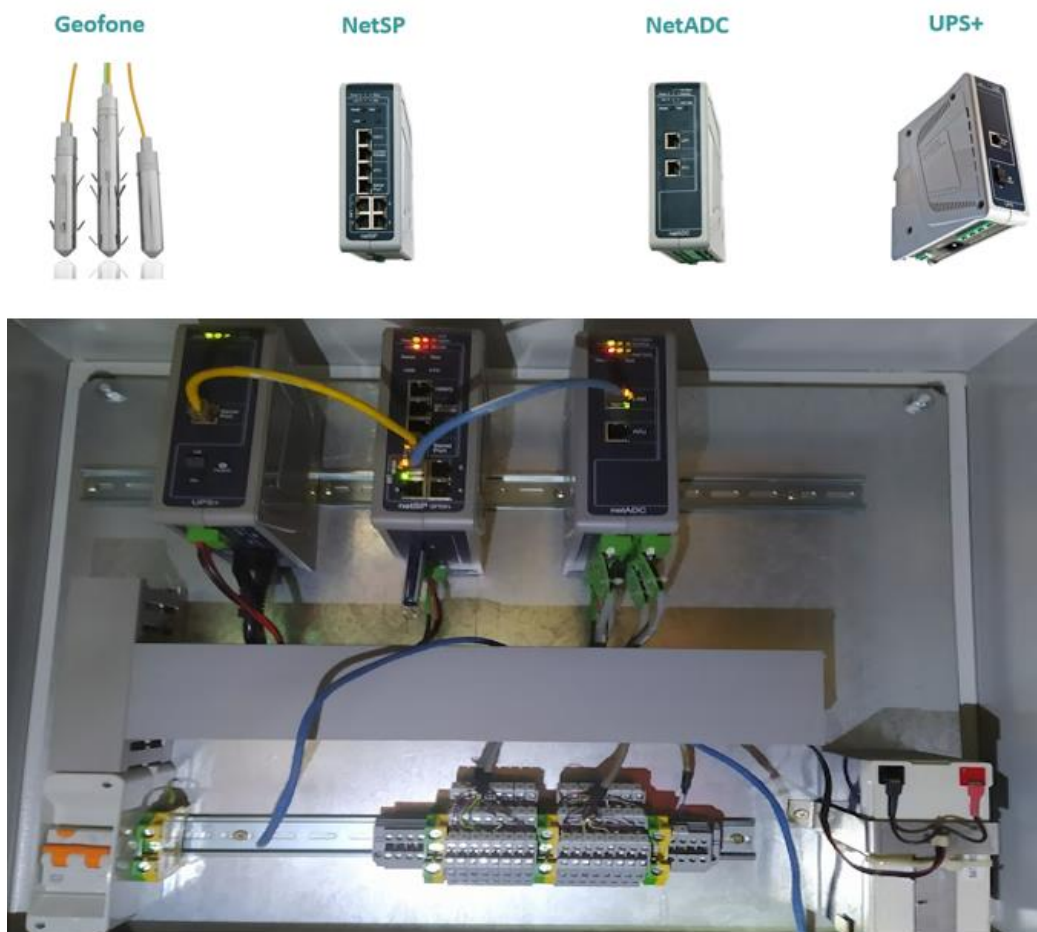


Figura 1. Estação sísmica e seus componentes internos

O sistema microssísmico da Mina Pilar atualmente está configurado com 7 estações sísmicas (figura 2), distribuídas nos níveis N+200, N+34, N-240, N-412, N-574, N-775 e N-965, com um total de 15 sensores funcionais.

