

RELATÓRIO TÉCNICO ITV DS

SOLUÇÕES EM PREVISÕES DE CURTO E CURTÍSSIMO PRAZO EM METEOROLOGIA PARA A CADEIA MINERAL DA VALE

Projeto Tempo & Clima

Indicador: 2020 - 1176 - Análise do impacto e proposta de melhores ferramentas de monitoramento e previsão de condições meteorológicas nas operações do Corredor Norte.

Evidência 2: Soluções em previsões de curto e curtíssimo prazo em meteorologia para a cadeia mineral da Vale.

Douglas Batista da Silva Ferreira

Belém / PA

Dezembro / 2020

Título: Soluções em previsões de curto e curtíssimo prazo em meteorologia para a cadeia mineral da Vale.	
PROD. TEC. ITV DS - N052/2020	Revisão 00
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (X) Pública	

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F383 Ferreira, Douglas Batista da Silva.
Soluções em previsões de curto e curtíssimo prazo em meteorologia para a cadeia mineral da Vale. / Douglas Batista da Silva Ferreira - Belém: ITV, 2020.
32 p.: il.
Relatório Técnico (Instituto Tecnológico Vale) – 2020
PROD.TEC.ITV.DS - N052/2020
DOI 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2020.52.Ferreira
1. Meteorologia - Monitoramento atmosférico. 2. Meteorologia - Previsão do tempo. 3. Cadeia mineral - Vale. I. Título
CDD 23. ed. 551.6098115

Bibliotecária responsável: Nisa Gonçalves / CRB 2 – 525

RESUMO EXECUTIVO

Diante da necessidade da absorção do conhecimento em meteorologia nos processos logísticos e atividades operacionais da cadeia mineral da Vale, o presente relatório técnico apresentou as principais ferramentas em monitoramento atmosférico e previsão de tempo nas escalas de curto e curtíssimo prazo. Como as diversas atividades que ocorrem na Vale acontecem a céu aberto e são expostas às condições adversas de tempo, foram apresentadas as funcionalidades e aplicações de cada ferramenta em processos que são impactados por chuvas fortes, rajadas de vento ou incidência de raios, por exemplo. A premissa é de que o conhecimento acurado das condições pretéritas e futuras da atmosfera fornecerão mais elementos para que os tomadores de decisões sejam capazes de definir as melhores soluções diante de problemas iminentes. O relatório apresentou técnicas de monitoramento atmosférico, como estações meteorológicas, que podem ser convencionais ou automáticas, estações de ar superior ou radiossondagens, satélite de monitoramento atmosférico e sensores de campo elétrico e magnético. Para as previsões na escala de curtíssimo prazo, o radar meteorológico foi apresentado como a ferramenta mais adequada para o conhecimento das condições atmosféricas nos próximos minutos até poucas horas, uma vez que consegue identificar as características do sistema atmosférico que se aproxima do local de interesse, destacando a intensidade, caráter e duração do evento. Como metodologias de previsão de tempo na escala temporal de curto prazo, a modelagem numérica regional, com ajustes nos parâmetros físicos do modelo, assimilação de dados ambientais como *input* das simulações e desenvolvimento de produtos sob medida representam uma solução com potencial para atender as necessidades da cadeia mineral, que ocorrem em escalas local e regional. Aliado à essa metodologia, as técnicas de inteligência artificial podem agregar valor às previsões dinâmicas, uma vez que adicionam o comportamento histórico das principais variáveis, de modo que podem ser compiladas para uma previsão com significância estatística. Para que a Vale possa usar as bases de dados de monitoramento atmosférico e previsões meteorológicas sob medida, o presente documento concluiu que a criação de um Centro de Monitoramento Atmosférico apresenta um potencial para integrar o conhecimento em meteorologia dedicado para a cadeia mineral, além de poder disponibilizar especialistas em meteorologia durante 24h por dia e 7 dias por semana para informar com altíssima precisão sobre os eventos meteorológicos extremos que podem impactar nas atividades críticas da cadeia mineral e, portanto, contribuir para a otimização da produtividade e aumento da segurança dos empregados.

RESUMO

A cadeia mineral ocorre a céu aberto e está episodicamente exposta aos fenômenos atmosféricos indutores de mau tempo, os quais podem impactar na produtividade da Vale e na segurança dos empregados. Em termos de monitoramento atmosféricos e nas escalas temporais de curto e curtíssimo prazo, as tecnologias desenvolvidas nos anos recentes têm demonstrado serem capazes de fornecer informações confiáveis e precisas sobre o estado pretérito e futuro da atmosfera. No presente relatório, foram apresentadas as melhores soluções em meteorologia visando otimizar as tomadas de decisões no âmbito da cadeia mineral da Vale, nas escalas de previsibilidade de curto e curtíssimo prazo. Assim, foram apresentadas a estrutura de funcionamento e os benefícios para a mineração de: estações meteorológicas, radiossondagens, satélites de monitoramento atmosférico, sensores de campo elétrico e magnético, radares meteorológicos, modelagem numérica regional e técnicas de inteligência artificial. A fim de facilitar e democratizar o acesso às informações, todos os dados gerados pelas ferramentas de monitoramento e previsão meteorológica devem ser integrados. Para tal, este documento propõe a criação de um Centro de Monitoramento Atmosférico na Vale, com especialistas em meteorologia em regime de operação e dedicados integralmente às atividades da cadeia mineral. Deste modo, são esperados benefícios na otimização de processos impactados, principalmente por chuvas fortes e incidências de raios, além de uma oportunidade singular para a Vale se tornar a primeira empresa mineradora do mundo a incorporar o conhecimento em meteorologia nas suas ações de planejamento operacional.

Palavras-chave: Monitoramento atmosférico. Previsão de tempo. Cadeia mineral. Centro de Monitoramento Atmosférico.

ABSTRACT

The mining chain occurs outdoor and is episodically exposed to atmospheric phenomena that induce bad weather, which can impact the Vale's productivity and the safety of employees. In terms of atmospheric monitoring and in the short and very short (*nowcasting*) term time scales, the latest technologies demonstrate that they are able to provide reliable and accurate data of the past and future state of the atmosphere. At the present report, were presented the best solutions on meteorology aiming to optimize the decisions making over the Vale's mining chain context, in the short and very short term predictability scales. Thus, with focus for mining, were presented the working structure and the benefits of: meteorological stations, soundings, atmospheric monitoring satellites, electric and magnetic field sensors, weather radars, regional numerical modeling and artificial intelligence techniques. In order to facilitate and democratize the access to information, all data generated by meteorological monitoring and forecasting tools must be integrated. To this end, this document proposes the creation of an Atmospheric Monitoring Center in the Vale, with meteorological specialists in operation and dedicated entirely to the activities of the mining chain. Therefore, benefits are expected in the optimization of impacted processes, mainly due to heavy rains and lightning strikes, in addition to a unique opportunity for Vale to become the first mining company in the world to incorporate meteorological knowledge into its operational planning actions.

Keywords: Atmospheric monitoring. Weather forecast. Mining chain. Atmospheric Monitoring Center.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Imagens da estação meteorológica automática do Instituto Tecnológico Vale (ITV), localizada próxima ao terminal ferroviário de Arari (MA).	10
Figura 2 -	Localização geográfica das estações meteorológicas / hidrometeorológicas do ITV, entre os estados do Pará e Maranhão.	11
Figura 3 -	Esquematisação da estrutura necessária para o lançamento do balão meteorológico, com a radiossonda, antena receptora, rádio receptor e computador para o acompanhamento do registro de dados.	12
Figura 4 -	(a) Momento de lançamento da radiossonda em um balão meteorológico, (b) início da subida na atmosfera e (c) diagrama Skew-T Log-P contendo os dados registrados pela radiossonda.	13
Figura 5 -	Imagem ilustrativa do satélite geoestacionário GOES.....	15
Figura 6 -	Estimativas pelo satélite TRMM da média (1998 a 2013) da precipitação (mm/dia) para o mês de julho para a parte do globo terrestre entre as latitudes de 45°S e 45°N.	16
Figura 7 -	Esquematisação do funcionamento de um radar meteorológico Doppler com dupla polarização.	19
Figura 8 -	Imagem ilustrativa de um radar meteorológico Doppler.	20
Figura 9 -	Sequência de imagens de radar meteorológico das (a) 0810UTC, (b) 0820UTC, (c) 0830UTC, (d) 0840UTC, (e) 0850UTC e (f) 0900UTC do dia 18 de dezembro de 2020, na região noroeste dos Estados Unidos, divisa com o Canadá.	21
Figura 10 -	Definições de escala e diferentes processos atmosféricos com características de tempo cronológico e escala horizontal.	22
Figura 11 -	Estrutura simplificada do funcionamento de um Centro de Monitoramento Atmosférico na Vale.	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	OBJETIVOS	8
3	FONTE DE PESQUISA E APRESENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES	8
4	SOLUÇÕES EM MONITORAMENTO ATMOSFÉRICO E NOWCASTING.....	9
4.1	ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE.....	9
4.2	RADIOSSONDAGENS	11
4.3	SATÉLITES DE MONITORAMENTO ATMOSFÉRICO	14
4.4	SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO E CAMPO MAGNÉTICO.....	17
4.5	RADAR METEOROLÓGICO	18
5	SOLUÇÕES EM CURTO PRAZO	21
5.1	MODELAGEM NUMÉRICA REGIONAL EM METEOROLOGIA.....	22
5.2	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING	24
6	INTEGRAÇÃO DAS INFORMAÇÕES METEOROLÓGICAS E APLICAÇÕES PARA A CADEIA MINERAL DA VALE.....	25
6.1	CENTRO DE MONITORAMENTO ATMOSFÉRICO	25
6.2	APLICAÇÕES PARA A CADEIA MINERAL DA VALE.....	27
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
	REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

No leste da Amazônia, a Vale possui grande parte da sua produção mineral no Complexo Minero-Logístico de Carajás, no sudeste do Pará escoada pela Estrada de Ferro Carajás (EFC) até o Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM) (VALE, 2020). Sob o ponto de vista meteorológico, essa cadeia mineral está localizada em uma região com período chuvoso bem definido, no qual sistemas atmosféricos atuam em diversas escalas e impactam diretamente nos processos operacionais da Vale, com chuvas fortes e duradouras, rajadas de vento, incidência de raios entre outros.

