Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

REGIONALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO SOBRE A CADEIA MINERAL NO LESTE DA AMAZÔNIA: CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS NO VERÃO AUSTRAL

Precipitation regionalization along the mineral supply chain in eastern Amazonia: future climate scenarios in the austral summer

Regionalización de la precipitación sobre la cadena mineral en la Amazonia oriental: escenarios climáticos futuros en el verano austral

Cláudia Priscila Wanzeler da Costa
Instituto Tecnológico Vale
claudia.costa@itv.org

Helber Barros Gomes
Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas
helber.gomes@icat.ufal.br

Vânia dos Santos Franco Sodré
Instituto Tecnológico Vale
vania.franco@pq.itv.org

Fabrício Daniel dos Santos Silva
Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas
Fabricio.santos@icat.ufal.br

Douglas Batista da Silva Ferreira
Instituto Tecnológico Vale
douglas.silva.ferreira@itv.org

Edmir dos Santos Jesus
Instituto Tecnológico Vale
edmir.jesus@pq.itv.org

Antônio Vasconcelos Nogueira Neto
Instituto Tecnológico Vale
antonio.nogueira@pq.itv.org

Renata Gonçalves Tedeschi
Instituto Tecnológico Vale
renata.tedeschi@itv.org

Adalcindo Ofir de Souza Magno Duarte
Grownt Consultoria e Inovacao Pesquisa e Desenvolvimento de Sistemas LTDA.
magno.duarte@grownt.tech

Resumo: Diante dos desafios enfrentados pela indústria mineral em equilibrar os elevados custos operacionais em regiões de difícil acesso, atender à crescente demanda global por commodities e, ao mesmo tempo, reduzir as emissões de gases do efeito estufa com vistas à sustentabilidade, torna-se essencial implementar ações de mitigação e adaptação. Essas ações, norteadas por análises de cenários climáticos futuros, são fundamentais para a gestão de riscos do setor frente às mudanças climáticas. O presente estudo analisou os impactos das alterações nos padrões da precipitação sobre o leste da Amazônia, com foco nos efeitos sobre a cadeia mineral. Foram empregados dados mensais de precipitação do CHIRPS e da regionalização do RegCM com o MPI. As análises contemplaram o clima atual (1982 a 2012) e futuro (2020 a 2050) considerando o trimestre de dezembro a fevereiro (DJF). O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) foi aplicado para categorizar os extremos climáticos nas séries de precipitação. As projeções do modelo são de aumento da precipitação durante o trimestre DJF, especialmente nas regiões de Marabá e Ponta da Madeira. As simulações sugerem que o trecho ferroviário entre Açailândia e Nova Vida poderá apresentar maior probabilidade de ocorrência a deslizamentos de terra, caso o cenário futuro seja condizente com o SSP5-8.5. A análise de viés revelou que o modelo tende a subestimar a ocorrência de extremos secos sobre a região de estudo. As projeções para a cadeia mineral indicam maior probabilidade de ocorrência de extremos chuvosos, especialmente sobre os trechos Sossego, Salobo e Ponta da Madeira.

Palavras-Chave: RegCM. Projeções climáticas. Extremos Climáticos. Amazônia oriental. Mineração.

Abstract: The mineral industry faces significant challenges in balancing the high operational costs in remote regions, meeting growing global commodity demand, and reducing greenhouse gas emissions to achieve sustainability goals. Implementing mitigation and adaptation strategies guided by future climate scenario analyses is fundamental for effective risk management in response to climate change. This study analyzed the impacts of changing precipitation patterns in the eastern Amazonia, focusing on the mineral supply chain. Monthly precipitation data from CHIRPS and the RegCM regionalization driven by MPI were employed. The analyses encompass the current climate period (1982–2012) and future projection (2020–2050) for the austral summer (December-January-February, DJF). The Standardized Precipitation Index (SPI) was applied to categorize climate extremes in the precipitation time series. Model projections indicate an increase in precipitation during DJF, particularly in the Marabá and Ponta da Madeira regions. Simulations suggest that the railway section between Açailândia and Nova Vida may experience higher landslide probability if the future scenario aligns with SSP5-8.5. Bias analysis revealed that the model underestimates dry extremes occurrences across the study region. Projections for the mineral supply chain indicate increased probability of wet extreme, particularly over the Sossego, Salobo, and Ponta da Madeira sections.

Keywords: RegCM. Climate projections. Climate extremes. Eastern Amazonia. Mining.

