

Mestrado Profissional
Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais

AMANDA SOUZA CAMPOS

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA
PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM CARAJÁS-PA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, área de Ciências Ambientais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV).

Orientador: Pedro Walfir M. e Souza Filho, Dr.
Coorientadora: Cláudia Priscila W. da Costa, Dra.

Belém / PA

2020

AMANDA SOUZA CAMPOS

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA
PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM CARAJÁS-PA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, área de Ciências Ambientais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV).

Data da aprovação:

Banca examinadora:

Dr. Pedro Walfir M. e Souza Filho
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dra. Cláudia Priscila Wanzeler da Costa
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr. Everaldo Barreiros de Souza
Membro Externo – Universidade Federal do Pará (UFPA)

Dr. Douglas Batista da Silva Ferreira
Membro Interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C198 Campos, Amanda Souza
Avaliação do impacto de variáveis meteorológicas na produção de Minério de Ferro em Carajás -PA/ AmandaSouza Campos. – Belém: ITV, 2020.
27 p: il.

Dissertação (mestrado) -- Instituto Tecnológico Vale, 2020.
Orientador: Pedro Walfir M. Souza Filho, Dr.
Coorientadora: Cláudia Priscila W. da Costa, Dra.

1. Degradação do solo – Carajás (PA). 2. Climatologia. 3. Preservação ambiental - Mudanças climáticas. I. Souza Filho, Pedro Walfir Martins e. II. Costa, Cláudia Priscila Wanzeler da. III. Título.

CDD 23. Ed. 551.3098115

Bibliotecário(a) responsável: Nisa Gonçalves CRB-2 / 525

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, que em todos os momentos esteve ao meu lado e nunca soltou minha mão, me ajudando trilhar mais esse caminho na vida acadêmica.

RESUMO

A pesquisa teve por objetivo investigar as relações entre as variáveis meteorológicas e a produção de minério de ferro, analisando o regime de chuva sobre a região de Carajás no ano 2017, em intervalos de tempo: mensal, quinzenal, semanal, diário e horário. Foram aplicadas técnicas estatísticas: test t de *Student* e correlação de Pearson, para identificar a relação das variáveis meteorológicas e a produção mineral. Na avaliação dos critérios de risco foi utilizada uma formula adaptada do IAC (Índice de Anomalia Chuva). Os resultados para o período chuvoso mostram que a chuva é a principal variável meteorológica a interferir na produção mineral. Para o período seco, a umidade relativa do ar é quem interfere negativamente na produção, no entanto, não provoca reduções acentuadas. Através dos critérios de riscos baseados em limiares de precipitação, percebeu-se que chuvas entre 0 – 15 mm/h, impactam muito baixo na produção, enquanto chuvas de 15-30mm/h tem impacto de 30%. Ocorrências de chuva entre 30–60mm/h, tem impacto moderado, enquanto chuvas acima de 60mm tem alto impacto na produção, podendo inclusive forçar paralisações. Concluiu-se que há correlação estatisticamente significativa entre as variáveis meteorológicas e a produção de minério de ferro, sendo relação direta para temperatura e inversa para chuva e umidade relativa do ar.

Palavras-chave: Variáveis meteorológicas. Produção mineral. Impacto. Carajás – Pará.

ABSTRACT

The research aimed to investigate the relationships between meteorological variables and iron ore production, analyzing the rainfall regime over the Carajás region in 2017, in time intervals: monthly, biweekly, weekly, daily and hourly. Statistical techniques were applied: Student's t test and Pearson's correlation, to identify the relationship between meteorological variables and mineral production. In the evaluation of the risk criteria, a formula adapted from the IAC (Rain Anomaly Index) was used. The results for the rainy season show that rain is the main meteorological variable that interferes with mineral production. For the dry period, the relative humidity of the air is the one that interferes negatively in the production, however, it does not cause sharp reductions. Through the risk criteria based on precipitation thresholds, it was noticed that rainfall between 0 - 15 mm / h, has a very low impact on production, while rainfall of 15-30 mm / h has a 30% impact. Rain events between 30–60mm / h have a moderate impact, while rains above 60mm have a high impact on production, and can even force downtime. It was concluded that there is a statistically significant correlation between meteorological variables and iron ore production, with a direct relationship for temperature and an inverse relationship for rain and relative humidity.

Keywords: Meteorological variables. Mineral production. Impact. Carajás – Pará.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Transbordamento do Rio Vermelho em maio de 2009 (reportagem do dia 08 de maio de 2009, atualizado em 10 de novembro de 2011). 12
- Figura 2** - Município de Barcarena – PA alagado após ser atingido por chuvas fortes em fevereiro de 2018 (reportagem 22 de fevereiro de 2018). 13

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação horária entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva horária (PRECh), temperatura do ar horária (TARh), umidade relativa do ar horária (URh) e produção mineral horária (PRODh).....	18
Tabela 2 - Correlação diária entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva diária (PRECd), temperatura do ar diária (TARd), umidade relativa do ar diária (URd) e produção mineral diária (PRODd).....	19
Tabela 3 - Correlação semanal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva semanal (PRECs), temperatura do ar semanal (TARs), umidade relativa do ar semanal (URs) e produção mineral semanal (PRODs).....	19
Tabela 4 - Correlação quinzenal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva quinzenal (PRECq), temperatura do ar quinzenal (TARq), umidade relativa do ar quinzenal (URq) e produção mineral quinzenal (PRODq).....	19
Tabela 5 - Correlação mensal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva mensal (PRECM), temperatura do ar mensal (TARm), umidade relativa do ar mensal (URm) e produção mineral mensal (PRODM)	20
Tabela 1 - Teste-t bicaudal presumindo variâncias diferentes entre as amostras das variáveis meteorológicas e a produção mineral.....	20
Tabela 7 - Classes de critério de risco operacional na produção de mineral em Carajás-PA associado aos volumes de chuva por hora.	21
Tabela 8 - Classes de critério de risco operacional e porcentagem de impacto da umidade relativa do ar na produção de minério de ferro.	22

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	09
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
3	MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1	MATERIAIS	14
3.1.1	Dados meteorológicos	14
3.1.2	Dados de produção mineral	15
3.2	MÉTODO	15
3.2.1	Coefficiente de correlação de Pearson	15
3.2.2	Teste de hipóteses – t de Student	16
3.2.3	Cálculo índice de impacto	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
4.1	ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DA PRODUÇÃO MINERAL DE CARAJÁS E VARIÁVEIS METEOTOLÓGICAS	18
4.2	TESTE DE HIPÓTESES	20
5	CLASSES DE IMPACTO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA PRODUÇÃO MINERAL	21
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
	REFERÊNCIAS	23
	APÊNDICE	26

1 INTRODUÇÃO

A economia brasileira é fortemente influenciada pela atividade mineradora, que representa cerca de 5% do PIB nacional, contribuindo de forma significativa para o equilíbrio econômico do Brasil por atrair investimentos e pela geração de empregos (VALE, 2017). De acordo com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio exterior, o Brasil desempenha um papel importante na indústria mineral mundial, com produção de minério concentrada principalmente nos Estados de Minas Gerais e Pará. Estes Estados fazem parte da área de atuação da empresa Vale S.A, que é a maior empresa mineradora do mundo, com produção média anual de 348,8 milhões de toneladas métricas de minério de ferro (VALE, 2017). No entanto, a mineração é um setor particularmente vulnerável às intempéries de tempo e que por isso pode sofrer perdas, tanto materiais, quanto humanas, principalmente em virtude da ocorrência de eventos extremos de chuva.

Os processos logísticos e operacionais da cadeia de mineração acontecem a céu aberto e por isso, estão expostos a mecanismos atmosféricos causadores de precipitação, que impactam direta e/ou indiretamente no quantitativo diário da produção de minério de ferro.

O trabalho aqui apresentado, dará enfoque ao complexo minero-logístico da empresa Vale S.A localizado na Amazônia Oriental, região Norte do Brasil, a qual está sujeita a diferentes mecanismos produtores de chuva, responsáveis pela variabilidade sazonal, sendo os principais a Zona de Convergência do Atlântico Sul (CARVALHO; JONES; LIEBMANN 2004), Zona de Convergência Intertropical (WALISER; GAUTIER, 1993), Linhas de Instabilidade (COHEN; SILVA DIAS; NOBRE, 1995).

A variação interanual das chuvas na região Amazônica, está relacionada a ocorrência de eventos ENOS (El Niño/Oscilação Sul). Este fenômeno está associado a alterações dos padrões normais da temperatura das águas superficiais e sub-superficiais do Pacífico equatorial central e leste, promovendo alteração do padrão dos ventos alísios no Pacífico equatorial, sendo capaz de influenciar o clima e o tempo em escala global. Além disto, este fenômeno pode ser identificado pela variação da pressão dos setores centro-leste e oeste do Pacífico tropical. O ENOS pode ser classificado em El Niño (EN) ou La Niña (LN), Em anos de EN ocorre redução do volume das chuvas na região Amazônica, o inverso ocorre durante anos de LN (SOUZA *et al.*, 2000; ARAÚJO *et al.*, 2013; TEDESCHI, 2013).

Souza *et al.* (2014), analisaram as características climatológicas do regime de precipitação da região de Carajás, no sudeste paraense, área de atuação da empresa Vale S.A

para os anos de 1990 a 2012. Observaram que o regime chuvoso se distribui entre os meses de janeiro a maio, e o período seco, nos meses de junho a outubro.

De acordo com Lopes, Souza e Ferreira (2013), o sudeste paraense sofre influência de sistemas frontais, além de apresentar ocorrência de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs), responsáveis por elevados índices pluviométricos.

Miranda (2016) afirmou que o padrão de clima regional interfere em mais da metade na produção de minério de ferro, uma vez que o efeito sazonal climático ocorre de forma inversa ao volume anual da produção.

Esta pesquisa destina-se a procurar respostas para a seguinte pergunta: como se dá a relação do minério de ferro com as variáveis meteorológicas e qual o limiar tolerável dessa relação para que não haja perdas significativas na produção de minério na Província Mineral de Carajás?

Neste trabalho, serão usados dados horários de produção de minério de ferro cedidos pela empresa Vale S.A e dados horários de variáveis meteorológicas disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia para o ano de 2017.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Katz (2014) fez uma síntese com os fatos mais significativos sobre a história da mineração brasileira e sua repercussão no mercado mundial, enfatizando a importância da atividade mineradora para a economia do país, desde o início da exploração das jazidas de ferro de Minas Gerais em meados de 1900s, e seu crescimento em 1942, até a descoberta do potencial mineral amazônico, em Carajás-PA, vinte anos mais tarde. O autor destaca ainda que na época presente, a mineração apresenta um ciclo virtuoso, pois reúne uma gama de conhecimentos multidisciplinares, capazes de garantir o sincronismo e fluxo contínuo da produção, convergindo a um progresso frente a fronteira da tecnológica de engenharia, pesquisa e exploração mineral.

O Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio exterior, destacou o Brasil como um ator importante na indústria mineral mundial, com desempenho robusto na balança comercial, apontado para um maior crescimento nas exportações e corrente de mercado, motivando o setor econômico, com mais empregos e mais riqueza (MIXVALE, 2017).

Em âmbito nacional, as commodities contribuem com mais de 5% no PIB, impactando de forma positiva no bem-estar da sociedade e equilíbrio econômico do país. No entanto, este é um setor que sofre com as variações climáticas, pois extremos de precipitação podem acarretar danos de longo prazo e muitas vezes irreversíveis, uma vez que processos logísticos e operacionais da mineração a céu aberto estão suscetíveis às intempéries do tempo, passíveis a paradas ou até mesmo perdas na produção.

Nos últimos anos foram registrados pela mídia nacional, vários episódios de eventos extremos de chuvas que causaram transtornos a atividade mineradora.

Em 2009 eventos severos de chuva na região de Marabá, sudeste do estado do Pará, culminaram na inundação do Rio Vermelho, deixando a Estrada de Ferro Carajás submersa em mais de 30 cm de altura, resultando em transtornos a população local, além de comprometer o transporte de minério de ferro da mineradora Vale S.A. (OGLOBO, 2009) (Figura 1).

Figura 1 - Transbordamento do Rio Vermelho em maio de 2009 (reportagem do dia 08 de maio de 2009, atualizado em 10 de novembro de 2011).



Fonte: apude Agência Vale do Rio Doce.

Em 2012 no Estado de Minas Gerais, as indústrias mineradoras tiveram que parar a produção devido a extremos de precipitação (VEJA, 2012).

No ano de 2013, em entrevista ao jornal digital Exame, a empresa Vale S.A, afirmou um recuo de 9,1% na produção mineral, no segundo trimestre do ano, devido ao prolongado período de chuvas no Norte do Brasil (EXAME, 2013).

Em 2018 o município de Barcarena, pertencente a mesorregião metropolitana de Belém, capital do estado do Pará, considerado um importante polo industrial para a região, sofreu grandes impactos com eventos de chuvas fortes, que ocasionou transbordamento da barragem de rejeitos (Figura 2), e conseqüentemente grandes transtornos à população local (G1, 2018).

Figura 2 - Município de Barcarena – PA alagado após ser atingido por chuvas fortes em fevereiro de 2018 (reportagem 22 de fevereiro de 2018).



Fonte: Gl.