O tempo, especialmente o tempo severo, são responsáveis por muitos desastres naturais que causam uma série de danos materiais e até perdas de vidas. Sabe-se que os fenômenos naturais não podem ser evitados, mas podem ser previstos. A previsão de tempo é um componente essencial de um sistema de alerta antecipado e ações consecutivas na gestão de crises e prevenção de riscos. Nos últimos anos, muito progresso tem sido alcançado nas pesquisas e no desenvolvimento de alto impacto em previsão de tempo com foco para diversas formas de perigo. Tais progressos incluem informações sobre probabilidade e a adição de várias técnicas de monitoramento atmosférico (WMO, 2017).

Neste contexto, as pesquisas e os avanços em meteorologia têm permitido cada vez mais o conhecimento do estado momentâneo e futuro da atmosfera, com registros observacionais, sensores, estações meteorológicas, radar meteorológico e outras técnicas de monitoramento têm demonstrado serem eficazes ao diagnosticar o comportamento das variáveis atmosféricas (CHAUHAN; THAKUR, 2014).

Na Vale, vem sendo recorrentes questões inerentes a interrupções operacionais pelo acionamento de alertas vermelhos devido ao mau tempo, que na prática não se concretizam em muitas oportunidades, o que tem prejudicado substancialmente na cadeia produtiva e até mesmo no traslado dos empregados. Outros problemas associados ao transbordamento de bacias de decantação devido às chuvas, o embarque de minério nos porões dos navios e até acidentes envolvendo descargas elétricas atmosféricas podem ser atenuados com o advento e a utilização correta de tecnologias capazes acompanhar a evolução espaço-temporal das principais variáveis atmosféricas e assim, mitigar os impactos na cadeia mineral da Vale.

Aliado a isso, a internalização do conhecimento em meteorologia na Vale, com profissionais dedicados para os diversos processos operacionais, como manuseio, a manutenção, o embarque etc., pode promover melhorias nas tomadas de decisões e no planejamento operacional.

De acordo com reuniões de trabalho, conversas pessoais e dados sobre paradas operacionais na Vale, é do conhecimento do autor deste documento que as informações em meteorologia nas escalas de curto e curtíssimo prazo representam uma lacuna no processo de tomadas de decisões da Vale, até mesmo por não possuir entre os seus empregados, profissionais com competência na área de ciências atmosféricas e, portanto, não possui em suas rotinas operacionais o fator meteorológico como parte dos seus processos.

O presente relatório abordará algumas tecnologias que representam as melhores técnicas em monitoramento atmosférico e previsão meteorológica nas escalas temporais de curto e curtíssimo prazo, que podem contribuir para aumentar o conhecimento dos tomadores de decisões sobre o estado presente e futuro das principais variáveis atmosféricas que impactam nas atividades de cadeia mineral.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo do presente relatório técnico é apresentar as principais tecnologias em meteorologia para a cadeia mineral no Corredor Norte da Vale, sob a perspectiva de um sistema integrado de previsões de variáveis meteorológicas que contribuem direta ou indiretamente no planejamento logístico e nas atividades operacionais da mina ao porto. As soluções aqui expostas representam as melhores ferramentas para o uso de um profissional em meteorologia para realizar uma previsão meteorológica com horizonte temporal de curtíssimo (minutos e poucas horas) e curto prazo (até 15 dias).

3 FONTE DE PESQUISA E APRESENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES

Para gerar as informações contidas neste relatório técnico optou-se por realizar buscas em livros, publicações científicas, relatórios técnicos, propostas comerciais de empresas fornecedoras da Vale e Instituto Tecnológico Vale (ITV), pesquisas bibliográficas realizadas no Google Acadêmico e em sites de empresas de tecnologia, além do conhecimento do autor e conversas pessoais com empregados da Vale acerca dos problemas encontrados na cadeia mineral em relação as condições meteorológicas.

4 SOLUÇÕES EM MONITORAMENTO ATMOSFÉRICO E NOWCASTING

Nesta seção, serão apresentadas as principais ferramentas de análise meteorológicas sobre o estado momentâneo da atmosfera e as tecnologias para a previsão na escala tempo de curtíssimo prazo, também chamada de *nowcasting*¹.

4.1 ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE

Uma estação meteorológica de superfície é composta por um conjunto de sensores capazes de medir e registrar parâmetros meteorológicos. As principais variáveis que podem ser medidas diretamente são: temperatura do ar, temperatura do solo, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, radiação solar global e precipitação.

As estações meteorológicas podem ser convencionais ou automáticas. As estações convencionais possuem sensores que apenas medem as variáveis, sendo necessária a presença de uma pessoa para o registro das observações, que normalmente são feitas nos horários sinóticos principais (0000, 0060, 1200 e 1800GMT) e horários intermediários (0300, 0900, 1500 e 2100GMT, segundo a Organização Meteorológica Mundial – OMM (WMO, 2017; WMO, 2020).

Em contrapartida, as estações meteorológicas automáticas (ver Figura 1) funcionam de modo autônomo, medindo e registrando em horários definidos a critério do usuário, as principais variáveis meteorológicas. Em geral, os registros são feitos a cada hora e permitem um acompanhamento com maior granularidade sobre o ciclo diurno das variáveis registradas. Tais dados podem ser enviados automaticamente de modo *online* via telemetria celular, satélite, *wifi* ou cabo de ethernet para um servidor remoto.

Segundo a OMM, uma estação meteorológica possui uma representatividade de até 100 km. Porém, esse valor foi definido para latitudes médias e pode alterar significativamente conforme a região do planeta. Para a região amazônica, por exemplo, onde a distribuição espaço-temporal da precipitação é alta, recomenda-se que a densidade de estações meteorológicas seja bem maior, quando comparadas a regiões extratropicais e temperadas.

Além dos estudos científicos em meteorologia e climatologia, uma análise do tempo meteorológico a partir estações em superfície pode gerar uma série de benefícios para a sociedade e diversos ramos da indústria, como a agricultura, energia e mineração, por exemplo.

¹ É a previsão do tempo em um período de 0 até 6 horas, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM). Essa previsão é uma extrapolação no tempo de parâmetros climáticos conhecidos, incluindo os obtidos por meio de sensoriamento remoto, utilizando técnicas que levam em consideração uma possível evolução da massa de ar. Portanto, esse tipo de previsão inclui detalhes que não podem ser resolvidos por modelos de previsão numérica do tempo que são executados em períodos de previsão mais longos.

Particularmente na mineração, as informações derivadas de estações meteorológicas podem ser utilizadas no acompanhamento de sistemas atmosféricos, caso haja uma boa densidade de medições e pontos de monitoramento. Em alguns locais, como pátios e áreas de cavas o ambiente precisa ser seco e a pista precisa apresentar boas condições de trafegabilidade. Logo, conhecer previamente os sítios onde já ocorreu precipitação pluviométrica pode contribuir no planejamento operacional e na otimização da retomada de atividades.

O Instituto Tecnológico Vale (ITV) possui 17 estações entre meteorológicas e hidrometeorológicas localizadas no leste na Amazônia, as quais foram estrategicamente instaladas a fim de atender as necessidades operacionais da Vale e a pesquisa científica no ITV. A Figura 2 mostra a localização das estações de superfície (losangos em amarelo) entre os estados do Pará e Maranhão.

Estudos diagnósticos sobre os padrões de precipitação podem ser conduzidos por especialistas na área de meteorologia, a fim de identificar as características climatológicas em escala diurna, o que potencialmente pode alterar rotinas de trabalho em áreas de mina e porto, cujas atividades não podem sofrer a influência da precipitação.

Para o profissional de meteorologia, as estações meteorológicas representam o registro único das variáveis atmosféricas que caracterizam as condições de tempo e clima local. Deste modo, são ferramentas imprescindíveis para o monitoramento e previsão do tempo, tanto em escala regional, quanto local e, tanto em curto prazo, quanto em curtíssimo prazo.

Figura 1 - Imagens da estação meteorológica automática do Instituto Tecnológico Vale (ITV), localizada próxima ao terminal ferroviário de Arari (MA).

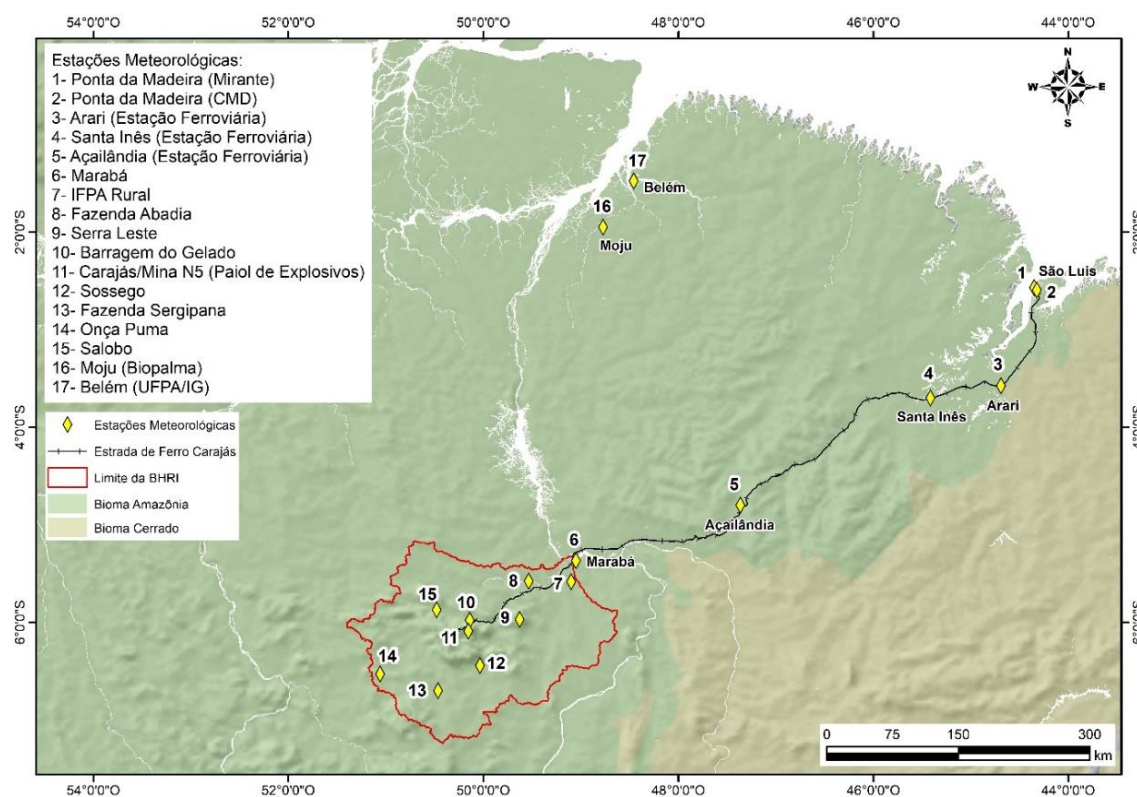
(b)