Resumen: Ante los desafíos a los que se enfrenta la industria minera para equilibrar los elevados costes operativos en regiones de difícil acceso, satisfacer la creciente demanda mundial de materias primas y, al mismo tiempo, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con miras a la sostenibilidad, resulta esencial implementar acciones de mitigación y adaptación. Estas acciones, guiadas por análisis de escenarios climáticos futuros, son fundamentales para la gestión de riesgos del sector frente al

cambio climático. El presente estudio analizó los impactos de las alteraciones en los patrones de precipitación sobre el este de la Amazonia, centrándose en los efectos sobre la cadena mineral. Se emplearon datos mensuales de precipitación del CHIRPS y de la regionalización del RegCM con el MPI. Los análisis contemplan el clima actual (1982 a 2012) y futuro (2019 a 2050), considerando el trimestre de diciembre a febrero (DEF). Se aplicó el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para categorizar los extremos climáticos en las series de precipitación. Las proyecciones del modelo indican un aumento de la precipitación durante el trimestre DJF, especialmente en las regiones de Marabá y Ponta da Madeira. Las simulaciones sugieren que el tramo ferroviario entre Acailândia y Nova Vida podría presentar una mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos de tierra, en caso de que el escenario futuro sea coherente con el SSP5-8.5. El análisis de sesgo reveló que el modelo tiende a subestimar la ocurrencia de extremos secos sobre la región de estudio. Las proyecciones para la cadena mineral indican una mayor probabilidad de ocurrencia de extremos lluviosos, especialmente sobre los tramos de Sossego, Salobo y Ponta da Madeira.

Palabras clave: RegCM. Proyecciones climáticas. Extremos climáticos. Amazonia oriental. Minería.

Submetido em: 31/12/2024
Aceito para publicação em: 25/11/2025
Publicado em: 24/07/2026

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia, maior floresta tropical do planeta, desempenha um papel fundamental na regulação do clima global e abriga vastas riquezas, tanto em biodiversidade quanto em recursos minerais, incluindo ouro, níquel, cobre e ferro. A indústria mineral é fundamental para a economia global, pois fornece matérias-primas essenciais para diversos setores, como construção civil, energia, transporte e tecnologia. Além disso, gera empregos na região de atuação, receitas fiscais e impulsiona o crescimento econômico mundial, sendo estratégica para a transição energética e a inovação tecnológica.

Na Amazônia oriental, especificamente no sudeste do estado do Pará, localiza-se uma das maiores jazidas minerais do mundo, especialmente de minério de ferro de alta qualidade, explorado pela empresa VALE, cuja cadeia produtiva se estende até o município de São Luís, no Maranhão. De acordo com Katz (2014), a cadeia de mineração engloba complexos processos minero-logísticos, desde a extração na mina, passando pelo sistema ferroviário, até o escoamento via porto marítimo. Como grande parte dessas operações ocorre a céu aberto, elas estão intrinsicamente expostas às condições meteorológicas. Eventos adversos de tempo e clima podem comprometer a infraestrutura, interromper a logística, elevar riscos ambientais e ocupacionais, e impactar diretamente os custos operacionais (Pearce *et al.*, 2011). Impactos tendem a se intensificar diante do aumento na frequência e magnitude de eventos extremos, tais como inundações, secas severas, tempestades intensas, que podem estar associados ao aquecimento global.

Durante o verão austral (dezembro a fevereiro), o regime pluviométrico na Amazônia oriental é governado por sistemas meteorológicos de diferentes escalas, incluindo Linhas de Instabilidade, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Estes sistemas são modulados pelas Temperaturas da Superfície do Mar (TSM) nos oceanos adjacentes, através de modos de variabilidade como ENOS (El Niño Oscilação Sul) e o Dipolo do Atlântico. Um dos efeitos do aquecimento global sobre os oceanos tem sido o favorecimento de regiões cada vez mais aquecidas que por sua vez alteram padrões dos ventos e a dinâmica dos sistemas meteorológicos.

Nesse contexto, o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) já destacava a alta vulnerabilidade da Amazônia às mudanças

climáticas, projetando aumento nas temperaturas médias e alterações significativas nos padrões de precipitação. O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) reforça essas preocupações, alertando que a continuidade das emissões de gases de efeito estufa exacerbará a exposição da Amazônia a eventos climáticos extremos.

Portanto, integrar cenários climáticos futuros à gestão de riscos é uma medida essencial para garantir a busca por ações de mitigação e adaptação corporativa, especialmente de grandes indústrias. Para isso, a regionalização climática via Modelos Climáticos Regionais (MCR) acoplados a Modelos Globais (MCG) tem sido amplamente empregada (Alves; Marengo, 2010; De Souza *et al.*, 2014; Wanzeler da Costa *et al.*, 2019). A técnica de downscaling dinâmico oferece vantagens significativas sobre o uso direto de saídas de MCGs, pois MCRs conseguem resolver processos atmosféricos de menor escala espacial, fornecendo projeções regionais mais detalhadas baseadas em cenários de emissão e narrativas socioeconômicas (Prein *et al.*, 2019; Ambrizzi *et al.*, 2019).