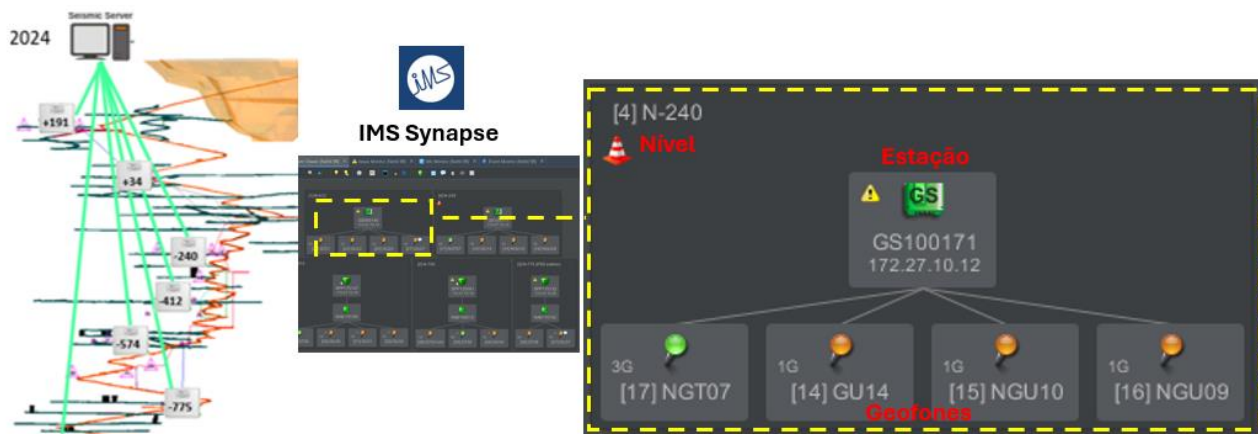


Figura 2. Configuração do sistema microsísmico em 2024

Através do software IMS Trace (figura 3 à esquerda), as informações enviadas pelos sensores são processadas em formato de sismogramas, nos quais é necessário identificar o tempo de chegada das ondas primárias (P) e secundárias (S), possibilitando estimar a localização do evento sísmico. A magnitude do evento é calculada com base na amplitude da onda (diretamente proporcional) e a frequência (inversamente proporcional), ou seja, para eventos de maiores magnitudes tem-se grandes amplitudes de onda e são emitidas energias de baixa frequência.

Existe um efeito de atenuação na rocha devido à distância do geofone para a fonte sísmica (a amplitude vai diminuindo com a distância e a frequência vai aumentando) e que também está relacionado à qualidade da rocha (quanto maior a qualidade menor a atenuação). Isto torna mais difícil a captação dos eventos de menores magnitudes conforme eles se distanciam dos sensores.

A diferença entre os tempos de chegada da onda primária (P) e da onda secundária (S) à uma estação sismográfica permite estimar a distância epicentral ( $d_e$ ) pela expressão abaixo, onde  $\Delta t_{p-s}$  é a diferença dos tempos de chegada da onda P e S, sendo  $V_p$  e  $V_s$  as respectivas velocidades. Conhecendo-se as distâncias dos sensores são registrados e processados os eventos quando captados por no mínimo quatro sensores (convecionado para maior assertividade) e então pode-se determinar a localização da fonte sísmica. O software calcula de forma automática.