(a)



Fonte: próprio autor (2020).

Figura 2 - Localização geográfica das estações meteorológicas / hidrometeorológicas do ITV, entre os estados do Pará e Maranhão.



Fonte: Wilson Nascimento, Instituto Tecnológico Vale (ITV), (2020)

4.2 RADIOSSONDAGENS

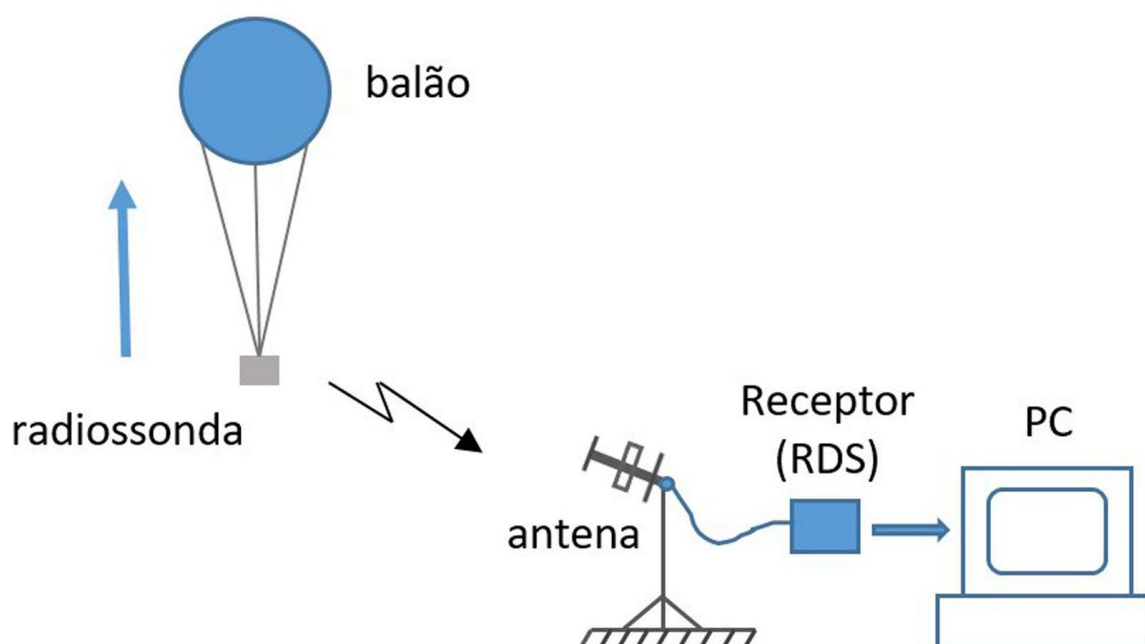
As estações meteorológicas de altitude, por meio de radiossondagens, são capazes de coletar dados em diversos níveis verticais na atmosfera, permitindo o conhecimento das condições atmosféricas predominantes em um determinado local, em dado momento. Assim, é possível diagnosticar a condição termodinâmica de estabilidade/instabilidade atmosférica, que podem indicar a formação de nuvens e, conseqüentemente, a ocorrência de precipitação (WMO, 2017).

As radiossondagens consistem no lançamento na atmosfera de um balão (enchido com gás hidrogênio ou hélio), ao qual é preso uma sonda com sensores para medir a temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica, bem como de uma antena GPS para registrar o deslocamento da sonda, que permite a medida da direção e velocidade do vento. Logo, são registradas as condições do perfil vertical da atmosfera no momento da subida do balão com a radiossonda.

Alguns tipos de radiossondas mais modernas possibilitam ao meteorologista realizar previsões de curtíssimo e curto prazo, informando dados como temperatura, umidade, ozônio e vento, além da avaliação de condições de estabilidade e instabilidade do ambiente (SQUITTER, 2020).

A Figura 3 ilustra a esquematização do acompanhamento das medidas do perfil vertical da atmosfera por uma radiossonda presa ao balão, bem como a antena receptora e um rádio receptor, o qual é conectado via porta usb a um computador de mesa ou notebook. No computador ou no notebook ficam instalados os programas para a recepção sinal e decodificação dos dados enviados pela sonda (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Figura 3 - Esquematização da estrutura necessária para o lançamento do balão meteorológico, com a radiossonda, antena receptora, rádio receptor e computador para o acompanhamento do registro de dados.



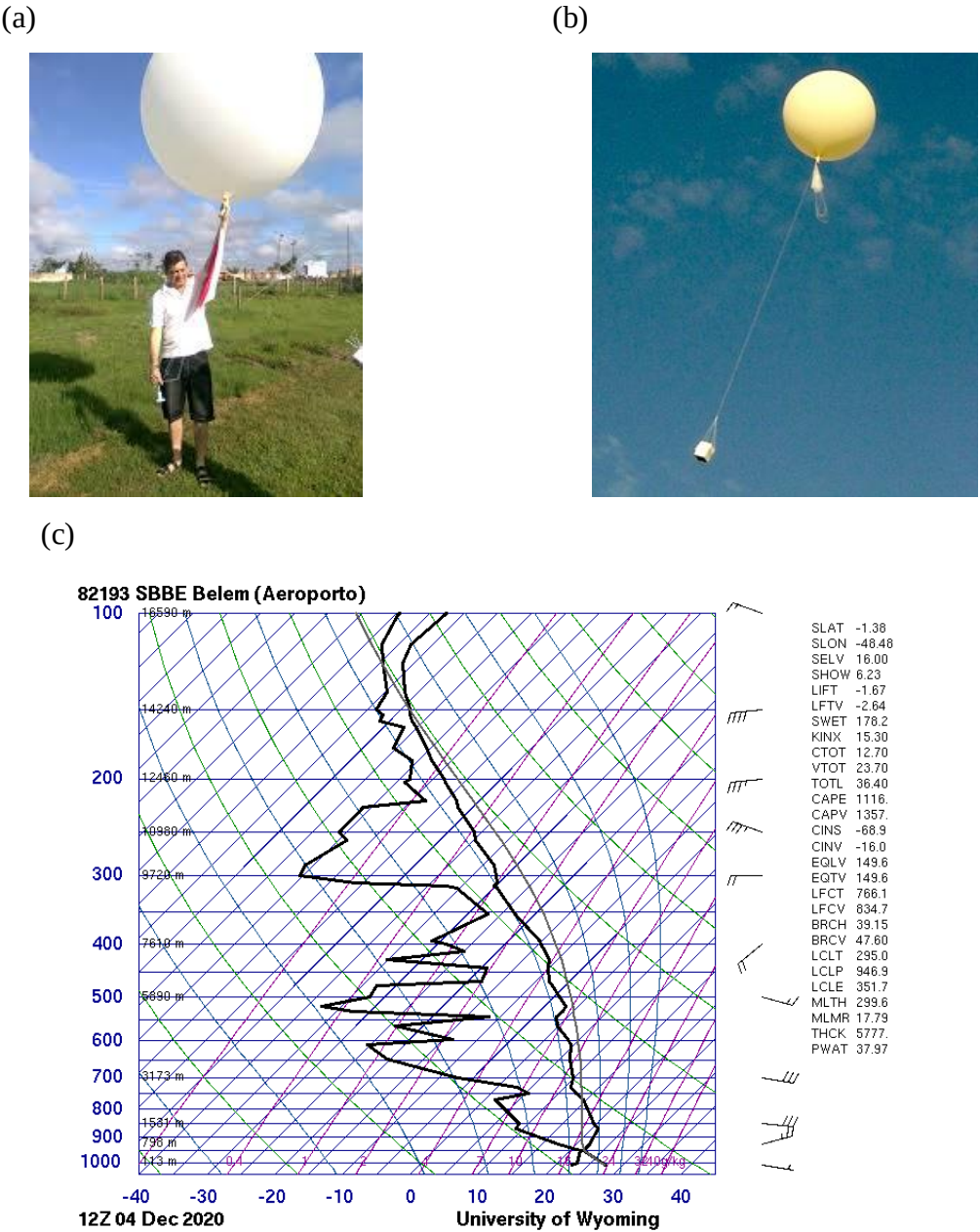
Fonte: Oliveira *et al.*, (2018)

A Figura 4, ilustra o processo de lançamento do balão com a radiossonda (Figura 4a), subida na atmosfera (Figura 4b) e geração do diagrama do tipo Skew-T Log-P com os dados registrados (Figura 4c).

