

AUTOMATIZAÇÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS HÍDRICOS E GEOTÉCNICOS COM TRANSMISSÃO DE DADOS VIA SATÉLITE EM OPERAÇÕES MINERÁRIAS E FERROVIÁRIAS

Guilherme RIBAS ¹; Leandro FONSECA ²; Edson CORREA ³; Juliana TANABE ⁴,
Henrique PENIDO ⁵, Pedro ASSUNÇÃO ⁶

Resumo – O monitoramento de parâmetros ambientais, geotécnicos, hidrológicos e climatológicos é fundamental em empreendimentos industriais, minerários e de infraestrutura, especialmente em áreas com potencial de impacto socioambiental significativo. Além de atender às exigências legais, esse monitoramento contribui diretamente para a segurança operacional, a estabilidade de estruturas geotécnicas – como taludes, barragens e pilhas – e a mitigação de riscos em operações de transporte de cargas. Com o avanço das tecnologias de automação e comunicação remota, sistemas baseados em transmissão de dados via satélite vêm se consolidando como soluções eficazes para ambientes remotos ou de difícil acesso. Esses sistemas permitem o monitoramento contínuo de piezômetros, pluviômetros, medidores de vazão e sensores de nível d'água, com maior agilidade na aquisição e transmissão das informações. Entre os principais benefícios estão a redução de custos operacionais, o aumento da frequência de coleta, a confiabilidade dos dados e a diminuição da exposição de equipes em campo, fortalecendo a eficiência e a segurança dos processos de monitoramento ambiental. Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre a automatização de monitoramentos hídricos e ambientais com comunicação via satélite, aplicada em áreas de mineração e ao longo de ferrovias de escoamento de minério de ferro no Brasil, demonstrando as vantagens operacionais e os resultados obtidos com a adoção dessa tecnologia.

Abstract – The monitoring of environmental and hydrological parameters is essential in industrial, mining, and infrastructure projects, especially in areas with significant potential for socio-environmental impact. In addition to meeting regulatory requirements, such monitoring directly contributes to operational safety, the stability of geotechnical structures—such as slopes, dams, and waste piles—and the mitigation of risks in cargo transportation operations. With advancements in automation and remote communication technologies, satellite data transmission systems have emerged as effective solutions for monitoring in remote or hard-to-access areas. These systems enable continuous monitoring of piezometers, rain gauges, flow meters, and water level sensors, providing faster data acquisition and transmission. Key benefits include reduced operational costs, increased data collection frequency, improved data reliability, and reduced exposure of field teams, thereby enhancing the overall efficiency and safety of environmental monitoring processes. This study presents a case study on the automation of hydrological and environmental monitoring using satellite communication, applied in mining areas and along major iron ore transportation railways in Brazil, demonstrating the operational advantages and results achieved through the implementation of this technology.

Palavras-Chave – Monitoramento; Parâmetros Ambientais; Automação; Transmissão Remota; Segurança.

¹ Engenheiro Geólogo, MecRoc Engenharia: Belo Horizonte – MG, (31) 98881-3312, guilherme.ribas@mecroc.com.br

² Engenheiro Civil, MecRoc Engenharia: Belo Horizonte – MG, (31) 99555-7678, leandro.fonseca@mecroc.com.br

³ Engenheiro Geólogo Msc., Vale: Belo Horizonte – MG, (31) 98681-4943, edson.correa@vale.com

⁴ Engenheira Civil Msc., Vale: São Luis – MA, (98) 98420-4264, juliana.tanabe@vale.com

⁵ Engenheiro Civil PhD, Vale: Belo Horizonte – MG, (31) 99119-7032, henrique.penido@vale.com

⁶ Engenheiro Geólogo, Mestre em Ciências Naturais (UFOP), Doutorando em geologia (UFMG), Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID), Belo Horizonte, Brasil, phassuncao@ufmg.br.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de parâmetros ambientais, geotécnicos, hidrológicos e climatológicos é uma atividade essencial em empreendimentos de mineração, infraestrutura e outras operações com potencial de impacto socioambiental. Além de atender a exigências legais e condicionantes ambientais, o monitoramento permite uma atuação preventiva na gestão de riscos, contribuindo diretamente para a segurança de estruturas e a continuidade operacional. Entre os parâmetros monitorados, destacam-se a vazão em cursos d'água, os níveis de água subterrânea e superficial, a precipitação pluviométrica, além do controle da qualidade de água e efluentes (Bertachini e Almeida, 2003; Boscov, 2008; Souza, 2024; Queiroz, 2024).