As chuvas da região Amazônica são moduladas por diferentes sistemas atmosféricos precipitantes. A variabilidade interanual das chuvas desta região está associada à ocorrência de eventos ENOS (El Niño/Oscilação Sul) que modulam os sistemas meteorológicos atuantes, de modo a intensificar ou desintensificar a precipitação (GRIMM *et al.*, 2000; SOUZA *et al.*, 2000; ARAUJO *et al.*, 2013). Os principais sistemas atmosféricos que atuam nesta região são:

- *Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)*: é considerada a principal fonte de precipitação para os trópicos, é um sistema de ordem planetária, que atua nos meses de verão austral, sendo responsável por elevadas quantidades pluviométricas, capazes de gerar diversos transtornos socioambientais (MOURA; VITORINO, 2012).
- *Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)*: este sistema tem como principal característica a persistência de uma banda de nebulosidade e precipitação, orientada no sentido noroeste-sudeste, estendendo-se até o Oceano Atlântico Sul, atua nos meses de primavera e verão austrais, ocasionando altos níveis pluviométricos (GRIMM; SILVA DIAS, 1995; FERREIRA; SANCHES; SILVA DIAS, 2004).
- *Linhas de Instabilidade (LI's)*: são linhas descontínuas de nuvens de convecção profunda geradas no final da tarde, pelo contraste térmico diário entre oceano e continente, com um tempo de vida estimado em 9 horas. Propagam-se para dentro do continente com orientação noroeste-sudeste em direção ao sudoeste, são responsáveis por

aproximadamente 40% da chuva que cai na região Amazônica e podem ocorrer durante todo o ano (COHEN,1989; ALCÂNTARA,2011).

- *Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM)*: são compostos por aglomerados de nuvens de convecção profunda que podem iniciar tanto nas primeiras horas da tarde, bem como no início da noite e perdurar, até a metade do dia seguinte. O tempo de duração destes sistemas está associado ao seu tamanho. No entanto, seu tempo de vida médio é estimado entre 10 a 20 horas com maturação durante a madrugada (MACHADO *et al.* 1998; CAMPOS; EICHHOLZ, 2011).

Segundo Sodré *et al.* (2015) a formação dos SCM's no sudeste do Pará, depende diretamente de sistemas sazonais, a exemplo ZCAS. Os autores destacaram ainda que, a ação antrópica influencia a formação e o desenvolvimento dos SCM's, uma vez que a maior parte dos sistemas observados na região, tenderam se formar sobre áreas devastadas.

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 MATERIAL

Este trabalho deu enfoque a Serra Norte da Província Mineral de Carajás, Sudeste do Pará, onde estão localizados os depósitos de minério de ferro N4 e N5 e as usinas de beneficiamento da empresa VALE S.A.

3.1.1 Dados meteorológicos

As análises meteorológicas foram feitas através dos dados coletados pelas estações meteorológicas, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instaladas na área da mina. Estas estações coletam a cada hora, informações de variáveis meteorológicas, tais como: temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade do vento, radiação solar.

Os dados das estações meteorológicas automáticas são registrados em horário UTC (*Universal Time Coordinated*, sigla em inglês) e devem ser corrigidos para hora local. Para a nossa região, esta correção se dá, subtraindo em três horas o horário do registro.

3.1.2 Dados de produção mineral

As usinas de beneficiamento são distribuídas na área da mina, organizadas em números de um a quatro, sendo as três primeiras divididas em britagem primária, secundária e terciária e a última é responsável pela rebitagem. A britagem é o processo pelo qual o minério extraído é fragmentado até atingir um tamanho ótimo que atenda as especificações de comercialização, caso os grãos de minério não atendam às exigências de mercado, eles são submetidos a rebitagem. Os dados das usinas são registrados a cada hora local, não necessitando de correção de horário. No trabalho, será utilizado os dados beneficiamento da USINA I.

É importante destacar que os dados utilizados são referentes ao ano de 2017, período o qual se deu início ao registro horário do beneficiamento do minério de ferro.

3.2 MÉTODO

Para analisar a relação entre as variáveis meteorológicas e a produção de minério de ferro, as amostras foram agrupadas em acumulados: horário, diário, semanal, quinzenal e mensal. A intensidade desta correlação pode ser classificada como fraca, moderada ou forte, podendo ser direta, representada pelo sinal positivo ou inversa (negativo). Nesta análise foram adotados o coeficiente de correlação de Pearson e o teste de hipóteses *T-Student*. O impacto desta relação analisado por meio da fórmula do Índice de Anomalias de Chuva (IAC) proposto por Rooy (1965), posteriormente adaptada por Freitas (2005) e Noronha *et al.* (2016).

3.2.1 Coeficiente de correlação de Pearson

Segundo Crespo (2004), o coeficiente de correlação de Pearson (ρ) mede o grau de correlação linear entre duas variáveis, e a direção dessa relação. É um valor adimensional que varia entre -1 e 1, e vai refletir a intensidade dessa correlação (1). Para $\rho = 1$, significa que existe uma correlação perfeita positiva entre as variáveis, porém, para $\rho = -1$ essa correlação é perfeita negativa, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui, e $\rho = 0$ mostra que essas variáveis não são linearmente dependentes.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

Onde X assume o valor de cada variável meteorológica e Y a produção mineral. \bar{X} e \bar{Y} são as médias aritméticas, n o tamanho da amostra e i o ano. As análises de correlação foram realizadas nas escalas de tempo: horário, semanal, quinzenal e mensal. A significância estatística das séries temporais será determinada através do teste t de Student.

3.2.2 Teste de hipóteses - t de Student

De acordo com Costa Neto (2002), teste t de Student é um teste de hipóteses sobre os parâmetros populacionais que usa conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma hipótese, que é considerada válida até que se prove o contrário.

Considerando H_0 a hipótese existente a ser testada e H_1 a hipótese alternativa, o teste irá levar a aceitação ou a rejeição de H_0 , e conseqüente negação ou afirmação de H_1 . No entanto, a decisão de aceitar ou rejeitar H_0 pode depender do nível de significância (α) adotado, ou seja, da probabilidade de se rejeitar incorretamente uma hipótese existente quando esta é verdadeira. O valor de α é comumente fixado em 5%. Entretanto, deve-se considerar a probabilidade de se aceitar uma hipótese nula quando esta é falsa. Neste caso, deve-se analisar o nível de confiança ($1 - \alpha$) desta hipótese, normalmente fixado 95%.

No trabalho, será adotado o teste t com desvio padrão (σ) da população desconhecido.

$$t_{n-1} = \frac{\bar{x} - \mu_0}{S_x / \sqrt{n}} \quad (2)$$

Como não se sabe o desvio padrão da população, seleciona-se uma amostra aleatória para que assim, possa determinar o desvio padrão amostral (S_x), para uma determinada média amostral (\bar{x}) de tamanho n .

As hipóteses a testar serão:

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0$$

H_0 será rejeitada se a variável analisada (μ), assumir valor diferente de μ_0 que é um valor fixado para comparação com a média da amostra. Para a interpretação do teste, as hipóteses assumirão que:

H_0 : não há interação entre as variáveis

H_1 : há interação entre as variáveis

O nível de significância e o nível de confiança serão, respectivamente:

$$\alpha = 0,05$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

É válido ressaltar que, a hipótese nula será rejeitada, se o p-valor encontrado for menor que 0,05, ou seja, 5%.

3.2.3 Cálculo índice de impacto

Para analisar o impacto (I) das variáveis meteorológicas sobre a produção mineral, foi utilizada a equação do índice de anomalia chuva (IAC), desenvolvido por Rooy (1965), posteriormente adaptado por Freitas (2005) e Noronha *et al* (2016), expresso por:

$$IAC=3 \left[\frac{(X - \bar{X})}{(\bar{M} - \bar{X})} \right] \quad (3)$$

A equação (3) utiliza-se do valor acumulado de chuva anual (X), média histórica climatológica (\bar{X}) e média dos dez maiores valores do ano analisado (\bar{M}). O valor 3 na equação (3) é um limite arbitrário atribuído a média dos dez maiores valores da série de dados.

O cálculo de IAC tem sido utilizado como importante ferramenta de análise da chuva em diferentes escalas espaciais e temporais, com a finalidade verificar a influência de fenômeno ENOS em determinadas regiões.

Com a intenção de identificar a real influência das variáveis meteorológicas sobre a produção mineral de Carajás e determinar os limiares de risco operacional, a presente pesquisa utilizou a equação (3) de forma adaptada (equação 5) a fim de atender as necessidades da série temporal estudada.

A equação (4), utiliza os valores da chuva horária ou diária (X), chuva média horária ou do dia (\bar{X}) e a média dos dez maiores valores horário ou diário do período analisado (\bar{M}).

O valor 10 de limite arbitrário, foi atribuído a equação adaptada para identificar os limiares de impacto associado ao risco operacional.

$$I = \left\{ 3 \left[\frac{X - \bar{X}}{M - \bar{X}} \right] \right\} 10 \quad (4)$$

Onde X é a chuva horária ou diária, \bar{X} a chuva média horária ou do dia.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DA PRODUÇÃO MINERAL DE CARAJÁS E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

As tabelas 1, 2 e 3 apresentam, respectivamente, as correlações horária, diária e semanal das variáveis estudadas. Nota-se que a relação entre a produção de minério de ferro e as variáveis meteorológicas é de intensidade fraca. Percebe-se que a chuva e a umidade apresentam correlação inversa em relação a produção de minério de ferro, enquanto a temperatura do ar apresenta correlação direta. Nota-se ainda que as variáveis meteorológicas chuva e umidade relativa do ar tem relação direta entre si, enquanto temperatura do ar apresenta relação inversa. Certamente, esta relação inversa está ligada a perda de calor da atmosfera e superfície adjacente durante episódio de chuva, o que proporciona decaimento da temperatura.

Tabela 1 - Correlação horária entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva horária (PRECh), temperatura do ar horária (TARh), umidade relativa do ar horária (URh) e produção mineral horária (PRODh)

	PRECh	TARh	URh	PRODh
PRECh	1,0	-0,2	0,1	-0,1
TARh	-0,2	1,0	-0,8	0,1
URh	0,1	-0,8	1,0	-0,1
PRODh	-0,1	0,1	-0,1	1,0

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 2 - Correlação diária entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva diária (PRECd), temperatura do ar diária (TARd), umidade relativa do ar diária (URd) e produção mineral diária (PRODd).

	PRECd	TARd	URd	PRODd
PRECd	1	-0,4	0,4	-0,2
TARd	-0,4	1	-0,8	0,2
URd	0,4	-0,8	1	-0,2
PRODd	-0,2	0,2	-0,2	1

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 3 - Correlação semanal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva semanal (PRECs), temperatura do ar semanal (TARs), umidade relativa do ar semanal (URs) e produção mineral semanal (PRODs).

	PRECs	TARs	URs	PRODs
PRECs	1	-0,7	0,6	-0,4
TARs	-0,7	1	-0,9	0,4
URs	0,6	-0,9	1	-0,4
PRODs	-0,4	0,4	-0,4	1

Fonte: Próprio autor (2020).

O acumulado quinzenal (Tabela 4), apresenta uma correlação de intensidade moderada entre as variáveis, além da manutenção do padrão da relação. Logo, entende-se que este padrão reflete o comportamento da população, sendo possível ser criado aleatoriamente.

Tabela 4 - Correlação quinzenal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva quinzenal (PRECq), temperatura do ar quinzenal (TARq), umidade relativa do ar quinzenal (URq) e produção mineral quinzenal (PRODq).

	PRECq	TARq	URq	PRODq
PRECq	1	-0,5	0,6	-0,6
TARq	-0,5	1	-0,9	0,5
URq	0,6	-0,9	1	-0,5
PRODq	-0,6	0,5	-0,5	1

Fonte: Próprio autor (2020).

Na tabela 5 percebe-se uma correlação de intensidade forte entre os acumulados mensais de produção de minério e chuva de 70%. Nota-se ainda, uma relação moderada entre os acumulados de umidade relativa do ar e minério de ferro (60%) e temperatura do ar e minério de ferro (50%).

Tabela 25 - Correlação mensal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva mensal (PRECm), temperatura do ar mensal (TARm), umidade relativa do ar mensal (URm) e produção mineral mensal (PRODm).

	PRECm	TARm	URm	PRODm
PRECm	1	-0,9	0,8	-0,7
TARm	-0,9	1	-0,9	0,5
URm	0,8	-0,9	1	-0,6
PRODm	-0,7	0,5	-0,6	1

Fonte: Próprio autor (2020).

A partir desse ponto, é importante analisar a significância dessa correlação, através do teste de hipóteses, a fim de garantir estatisticamente que as relações existentes e mostradas acima são significativas.

4.2 TESTE DE HIPÓTESES

Pelo teste de hipóteses aplicado, verificou-se a significância estatística da interação entre as amostras analisadas. A tabela 10 mostra os resultados obtidos para cada variável meteorológica em relação a produção de minério de ferro. Para esta análise, admitiu-se que H_0 indica não interação significativa entre as amostras, enquanto H_1 há interação significativa entre as amostras.

Tabela 3 - Teste-t bicaudal presumindo variâncias diferentes entre as amostras das variáveis meteorológicas e a produção mineral.

		Temperatura do ar		Umidade Relativa do ar		Chuva	
Produção de minério de ferro	Hipótese alternativa	p-valor	Hipótese alternativa	p-valor	Hipótese alternativa	p-valor	
		verdadeiro	< 2.2e-16	verdadeiro	< 2.2e-16	verdadeiro	< 2.2e-16

Fonte: Próprio autor (2020).

Adotou-se o teste bicaudal, com nível de significância em 0,05 e nível de confiança em 0,95, para dados não pareados, ou seja, independentes.

Foi analisada a significância dos acumulados horário, semanal, quinzenal e mensal separadamente, no qual obteve-se o mesmo p-valor, inferior a 5%, sendo rejeitada a hipótese nula, logo, entende-se que a interação entre produção de minério e variáveis meteorológicas é estatisticamente significativa.

5 CLASSES DE IMPACTO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA PRODUÇÃO MINERAL

Conforme visto anteriormente, a produção mineral apresenta uma relação de comportamento inverso com a chuva e com a umidade relativa do ar, enquanto com a temperatura do ar, apresenta relação direta. Diante disto, nas análises seguintes, não foi incluído o estudo do impacto da temperatura do ar em relação a produção mineral, uma vez que a intenção da pesquisa é encontrar classes de riscos aos impactos daquelas variáveis de correlação inversa à produção mineral.