Para a cadeia mineral, especialmente nas regiões de mina e porto, cujos processos ocorrem na escala espacial de poucos quilômetros, o conhecimento do perfil vertical da atmosfera local permite o diagnóstico termodinâmico e a determinação de vários índices que, quando combinados, podem informar a estabilidade/instabilidade atmosférica. Deste modo, é

possível antecipar se há condições de precipitação para o decorrer do dia, bem como indicar as características da precipitação, se fraca, moderada ou forte, se contínua, intermitente ou em forma de pancadas. Tais informações podem ser utilizadas por diversas gerências da Vale que lidam com o planejamento diário, para os quais o conhecimento prévio da precipitação é considerado.

Figura 4 - (a) Momento de lançamento da radiossonda em um balão meteorológico, (b) início da subida na atmosfera e (c) diagrama Skew-T Log-P contendo os dados registrados pela radiossonda.



Fonte: Projeto Chuva (CPTEC/INPE) e University of Wyoming, Department of Atmospheric Science².

² Disponível em: <http://weather.uwyo.edu/>.

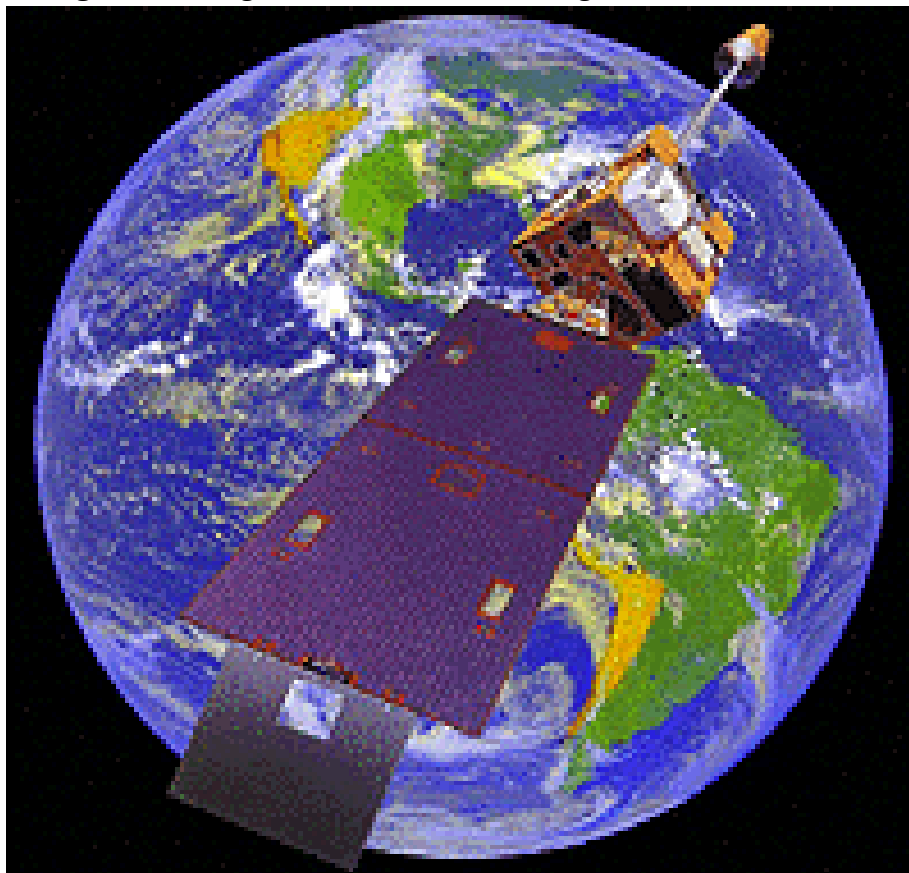
4.3 SATÉLITES DE MONITORAMENTO ATMOSFÉRICO

Em meteorologia é comum o uso de satélites geoestacionários (Figura 5), que orbitam sobre o plano equatorial da Terra a uma altitude de 35800 Km. A esta altitude, a velocidade do satélite e a de rotação da Terra são iguais, pelo que o satélite permanece estacionário sobre um certo ponto do Equador. Esta órbita permite que o satélite observe continuamente a mesma porção do globo (42% da superfície terrestre). É necessária uma rede de 5 ou 6 satélites para cobrir a totalidade do globo. Os polos nunca são visíveis por este tipo de satélite (SOS, 2020).

No Brasil, atualmente o principal satélite geoestacionário de monitoramento atmosférico é o GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) da NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*), para os canais: visível, vapor de água e temperatura do topo de nuvens. Esse satélite faz parte da nova geração da série GOES que permite um rastreamento muito mais acurado das bandas de nebulosidade, associadas a tempestades severas sobre diferentes regiões do globo terrestre. As imagens são disponibilizadas a cada 15 minutos para todos os canais e em tempo quase real, o que permite monitorar o deslocamento dos sistemas atmosféricos e bandas de nebulosidade (SMA, 2020). De posse dessas informações, os meteorologistas de áreas operacionais são capazes de um rápido reconhecimento e do monitoramento de fenômenos meteorológicos perigosos, como tempestades, contribuindo assim para a previsão do tempo e *nowcasting*.

Na ausência de outros tipos de informações, como estações meteorológicas e do próprio radar meteorológico, a estimativa da precipitação por satélite é uma alternativa eficaz para o conhecimento da distribuição pluviométrica espacial. As técnicas de estimativa geralmente funcionam com melhor desempenho para a precipitação convectiva, que ocorre com mais frequência em regiões tropicais.

Figura 5 - Imagem ilustrativa do satélite geoestacionário GOES.



Fonte: All Met Sat - GOES, ([2020])³

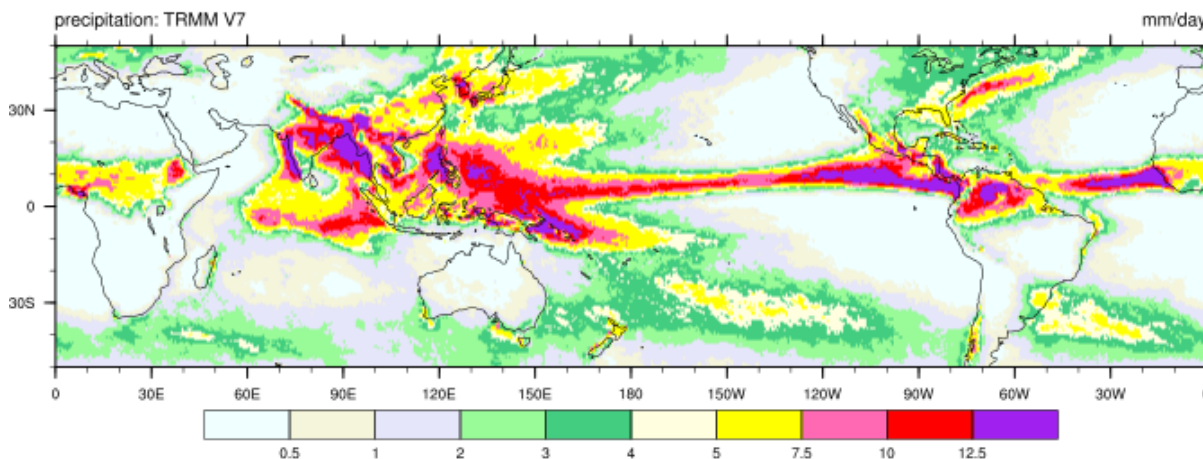
De acordo com estudos científicos (KUMMEROW *et al.*, 2000; ROZANTE *et al.*, 2010), as estimativas de precipitação por satélite vêm melhorando os seus algoritmos no sentido de se aproximar cada vez mais da observação real. O satélite geoestacionário *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), por exemplo, forneceu entre 1997 e 2015 informações importantes sobre a precipitação (Figura 6) usando vários instrumentos espaciais para aumentar a compreensão das interações entre o vapor d'água, as nuvens e a precipitação, que são fundamentais para regular o clima da Terra (KUMMEROW *et al.*, 2000).

Há alguns fatores limitantes para as estimativas de precipitação por satélite, como a natureza dos fenômenos, como células convectivas de vida curta, mas o fato é que as estimativas com base das temperaturas do topo de nuvens têm representado um avanço significativo nas análises quantitativas da taxa de precipitação. Em geral, as precipitações derivadas de nuvens estratiformes, isto é, desenvolvimento horizontal mais acentuado que o vertical, são mais

³ Disponível em: <https://pt.allmetsat.com/satellite-goes.php>.

complexas de serem capturadas e requerem o uso de propriedades microfísicas de nuvens ou de satélites em órbita terrestre baixa (abaixo de 2000 km).

Figura 6 - Estimativas pelo satélite TRMM da média (1998 a 2013) da precipitação (mm/dia) para o mês de julho para a parte do globo terrestre entre as latitudes de 45°S e 45°N.



Fonte: Climate Data Guide, ([2020])⁴.

Além disso, os satélites geoestacionários podem oferecer informações regulares sobre áreas com nevoeiro e baixa visibilidade, com base em combinações de cores em canais específicos. Novos métodos que combinam dados multiespectrais de satélites com informações de modelagem numérica de tempo podem fornecer estimativas quantitativas da probabilidade de nevoeiros e nuvens baixas (WMO, 2017).

De modo geral, para regiões com baixa densidade populacional, com escassez de informações meteorológicas em superfície, os dados gerados por satélite permitem tanto o diagnóstico em tempo quase real da cobertura de nebulosidade, quanto estimativas confiáveis e cada vez mais precisas da precipitação.

Particularmente no caso da cadeia mineral da Vale no leste da Amazônia, onde há muitas áreas remotas e sem qualquer tipo de informações meteorológicas do estado da atmosfera, os dados de satélite surgem como uma alternativa que pode ser útil às áreas operacionais que são diretamente impactadas pelas condições de tempo, como a manutenção em ferrovias, por exemplo, que ocorrem em locais remotos e expõem empregados à tempestades e descargas elétricas atmosféricas.

⁴ Disponível em: climatedataguide.ucar.edu.