Tradicionalmente, essas atividades são conduzidas por meio de coletas manuais em campo ou com o uso de sensores conectados a registradores de dados (*dataloggers*) e quando automatizada, a transmissão das informações feita por redes celulares, rádio ou internet (Silva, 2019; Campos et al. 2020). No entanto, em regiões remotas ou com infraestrutura limitada, essas tecnologias enfrentam desafios operacionais. Por outro lado, os sistemas de comunicação via satélite surgem como uma alternativa eficiente e robusta, especialmente para aplicações em ambientes complexos, como áreas mineradas e ferrovias de transporte de minério.

Entre as principais vantagens desses sistemas, destacam-se a simplicidade e agilidade na instalação, a capacidade de operação autônoma por longos períodos e a confiabilidade na transmissão dos dados, mesmo em locais com acesso restrito. A redução de deslocamentos de equipes técnicas a campo, aliada à maior frequência e qualidade das leituras, proporciona uma base de dados mais robusta para a análise dos fenômenos monitorados, aumentando a segurança e eficiência nas tomadas de decisão (Kiziroglou et al., 2016).

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicação da transmissão de dados via satélite na automatização de monitoramentos hídricos (como pluviometria, níveis de água subterrânea e vazão em drenagens superficiais), com foco em empreendimentos minerários e logísticos de grande escala no Brasil. A tecnologia adotada baseia-se em *dataloggers* compactos, que já incorporam alimentação por bateria ou painel solar e modem de comunicação satelital, reduzindo significativamente a necessidade de infraestrutura complementar — como torres, antenas, gateways e redes de dados terrestres.

O estudo se aplica especialmente a duas regiões mineradoras de grande relevância nacional: o Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, e a Serra dos Carajás, no estado do Pará. Ambas concentram grande parte da produção de minério de ferro do país, sendo responsáveis por volumes expressivos de exportação. No Quadrilátero Ferrífero, se encontram municípios historicamente ligados à mineração como Itabira, Mariana, Congonhas e Ouro Preto, historicamente, essa região foi um importante polo aurífero durante o ciclo do ouro no século XVIII e, atualmente, é reconhecida pela abundância de depósitos de minério de ferro de alto teor, além de outras riquezas minerais como ouro e manganês. A extração de minério de ferro é escoada pela Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), operada pela Vale, que escoo o minério até o Porto de Tubarão, no estado do Espírito Santo.

Já na Serra dos Carajás, localizada em região de floresta amazônica, constituindo atualmente a região de maior produção de minério de ferro do Brasil. A produção é transportada pela Estrada de Ferro Carajás (EFC), que conecta o interior do Pará ao porto de Ponta da Madeira, em São Luís no estado do Maranhão. Além do ferro, a região é rica em manganês, cobre, níquel, ouro, bauxita, zinco e outros minerais. A exploração mineral em Carajás é relativamente recente, iniciada na década de 1980, mas rapidamente se consolidou como um dos principais polos mineradores do país.

Ambas as ferrovias atravessam áreas com características ambientais complexas — como altos índices pluviométricos, taludes ferroviários, rebaixamento de nível d'água, reposição de águas de nascentes e drenagens naturais — o que justifica e demanda o uso de tecnologias confiáveis e autônomas de monitoramento.

2. LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Os locais onde foram aplicadas as tecnologias de automatização de monitoramentos, apresentados neste trabalho, compreendem áreas adjacentes a cavas de mineração, áreas de entorno de minas, e ferrovias responsáveis pelas principais vias de escoamento de minérios e outras commodities do Brasil.