A partir do cálculo do índice de impacto, foi possível determinar classes de critérios de risco para a produção mineral associado mineral associado a chuva. Na tabela 11 encontram-se as proposições de classes de risco operacional a produção de minério de ferro em Carajás-PA associada a chuva horária. Nela, observa-se que para acumulados de chuva entre 0 e 15 mm/h não há impacto na produção, enquanto volumes de chuva acima de 60 mm/h há alto risco de impactar a produção mineral em Carajás-PA, incluindo paralisações operacionais.

Tabela 7 - Classes de critério de risco operacional na produção de mineral em Carajás-PA associado aos volumes de chuva por hora.

CHUVA	RISCO	%IMPACTO
0 -15 mm	MUITO BAIXO	0%
15 – 30mm	BAIXO	30%
30 – 60mm	MODERADO	50%
>60mm	ALTO	>80%

Fonte: Próprio autor (2020).

Na tabela 8 encontram-se as sugestões de classes de risco operacional para produção de minério de ferro em Carajás-PA associada a umidade relativa do ar para o período menos chuvoso. Nela, observa-se que para valores acima de 70% apresentam risco significativo a produção mineral em Carajás-PA, por estar próximo do ponto de saturação do minério de ferro.

Tabela 8 – Classes de critério de risco operacional e porcentagem de impacto da umidade relativa do ar na produção de minério de ferro.

UR	RISCO	%IMPACTO
< 60%	BAIXO	30%
60 - 70%	MODERADO	50%
>70%	ALTO	>70%

Fonte: Próprio autor (2020).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o padrão observado da relação entre as variáveis meteorológicas e a produção de minério de ferro, é possível afirmar que a chuva e a umidade relativa do ar impactam negativamente na produção, por apresentarem relação inversa, enquanto a temperatura do ar impacta positivamente. Este impacto não é expressivo em acumulados horários, diários e semanais, de acordo com a correlação de Pearson, por obter uma relação fraca, enquanto, em acumulados quinzenais e mensais as variáveis têm relação moderada a forte, demonstrando o potencial de impacto. A partir dessas análises, sugere-se que em escalas horárias, diárias e semanais, a produção mineral dependem de outros fatores além dos meteorológicos, o que não ocorre nas escalas quinzenal (que é moderada) e na mensal (relação forte). Pelo cálculo de impacto, aplicado sobre a série temporal estudada, foi possível estabelecer classes de alertas para eventos severos de chuva, quando então definiu-se que acumulados de chuva a partir de 60 mm/h causam forte impacto na produção mineral. Esses impactos podem ser minimizados a partir de planejamento adequado a partir do constante monitoramento do tempo, com a finalidade de evitar grandes perdas econômicas à empresa Vale S.A.

REFERENCIAS

ALCÂNTARA, Clênia R. Linha de Instabilidade da Amazônia: estudo de caso e Importância das Características do Perfil do Vento na sua Formação e Desenvolvimento. **Revista Ciência e Natura**, v. 33, n. 2, p. 197-226, 2011. DOI [10.5902/2179460X9370](https://doi.org/10.5902/2179460X9370). Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/artic le/view/9370>. Acesso em: 01 ago. 2020.

ARAÚJO, Rosimeire G. *et al.* A influência do evento El Niño - Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, [online], v. 43, n. 4, p. 469-480, 2013. DOI [10.1590/S0044-59672013000400009](https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000400009). Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672013000400009&lng=pt&t lng=pt. Acesso em: 01 ago. 2020.

CAMPOS, Cláudia R. J.; EICHHOLZ, Cristiano W. Características físicas dos sistemas convectivos de mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 331-345, 2011. DOI [10.1590/S0102-261X2011000200009](https://doi.org/10.1590/S0102-261X2011000200009). Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2011000200009. Acesso em: 01 ago. 2020.

CARVALHO, Leila M. V.; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v.17, n. 1, p. 88-108, 2004. DOI [10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2). Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/jcli/article/17/1/88/30211/The-South-Atlantic-Convergence-Zone-Intensity-Form>. Acesso em: 01 ago. 2020.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F. da; NOBRE, C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 123, n. 11, p. 3163-3174, nov. 1995. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000897347>. Acesso em: 01 ago. 2020.

COHEN, Julia Clarinda P. **Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia**. 1989. 160 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.18.17.31/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2020.

ESTADO DE MINAS. **MDIC: mesmo com saldo menor, desempenho da balança é mais robusto que em 2017**. Economia. 01 out. 2018. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2018/10/01/internas_economia,993321/mdic-mesmo-com-saldo-menor-desempenho-da-balanca-e-mais-robusto-que.shtml. Acesso em: 19 out. 2018.

EXAME. **Enchentes na Austrália prejudicam mineradoras**. Mundo. 13 jun. 2018. Disponível em: <https://exame.com/mundo/enchentes-na-australia-prejudicam-mineradoras-2/>. Acesso em: 15 out. 2018.

FERREIRA, Douglas da S.; SOUZA, Everaldo B. de; MORAES, Bergson C. de; MEIRA FILHO, Luiz Gylvan. Spatial and Temporal Variability of Rainfall in Eastern Amazon during the Rainy Season. **The Scientific World Journal**, v. 2015, 2015. DOI [10.1155/2015/209783](https://doi.org/10.1155/2015/209783). Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2015/209783/>. Acesso em: 01 ago. 2020.

FERREIRA, N. J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M. A. F. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 1, p. 89-98. 2004.

FREITAS, Marcos Airton de S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. **Revista Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 84-95, 1998. DOI [10.5020/23180730.1998.1175](https://doi.org/10.5020/23180730.1998.1175). Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/1175>. Acesso em: 01 ago. 2020.

G1. Dez pontos para entender o vazamento de barragem de mineradora que contamina Barcarena no PA. G1 Pará. 24 fev. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/10-pontos-para-entender-o-vazamento-de-barragem-de-mineradora-que-contamina-barcarena-no-pa.ghtml>. Acesso em: 15 out. 2018.

GRIMM, Alice M.; SILVA DIAS, Pedro L. Analysis of Tropical–Extratropical Interactions with Influence Functions of a Barotropic Model. **Journal Atmospheric Science**, v. 52, n. 20, p. 3538–3555, 1995. DOI [10.1175/1520-0469\(1995\)052<3538:AOTIWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<3538:AOTIWI>2.0.CO;2). Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/jas/article/52/20/3538/23781/Analysis-of-Tropical-Extratropical-Interactions>. Acesso em: 01 ago. 2020.

KATZ, Felipe. Recursos Minerais e a Economia do Conhecimento. **In: BELLUZO, Luiz G. de M.; FRISCHTAK, Cláudio R.; LAPLANE, Mariano (Orgs.). Produção de commodities e desenvolvimento econômico.** Campinas: UNICAMP; Instituto de Economia; Vale S.A., 2014. p. 83-101. (Capítulo 6). Disponível em: https://www.eco.unicamp.br/neit/images/stories/arquivos/Producao_de_Commodities_e_Desenvolvimento_Economico.pdf. Acesso em: 01 ago. 2020.

LOPES, Marcio N. G.; SOUZA, Everaldo B. de; FEEEREIRA, Douglas B. da S. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 9, v. 12, p. 84-102, jan./jul., 2013. DOI [10.5380/abclima.v12i1.31402](https://doi.org/10.5380/abclima.v12i1.31402). Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/31402>. Acesso em: 01 ago. 2020.

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 6, p. 1630-1654, 1998. DOI [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1630:LCVOMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1630:LCVOMC>2.0.CO;2). Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/mwr/article/126/6/1630/66084/Life-Cycle-Variations-of-Mesoscale-Convective>. Acesso em: 01 ago. 2020.

MIRANDA, Josiane A. G. **Efeito da sazonalidade climática regional na produção de minério de ferro da Vale em Carajás - Pará.** 2016. 33 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais) - Instituto Tecnológico Vale, Belém, 2016. Disponível em: <http://www.itv.org/wp->

[content/uploads/2018/02/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Josiane-Miranda.pdf](#). Acesso em: 01 ago. 2020.

MOURA, Mauricio do N.; VITORINO, Maria Isabel. Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à Zona de Convergência Intertropical. **Revista brasileira de meteorologia**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 475-483, 2012. DOI 10.1590/S0102-77862012000400010. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/5537>. Acesso em: 01 ago. 2020.

NORONHA, Gustavo C. de; HORA, Mônica de A. G. M. da; SILVA, Luciene P. Análise do Índice de Anomalia de Chuva para a Microbacia de Santa Maria/Cambiocó, RJ. **Revista brasileira de meteorologia**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 74-81, mar. 2016. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620140160>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862016000100074&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 28 jan. 2020.

OGLOBO. **Trilhos da Estrada de Ferro Carajás da Vale do Rio Doce**. 8 maio 2009. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/trilhos-da-estrada-de-ferro-carajas-da-vale-do-rio-doce-estao-cobertos-pelas-aguas-3167834>. Acesso em: 21 jun. 2020.

SODRÉ, Giordani R.; VITORINO, Maria Isabel; COHEN, Júlia Clarinda P.; MORAES, Bergson C.. Estudo observacional da convecção de mesoescala em diferentes superfícies no estado do Pará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 5, p. 1281-1293, 2015. DOI <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.5.p1281-1293>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/artic le/view/232958>. Acesso em: 01 ago. 2020.

SOUZA, Everaldo B. de; MORAES, Bergson C. de; FERREIRA, Douglas B. S.; MEIRA FILHO, Luiz Gylvan. Dynamical Downscaling for Railroad Areas in Eastern Amazon and Southeastern Brazil: Current Climate and Near-Future Projections. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 4, n. 2, p. 155-163, abr. 2014. DOI [10.4236/acs.2014.42018](https://doi.org/10.4236/acs.2014.42018). Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=44463>. Acesso em: 01 ago. 2020.

SOUZA, Everaldo B. de; KAYANO, Mary T.; TOTA, Julio; PEZZI, Luciano; FISCH, Gilberto; NOBRE, Carlos. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960 - 1998. **Acta Amazonica**, v. 30, n. 2., p. 305-3018, 2000. DOI [10.1590/1809-43922000302318](https://doi.org/10.1590/1809-43922000302318). Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672000000200305. Acesso em: 01 ago. 2020.

VALE. **Qual a importância da mineração para a economia do país**. Notícias. 01 jun. 2017. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutv ale/news/paginas/qual-a-importancia-da-mineracao-para-a-economia-do-pais.aspx#:~:text=Importante%20fonte%20de%20renda%2C%20a,por%20seu%20diferencial%20e%20riqueza>. Acesso em: 15 out. 2018.

VEJA. **Chuvas afetam extração de minério da Vale em MG**. Economia. 9 jan. 2012. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/chuvas-afetam-extracao-de-minerio-da-vale-em-mg/>. Acesso em: 19 out. 2018.

WALISER, Duane E.; GAUTIER, Catherine. A Satellite-derived Climatology of the ITCZ. **Journal of Climate**, v. 6, n. 11, p. 2162-2174, nov. 1993. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26198602>. Acesso em: 01 ago. 2020.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Relatório Técnico apresentado como Dissertação para o MPROF.

INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



PROD. TEC. ITV DS / N040/2020

DOI: 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2020.40.Campos

PRODUÇÃO TÉCNICA ITV DS

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM CARAJÁS-PA.

Relatório Final do subprojeto Previsão do Tempo

Amanda Souza Campos

Pedro Walfir Martins e Souza Filho

Cláudia Priscila Wanzeler da Costa

Belém / Pará

Julho / 2020

Título: Avaliação do impacto de variáveis meteorológicas na produção de minério de ferro em Carajás -PA	
PROD.TEC.ITV DS - N040/2020	Revisão
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública	00

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)

C198 Campos, Amanda Souza
Avaliação do impacto de variáveis meteorológicas na produção de minério de ferro em Carajás -PA / Amanda Souza Campos, Pedro Walfir Martins e Souza Filho, Claudia Priscila Wanzeler da Costa. – Belém: ITV, 2020.
32 p: il.

Relatório Técnico (Instituto Tecnológico Vale) – 2020
PROD.TEC.ITV.DS.N040/2020
DOI 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2020.40.Campos

1. Degradação do solo – Carajás (PA). 2. Climatologia. 3. Preservação ambiental - Mudanças climáticas. I. Souza Filho, Pedro Walfir Martins e. II. Costa, Claudia Priscila Wanzeler da. III. Título.

CDD 23. Ed. 551.3098115

Bibliotecário(a) responsável: Nisa Gonçalves CRB-2 / 525

RESUMO EXECUTIVO

O grupo de Pesquisas em Tecnologia Ambiental realiza estudos para responder perguntas sobre mudança do uso e cobertura do solo, recuperação de áreas degradadas, além de meteorologia e mudança do clima. Para tal, implementou-se o projeto Tempo & Clima com o objetivo de realizar pesquisa científica básica e aplicada em meteorologia, com ênfase em estudos do clima e mudança do clima e, modelagem numérica regional, focados em áreas de interesse da Vale. Dentro deste escopo, o tema do projeto de mestrado teve por objetivo investigar possíveis relações entre as variáveis meteorológicas e a produção de minério de ferro, analisando o regime de chuva sobre a região de Carajás no ano 2017, em intervalos de tempo: mensal, quinzenal, semanal, diário e horário. Foram aplicadas técnicas estatísticas: test t de *Student* e correlação de Pearson, para identificar a relação das variáveis meteorológicas e a produção mineral. Os resultados para o período chuvoso mostram que a principal variável de interação com a produção é a chuva, entretanto, em alguns casos a duração da chuva sobrepõe-se a intensidade. Para o período seco, a umidade relativa do ar, é quem mais interfere na produção de minério de ferro. Através de critérios de riscos baseados em limiares de precipitação, percebeu-se que chuvas entre 0 – 15 mm/h, impactam muito baixo na produção, enquanto chuvas de 15-30mm/h tem impacto de 30%. Ocorrências de chuva entre 30–60mm/h, tem impacto moderado, enquanto chuvas acima de 60mm tem alto impacto na produção, podendo inclusive forçar paralisações. Concluiu-se que há correlação estatisticamente significativa entre as variáveis meteorológicas e a produção de minério de ferro, sendo relação direta para temperatura e inversa para chuva e umidade relativa do ar. O projeto de mestrado foi mantido por bolsa de ensino Fadesp com vigência de 01/05/2018 a 30/04/2019.