4.4 SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO E CAMPO MAGNÉTICO

Todos os processos de relâmpagos estão associados com o movimento de cargas elétricas e, portanto, podem ser estudados através de medições dos campos elétricos e magnéticos associados a esse movimento. Vários processos físicos ocorrem nos relâmpagos nuvem-solo (NS) e intranuvem (IN), cada um destes processos tendo um campo elétrico e magnético irradiante associado. Estes processos, que compõem juntos o relâmpago, emitem pulsos eletromagnéticos em uma faixa de frequência que se estende desde abaixo de 1 Hz até próximo de 300 MHz, com máxima intensidade no espectro de frequência em torno de 5 a 10 KHz. O tipo de informação que pode ser obtida a partir de observações da radiação eletromagnética dos relâmpagos depende da frequência f , e, portanto, do comprimento de onda λ , da radiação detectada (MAGINA, 2000).

Um relâmpago pode ser mapeado com sinais de frequência muito alta (VHF – *Very High Frequency*), útil para detectar o canal; e sinais de frequência muito baixa (VLF – *Very Low Frequency*), que são mais adequados para detectar a localização de incidência de um raio (POELMAN, 2010). O relâmpago NS é observado principalmente na faixa de VLF, enquanto que os relâmpagos IN predominam na faixa de VHF (CUMMINS *et al.*, 2008).

Assim, um sistema de localização de relâmpagos pode ser constituído por diversos sensores (antenas e dispositivos eletrônicos associados) projetados para operar em uma determinada faixa de frequência (o que determina o tipo de descarga detectada e o alcance do sistema) e dispostos em uma adequada configuração de forma a captarem a radiação eletromagnética produzida pelas descargas e de uma central que recebe os dados dos sensores através de canais de comunicação e os processa, gerando como resultado informações sobre as descargas detectadas por este sistema, como por exemplo, localizar e mapear no céu as descargas com precisão de poucas centenas de metros (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

Em meteorologia, é muito comum o uso de sensores de campo elétrico e campo magnético para aplicações de aviso de raios iminentes e em aplicações de pesquisa científica. Os sensores são capazes de medir a componente vertical do campo elétrico atmosférico na superfície da Terra. Um sensor completo (que mede e registra dados) normalmente faz parte de um sistema de campo elétrico maior, no qual está incluído um *datalogger*, podendo ser expandido com a adição de outros sensores (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2020).

A utilização de sensores de campo elétrico e magnético para verificar o local aproximado em que o primeiro raio pode cair e detectar as condições atmosféricas que precedem o relâmpago, é de suma importância para as rotinas operacionais e planejamento

logístico da cadeia mineral, uma vez que, de acordo com relatos de empregados da Vale em comunicação pessoal e reuniões de trabalho, a incidência de raios tem sido o principal motivo de interrupções operacionais devido a emissão de alertas vermelhos. Tais alertas frequentemente não são aderentes às condições de tempo local, de modo que gera frustração, especialmente na produção mineral. Neste sentido, os sensores de campo elétrico e magnético surgem como uma boa alternativa para identificar o aumento do campo elétrico dentro de um raio, de modo a diagnosticar e prognosticar com precisão a ocorrência de relâmpagos, que podem ser IN ou NS.

4.5 RADAR METEOROLÓGICO

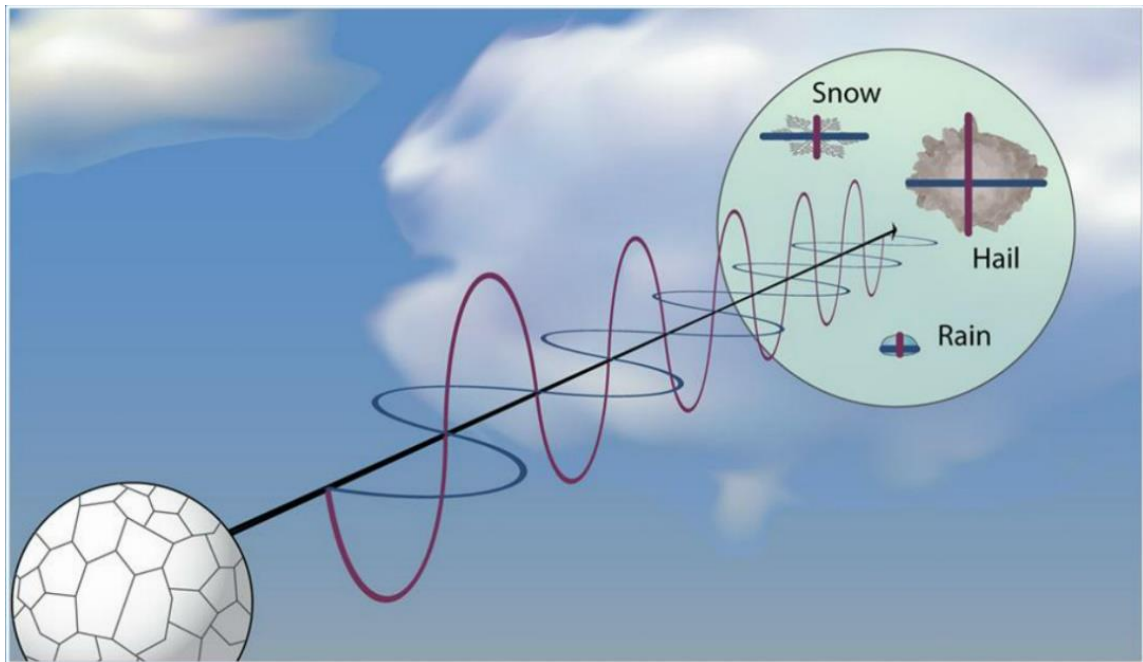
Os radares meteorológicos são de suma importância para o monitoramento da atmosfera, pois não somente detectam a presença de hidrometeoros, como também movimentos das massas de ar. Assim, pode ser tomada como a melhor ferramenta para o *nowcasting*, uma vez que auxilia no monitoramento das condições de tempo locais.

Os radares funcionam basicamente interpretando sinais de ondas eletromagnéticas que são emitidas por eles. Essas ondas são emitidas na atmosfera e à medida que interagem com corpos presentes na atmosfera são recebidos de volta, ou não, pela antena do radar (Figura 7).

Para interpretar as respostas dos sinais emitidos pelo radar meteorológico, é necessário que uma equipe de técnicos em meteorologia e meteorologistas trabalhem em conjunto, no sentido de analisar todas as probabilidades de formação de fenômenos meteorológicos intensos, os possíveis deslocamentos destes e consequentemente os potenciais danos.

Existem basicamente duas classes de radares meteorológicos: os de polarização simples e os de polarização dupla. Essa diferença se dá no número de eixos em que as ondas eletromagnéticas são emitidas, onde a emissão na polarização dupla ocorre nos eixos X e Y (GAMIC, 2020).

Figura 7 - Esquematização do funcionamento de um radar meteorológico Doppler com dupla polarização.



Fonte: National Weather Service, ([2020])⁵.

Os radares de polarização dupla, pela emissão de ondas nos dois eixos cartesianos, conseguem extrair mais informações dos corpos presentes na atmosfera. Deste modo, possuem maior capacidade de classificar e identificar estes corpos (GAMIC, 2020; VAISALA, 2020).

Dada a complexidade dos sistemas atmosféricos que atuam na Amazônia, os radares de polarização dupla são mais adequados para a região do Corredor Norte da Vale, uma vez que coletam dados importantes da composição da nuvem, o que permite a realização de pesquisas científicas para aprimorar o entendimento da atmosfera local e melhorar os índices de acerto de previsão do tempo e de outros produtos.

Os radares meteorológicos conseguem captar a refletividade e a quantidade de água contida em uma nuvem, bem como as características morfológicas de uma tempestade e calcular a aproximação de um sistema atmosférico em direção a uma mina ou a uma barragem, por exemplo. Logo, para a escala da mineração o radar meteorológico Banda X, com polarização dupla (Figura 8) representa o estado-da-arte em *nowcasting*, capaz de fornecer com antecedência de até 2h, dados precisos para auxiliar tomadas de decisões de uma equipe de meteorologistas sobre o estado futuro próximo da atmosfera local.

⁵ Disponível em: <https://www.weather.gov/news/130425-dualpol>.

A sequência de imagens na Figura 9 demonstra como é possível o acompanhamento de sistemas atmosféricos com dados de radar meteorológico. Apesar da ferramenta possibilitar uma análise temporal em menor intervalo de tempo, a série de imagens a cada 10 minutos mostra a evolução das bandas de nebulosidade próximas a região de Vancouver, Canadá. Nas escalas em cores (verde, amarelo, laranja e vermelho) é possível destacar regiões com indicativo de menor à maior quantidade de precipitação nos sites, com acompanhamento em tempo real da evolução dos sistemas atmosféricos.