$$d_e = \frac{\Delta t_{p-s}}{\frac{1}{V_p} - \frac{1}{V_s}} \quad (1)$$

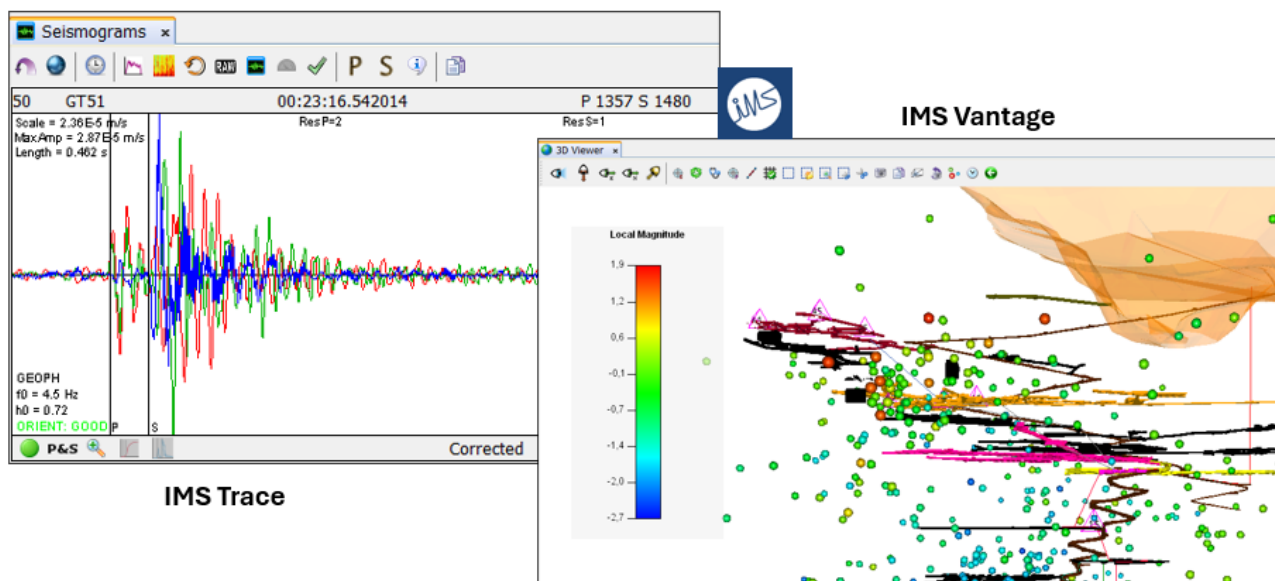


Figura 3. Softwares IMS Trace e IMS Vantage para processamento e visualização dos dados sísmicos

Após o processamento dos sismogramas e de posse das informações de localização e magnitude de cada evento sísmico processado, os dados são interpretados através do software IMS Vantage (figura 3 à direita). Com o IMS Vantage é possível visualizar as localizações dos eventos em 3D e correlacionar os dados das fontes sísmicas com as aberturas de escavações da mina subterrânea. Dessa forma, é possível identificar as concentrações de sismos em dada região específica da mina.

Quanto maior a quantidade de sensores e melhor distribuídos espacialmente, melhor será a captação dos eventos sísmicos e menor o erro associado à localização. A instalação de novos sensores e estações sísmicas tem como objetivo reduzir a incerteza da localização de eventos sísmicos, principalmente nas regiões mais distantes dos sensores atuais, nas quais o erro na localização pode atingir a ordem de grandeza de quilômetros. Além disso, irá aumentar a capacidade de captação dos sensores para eventos sísmicos de baixa magnitude nestas regiões, que também são importantes para uma interpretação mais abrangente dos dados que são utilizados para o processo de gerenciamento de risco geotécnico.

Sismólogos recomendam um valor aceitável de erro na localização dos eventos sísmicos de no máximo 50 metros. Através da ferramenta de análise de sensibilidade do IMS Vantage, torna-se possível identificar os locais onde o índice de incerteza é muito grande e simular como seria este erro na localização ao adicionar novos sensores nas proximidades daquela região (figura 4). Com a mesma ferramenta é possível visualizar qual é a magnitude mínima dos eventos que o sistema é capaz de captar em cada local.

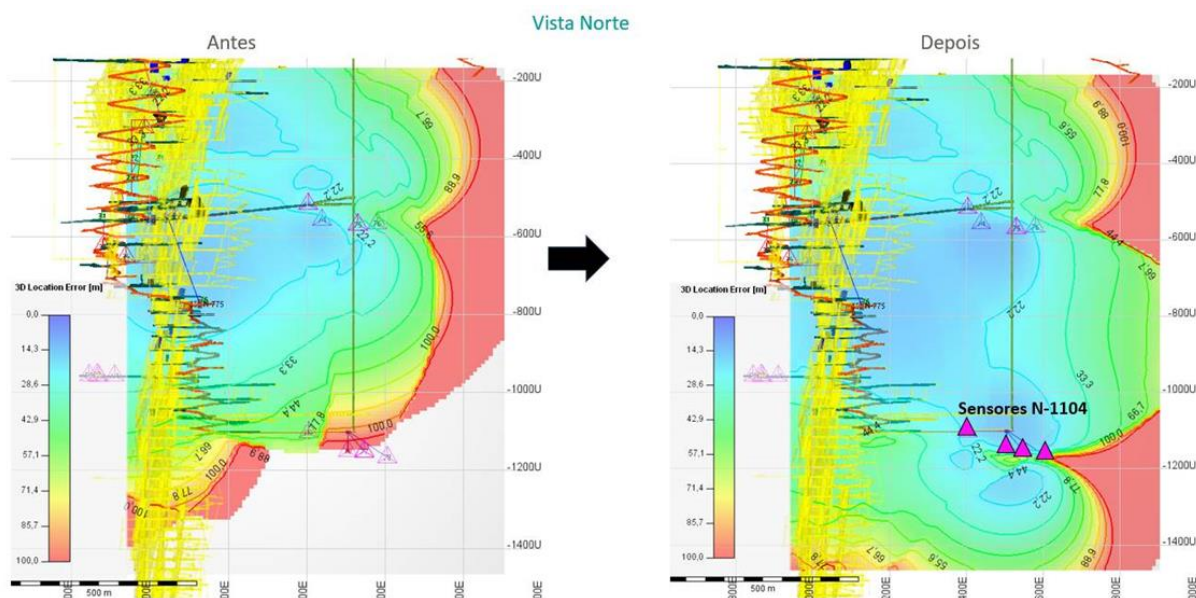


Figura 4. Análise de sensibilidade para avaliação de incerteza na localização dos eventos na região do shaft