LISTA DE FIGURA

- Figura 1** – Complexo mineral de Carajás-PA. Em verde, a Floresta Nacional de Carajás. As demais áreas destacadas no mapa são as minas da empresa Vale, sendo a porção Norte composta pelas minas Azul, N1, N4 e N5, sendo as duas últimas o objeto de estudo desta pesquisa e a porção Sul está o complexo S11D e sossego.09
- Figura 2** - Logística operacional da cadeia de mineração da serra norte em Carajás-PA.**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 3** – Localização das Estações Meteorológicas (alfinete amarelo) e usinas de beneficiamento (quadrado branco).....**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 4** – Séries de dados originais em escala de tempo horária, referente ao ano de 2017: (a) produção de minério de ferro da usina I da Vale S.A (toneladas), (b) precipitação (mm), (c) umidade relativa do ar (%) e (d) temperatura do ar (°C). 15
- Figura 5** – Distribuição mensal das variáveis meteorológicas e produção de minério de ferro do complexo mineral de Carajás no ano de 2017. (a) Produção de minério, (b) precipitação, (c) Umidade relativa do ar e (d) temperatura média do ar. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6** – Distribuição diária da chuva (mm/dia) e da produção de minério de ferro (toneladas/dia) em Carajás-PA no mês de fevereiro/2017. 21
- Figura 7** – Impacto da chuva na produção de minério de ferro em Carajás-PA no mês de fevereiro/2017. Unidade: % 22
- Figura 8** – Distribuição horária da chuva e produção de minério de ferro no dia 11/02/2017. 22
- Figura 9** – Impacto da umidade relativa na produção de minério de ferro em Carajás-PA no mês de fevereiro/2017. Unidade: % 23
- Figura 10** – Distribuição diária de chuva (mm/dia) e produção de minério de ferro (tonelada/dia) no mês de julho/17..... 24
- Figura 11** - Distribuição diária da Umidade relativa do ar (em %) em Carajás-PA no mês de julho de 2017. 25
- Figura 12** – Impacto da umidade relativa do ar na produção de minério de ferro no mês de julho/2017. Unidade (%). 25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados originais da série temporal das variáveis meteorológicas (INMET) e produção USINA I (Vale S.A).....	16
Tabela 2 - Dados interpolados da série temporal das variáveis meteorológicas (INMET) e produção da usina I (Vale S.A).....	16
Tabela 3 - Matriz de correlação da série temporal original.....	17
Tabela 4 - Matriz de correlação da série temporal interpolada.....	17
Tabela 5 – Correlação horária entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva horária (PRECh), temperatura do ar horária (TARh), umidade relativa do ar horária (URh) e produção mineral horária (PRODh).....	17
Tabela 6 – Correlação diária entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva diária (PRECd), temperatura do ar diária (TARd), umidade relativa do ar diária (URd) e produção mineral diária (PRODd).....	18
Tabela 7 – Correlação semanal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva semanal (PRECs), temperatura do ar semanal (TARs), umidade relativa do ar semanal (URs) e produção mineral semanal (PRODs).....	18
Tabela 8 – Correlação quinzenal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva quinzenal (PRECq), temperatura do ar quinzenal (TARq), umidade relativa do ar quinzenal (URq) e produção mineral quinzenal (PRODq).....	18
Tabela 9 – Correlação mensal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva mensal (PRECm), temperatura do ar mensal (TARm), umidade relativa do ar mensal (URm) e produção mineral mensal (PRODm).....	18
Tabela 10 – Teste-t bicaudal presumindo variâncias diferentes entre as amostras.....	19
Tabela 11 – Classes de critério de risco operacional e porcentagem de impacto da chuva na produção de minério de ferro.....	23
Tabela 12 – Classes de critério de risco operacional e porcentagem de impacto da umidade relativa do ar na produção de minério de ferro.....	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	06
2	OBJETIVOS	07
2.1	GERAL	07
2.2	ESPECÍFICOS	08
3	MATERIAL E MÉTODOS	08
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	08
3.2	DADOS METEOROLÓGICOS E DE PRODUÇÃO MINERAL	10
3.3	METODOLOGIA	12
3.3.1	Estatística descritiva e tratamento dos dados	12
3.3.2	Coefficiente de correlação de Pearson	12
3.3.3	Teste e hipóteses – t de Student	13
3.3.4	Índice de impacto	14
4	RESULTADOS	15
4.1	ANÁLISE DESCRITIVA DAS SÉRIES TEMPORAIS DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO	15
4.2	ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DA PRODUÇÃO MINERAL DE CARAJÁS E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS	17
4.3	RELAÇÃO ENTRE A PRODUÇÃO MINERAL DE CARAJÁS E AS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS	19
5	AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA PRODUÇÃO MINERAL	20
5.1	PERÍODO CHUVOSO DE 2017	21
5.2	PERÍODO SECO DE 2017	24
6	CONCLUSÃO	26
	REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A economia brasileira é fortemente influenciada pela atividade mineradora, que representa cerca de 5% do PIB nacional, contribuindo de forma significativa para o equilíbrio econômico do Brasil por atrair investimentos e pela geração de empregos, por exemplo (VALE, 2017). De acordo com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio exterior, o Brasil desempenha um papel importante na indústria mineral mundial, com produção de minério concentrada principalmente nos estados de Minas Gerais e Pará. Estes estados fazem parte da área de atuação da empresa Vale S.A, que é a maior empresa mineradora do mundo, com produção média anual de 348,8 milhões de toneladas métricas de minério de ferro (VALE, 2017).

A mineração é um setor particularmente vulnerável às intempéries do tempo e clima e, por isso, podem sofrer perdas significativas. Os processos logísticos e operacionais da cadeia de mineração da Vale S.A ocorrem a céu aberto, da mina ao porto e, frequentemente, estão expostos a mecanismos atmosféricos causadores de precipitação, que impactam direta e/ou indiretamente no quantitativo diário da produção de minério de ferro. Conforme analisado por Martins, Lima, Leal Filho (2012) e Fina (2019), o minério de ferro apresenta propriedades hidrofílicas, ou seja, possuem grande afinidade com a água, portanto, em contato com a umidade, atinge o grau de saturação (80%) interferindo na qualidade do minério.

O complexo minero-logístico da Vale I está localizado em Carajás, no Norte do Brasil, pertencente a Amazônia Oriental, e está sujeito a diferentes mecanismos produtores de chuva. A variabilidade interanual das chuvas na região Amazônica está associada à ocorrência de eventos ENOS (El Niño/Oscilação Sul) que modulam os sistemas meteorológicos atuantes, de modo a intensificar ou desintensificar a precipitação (GRIMM *et al.*, 2000; SOUZA *et al.*, 2000; ARAÚJO *et al.*, 2013). Os principais sistemas atmosféricos que atuam nesta região são:

- *Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)*: é considerada a principal fonte de precipitação para os trópicos, é um sistema de ordem planetária, que atua nos meses de verão austral, sendo responsável por elevadas quantidades pluviométricas, capazes de gerar diversos transtornos socioambientais (MOURA; VITORINO, 2012).
- *Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)*: este sistema tem como principal característica a persistência de uma banda de nebulosidade e precipitação, orientada no sentido noroeste-sudeste, estendendo-se até o Oceano Atlântico Sul, atua nos meses de

primavera e verão austrais, ocasionando altos níveis pluviométricos (GRIMM, SILVA DIAS, 1995; FERREIRA, SANCHES, SILVA DIAS, 2004).

- *Linhas de Instabilidade (LI's)*: são linhas descontínuas de nuvens de convecção profunda geradas no final da tarde, pelo contraste térmico diário entre oceano e continente, com um tempo de vida estimado em 9 horas. Propagam-se para dentro do continente com orientação noroeste-sudeste em direção ao sudoeste, são responsáveis por aproximadamente 40% da chuva que cai na região Amazônica e podem ocorrer durante todo o ano (COHEN, 1989; ALCÂNTARA, 2011).
- *Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM)*: são compostos por aglomerados de nuvens de convecção profunda que podem iniciar tanto nas primeiras horas da tarde, bem como no início da noite e perdurar, até a metade do dia seguinte. O tempo de duração destes sistemas está associado ao seu tamanho. No entanto, seu tempo de vida médio é estimado entre 10 a 20 horas com maturação durante a madrugada (MACHADO *et al.*, 1998; CAMPOS, EICHHOLZ, 2011).

Segundo Sodré *et al.* (2015) a formação dos SCM's no sudeste do Pará, depende diretamente de sistemas sazonais, a exemplo ZCAS. Os autores destacaram ainda que, a ação antrópica influencia a formação e o desenvolvimento dos SCM's, uma vez que a maior parte dos sistemas observados na região, tenderam se formar sobre áreas devastadas.

Souza *et al.* (2014) analisaram as características climatológicas do regime de chuva de Carajás, para um intervalo de 22 anos. Observaram que o regime chuvoso se distribui entre os meses de janeiro a maio, e o período seco, referente aos meses de junho a outubro.

Miranda (2016) analisou a variabilidade sazonal da precipitação em Carajás-PA e percebeu que esta variável interfere em mais de 50% na produção de minério de ferro da Vale, principal empresa de mineração que atua na região.

Diante do exposto, esta pesquisa procura respostas para a seguinte pergunta: como se dá a relação entre a produção de minério de ferro em Carajás-PA e as variáveis meteorológicas que impactam significativamente a cadeia mineral?

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral propor classes de critérios de risco para a produção mineral em Carajás-PA a partir de limiares de precipitação, umidade relativa do ar e

temperatura do ar, de modo a minimizar as perdas de matéria prima e/ou paralisação das atividades operacionais, considerando a escala da mina (da ordem de poucos quilômetros).

2.2 ESPECÍFICOS

- Investigar a relação de variáveis meteorológicas e a produção de minério de ferro na Serra Norte, em Carajás-PA do ano de 2017.
- Avaliar o impacto das variáveis meteorológicas na produção mineral em Carajás-PA, em escalas de tempo horária, semanal, quinzenal e mensal.
- Propor critérios de risco operacional a partir dos limiares das variáveis meteorológicas que mais impactam na produção de mineral de Carajás.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no Sudeste paraense, Amazônia Oriental. O clima da região Amazônica é classificado como quente e úmido, contendo pouca variação de temperatura e umidade elevada durante todo o ano (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1998). Por esta razão, a precipitação passa ser a variável de maior relevância, uma vez que apresenta grande variabilidade espaço-temporal (COSTA *et al.*, 2019).

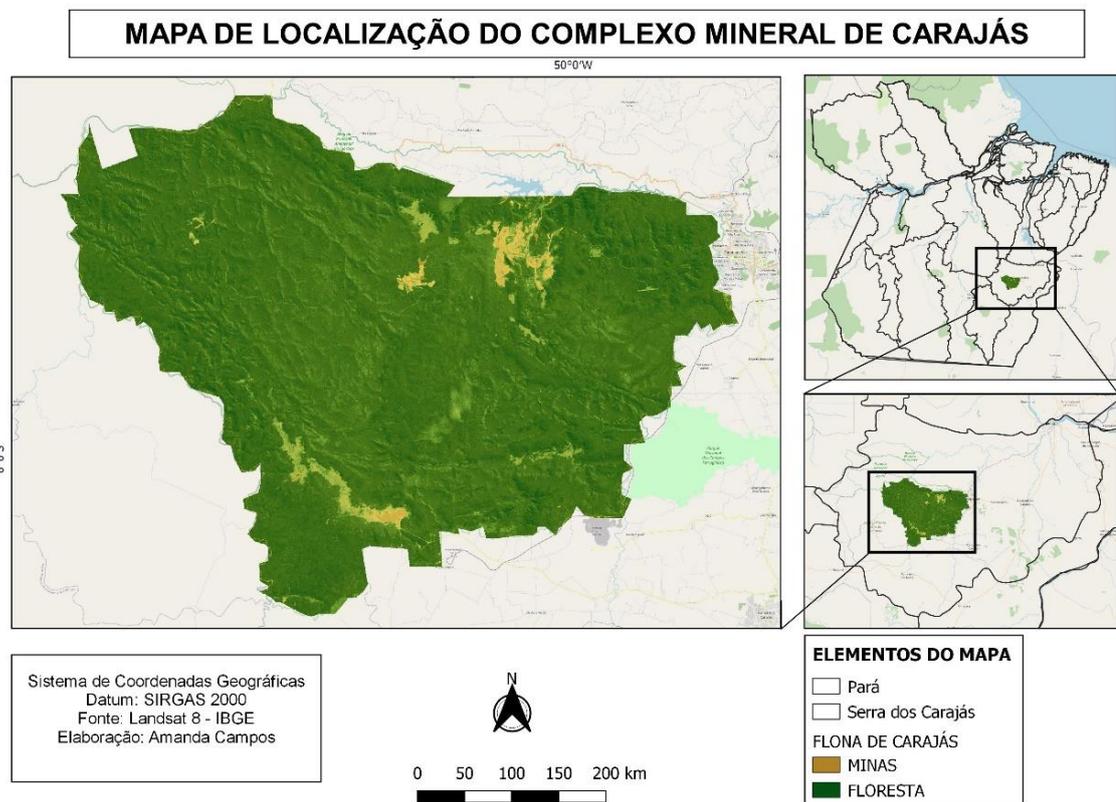
O sudeste paraense, paz parte do Planalto Dissecado do Sul, possui maciços residuais de topo aplainado e conjuntos de cristas (BRASIL, 1974); o solo é composto por vários elementos químicos – Fósforo (P) Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Cobre (Cu) e Ferro (Fe) – dos quais, destaca-se o ferro, por apresentar o mais alto teor em escala mundial (LINDENMAYER, LAUX, TEXEIRA, 2001; SCHAEFER *et al.*, 2016). No entanto, é considerado pobre, por ser pouco fértil, ter acidez elevada, deficiência em estrutura e nutrientes, tornando-o inapropriado ao cultivo agrícola (SECCO, MESQUITA 1983; EMBRAPA, 2013).