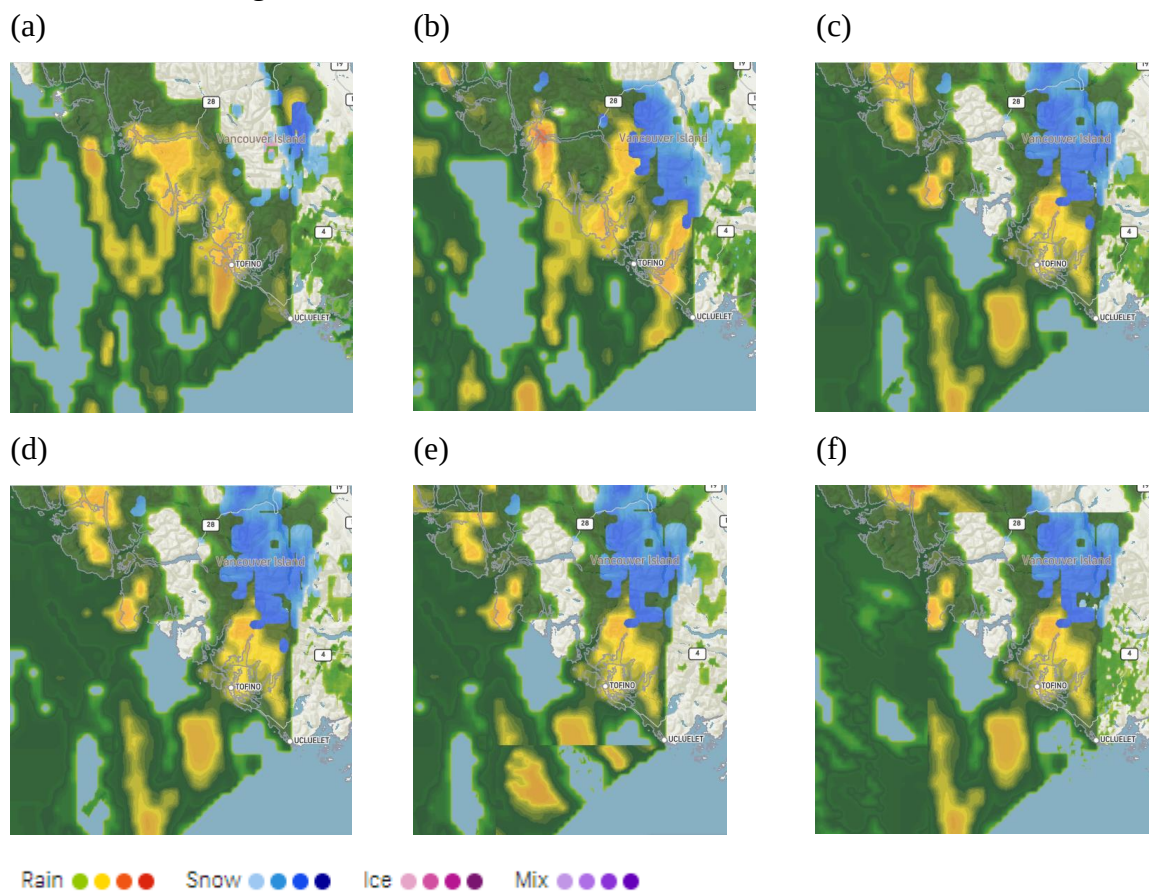
Figura 8 - Imagem ilustrativa de um radar meteorológico Doppler.



Fonte: GAMIC, ([2020])⁶.

⁶ Disponível em: <https://www.gamic.com/>.

Figura 9 - Sequência de imagens de radar meteorológico das (a) 0810UTC, (b) 0820UTC, (c) 0830UTC, (d) 0840UTC, (e) 0850UTC e (f) 0900UTC do dia 18 de dezembro de 2020, na região noroeste dos Estados Unidos, divisa com o Canadá.



Fonte: AccuWeather, ([2020])⁷.

5 SOLUÇÕES EM CURTO PRAZO

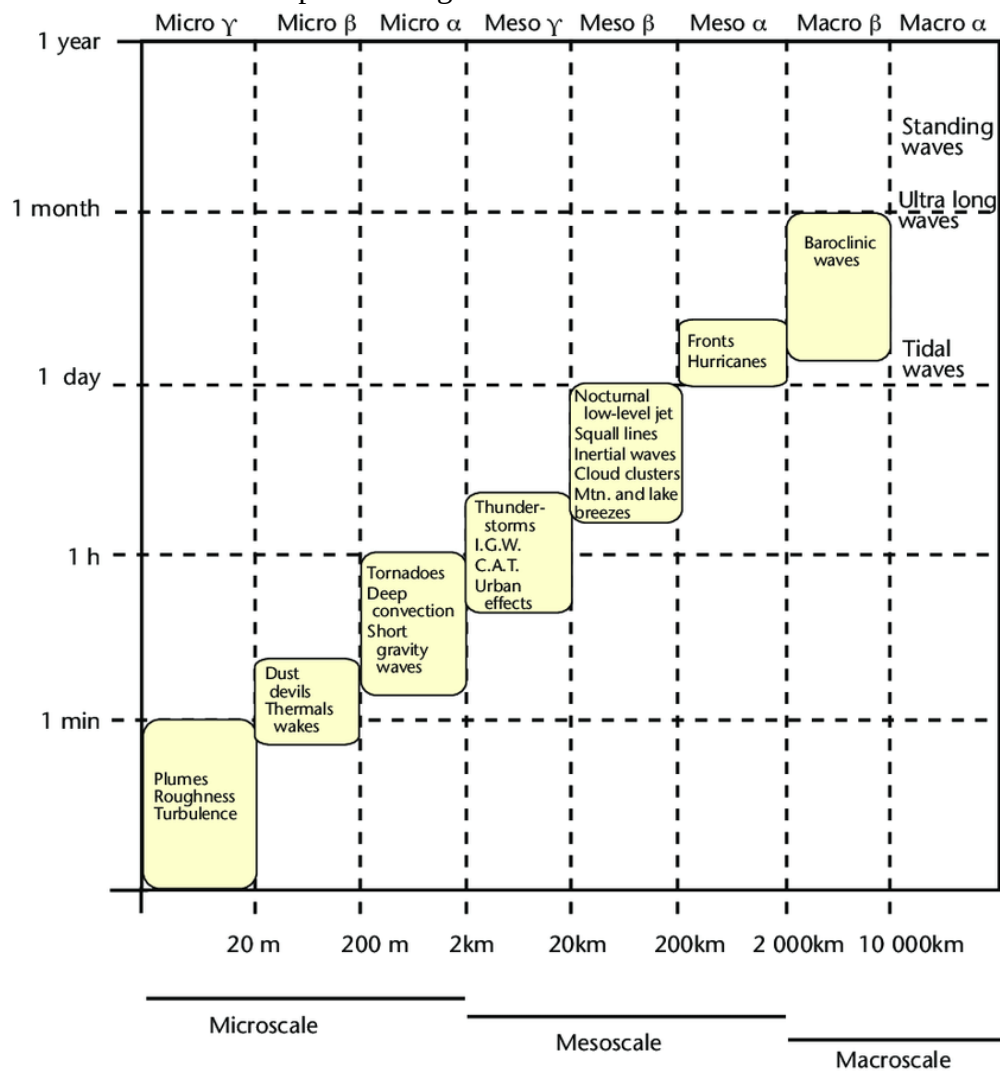
De acordo com a metodologia proposta por Orlanski (1975), os fenômenos meteorológicos que ocorrem na escala de curto prazo, notadamente da ordem de poucos dias, são os ciclones tropicais, sistemas frontais, o deslocamento de cristas e cavados entre outros (Figura 10).

Atualmente, fenômenos de escalas menores como bandas de precipitação, tempestades severas, frentes de rajada e nuvens tipo *cumulus* podem ser observados pelos radares meteorológicos e satélites geoestacionários, por exemplo, os quais se enquadram como ferramentas de monitoramento e previsão de tempo na escala temporal de curtíssimo prazo, discutido na seção anterior.

⁷ Disponível em: <https://www.accuweather.com/en/us/national/weather-radar>

Nesta seção, serão apresentadas as melhores soluções em pesquisa e desenvolvimento na área de meteorologia no que tange à previsibilidade de tempo atmosférico na escala temporal de curto prazo.

Figura 10 - Definições de escala e diferentes processos atmosféricos com características de tempo cronológico e escala horizontal.



Fonte: Orlanski (1975).

5.1 MODELAGEM NUMÉRICA REGIONAL EM METEOROLOGIA

Os sistemas atmosféricos têm um papel primordial no planejamento de diversas atividades econômicas, muitas das quais são vitais para a subsistência e desenvolvimento humano. Cada vez mais as condições de tempo meteorológico são utilizadas no delineamento de atividades diárias, como por exemplo na mineração, que ocorre a céu aberto e está episodicamente sujeita aos impactos de tempestades, com relâmpagos, chuvas fortes, rajadas

de vento, condições de má visibilidade pela formação de nevoeiros, entre outros fenômenos que exercem impacto direto ou indireto na execução de atividades.

Como os fenômenos naturais não podem ser evitados, mas podem ser previstos, as pesquisas e os avanços em meteorologia têm permitido cada vez mais o conhecimento do estado futuro da atmosfera. Neste sentido, a modelagem numérica em meteorologia, surge como uma ferramenta robusta e capaz de prever variáveis meteorológicas relevantes para as operações da Vale. Os modelos numéricos são compostos por equações físicas e matemáticas, escritas em linguagem computacional, integradas no tempo de modo a simular as características do sistema climático da Terra (HOLTON, 2005). Geralmente, os modelos são de código livre, o que permite a sua adaptação para qualquer parte do planeta, alterando os parâmetros físicos e as características de cada região para a qual é feita a previsão (JACOBSON, 1999; LIOU, 1980).

Assim, ajustar um modelo numérico em meteorologia e sistematizar as previsões para a cadeia mineral da Vale têm potencial para suprir a ausência de informações sobre o estado futuro da atmosfera, em um horizonte de curto prazo (poucos dias). Além disso, realizar pesquisa científica em modelagem numérica em meteorologia aplicada representa um fator inovador para a indústria mineral da Vale, especialmente no Corredor Norte, localizado no leste da Amazônia, onde as informações meteorológicas são escassas.

Um modelo amplamente usado por especialistas em meteorologia é o *Weather Research and Forecasting* (WRF), que se trata de um modelo numérico regional usado mundialmente tanto para a pesquisa, quanto para a previsão de tempo operacional. Os suportes do WRF são feitos por uma comunidade, uma vez que o modelo é de código livre e compartilhado, com desenvolvimento distribuído e suporte centralizado (SKAMAROCK *et al.*, 2008).