Foram realizadas automatizações na Ferrovia de Carajás e na Ferrovia Vitória-Minas, ambas operadas pela Vale S/A, assim como em áreas adjacentes a cavas de mineração operadas pela Vale. As áreas estão localizadas nos estados do Pará, Maranhão, Minas Gerais e Espírito Santo. A figura 1 apresenta os locais de instalação dos instrumentos apresentados neste estudo de caso:

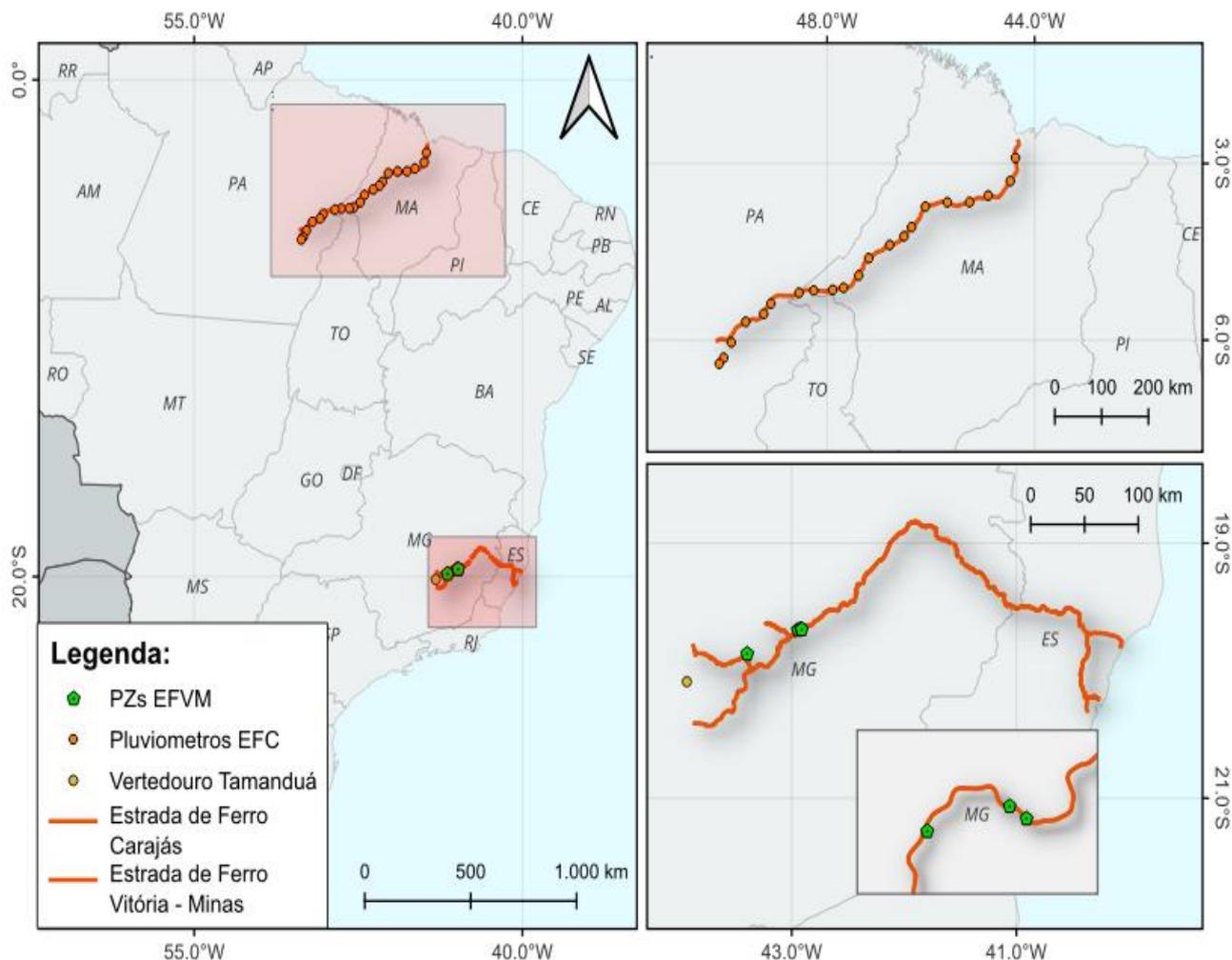


Figura 1. Localização das áreas de estudo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para as automatizações apresentadas neste trabalho, foram utilizados sensores com funcionamento consagrado no monitoramento de parâmetros ambientais e geotécnicos, como piezômetros, pluviômetros e sensores ventilados de nível d'água. A utilização de cada sensor foi adequada ao parâmetro a ser monitorado, como a vazão em fluxos superficiais, precipitação, poropressões e nível d'água subterrânea e superficial.