### 3. PROJETOS DA MINA PILAR

A Mina Pilar é subdividida em projetos (figura 5) que apresentam diferentes litologias predominantes e propriedades geomecânicas do maciço, tais como qualidade do maciço, parâmetros das discontinuidades, condição das tensões, etc. Em relação à sismicidade, as maiores ocorrências de eventos sísmicos estão relacionadas às lavras em regiões mais profundas da mina, onde o campo de tensões tende a influenciar o comportamento de ruptura do maciço associado a rupturas frágeis.



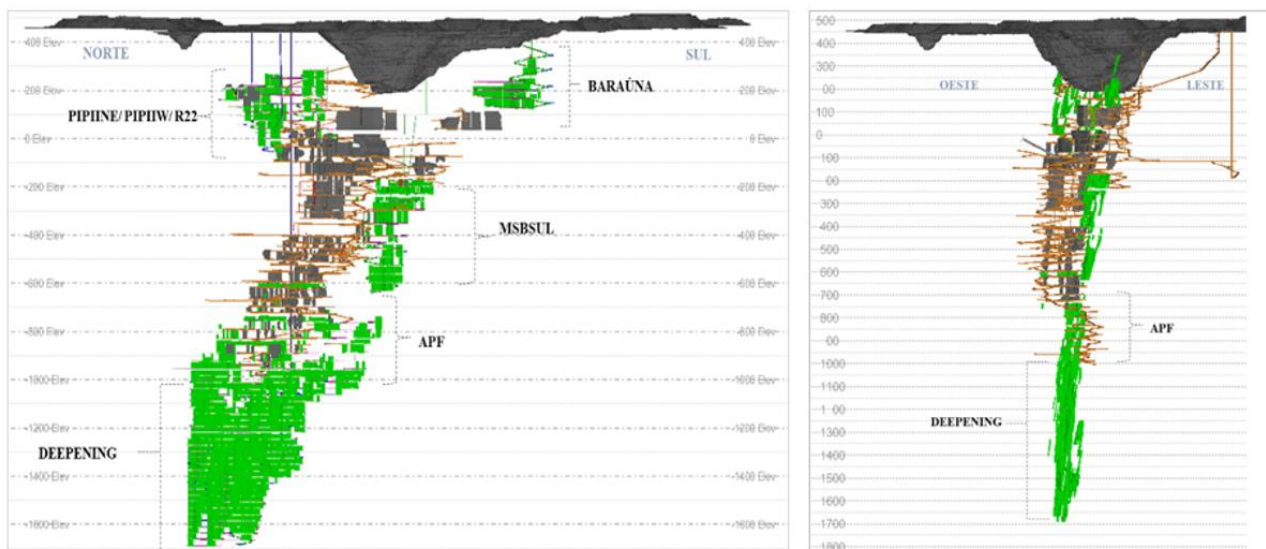


Figura 5. Projetos da Mina Pilar (em verde a reserva futura e em cinza as regiões já lavradas)

#### 4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O presente estudo foi iniciado em 2023 a fim de criar um plano de expansão do sistema microssísmico, através da instalação de novas estações sísmicas em locais estratégicos, correlacionado ao plano de produção a longo prazo na medida em que as atividades de lavra ocorram em níveis cada vez mais profundos da mina subterrânea. O trabalho tem um caráter de embasamento técnico para dimensionar o sistema microssísmico e validar o investimento estratégico da companhia para o monitoramento das escavações.

Para isso, foram realizadas simulações de análises de sensibilidade utilizando a configuração do sistema microssísmico atual e adicionando estações sísmicas em locais onde a cobertura não é suficiente para prover um monitoramento sísmico eficiente.