Os componentes do sistema de modelagem com o WRF consistem na fase de pré-processamento por meio do WPS (*WRF Pre-Processing System*), baseado na interpolação de dados reais para as rodadas de previsão numérica de tempo e no programa que adiciona mais observações na análise do modelo; na fase de processamento do modelo WRF, que inclui a inicialização de programas para dados idealizados e reais (*real.exe* e *ideal.exe*) e um programa para a integração numérica (*wrf.exe*); além dos módulos separados para assimilação de dados WRFDA (*WRF Data Assimilation*), módulo para análise química do modelo (WRF-Chem) e modelos de floresta para incêndios florestais (WRF-Fire). Essas etapas são consolidadas na fase de pós-processamento e visualização, que pode ser feito por uma série de ferramentas.

Por ser de código livre e permitir adaptações em seus parâmetros físicos e dinâmicos para as condições de um dado domínio, além de possuir módulos específicos para a assimilação

de dados ambientais, módulo químico e simulações de regiões com potencial para incêndios florestais, o WRF representa uma excelente ferramenta para previsões numéricas de tempo para cadeia mineral. Através de técnicas de *downscaling*, é possível alcançar altas resoluções espaciais com o modelo, como poucos quilômetros e até metros. Para o caso da cadeia mineral, onde determinadas atividades ocorrem em escala local, como as operações em pátios, minas e usinas, a capacidade do modelo WRF em gerar informações detalhadas torna evidente que, com a devida calibração por pesquisa científica aplicada, pode se tornar o principal instrumento para os tomadores de decisões, no que tange às previsões meteorológicas de curto prazo.

5.2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING

Nas seções anteriores, foi discutido que os dados meteorológicos observados e previstos podem ser oriundos de satélites, balões meteorológicos, sensores em superfície, sistemas de radar e previsões meteorológicas por modelagem numérica.

Com um conjunto de dados cada vez maior, mudanças nas condições atmosféricas, a precisão das previsões pode oscilar, especialmente por períodos mais longos. Para estes casos, Inteligência Artificial (IA) pode provar ser uma alternativa ou uma metodologia que agrega valor no aumento da precisão e confiabilidade da previsão do tempo (HOLMSTROM *et al.*, 2016).

As previsões de IA são baseadas principalmente em algoritmos de aprendizado de máquina, do inglês *machine learning*. Ao processar dados mais complexos em um período mais curto de tempo usando princípios de regressão linear, os meteorologistas podem fazer previsões com precisão. O aprendizado de máquina também pode ajudar com outras previsões, incluindo temperatura, altura de onda e precipitação. As técnicas de IA para previsões meteorológicas são Rede Neural Artificial, Rede Neural de Conjunto, Rede de Retropropagação, Rede de Função de Base Radial, Rede Neural de Regressão Geral, Algoritmo Genético, Perceptron Multicamadas e Agrupamento Fuzzy (ANALYTICS INSIGHT, 2020).

As técnicas de aprendizado de máquina usam algoritmos baseados na combinação de dados de diversas naturezas, as quais incluem aqueles listados no presente relatório técnico. Os recursos de previsão do tempo da IA são multifacetados. Desde ajudar na gestão de desastres a logística, indústria de varejo à agricultura e podendo contribuir também no planejamento logístico da cadeia mineral. Existem muitas aplicações de IA na previsão do tempo e do clima. Por exemplo, a IA está sendo testada atualmente na assimilação de dados, onde as observações

são combinadas com os dados de previsão e para emular componentes individuais do modelo, como nuvens em modelos convencionais (HAUPT *et al.*, 2018).

Contudo, apesar de aumentar os níveis de precisão, a previsão do tempo nunca será 100% exata. O conceito de IA tem uma desvantagem fundamental quando comparado aos modelos físicos e dinâmicos: enquanto os modelos físicos visam simular todas as características das previsões, com base em equações governantes da atmosfera, as quais são integradas no tempo, o método de IA baseia-se em aprender o comportamento de um sistema a partir dos dados como uma “caixa preta”. Nestes casos, pode haver dados adequados insuficientes para fazer previsões para todo o sistema terrestre com todas as suas interações complexas. Particularmente na Amazônia, onde a densidade de informações é baixa, isso pode representar um problema real.

Para a cadeia mineral, o uso de técnicas de inteligência artificial pode ser aplicado em conjunto com a modelagem numérica regional, no sentido de reunir informações históricas combinadas estatisticamente com as previsões geradas a partir da integração numéricas das equações físicas que governam o movimento da atmosfera. Assim, entende-se que o conhecimento do comportamento climatológico nas escalas regionais e locais de diversas variáveis meteorológicas e um modelo numérico adaptado para a região de interesse podem reduzir ainda mais as incertezas nos prognósticos de tempo com horizonte de curto prazo.

6 INTEGRAÇÃO DAS INFORMAÇÕES METEOROLÓGICAS E APLICAÇÕES PARA A CADEIA MINERAL DA VALE

6.1 CENTRO DE MONITORAMENTO ATMOSFÉRICO

Em meteorologia, assim como em outras áreas do conhecimento, o uso integrado de diversas ferramentas é o procedimento mais adequado para o meteorologista diagnosticar e prognosticar as condições de tempo em determinada região. Como a atmosfera é um fluido dinâmico, as condições de tempo podem mudar drasticamente em poucos dias, horas e até minutos.

A cadeia mineral da Vale, por sua vez, acontece na escala de poucos quilômetros e até metros, como as manutenções de equipamentos, ferrovia, esteiras, usinas, operações em guindastes, drenagem de bacias de decantação, embarque de minério nos porões de navios entre outras atividades que invariavelmente sofrem impactos diretos e indiretos das condições atmosféricas. Assim, mitigar as consequências no âmbito operacional de tempestades, incidência de raios, rajadas de vento, baixas condições de visibilidade por nevoeiro, agilizar

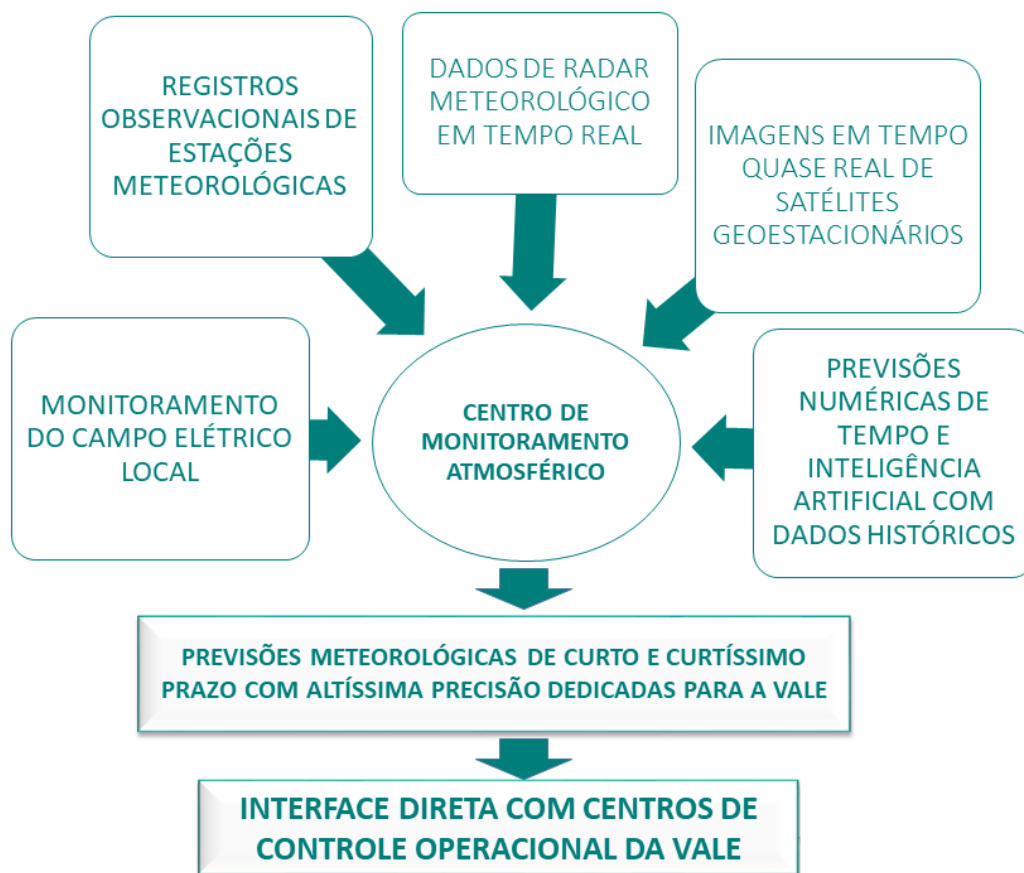
ações de combate a incêndios florestais entre outras, são fundamentais não apenas para otimizar as atividades operacionais da cadeia mineral, com a redução dos falsos alertas vermelho, mas principalmente para salvaguardar a segurança de empregados da Vale que exercem atividades de risco.

Neste sentido, a estruturação de um Centro de Monitoramento Atmosférico (CMA), equipado com informações meteorológicas observacionais e previsões de tempo regionalizadas e disponíveis em tempo real, bem como com uma equipe de especialistas em meteorologia dedicados às operações da Vale, têm alto potencial para aumentar a precisão das previsões de tempo nas escalas de curto (poucos dias) e curtíssimo prazo (horas).

A priori, o CMA precisa funcionar durante 24 horas por dia, 7 dias por semana, especialmente no período chuvoso, que ocorre na maior parte do primeiro semestre no Corredor Norte da Vale e é o período onde acontece o maior número de interrupções operacionais, tanto em áreas de mina quanto no porto. Durante o segundo semestre, as atividades no CMA podem reduzir por motivo da redução da frequência dos sistemas atmosféricos indutores de mau tempo na região do Corredor Norte. Entretanto, destaca-se que o trimestre julho, agosto e setembro é caracterizado pelo aumento dos focos de incêndios florestais na região de Carajás.