Para a automação foram utilizados *Dataloggers* com comunicação via satélite da fabricante australiana EWS. Diferentes modelos foram utilizados de acordo com cada situação de monitoramento, além de acessórios para proteção e fixação dos *dataloggers*. Todas as

instalações, automações e integrações foram realizadas pela equipe da MecRoc Engenharia, em campanhas nos anos de 2023 e 2024.

Foram utilizados tanto sensores de corda vibrante, como sensores digitais nas instalações. Para cada tipo de sensor foi utilizado um modelo de datalogger EWS compatível com saída digital ou corda vibrante. Os dataloggers foram utilizados nas versões de 2 canais, onde até 2 sensores podem ser conectados simultaneamente, e dataloggers de 4 canais, onde até 4 sensores podem ser conectados. O Quadro 1 apresenta os sensores e dataloggers satelitais utilizados nas instalações:

Quadro 1 - Sensores e dataloggers utilizados nas instalações

Sensor	Descrição
	Sensor Piezométrico de Corda Vibrante
	Tipping Bucket Rain Gauge (Pluviômetro de báscula)
	Sensor ventilado de pressão de água
Sensor	Descrição
	Datalogger 2 Canais - Corda vibrante - Digital
	Datalogger 4 canais - Corda vibrante - Digital
	WellCap

Os *dataloggers* satelitais podem ser utilizados com bateria interna de longa duração, podendo funcionar por até 2 anos a depender da taxa de coleta de dados e quantidade de transmissões via satélite realizadas por dia. Também foram utilizadas versões com placa solar acoplada, onde há constante carregamento das baterias internas. Os *dataloggers* de 2 canais, são comumente utilizados com o acessório *WellCap*, que funciona como uma proteção ao equipamento, e é projetado para permitir o acesso ao tubo dos instrumentos sem a necessidade de remoção completa da estrutura.

A metodologia de instalação de automatização com os *dataloggers*, baseia na simples instalação dos sensores de maneira convencional, e conexão direta com eles, que são então fixados em estruturas próximas aos sensores, com boa visada para o céu, garantindo uma boa conexão com a rede de satélites. Em campo é possível que seja configurada a taxa de coleta e

transmissão de dados, e acionar o equipamento que já se encontra em funcionamento a partir deste momento.

Os dados são transmitidos para servidor próprio da EWS, e disponibilizados em plataforma online chamada Orion. Estes dados também podem ser integrados a outros *softwares* de monitoramento, via API desenvolvida pela fabricante, tornando o acesso aos dados mais ágil e integrado a outros sistemas de monitoramento. A imagem abaixo ilustra as etapas desde a instalação dos instrumentos, até a disponibilização dos dados para o cliente final:

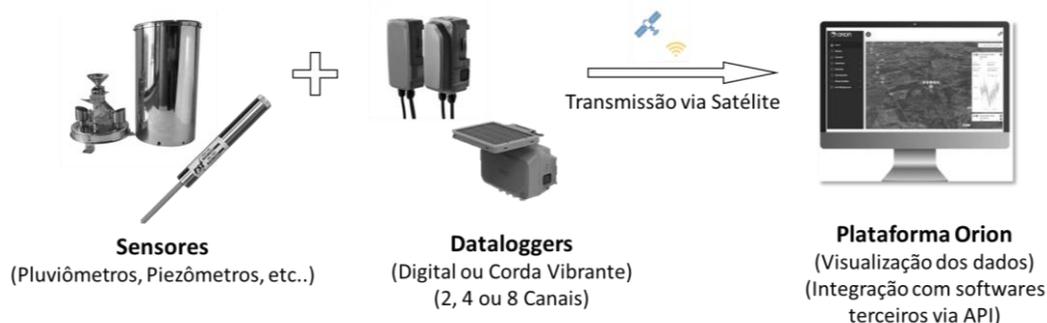


Figura 2. Esquema de automatização dos monitoramentos com transmissão via satélite.