Vale ressaltar que a análise de sensibilidade leva em consideração o perfeito funcionamento dos sensores instalados. No entanto, foi observado que para alguns sensores que apresentavam desvios operacionais em virtude do tempo de exposição à áreas antigas da mina próximas a lavra (falhas na comunicação com a estação, cabos rompidos, componentes defeituosas, etc) não havia como atuar na correção por impossibilidade de acesso às galerias. Portanto, a análise do sistema atual foi realizada desconsiderando estes sensores defeituosos e criou-se um plano de ação para substituição dos sensores defeituosos.

Através da análise de sensibilidade foi possível observar as regiões onde a cobertura dos eventos sísmicos não é satisfatória (figura 6), o que pode ser confirmado através de relatos de campo sinalizando a percepção de estalos e vibrações que não eram captados pelo sistema.

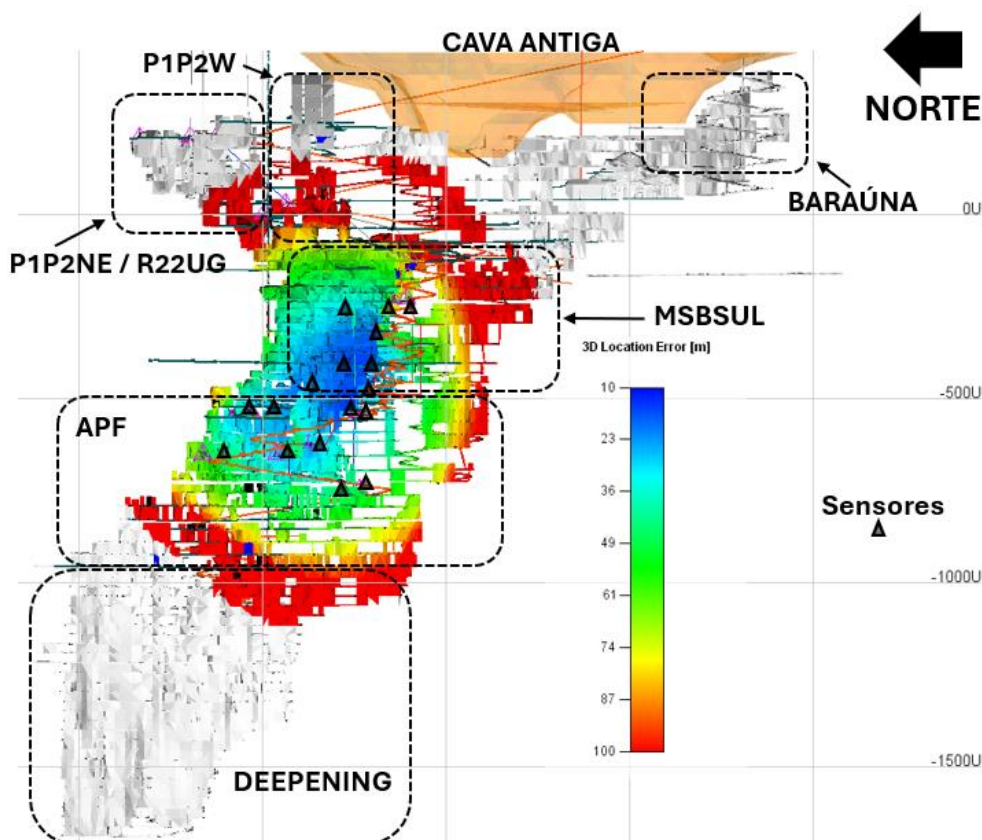


Figura 6. Análise de sensibilidade do sistema em 2023 e projetos da MSB

A análise de sensibilidade comprovou que os projetos MSBSUL e APF tem a melhor cobertura sísmica (Figura 6). Essas áreas são correspondentes àquelas onde o plano de produção dos últimos cinco anos tem apresentado maior representatividade, demonstrando que a escolha da distribuição das estações sísmicas para estes locais representou uma tomada de decisão assertiva para o monitoramento sísmico.

Os projetos P1P2NE/R22UG não possuem um histórico de eventos sísmicos, portanto é aceitável não estabelecer um plano de monitoramento robusto para a região. O projeto P1P2W possui um histórico de sismicidade comprovada, para isto foi planejada a instalação das estações sísmicas no N+200 e no N+34 a fim de prover um melhor monitoramento desses projetos mais superficiais.