Essa área é colonizada por plantas adaptadas, conhecidas como vegetação de canga, capazes de tolerar um conjunto de características ambientais limitantes (SCHAEFER *et al.*, 2015). A vegetação de canga ou campos ferruginosos estão associados a vários tipos de substratos ricos em ferro, ocorrendo sobre jazidas de ferro economicamente importantes (JACOBI, CARMO, 2008; SCHAEFER *et al.*, 2015).

Neste contexto, está inserida a Floresta Nacional de Carajás, área de conservação ambiental federal do Brasil, que engloba o complexo mineral de Carajás, a região de atuação da mineradora Vale S.A.

O complexo mineral de Carajás é dividido em Serra Norte (minas N1, N4, N5 e Azul) e Serra Sul (complexo S11 e sossego) como pode visto pela figura 1.

Figura 1 – Complexo mineral de Carajás-PA. Em verde, a Floresta Nacional de Carajás. As demais áreas destacadas no mapa são as minas da empresa Vale, sendo a porção Norte composta pelas minas Azul, N1, N4 e N5, sendo as duas últimas o objeto de estudo desta pesquisa e a porção Sul está o complexo S11D e sossego.



Fonte: próprio autor (2020).

Este trabalho dá enfoque a Serra Norte, na qual estão localizados os depósitos de minério de ferro N4 e N5 e as usinas de beneficiamento da empresa VALE S.A.

A Figura 2 apresenta uma visão geral da logística mineral de Carajás, que é composto por britagem primária (BSM V), britagem secundária, pátio de regularização, classificação, britagem terciária, pátio de produtos e sítio de embarque. A britagem é o processo pelo qual a rocha de minério é triturada em pequenos fragmentos.

O processo operacional se inicia com a retirada do minério da cava da mina sendo transportado para a primeira etapa de britagem. Em seguida, este minério viaja a uma distância de 4 km por transportadores de correias até ser descarregado na britagem secundária para alimentar os britadores que irão triturar novamente o minério de ferro. Após a segunda britagem, o minério é transportado até as peneiras de classificação, que irão enviar para o pátio de estocagem os grãos que passaram pela peneira. Aqueles grãos que ficaram retidos, serão enviados para a britagem terciária e enviados de volta para classificação para um novo peneiramento. O ciclo só termina quando o minério atingi um tamanho ótimo que atendam as especificações de comercialização. É válido salientar que todo esse processo logístico-operacional da cadeia de mineração ocorre a céu aberto.

Figura 2 - Logística operacional da cadeia de mineração da serra norte em Carajás-PA.



Fonte: Revista adicional 40 (2013).

3.2 DADOS METEOROLÓGICOS E DE PRODUÇÃO MINERAL

Este trabalho dá enfoque a Serra Norte, na qual estão localizados os depósitos de minério de ferro N4 e N5 e as usinas de beneficiamento da empresa VALE S.A (Figura 3). As usinas são distribuídas em números de um a quatro, sendo as três primeiras responsáveis pelos processos de britagem primária, secundária e terciária. A britagem é o processo pelo qual o

minério extraído é fragmentado até atingir um tamanho ótimo que atendam as especificações de comercialização. A quarta usina é responsável pela rebitagem dos grãos de minério que não atenderam as exigências de mercado.

Além das usinas de beneficiamento, existem três estações meteorológicas localizadas na região, sendo duas destas pertencentes à empresa Vale S.A e uma ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estas estações (Figura 3) coletam a cada hora, informações de variáveis meteorológicas, tais como: temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos, radiação solar.

Figura 3 – Localização das Estações Meteorológicas (alfinete amarelo) e usinas de beneficiamento (quadrado branco).



Fonte: adaptado do Google Earth (2020).

Os dados das estações meteorológicas automáticas são registrados em horário UTC (*Universal Time Coordinated*, sigla em inglês) e devem ser corrigidos para hora local. Para a nossa região, esta correção se dá, subtraindo em três horas o horário do registro. Os dados das usinas de beneficiamento (I a IV), são registrados a cada hora local, não necessitando de correção.

Neste trabalho foram utilizados os dados meteorológicos da estação meteorológica do INMET, por apresentar uma série de dados com poucas falhas. Os dados de beneficiamento

foram disponibilizados pela empresa Vale S.A e são referentes ao da Usina I no ano de 2017, período o qual se deu início aos registros horários do beneficiamento do minério de ferro.

3.3 METODOLOGIA

3.3.1 Estatística descritiva e tratamento dos dados

O comportamento e a normalidade dos dados foram avaliados de forma subjetiva por meio da análise descritiva exploratória. As ferramentas descritivas utilizadas foram gráficos e tabelas construídos através de dados originais, possibilitando detectar dados espúrios e/ou falhos (NA's).

A existência de dados espúrios foram verificada através da análise de gráficos *boxplot* e selecionados pela função *boxplot.stats* do pacote *grDevices* do Software R versão 3.5.3 (R Core Team, 2019). Foi considerado espúrio toda a informação discrepante, ou seja, muito fora do comportamento médio da amostra. Além disto, foi feita análise do resumo de cada amostra através do comando *summary()* do Software R, que possibilitou a construção das tabelas para a determinação das falhas durante a fase de análise descritiva. Os dados espúrios foram removidos e substituídos por NA.

Para eliminar os dados falhos encontrados inicialmente e aqueles inseridos posteriormente através da remoção dos dados espúrios, empregou-se técnica de interpolação linear através do Software R versão 3.5.3 (R Core Team, 2019), com auxílio da função de interpolação *na.approx* (1) do pacote *zoo*.

$$\text{na.approx}(\text{dados}, \text{method} = \text{"linear"}) \quad (1)$$

Esta função (1) substitui cada dado falho encontrado pela média entre os pontos, imediatamente, anterior e posterior ao dado falho encontrado.

O passo seguinte foi o de determinar o coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis de estudo, para verificar a intensidade e direção da relação entre as mesmas em diferentes escalas de tempo.

3.3.2 Coeficiente de correlação de Pearson

Segundo Crespo (2004), o coeficiente de correlação de Pearson (ρ) mede o grau de correlação linear entre duas variáveis e a direção dessa relação. É um valor adimensional

situado entre -1 e 1, que vai refletir a intensidade dessa correlação (2). Para $\rho = 1$, significa que existe uma correlação perfeita positiva entre as variáveis, porém, para $\rho = -1$ esta correlação é perfeita negativa, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui por estarem em direções contrárias, e $\rho = 0$ mostra que essas variáveis não são linearmente dependentes.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

Onde X assume o valor da variável meteorológica e Y a produção mineral. \bar{X} e \bar{Y} são as médias aritméticas, n o tamanho da amostra e i o ano. As análises de correlação foram realizadas nas escalas de tempo: horário, semanal, quinzenal e mensal. A significância estatística das séries temporais foi determinada através do teste t de Student.

3.3.3 Teste de hipóteses - t de Student

De acordo com Costa Neto (2002), o teste t de Student é um teste de hipóteses sobre os parâmetros populacionais que usa conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma hipótese, que é considerada válida até que se prove o contrário.

Considerando H_0 a hipótese existente a ser testada e H_1 a hipótese alternativa, o teste irá levar a aceitação ou a rejeição de H_0 , e conseqüente negação ou afirmação de H_1 . No entanto, a decisão de aceitar ou rejeitar H_0 pode depender do nível de significância (α) adotado, ou seja, da probabilidade de se rejeitar incorretamente uma hipótese existente quando esta é verdadeira. O valor de α é comumente fixado em 5%. Entretanto, deve-se considerar a probabilidade de se aceitar uma hipótese nula quando esta é falsa. Neste caso, deve-se analisar o nível de confiança ($1 - \alpha$) desta hipótese, normalmente fixado em 95%.

Neste trabalho foi adotado o teste t com desvio padrão (σ) da população desconhecida, conforme equação 3 abaixo:

$$t_{n-1} = \frac{\bar{x} - \mu_0}{S_x / \sqrt{n}} \quad (3)$$

Como o desvio padrão da população era desconhecido, selecionou-se uma amostra aleatória para que assim, fosse possível determinar o desvio padrão amostral (S_x), para uma determinada média amostral (\bar{x}) de tamanho n .

As hipóteses testadas foram:

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0$$

H_0 será rejeitada se a variável analisada (μ), assumir valor diferente de μ_0 que é um valor fixado para comparação com a média da amostra. Para a interpretação do teste, as hipóteses assumiram que:

H_0 : não há interação entre as variáveis

H_1 : há interação entre as variáveis

O nível de significância e o nível de confiança utilizados foram, respectivamente:

$$\alpha = 0,05$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

É válido ressaltar que, a hipótese nula será rejeitada, se o p-valor encontrado for menor que 0,05, ou seja, 5%.

3.3.4 Índice de impacto

Para analisar o impacto (I) das variáveis meteorológicas sobre a produção mineral, foi utilizada a equação do índice de anomalia chuva (IAC), desenvolvido por Rooy (1965), posteriormente adaptado por Freitas (2005) e Noronha *et al* (2016), expresso por:

$$IAC=3 \left[\frac{(X-\bar{X})}{(\bar{M}-\bar{X})} \right] \quad (4)$$

A equação (4) utiliza-se do valor acumulado de chuva anual (X), média histórica climatológica (\bar{X}) e média dos dez maiores valores do ano analisado (\bar{M}). O valor 3 na equação (4) é um limite arbitrário atribuído a média dos dez maiores valores da série de dados.

O cálculo de IAC tem sido utilizado como importante ferramenta de análise da chuva em diferentes escalas espaciais e temporais, com a finalidade verificar a influência de fenômeno ENOS em determinadas regiões.

Com a intenção de identificar a real influência das variáveis meteorológicas sobre a produção mineral de Carajás e determinar os limiares de risco operacional, a presente pesquisa

utilizou a equação (4) de forma adaptada (equação 5) a fim de atender as necessidades da série temporal estudada.

A equação (5), utiliza os valores da chuva horária ou diária (X), chuva média horária ou do dia (\bar{X}) e a média dos dez maiores valores horário ou diário do período analisado (\bar{M}). O valor 10 de limite arbitrário, foi atribuído a equação adaptada para identificar os limiares de impacto associado ao risco operacional.

$$I = \left\{ 3 \left[\frac{X - \bar{X}}{\bar{M} - \bar{X}} \right] \right\} 10 \quad (5)$$

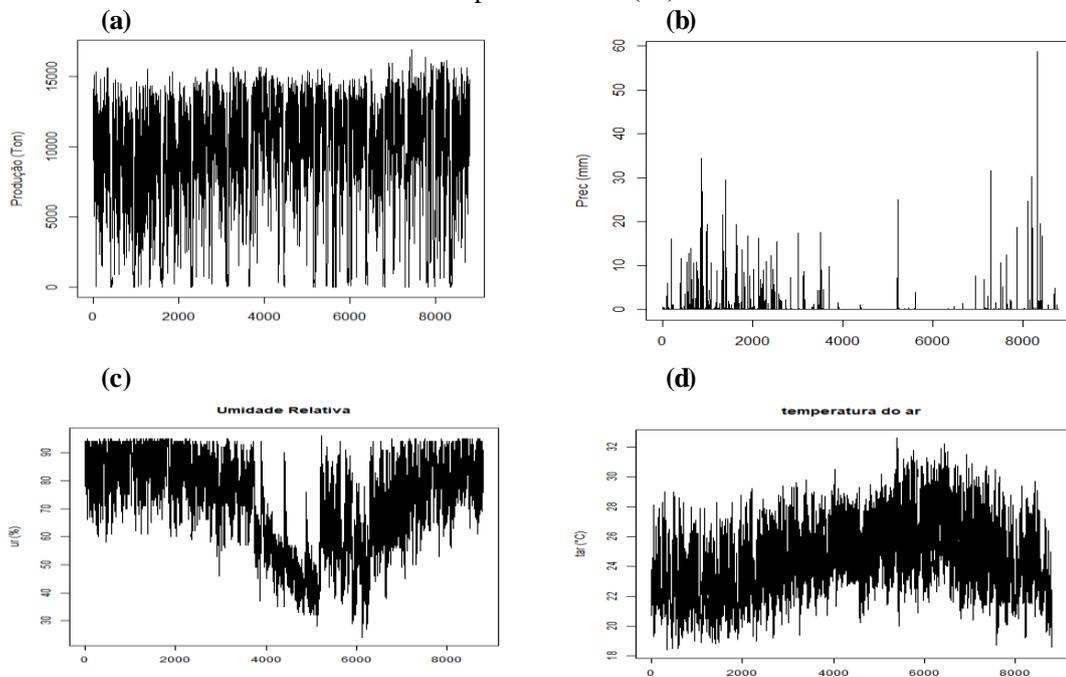
Onde X é a chuva horária ou diária, \bar{X} a chuva média horária ou do dia.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DESCRITIVA DAS SÉRIES TEMPORAIS DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO

As séries temporais analisadas na pesquisa apresentam alta frequência de dados, como podem ser observadas na figura 4, sendo passíveis a falhas.

Figura 4 – Séries de dados originais em escala de tempo horária, referente ao ano de 2017: (a) produção de minério de ferro da usina I da Vale S.A (toneladas), (b) precipitação (mm), (c) umidade relativa do ar (%) e (d) temperatura do ar (°C).



Fonte: Próprio autor (2020).