Monitoramento de Pluviometria

Para o monitoramento pluviométrico, foram utilizados pluviômetros de balsa (*tipping bucket rain gauges*), com saída de sinal digital (*pulse*). Este instrumento é composto por um balde de captação de chuva, que direciona a água para um funil que leva a uma balsa de capacidade de armazenamento conhecida. À medida que a água é acumulada e atinge seu limite, a balsa despeja a água armazenada e registra o acumulado dentro do determinado período.

O pluviômetro é então conectado ao datalogger EWS, que registra os dados armazenados, e faz a transmissão via satélite destes valores. O Sistema é instalado com suportes metálicos e painel solar. Os dados podem ser visualizados na plataforma Orion, ou direcionados a outros servidores via API. A figura abaixo apresenta a instalação do sistema de monitoramento de pluviometria com comunicação satelital:



Figura 3. Instalação do sistema de monitoramento via satélite de pluviometria.

Monitoramento de Piezômetros

Para o monitoramento de poropressões em piezômetros, foram utilizados sensores piezométricos de corda vibrante, fornecidos pela Vale. Não fez parte do escopo deste estudo a seleção dos sensores, e a perfuração e construção dos poços onde foram instalados os sensores. Os sensores foram instalados nos poços nas profundidades definidas pela projetista, e para a automatização foram utilizados dataloggers EWS para o registro e transmissão dos dados via satélite.

Foram utilizados tantos *dataloggers* de 2 canais, quanto dataloggers de 4 canais ligados aos sensores, de acordo com a quantidade de sensores instalados nos locais de monitoramento. Também foram utilizados os *WellCaps* como proteções para os dataloggers, além de funcionar

como alimentação de energia externa, em caso de painel solar integrado. Os dados podem ser visualizados na plataforma Orion, ou direcionados a outros servidores via API. A figura abaixo apresenta a instalação do sistema de monitoramento de piezômetros com comunicação satelital:



Figura 4. Instalação do sistema de monitoramento via satélite de Piezômetros e INAs.

Monitoramento de Vazão em Vertedouros

O monitoramento de vazão em vertedouros é convencionalmente realizado com a construção de um barramento que canaliza o fluxo para um canal de geometria conhecida, onde o cálculo da vazão é feito com a leitura de nível de água à montante do vertedouro, que pode ser de diferentes geometrias (trapezoidal, triangular, etc.), de acordo com o fluxo de água do local. Esta leitura é geralmente feita de maneira visual, em régua instaladas na água a montante do vertedouro.

A automatização deste monitoramento consiste na instalação de um sensor ventilado de nível d'água, juntamente a um *datalogger* satelital que armazena e transmite os dados nas taxas de coleta a transmissão previamente definidas. Os dados de nível d'água são transmitidos à plataforma Orion, onde são convertidos em dados de vazão, de acordo com equações definidas para a geometria do vertedouro.

A instalação do sensor é feita próxima ao vertedouro, com utilização de tubos e mangueiras, e a fixação do *datalogger* é semelhante à instalação em piezômetros, com utilização de *WellCaps* para proteção, por vezes com alimentação externa de energia por painel solar acoplado. A figura abaixo apresenta a instalação deste sistema de monitoramento em vertedouros:



Figura 5. Instalação do sistema de monitoramento via satélite de vazão em vertedouros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As instalações dos sistemas de monitoramento apresentados aconteceram no período entre 14/12/2023 e 12/12/2024, em trechos ferroviários e entornos de áreas de mineração, operadas pela Vale. Um total de 37 monitoramentos foram automatizados com o sistema de transmissão via satélite implementado. Para cada monitoramento, foi utilizada uma taxa de coleta e transmissão de dados adequada ao cenário. A Tabela 1 apresenta os quantitativos de instalações e configurações adotadas nos instrumentos automatizados:

Tabela 1. Quantidades de instrumentos automatizados, e taxas de coleta e transmissão configuradas para cada monitoramento.