Em 2023, iniciou-se a produção da área chamada Deepening, na qual estão sendo desenvolvidos os primeiros painéis de lavra deste projeto (N-991, N-1017, N-1043, N-1069). Para garantir uma melhoria na captação de dados da região, foi proposta a instalação de estações sísmicas no N-965.

Dessa forma, as áreas mais críticas previstas para lavra em 2024 e 2025 de acordo com o plano de produção atual estão com cobertura sísmica adequada. Com a ativação das estações sísmicas citadas (N+200, N+34 e N-965) houve um ganho considerável no monitoramento dos projetos superficiais P1P2W/P1P2NE/R22UG, de todo o projeto APF e de níveis além do desenvolvimento atual do projeto Deepening (figura 7).

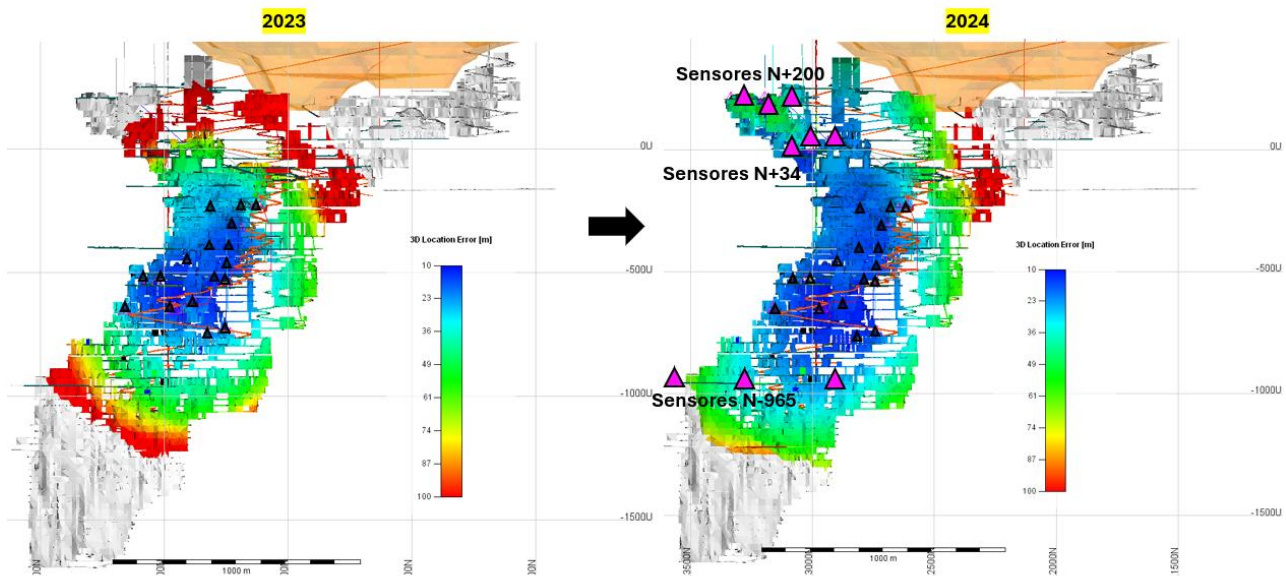


Figura 7. Comparação entre a cobertura do sistema microsísmico em 2023 e em 2024 com as novas estações

As próximas estações sísmicas a serem instaladas estão relacionadas à necessidade de aumento de cobertura de captação de dados sísmicos na região do novo shaft (projeto em desenvolvimento), que são as estações do N-500 e N-1104 previstas para o segundo semestre de 2024. A análise de sensibilidade possibilitou estabelecer um plano de expansão ano a ano, considerando os alvos de produção dos projetos, com perspectiva de implementação de mais quatro estações sísmicas distribuídas de maneira tal a garantir a cobertura geral da mina com base no comportamento de atividade sísmica de cada área.

## 5. CONCLUSÃO

O estudo de análise de sensibilidade demonstrou ser um método adequado para o dimensionamento do monitoramento sísmico, baseado nos alvos de produção e atividade sísmica específica de cada área. Por meio deste, é possível aprimorar a confiabilidade na administração de dados que serão utilizados para o gerenciamento de risco geotécnico e tomada de decisão em relação a segurança das atividades nas escavações subterrâneas.