Pela análise descritiva da tabela 1 nota-se ocorrência de dados falhos (NA) em todas as amostras, os quais podem contribuir erroneamente no resultado final. Cada série de dados foi interpolada separadamente, a fim de remover esses dados falhos. No entanto, esta interpolação ocasionou alterações sutis na estatística de cada variável, que aparentemente não trouxeram benefícios relevantes (tabela 2).

Tabela 1 – Estatísticas das séries temporais originais de dados das variáveis meteorológicas do INMET e da produção de minério de ferro da Vale S.A: Min (valor mínimo), 1st Qu (primeiro quartil), Median (Mediana), Mean (valor médio), 3rd Qu (terceiro quartil), Max (valor máximo) e NA's (dato falho na série).

Chuva	Temperatura do ar	Umidade relative do ar	Produção minerio de ferro
Min.: 0.0000	Min.:18.40	Min.:24.0	Min.:0
1st Qu.: 0.0000	1st Qu.:22.50	1st Qu.:63.0	1st Qu.:8562
Median:0.0000	Median :24.00	Median:77.0	Median :10910
Mean: 0.2114	Mean:24.22	Mean:73.3	Mean:10154
3rd u.: 0.0000	3rd Qu.:25.80	3rd Qu.:86.0	3rd Qu.:12787
Max.:58.6000	Max.:32.60	Max.:96.0	Max.:16863
NA's :161	NA's:158	NA's:158	NA's:288

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 2 - Estatísticas das séries temporais interpoladas de dados das variáveis meteorológicas do INMET e da produção de minério de ferro da Vale S.A: Min (valor mínimo), 1st Qu (primeiro quartil), Median (Mediana), Mean (valor médio), 3rd Qu (terceiro quartil), Max (valor máximo).

Chuva	Temperatura do ar	Umidade relativa do ar	Produção minerio de ferro
Min.: 0.0000	Min.:18.40	Min.:24.00	Min.:0
1st Qu.: 0.0000	1st Qu.:22.50	1st Qu.:63.00	1st Qu.:8658
Median: 0.0000	Median:24.00	Median:77.00	Median:10782
Mean: 0.2122	Mean:24.23	Mean:73.29	Mean:10154
3rd Qu.: 0.0000	3rd Qu.:25.80	3rd Qu.:85.00	3rd Qu.:12737
Max.:58.6000	Max.:32.60	Max.:96.00	Max.:16863

Fonte: Próprio autor (2020).

Para verificar de forma mais clara as melhorias ocorridas nas amostras após a interpolação, fez-se a correlação horária dos dados originais e interpolados, como pode ser visto nas tabelas 3 e 4.

Comparando as séries temporais original (tabela 3) e interpolada (tabela 4), nota-se melhoria nos dados após a interpolação ao observar a intensidade da relação de cada variável

meteorológica e a produção mineral. Quanto a direção da correlação, percebe-se que esta é independente da remoção dos valores falhos.

Tabela 3 - Matriz de correlação da série temporal original entre as variáveis meteorológicas (INMET) e a produção de minério de ferro (Vale S.A).

	Chuva	Temperatura do ar	Umidade Relativa do ar	Produção minério ferro
Produção minério de ferro	-0.009	0.002	-0.018	1

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 4 - Matriz de correlação da série temporal interpolada entre as variáveis meteorológicas (INMET) e a produção de minério de ferro (Vale S.A).

	Chuva	Temperatura do ar	Umidade Relativa do ar	Produção minério de ferro
Produção minério de ferro	-0.127	0.133	-0.136	1

Fonte: Próprio autor (2020).

4.2 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DA PRODUÇÃO MINERAL DE CARAJÁS E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

As tabelas 4, 5 e 6 apresentam, respectivamente, as correlações horária, diária e semanal entre as variáveis estudadas. Nota-se que a relação entre a produção de minério de ferro e as variáveis meteorológicas é de intensidade fraca ($\leq 0,4$) em todas as escalas temporais analisadas. A chuva e a umidade relativa do ar apresentam correlação inversa com a produção de minério de ferro, enquanto a temperatura do ar apresenta correlação direta.

Tabela 5 – Correlação horária entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva horaria (PRECh), temperatura do ar horaria (TARh), umidade relativa do ar horaria (URh) e produção mineral horária (PRODh)

	PRECh	TARh	URh	PRODh
PRODh	-0,1	0,1	-0,1	1

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 6 – Correlação diária entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva diária (PRECd), temperatura do ar diária (TARd), umidade relativa do ar diária (URd) e produção mineral diária (PRODd)

	PRECd	TARd	URd	PRODd
PRODd	-0,2	0,2	-0,2	1

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 7 – Correlação semanal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva semanal (PRECs), temperatura do ar semanal (TARs), umidade relativa do ar semanal (URs) e produção mineral semanal (PRODs)

	PRECs	TARs	URs	PRODs
PRODs	-0,4	0,4	-0,4	1

Fonte: Próprio autor (2020).

A análise da correlação quinzenal entre a produção de minério de ferro e as variáveis meteorológicas (Tabela 8) mostra que a relação entre as mesmas é de intensidade moderada ($\geq 0,5$) e inversa, exceto com a temperatura do ar. Logo, entende-se que este padrão reflete o comportamento da população, sendo impossível que o padrão possa ser criado aleatoriamente.

Tabela 8 – Correlação quinzenal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva quinzenal (PRECq), temperatura do ar quinzenal (TARq), umidade relativa do ar quinzenal (URq) e produção mineral quinzenal (PRODq)

	PRECq	TARq	URq	PRODq
PRODq	-0,6	0,5	-0,5	1

Fonte: Próprio autor (2020).

Na tabela 9 percebe-se uma correlação de intensidade forte (70%) e inversa entre os acumulados mensais de produção de minério e a chuva. Esta relação mais forte com a chuva mensal também é refletida no aumento da relação com a umidade relativa do ar (60%). É válido ainda destacar, que a intensidade da relação da produção de minério com a temperatura em escala mensal é a mesma observada em escala quinzenal (Tabela 8) podendo indicar que a produção de minério mensal será minimamente ou não será mais afetada pelas variações na temperatura do ar.

Tabela 9 – Correlação mensal entre as variáveis meteorológicas e a produção mineral para o ano de 2017. Sendo chuva mensal (PRECm), temperatura do ar mensal (TARm), umidade relativa do ar mensal (URm) e produção mineral mensal (PRODm)

	PRECm	TARm	URm	PRODm
PRODm	-0,7	0,5	-0,6	1

Fonte: Próprio autor (2020).

A partir desse ponto, é importante analisar a significância dessa correlação, através do teste de hipóteses, a fim de garantir estatisticamente que as relações existentes e mostradas acima são significativas.

A tabela 10 mostra os resultados obtidos para cada variável meteorológica em relação a produção de minério de ferro. Para esta análise, admitiu-se que H_0 indica não interação significativa entre as amostras, enquanto H_1 há interação significativa entre as amostras.

Tabela 10 – Teste-t bicaudal presumindo variâncias diferentes entre as amostras das variáveis meteorológicas e a produção mineral.

		Temperatura do ar		Umidade Relativa do ar		Chuva	
Produção minério de ferro	<i>Hipótese alternativa</i>	<i>p-valor</i>	<i>Hipótese alternativa</i>	<i>p-valor</i>	<i>Hipótese alternativa</i>	<i>p-valor</i>	
		verdadeiro	< 2.2e-16	verdadeiro	< 2.2e-16	verdadeiro	< 2.2e-16

Fonte: Próprio autor (2020).

Adotou-se o teste bicaudal, com nível de significância em 0,05 e nível de confiança em 0,95, para dados não pareados, ou seja, independentes.

Foi analisada a significância dos acumulados horário, semanal, quinzenal e mensal separadamente, no qual obteve-se o mesmo p-valor, inferior a 5%, sendo rejeitada a hipótese nula, logo, entende-se que a interação entre produção de minério e variáveis meteorológicas é estatisticamente significativa.

4.3 RELAÇÃO ENTRE A PRODUÇÃO MINERAL DE CARAJÁS E AS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

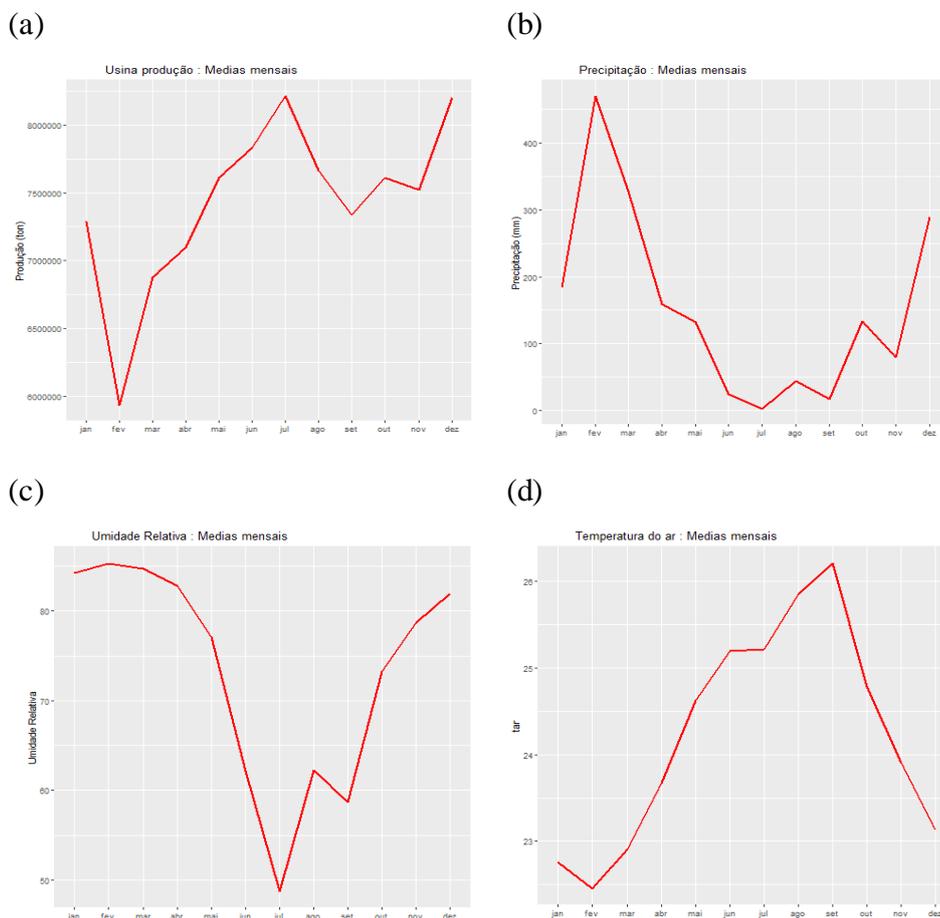
A Figura 5 refere a distribuição dos acumulados mensais em 2017 da produção de minério de ferro (Figura 5a), precipitação (Figura 5b), umidade relativa do ar (Figura 5c) e da temperatura média do ar (Figura 5d). Nota-se que os maiores volumes de chuva (Figura 5b) e os altos valores de umidade relativa do ar (Figura 5C), ocorreram no primeiro semestre do ano, e portanto, identifica-se como o período chuvoso. Além disso, observa-se que no segundo semestre ocorreram as temperaturas mais elevadas (Figura 5d) e um melhor desempenho da produção de minério de ferro (Figura 5a), sendo este o período menos chuvoso.

Nota-se ainda que no segundo semestre, a produção mensal de minério de ferro apresenta um comportamento peculiar em relação a temperatura.

No primeiro semestre de 2017, o mês de fevereiro destacou-se por apresentar grande volume de chuva acima de 450 mm, altos valores de umidade relativa do ar, entorno de 85% e

consequentemente temperaturas amenas, e a menor taxa de produção de minério de ferro do ano, entorno de 197 mil toneladas. Em contrapartida no período seco, o mês de julho destacou-se por conter a maior produção mineral, 282 mil toneladas, com os menores valores de chuva (2,2mm) e umidade relativa do ar (45%).

Figura 5 – Distribuição mensal das variáveis meteorológicas e produção de minério de ferro do complexo mineral de Carajás no ano de 2017. (a) Produção de minério, (b) precipitação, (c) Umidade relativa do ar e (d) temperatura média do ar.



Fonte: Próprio autor (2020).

4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA PRODUÇÃO MINERAL

Conforme visto anteriormente, a produção mineral apresenta uma relação de comportamento inverso com a chuva e com a umidade relativa do ar, enquanto a temperatura do ar, apresenta relação direta. Diante disto, nas análises seguintes, não foi incluído o estudo do impacto da temperatura do ar em relação a produção mineral, uma vez que a intenção da

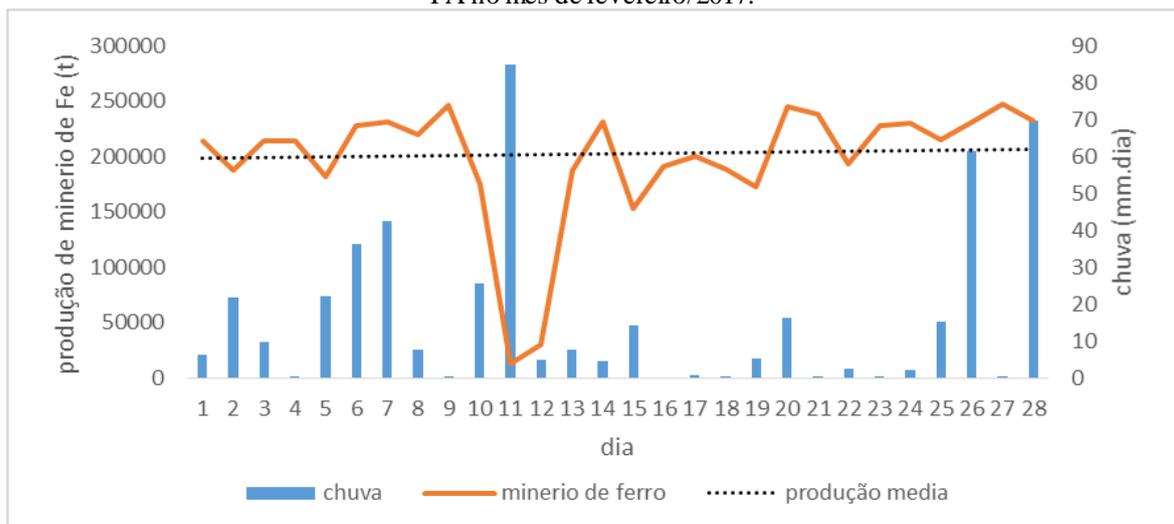
pesquisa é encontrar classes de riscos aos impactos daquelas variáveis de correlação inversa à produção mineral.