Monitoramento	Quantidade	Taxa de Coleta (leituras/dia)	Taxa de transmissão (transm./dia)
Piezômetros	13	1	1
INA	2	1	1
Pluviômetros	21	24	8
Vazão em Vertedouros	1	24	6

Uma vez instalados, os instrumentos fizeram as transmissões de dados de acordo com as taxas programadas, e puderam ser acessados pela Vale no centro de monitoramento geotécnico, através da plataforma Orion, e software privado de monitoramento integrado a outros instrumentos. Os dados são apresentados na plataforma em gráficos, em períodos selecionados pelo usuário, sendo possível a visualização dos dados já convertidos quando necessário. A figura abaixo apresenta os gráficos dos dados de instrumentos automatizados, visualizados pela plataforma Orion:

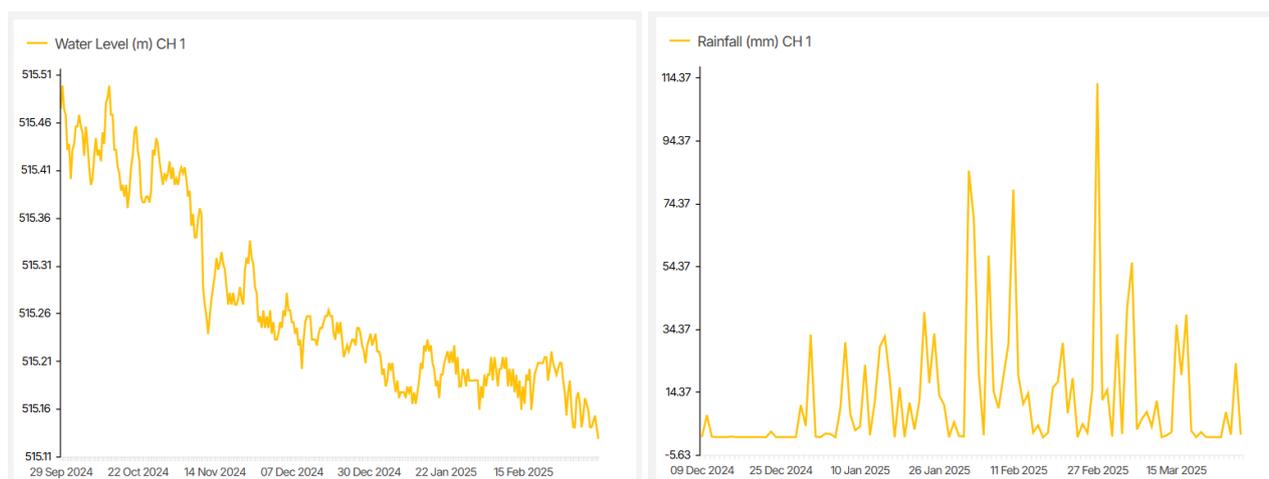


Figura 6. Gráficos de dados de monitoramentos de piezômetros, vazão em vertedouros e pluviometria.

Um total de 37 monitoramentos foram automatizados ao longo deste estudo de caso, os locais de monitoramento estão descritos na tabela 2 abaixo:

Tabela 1. Instrumentos automatizados com comunicação satelital.

Monitoramento	Quantidade	Site	Data de instalação
Piezômetros	5	Mina de Brucutu	05/11/2024
INA	1	Km 488	30/04/2024
Piezômetros	3		12/12/2024
INA	1	Km 489	28/11/2024
Piezômetros	3		29/11/2024
Piezômetros	2	Km 493	14/12/2023 09/07/2024
Pluviômetros	21	Estrada de Ferro de Carajás	10/12/2024
Vazão em Vertedouro	1	Mina Tamanduá	06/08/2024

Os instrumentos tiveram boa performance no período de monitoramento, reduzindo significativamente a periodicidade de deslocamentos de equipes aos locais de monitoramento, para realização de leituras manuais dos parâmetros monitorados. Com a automatização da coleta e transmissão de dados, também foi possível obter uma série de dados mais robusta, com uma taxa de coleta muito superior àquela realizada de maneira manual, que convencionalmente é feita semanalmente ou quinzenalmente pelas equipes de campo. Isto permite que as equipes técnicas façam análises mais precisas das variações de fluxo, nível d'água e pluviometria.