Portanto, aderente aos anseios da Vale com vistas à otimização do tempo de produtividade, redução das perdas na cadeia produtiva e aumento da segurança ocupacional, a proposta do CMA visa uma dedicação exclusiva de uma equipe de especialistas em meteorologia totalmente voltados para o Corredor Norte, devidamente providos de ferramentas de monitoramento atmosférico e previsão de tempo e com interface direta com os Centro de Controle Operacionais locais (Figura 10). O detalhamento do CMA não é objetivo do presente relatório, no entanto, caso haja interesse, a proposta do CMA poderá ser aprofundada em outro documento.

Figura 11 - Estrutura simplificada do funcionamento de um Centro de Monitoramento Atmosférico na Vale.



Fonte: próprio autor (2020).

6.2 APLICAÇÕES PARA A CADEIA MINERAL DA VALE

Abaixo, são listadas algumas aplicações das soluções em meteorologia para a cadeia mineral no Corredor Norte, vislumbrando os benefícios para a área operacional e as oportunidades para Vale no horizonte temporal de curto e curtíssimo prazo.

- A concretização do projeto do Centro de Monitoramento Atmosférico pode tornar a Vale uma referência na indústria mineral, como a única no mundo a utilizar de forma integrada a seus processos operacionais, tecnologias e conhecimentos em meteorologia de maneira a otimizar sua cadeia produtiva;
- Pela previsão da ocorrência de tempestades sobre pátios de estocagem de minério em Carajás, podem ser aplicados polímeros em pilhas de minério para a redução de umidade, o que pode melhorar a qualidade do produto;

- Monitoramento de pilhas a fim de evitar o desmoronamento e avalanches nos pátios de estocagem;
- Áreas de acesso dos caminhões *offroad* podem ser negativamente influenciadas pelas condições de tempo e o conhecimento prévio das características dos sistemas atmosféricos que passarão pelos locais podem contribuir para o reinício com segurança das atividades nas minas;
- Considerando toda a cadeia produtiva coberta por radares meteorológicos e uma boa densidade de estações meteorológicas automáticas, é possível traçar um plano de velocidade para o trem da Vale durante o trajeto entre a mina e o porto, onde os eventos meteorológicos indutores de precipitação podem umidificar o minério transportado e prejudicar a qualidade do produto;
- Planejamento logístico de manutenção de equipamentos, usinas, ferrovias, correias transportadoras entre outros, com base nas previsões meteorológicas de curto/curtíssimo prazo mais precisas;
- Operações em guindastes com maior segurança para os empregados da Vale e terceirizados, pelo monitoramento em tempo real das condições de chuva e vento;
- Monitoramento dos índices pluviométricos em áreas de barragens;
- Monitoramento dos sistemas atmosféricos que podem induzir precipitação nos píeres do porto Ponta da Madeira durante o embarque de minério nos porões dos navios, de modo a reduzir a exposição do produto a um maior teor de umidade;
- Redução do tempo de inatividade operacional em diversos processos da cadeia mineral;
- Redução do *Transportable Moisture Limit* (TML) do minério embarcado nos porões nos navios;

- Diminuição do período de alertas vermelhos acionados, uma vez que os mesmos serão mais aderentes com o estado real da atmosfera;
- Monitoramento de bacias de decantação, as quais podem transbordar durante eventos extremos de precipitação e prejudicar comunidades vizinhas aos sítios da Vale;
- Comunicação direta do CMA com os Centros de Controle Operacionais (CCO) e/ou com os Centros de Operações Integradas (COI) para agilizar a emissão de alertas e comprometimento dos especialistas com as atividades da Vale;
- Aumentar a segurança dos empregados da Vale, pela maior precisão das previsões meteorológicas e, conseqüente, maior confiabilidade;
- Aprimorar as tomadas de decisões diante de eventos meteorológicos danosos às atividades operacionais;
- Parceria com o ITV, que desenvolve pesquisa em modelagem numérica regional dedicada às bases operacionais da Vale, visando o fornecimento de previsões meteorológicas de curto prazo sob medida para a empresa;
- Melhorar o desempenho das previsões meteorológicas de curto prazo elaboradas pelo ITV para a Vale, utilizando como *input* nos modelos numéricos, os dados do radar do CMA;
- Possibilidade de utilizar o radar meteorológico para melhorar a segurança da navegação aérea em Carajás e emitir alertas de deslizamento de taludes em áreas de risco (ex: ferrovia, ramal e comunidades);
- A Vale também poder ser reconhecida por implantar sistemas de alerta meteorológico mais avançados, proporcionando maior segurança para seus empregados, bem como para a população no entorno de seus empreendimentos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente relatório técnico apresentou as principais ferramentas de monitoramento atmosférico e previsão nas escalas de tempo em curto e curtíssimo prazo, focados para a cadeia mineral. Abordou-se a estrutura de funcionamento das ferramentas, bem como as aplicações e benefícios para a Vale.

Visando o desenvolvimento de rotinas operacionais dedicadas para a Vale, foi proposto que as ferramentas sejam expandidas para cobrir toda a região do Corredor Norte e integradas em Centro de Monitoramento Atmosférico (CMA), com interface direta com os Centro de Controle Operacional locais das minas e porto.

Deste modo, entende-se que a geração do conhecimento sob medida para a Vale, considerando as suas especificidades locais, é o modo mais adequado para reduzir as incertezas inerentes às previsões meteorológicas nas escalas de curto e curtíssimo prazo.

O advento das tecnologias propostas no presente documento, aliado ao CMA composto por especialistas na área de meteorologia têm alto potencial para reduzir os alertas vermelhos associados ao tempo adverso, aumentar a segurança de empregados, melhorar processos impactados aos fenômenos atmosféricos e reduzir a umidade do minério transportado, garantindo assim, a competitividade da Vale nos setores logísticos e operacionais.

REFERÊNCIAS

- ANALYTICS INSIGHT. **How Is AI Empowering the Weather Forecasting Technology?** Artificial intelligence forecast latest news. Disponível em: <https://www.analyticsinsight.net/ai-empowering-weather-forecasting-technology/>. Acesso em: 18 dez. 2020.
- CAMPBELL SCIENTIFIC. **CS110: Electric Field Meter Sensor – Lightning Warning Sensors**. Disponível em: <https://www.campbellsci.com.br/cs110>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- CHAUHAN, D.; THAKUR, J. Data Mining Techniques for Weather Prediction: A Review. **International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication**, v. 2, p. 2184-2189, 2014.
- CUMMINS, K. L. *et al.* Modeling and a calibration of Vaisala's operational long range lightning detection network. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 20., 2008, Tucson, AZ, USA. **Proceedings...** Tucson: Vaisala, 2008.
- GAMIC. **GAMIC Multifunctional Weather Radar System: Solid State X-Band Doppler Weather Radar with Dual Polarization**. Disponível em: https://www.gamic.com/doc/GAMIC_GMWR-400_1000-SST.pdf. Acesso em: 10 dez. 2020.
- HAUPT, E. S.; COWIE, J.; LINDEN, S.; MCCANDLESS, T.; KOSOVIC, B.; ALESSANDRINI, S. **Machine Learning for Applied Weather Prediction**. IEEE 14th International Conference on e-Science, 2018.
- HOLMSTROM, M.; LIU, D.; VO, C. **Machine Learning Applied to Weather Forecasting**. 2016. Disponível em: <http://cs229.stanford.edu/proj2016/report/HolmstromLiuVo-MachineLearningAppliedToWeatherForecasting-report.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2020.
- JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of atmospheric modeling**. Cambridge, USA: Cambridge University Press, 1999.
- KUMMEROW, C. *et al.* The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission. Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39 n. 12, p. 1965-1982, 2000.
- LIU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. California, USA: Academic Press, 1980.
- MAGINA, F. C. **Sistema de Alerta de Ocorrência de Raios Utilizando Rede de Sensores de Campo Elétrico Atmosférico**. 2016. 118 f. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L6ACE5>. Acesso em: 10 dez. 2020.
- OLIVEIRA, F. P.; AMORIM, H. S.; DEREZYNSKI, C. P. Investigando a atmosfera com dados obtidos por radiossondas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 40, n. 3, e3503, 2018.
- ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 56, p. 527-530, 1975.

PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: INPE, 2000. 185 p. ISBN 85-901719-1-4. (INPE-8542-RPQ/724).

POELMAN, D. R. **On the Science of Lightning: An Overview**. L’Institut Royal Meteorologique de Belgique. Bruxelles, p. 62, 2010.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONCALVES, L. G. G. de; VILA, D. A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 885-894, 2010

SCIENCE ON A SPHERE (SOS). **Description of Geostationary Satellites**. National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <https://sos.noaa.gov/datasets/geostationary-satellites/>. Acesso em: 15 dez. 2020.

SISTEMA DE MONITORAMENTO AGROMETEOROLÓGICO (SMA). **GOES 16 CPTEC**. Disponível em: http://sma.fundacaoabc.org/monitoramento/satelite/goes_16_cptec. Acesso em 14 de dezembro de 2020.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; HUANG, X. Y.; WANG, W.; POWERS, J. G. **A Description of the Advanced Research WRF Version 3**, NCAR TECHNICAL NOTE, NCAR/TN-475 STR, p. 113, 2008.

SQUITTER - METEOROLOGIA E HIDROLOGIA. **Radiossondas (Estações Meteorológicas de Altitude)**. Disponível em: <http://www.squitter.com.br/produtos/10/radiossondas-estacao-meteorologica-de-altitude>. Acesso em: 17 dez. 2020.

VAISALA. **Weather Radar Systems: An Overview**. Disponível em: <https://www.vaisala.com/en/products/devices/weather-radar-products/weather-radar-systems>. Acesso em: 15 dez. 2020.

VALE. **Saiba mais sobre os negócios da Vale**: minério de ferro e pelotas. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 15 dez. 2020.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Automatic Weather Station (AWS) web portal**. Disponível em: <https://www.wmo.int/pages/prog//www/IMOP/AWSportal/AWSportal.html>. Acesso em: 16 dez. 2020.

_____. **Guidelines for Nowcasting Techniques**. Chairperson, Publications Board. ed. 2017, n. 1198, 2017.