A análise de sensibilidade permitiu concluir que o sistema microsísmico terá uma expansão prevista até o ano de 2031, contemplando uma cobertura satisfatória em todos os projetos de lavra com previsão até o final da vida útil da mina (figura 8). Estima-se que a configuração final do sistema terá cerca de 13 estações sísmicas e 40 sensores, um quantitativo maior que o dobro da configuração inicial em 2023.

Este plano de expansão pode sofrer alterações a depender de novas descobertas de alvos, modificações das premissas do plano de produção do longo prazo e alteração da sequência de lavra, o que infere que este método deve ser revisado a cada atualização do LOM e novas considerações de futuras aquisições de estações sísmicas devem ser realizadas.

O monitoramento sísmico corresponde a uma medida de controle utilizada em conjunto com outras técnicas e ferramentas para apoiar a gestão de risco geotécnico, sendo portanto um investimento de alta relevância para a manutenção da segurança da operação.

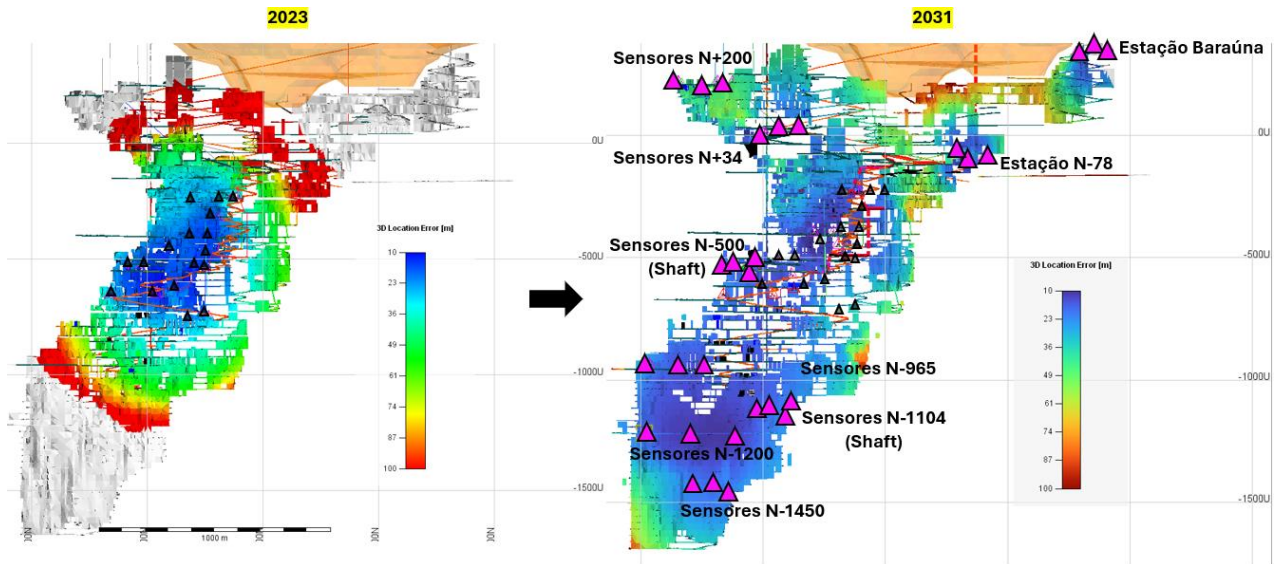


Figura 8. Comparação entre a cobertura do sistema microssísmico em 2023 e em 2021 após expansão total

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à companhia EroBrasil Caraíba, especialmente ao setor interno de Geotecnia, pelo apoio e incentivo ao desenvolvimento deste estudo. Agradeço ao corpot técnico da empresa IMS (Instituto de Sismologia de Mina) pela interação na validação das análises e transmissão de conhecimentos técnicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Calixto, F. (2019), Minutes of the Site Visit to Caraiba Mine, Tech. rep., Institute of Mine Seismology, 4 p.
- Larsson, K. (2004), Seismicity in Mines – A Review, Tech rep., Luleå University of Technology.
- Malovichko, D. (2019), Calibrating and testing of the forecast of seismic hazard for planned mining sequences, in Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk, pp. 245–258.
- Mendecki, A. (2013), Mine Seismology: Glossary of Selected Terms, in The 8th rockburst and seismicity in mines symposium. Russia.