Em determinados instrumentos, foram configurados alarmes pela plataforma Orion, onde são disparadas mensagens via e-mail e SMS à lista de contatos cadastrados, caso algum valor de leitura esteja superior aos valores de alerta definidos pela equipe técnica. Um exemplo é o caso de monitoramentos de vazão onde condicionantes ambientais indicam um fluxo mínimo que deve ser garantido em determinada drenagem, caso o valor atinja níveis inferiores às vazões definidas, alarmes são entregues às equipes responsáveis.

Para as instalações foram utilizadas infraestruturas simples, como suportes metálicos, e tubos de PVC, não sendo necessária a construção de infraestrutura complexa como em sistemas de monitoramentos convencionais (torres de comunicação, estrutura de fibra ótica, antenas de celular). Os dataloggers tem instalação com baixa complexidade, sendo possível a instalação e automatização de até 3 instrumentos em mesmo dia em determinados casos.

Por se tratar de equipamentos eletrônicos, muitas vezes instalados em locais remotos e ao ar livre, por vezes foram necessárias manutenções pontuais em equipamentos com perdas de comunicação, ou demais problemas de funcionamento. Ainda que estas atividades se façam necessárias em alguns casos, o equipamentos funcionaram por períodos prolongados sem a necessidade de visitas de equipes ao local, o que por sua vez traz ganho significativo na eficiência, qualidade e segurança no monitoramento em locais remotos.

5. CONCLUSÕES

Em um cenário atual, como o da mineração, onde tem-se uma busca constante por maior eficiência e segurança nas operações, a automatização de sistemas de monitoramento tem papel fundamental na busca por estas melhorias. A utilização de sistemas de comunicação satelital para tais automatizações, traz uma solução eficaz para o monitoramento em áreas remotas. O sistema utilizado neste trabalho, mostrou que pode ser aplicado com operações de instalações de baixa complexidade, e maior agilidade em relação a sistemas convencionais de comunicação, que requerem maior infraestrutura para envio dos dados remotamente.

O sistema permitiu à equipe técnica da Vale o acesso remoto aos dados de monitoramento, sem a necessidade de envio de colaboradores para coleta manual de dados. O monitoramento permitiu uma coleta de dados robusta, com maior quantidade de dados coletados, trazendo maior confiabilidade aos dados dos monitoramentos.

Futuras instalações e automatizações com o sistema de comunicação via satélite, vão trazer maior eficiência e segurança também para monitoramentos de nível d'água superficial, qualidade de água, meteorologia, dentre outros parâmetros já monitorados por empreendimentos de mineração.

REFERÊNCIAS

- BERTACHINI, A. C., ALMEIDA, D. C. de. O rebaixamento do nível d'água em mineração e obras civis. *Águas Subterrâneas*. 2003. São Paulo. Disponível: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23932> Acessado: 14/04/2025.
- BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. *Geotecnia ambiental*. Oficina de textos, 2008.
- CAMPOS, Renan Landim et al. *Estado da Arte em Monitoramento Geotécnico de Deslocamento para Barragens e Estruturas de Mineração*.
- KIZIROGLOU, Michail E. et al. Opportunities for sensing systems in mining. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 13, n. 1, p. 278-286, 2016.
- QUEIROZ, Vinícius Oliveira. *Monitoramento geotécnico de estruturas de mineração*. 2024. 86 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.
- SILVA, Márcio Flávio Sousa. *Sistema de monitoramento online de barragens de mineração*. 2019. 106 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.
- SOUZA, Bruna Queiroz de. *Monitoramento hidrológico de nascentes em área de mineração de bauxita na situação de pré-lavra na Zona da Mata mineira*. 2024.