4.1 PERÍODO CHUVOSO DE 2017

Para análise do impacto das variáveis meteorológicas sobre a produção mineral durante o período chuvoso de 2017, selecionou-se o mês de fevereiro por apresentar os maiores acumulados chuva e maiores valores de umidade relativa do ar.

O mês de fevereiro quando observado em escala de dias (Figura 6), percebe-se uma variação temporal das chuvas. Durante todo o mês, houve vários episódios de chuvas que causaram impactos significativos na produção de minério de ferro (Figura 7). No entanto, ao analisar em escala horária, percebe-se que o dia 11/02 houve um evento de chuva que durou de 13 horas, resultando em acumulados de 85 mm (Figura 8). Neste episódio, a produção mineral em Carajás ficou em torno de 13 mil toneladas, muito abaixo da produção média diária que é de pouco mais de 200mil toneladas de minério de ferro.

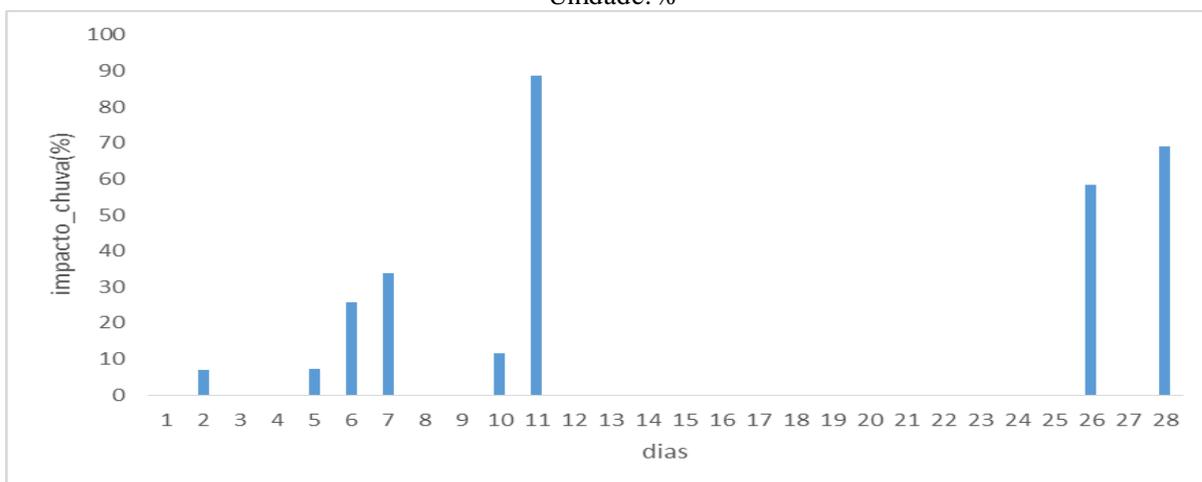
Figura 6 – Distribuição diária da chuva (mm/dia) e da produção de minério de ferro (toneladas/dia) em Carajás - PA no mês de fevereiro/2017.



Fonte: Próprio autor (2020).

O evento de chuva do dia 11/02 impactou em 90% a produção de minério de ferro em Carajás, e os demais episódios de chuvas intermitentes afetaram em até 60% (Figura 7).

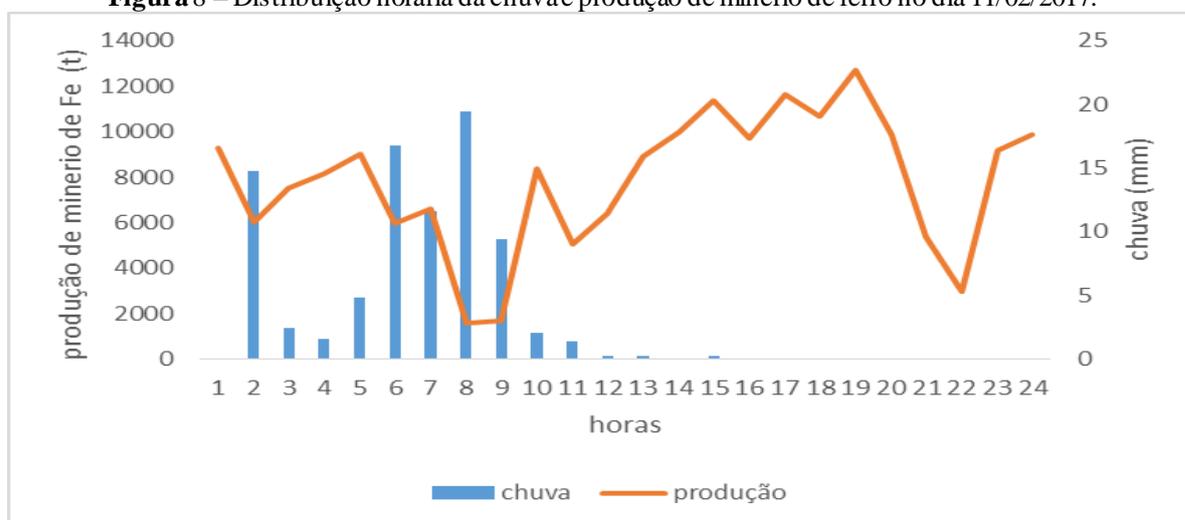
Figura 7 – Impacto da chuva na produção de minério de ferro em Carajás -PA no mês de fevereiro/2017.
Unidade: %



Fonte: Próprio autor (2020).

Fazendo a análise horária do dia 11/02 percebe-se que as chuvas foram frequentes no período da manhã (Figura 8), com o maior valor registrado às 8 horas local, o equivalente a 19 mm. Quando comparados os acumulados de produção das 7 horas e 8 horas, percebe-se que a chuva ocorrida às 8 horas provocou uma redução na produção de minério de 4 mil toneladas, nota-se ainda que o seu impacto é sentido até a hora seguinte, 9 horas. No período da tarde, verifica-se um aumento na produção, momento que não há registro de chuva. Diante disto, entende-se que o impacto de chuvas na produção mineral, tem relação não somente a sua intensidade, mas também a duração.

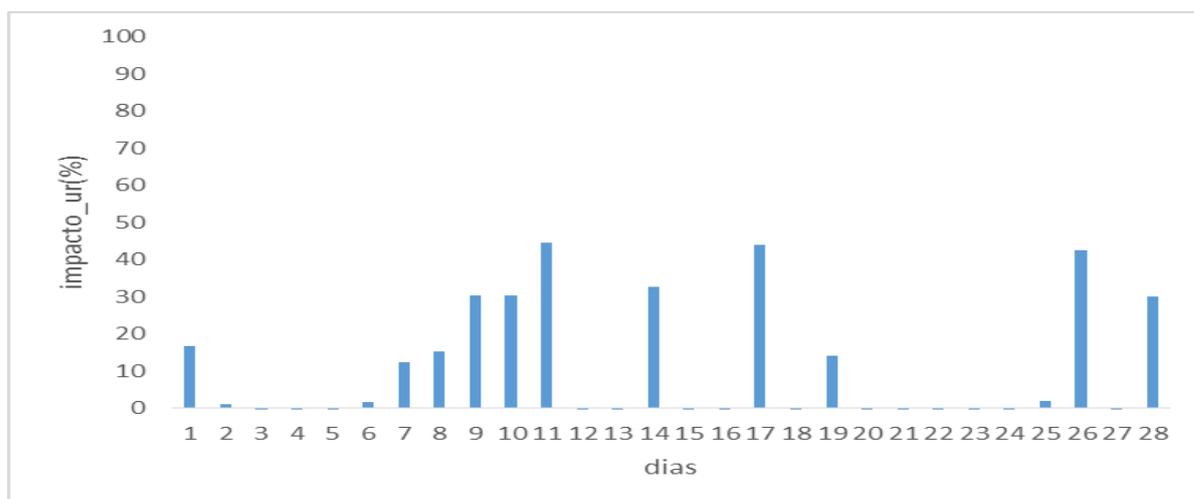
Figura 8 – Distribuição horária da chuva e produção de minério de ferro no dia 11/02/2017.



Fonte: Próprio autor (2020).

Apesar do mês de fevereiro ter apresentado grandes valores de chuva, nota-se que a umidade relativa do ar impactou em torno de 50% da produção de minério em Carajás (Figura 9). No entanto, percebe-se que entre as variáveis meteorológicas analisadas, a chuva é aquela que mais interfere negativamente no desempenho da produção mineral.

Figura 9 – Impacto da umidade relativa na produção de minério de ferro em Carajás -PA no mês de fevereiro/2017. Unidade: %.



Fonte: Próprio autor (2020).

A partir do cálculo do índice de impacto, foi possível determinar classes de critérios de risco para a produção mineral associado mineral associado a chuva. Na tabela 11 encontram-se as proposições de classes de risco operacional a produção de minério de ferro em Carajás-PA associada a chuva horária. Nela, observa-se que para acumulados de chuva entre 0 e 15 mm/h não há impacto na produção, enquanto volumes de chuva acima de 60 mm/h há alto risco de impactar a produção mineral em Carajás-PA, incluindo paralisações operacionais.

Tabela 11 – Classes de critério de risco operacional na produção de mineral em Carajás -PA associado aos volumes de chuva por hora..

CHUVA	RISCO	%IMPACTO
0 -15 mm	MUITO BAIXO	0%
15 – 30mm	BAIXO	30%
30 – 60mm	MODERADO	50%
>60mm	ALTO	>80%

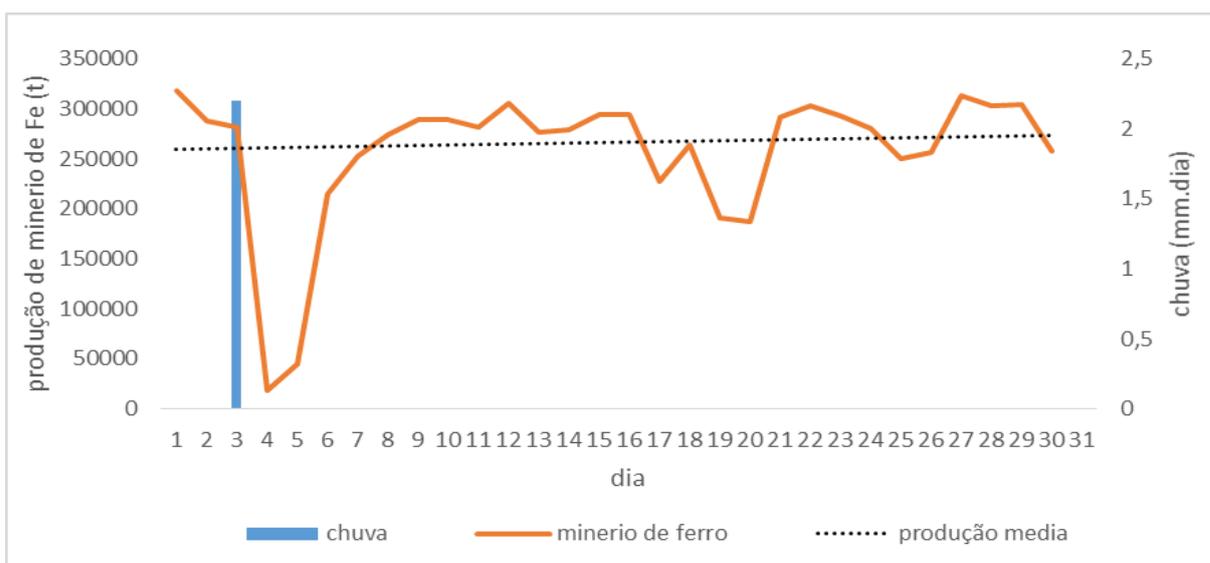
Fonte: Próprio autor (2020).

4.2 PERÍODO SECO DE 2017

Para representar o período menos chuvoso do ano de 2017, selecionou-se o mês de julho por apresentar o menor acumulado de chuva e maiores taxas de produção mineral.

Em julho (Figura 10), houve apenas um episódio de chuva no mês, com acumulado de 2,2 mm no dia 03/07. No entanto, percebe-se que ao longo do mês, houve alguns decaimentos na produção de minério de ferro em Carajás-PA, e portanto, sugere-se que a variação da produção mineral do mês de julho não pode ser explicada pela chuva e talvez esteja associada a outro fator, como a retomada de produção pela empresa após o período chuvoso.

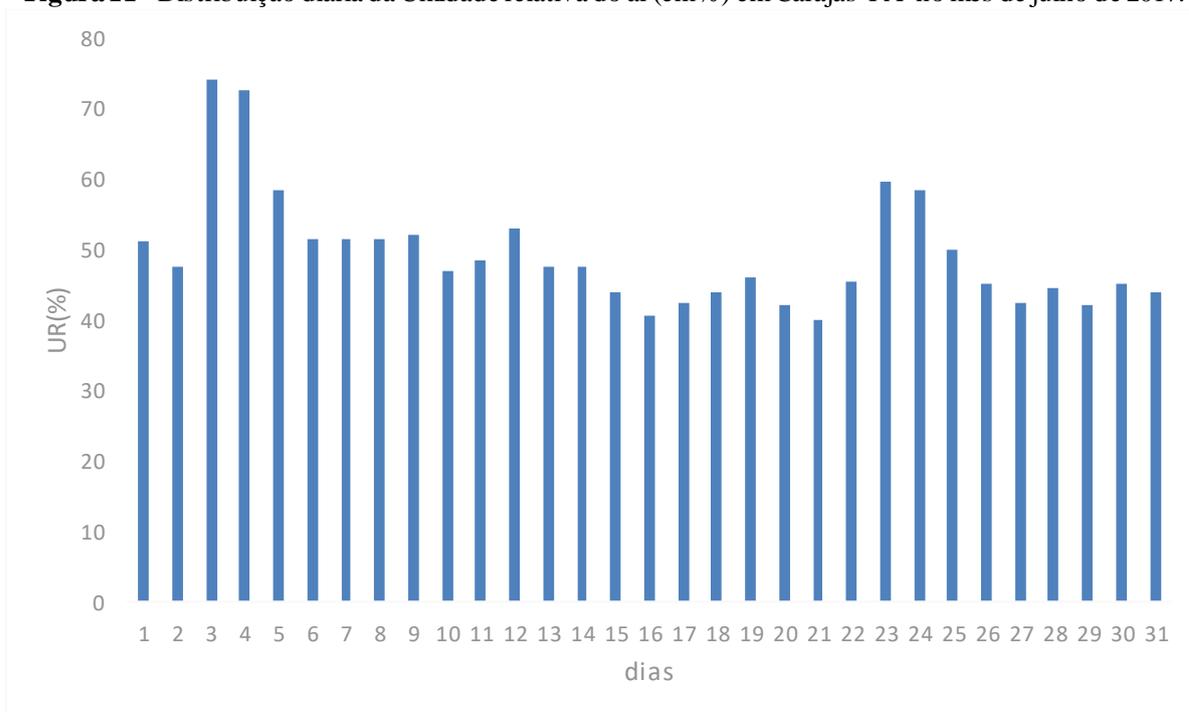
Figura 10 – Distribuição diária de chuva (mm/dia) e produção de minério de ferro (tonelada/dia) no mês de julho/17.



Fonte: Próprio autor (2020).

No entanto, pela Figura 11 percebe-se que a variação da produção mineral do mês de julho de 2017, pode estar associada com as variações na UR, uma vez que nos dias em que houve valores de UR acima de 60%, coincidiram com reduções na produção mineral, principalmente nos dias 03 e 04 momento em que os valores da umidade relativa do ar estiveram próximas ao ponto de saturação do minério de ferro (80%).

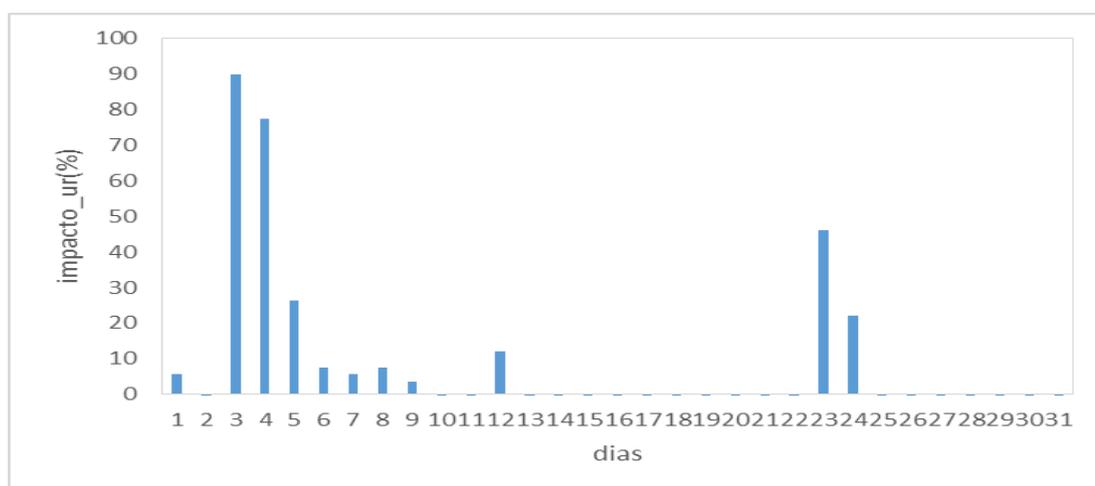
Figura 11 - Distribuição diária da Umidade relativa do ar (em%) em Carajás -PA no mês de julho de 2017.



Fonte: Próprio autor (2020).

Partindo desta última análise, fez-se o cálculo do índice de impacto (Figura 11), onde vê-se que os dias com os mais altos valores de umidade relativa do ar, apresentaram um impacto de até 90% sobre a produção mineral, o que pode estar associado a qualidade do minério.

Figura 12 – Impacto da umidade relativa do ar na produção de minério de ferro no mês de julho/2017. Unidade (%).



Fonte: Próprio autor (2020).

Na tabela 12 encontram-se as sugestões de classes de risco operacional para produção de minério de ferro em Carajás-PA associada a umidade relativa do ar para o período menos chuvoso. Nela, observa-se que para valores acima de 70% apresentam risco significativo a produção mineral em Carajás-PA.

Tabela 12 – Classes de critério de risco operacional e porcentagem de impacto da umidade relativa do ar na produção de minério de ferro.

UR	RISCO	%IMPACTO
< 60%	BAIXO	30%
60 - 70%	MODERADO	50%
>70%	ALTO	>70%

Fonte: Próprio autor (2020).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a relação entre variáveis meteorológicas e a produção de minério de ferro em Carajás-PA da mineradora Vale no ano de 2017. O teste de hipóteses, acusou uma relação estatisticamente significante entre as amostras. A correlação de Pearson, apresentou direção inversa da produção mineral em relação a chuva e umidade relativa do ar, em contrapartida apresentou correlação direta com a temperatura do ar. No mês mais chuvoso do ano de 2017 (fevereiro), a variável meteorológica que mais impactou a produção foi a chuva (acima de 80%) ocasionados por grandes volumes pluviométricos. Por outro lado, no mês mais seco de 2017 (julho), a umidade relativa do ar mostrou-se capaz de interferir na produção de minério de ferro, na ocorrência de valores acima de 70%. Pelas análises horárias, verificou-se que a ocorrência de chuva na área da mina, resultou em uma redução substancial da produção de minério de ferro, como foi o caso de fevereiro de 2017. Verificou-se ainda que na ausência de chuvas, a umidade relativa do ar pode interferir na qualidade do minério e assim impactar na produção mineral.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, Clênia R. Linha de Instabilidade da Amazônia: estudo de caso e Importância das Características do Perfil do Vento na sua Formação e Desenvolvimento. **Revista Ciência e Natura**, v. 33, n. 2, p. 197-226, 2011. DOI [10.5902/2179460X9370](https://doi.org/10.5902/2179460X9370). Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/artic le/view/9370>. Acesso em: 01 ago. 2020.

ARAÚJO, Rosimeire G. *et al.* A influência do evento El Niño - Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, [online], v. 43, n. 4, p. 469-480, 2013. DOI [10.1590/S0044-59672013000400009](https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000400009). Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672013000400009&lng=pt&t lng=pt. Acesso em: 01 ago. 2020.

CAMPOS, Cláudia R. J.; EICHHOLZ, Cristiano W. Características físicas dos sistemas convectivos de mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 331-345, 2011. DOI [10.1590/S0102-261X2011000200009](https://doi.org/10.1590/S0102-261X2011000200009). Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2011000200009. Acesso em: 01 ago. 2020.

CARVALHO, Leila M. V.; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v.17, n. 1, p. 88-108, 2004. DOI [10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2). Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/jcli/article/17/1/88/30211/The-South-Atlantic-Convergence-Zone-Intensity-Form>. Acesso em: 01 ago. 2020.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F. da; NOBRE, C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 123, n. 11, p. 3163-3174, nov. 1995. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000897347>. Acesso em: 01 ago. 2020.

COHEN, Julia Clarinda P. **Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia**. 1989. 160 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.18.17.31/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2020.

EXAME. **Enchentes na Austrália prejudicam mineradoras**. Mundo. 13 jun. 2018. Disponível em: <https://exame.com/mundo/enchentes-na-australia-prejudicam-mineradoras-2/>. Acesso em: 15 out. 2018.

ESTADO DE MINAS. **MDIC: mesmo com saldo menor, desempenho da balança é mais robusto que em 2017**. Economia. 01 out. 2018. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2018/10/01/internas_economia,993321/mdic-mesmo-com-saldo-menor-desempenho-da-balanca-e-mais-robusto-que.shtml. Acesso em: 19 out. 2018.

ESTADO DE MINAS. **Vale bate recorde de produção em Minas Gerais**. Economia, 30 jul. 2011. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2011/07/30/internas_economia,242395/vale-bate-recorde-de-producao-em-minas-gerais.shtml. Acesso em: 15 out. 2018.

FERREIRA, N. J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M. A. F. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 1, p. 89-98. 2004.

FREITAS, Marcos Airton de S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. **Revista Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 84-95, 1998. DOI [10.5020/23180730.1998.1175](https://doi.org/10.5020/23180730.1998.1175). Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/1175>. Acesso em: 01 ago. 2020.

G1. Dez pontos para entender o vazamento de barragem de mineradora que contamina Barcarena no PA. G1 Pará. 24 fev. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/10-pontos-para-entender-o-vazamento-de-barragem-de-mineradora-que-contamina-barcarena-no-pa.ghtml>. Acesso em: 15 out. 2018.

GRIMM, Alice M.; SILVA DIAS, Pedro L. Analysis of Tropical–Extratropical Interactions with Influence Functions of a Barotropic Model. **Journal Atmospheric Science**, v. 52, n. 20, p. 3538–3555, 1995. DOI [10.1175/1520-0469\(1995\)052<3538:AOTIWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<3538:AOTIWI>2.0.CO;2). Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/jas/article/52/20/3538/23781/Analysis-of-Tropical-Extratropical-Interactions>. Acesso em: 01 ago. 2020.

LOPES, Marcio N. G.; SOUZA, Everaldo B. de; FEEEREIRA, Douglas B. da S. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 9, v. 12, p. 84-102, jan./jul., 2013. DOI [10.5380/abclima.v12i1.31402](https://doi.org/10.5380/abclima.v12i1.31402). Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/31402>. Acesso em: 01 ago. 2020.

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 6, p. 1630-1654, 1998. DOI [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1630:LCVOMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1630:LCVOMC>2.0.CO;2). Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/mwr/article/126/6/1630/66084/Life-Cycle-Variations-of-Mesoscale-Convective>. Acesso em: 01 ago. 2020.

MIRANDA, Josiane A. G. **Efeito da sazonalidade climática regional na produção de minério de ferro da Vale em Carajás - Pará**. 2016. 33 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais) - Instituto Tecnológico Vale, Belém, 2016. Disponível em: <http://www.itv.org/wp-content/uploads/2018/02/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Josiane-Miranda.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2020.

MOURA, Mauricio do N.; VITORINO, Maria Isabel. Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à Zona de Convergência Intertropical. **Revista brasileira de meteorologia**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 475-483, 2012. DOI [10.1590/S0102-77862012000400010](https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000400010). Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/5537>. Acesso em: 01 ago. 2020.

NORONHA, Gustavo C. de; HORA, Mônica de A. G. M. da; SILVA, Luciene P. Análise do Índice de Anomalia de Chuva para a Microbacia de Santa Maria/Cambiocó, RJ. **Revista brasileira de meteorologia**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 74-81, mar. 2016 . DOI <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620140160>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862016000100074&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 28 jan. 2020.

OGLOBO. **Trilhos da Estrada de Ferro Carajás da Vale do Rio Doce**. 8 maio 2009. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/trilhos-da-estrada-de-ferro-carajas-da-vale-do-rio-doce-estao-cobertos-pelas-aguas-3167834>. Acesso em: 21 jun. 2020.

SODRÉ, Giordani R.; VITORINO, Maria Isabel; COHEN, Júlia Clarinda P.; MORAES, Bergson C.. Estudo observacional da convecção de mesoescala em diferentes superfícies no estado do Pará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 5, p. 1281-1293, 2015. DOI <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.5.p1281-1293>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/artic le/view/232958>. Acesso em: 01 ago. 2020.

SOUZA, Everaldo B. de; MORAES, Bergson C. de; FERREIRA, Douglas B. S.; MEIRA FILHO, Luiz Gylvan. Dynamical Downscaling for Railroad Areas in Eastern Amazon and Southeastern Brazil: Current Climate and Near-Future Projections. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 4, n. 2, p. 155-163, abr. 2014. DOI [10.4236/acs.2014.42018](https://doi.org/10.4236/acs.2014.42018). Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=44463>. Acesso em: 01 ago. 2020.

SOUZA, Everaldo B. de; KAYANO, Mary T.; TOTA, Julio; PEZZI, Luciano; FISCH, Gilberto; NOBRE, Carlos. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960 - 1998. **Acta Amazonica**, v. 30, n. 2., p. 305-3018, 2000. DOI [10.1590/1809-43922000302318](https://doi.org/10.1590/1809-43922000302318). Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-5967200000200305. Acesso em: 01 ago. 2020.

VALE. **Qual a importância da mineração para a economia do país**. Notícias. 01 jun. 2017. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutv ale/news/paginas/qual-a-importancia-da-mineracao-para-a-economia-do-pais.aspx#:~:text=Importante%20fonte%20de%20renda%2C%20a,por%20seu%20diferencial%20e%20riqueza>. Acesso em: 15 out. 2018.

VEJA. **Chuvas afetam extração de minério da Vale em MG**. Economia. 9 jan. 2012. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/chuvas-afetam-extracao-de-minerio-da-vale-em-mg/>. Acesso em: 19 out. 2018.

WALISER, Duane E.; GAUTIER, Catherine. A Satellite-derived Climatology of the ITCZ. **Journal of Climate**, v. 6, n. 11, p. 2162-2174, nov. 1993. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26198602>. Acesso em: 01 ago. 2020.