Face aos desafios impostos pela variabilidade climática ao setor extrativo, este trabalho propõe analisar os impactos das alterações futuras nos padrões da precipitação de verão austral sobre o leste da Amazônia, com foco na cadeia mineral, utilizando o downscaling dinâmico através do modelo RegCM.

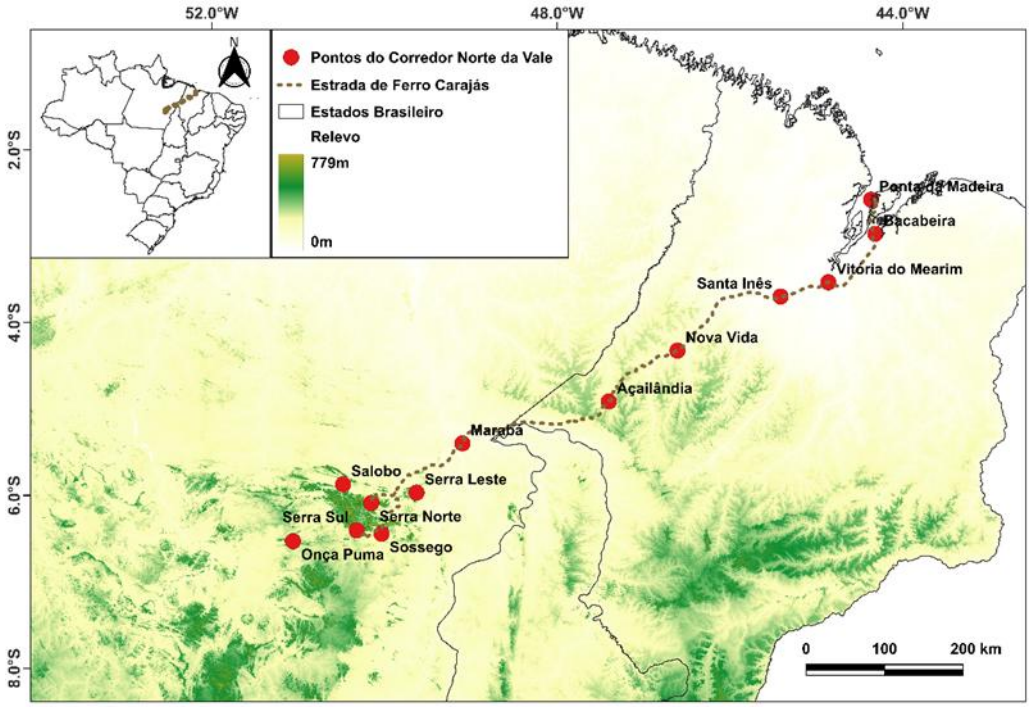
2. METODOLOGIA

O presente estudo dará enfoque à cadeia mineral localizada na Amazônia oriental, que pode ser visualizada na Figura 1, representada por 13 trechos estratégicos (círculos vermelhos na figura) em que passa a estrada de ferro Carajás (EFC), na qual escoa a produção mineral extraída das minas no sudeste do Pará (Onça Puma, Serra Sul, Serra Norte, Serra Leste, Salobo e Sossego) e que possuem grandes reservas minerais como cobre, níquel, manganês e, em especial, ferro (Palheta; Silva; Medeiros, 2015; VALE, [s.d.]). A EFC, em operação desde 1985, ligando os estados do Pará e Maranhão, realiza o transporte de cargas de minério de ferro, manganês, ferro-gusa, cobre, níquel grãos, combustíveis e celulosa, e também o trem com passageiros que trasladam entre os dois estados. O terminal marítimo de Ponta da Madeira, localizado em São Luís – Maranhão é um importante ativo da maior empresa de mineração do Brasil e configura-se como um dos maiores portos brasileiros em volume de carga processada e destina-se, principalmente, à exportação do minério de ferro trazido das minas

da Serra de Carajás, no estado do Pará. Adicionalmente, a região de estudo é caracterizada por relevo acentuado em que estão localizadas as minas, especialmente as de minério de ferro, associados a afloramentos no topo das montanhas e que são conhecidas como cangas (Souza-Filho *et al.*, 2020).

No presente estudo, as análises ao longo da cadeia logística mineral no leste da Amazônia contemplam 13 trechos estratégicos, agrupados em três setores: mineração (Salobo, Sossego, Onça Puma, Serras Norte, Leste e Sul); ferrovia de escoamento da produção (Marabá, Açailândia, Nova Vida, Santa Inês, Vitória do Mearim e Bacabeira); e porto (Ponta da Madeira), local de embarque do minério. A Tabela 1 apresenta as coordenadas geográficas dos trechos analisados.

Figura 1 - Localização da área de estudo: Corredor Norte da Vale. As cores representam a topografia (metros) da região. Os círculos em vermelho representam os pontos ou trechos ao longo da cadeia mineral analisados neste estudo.



Fonte: elaborado pelos autores (2024).

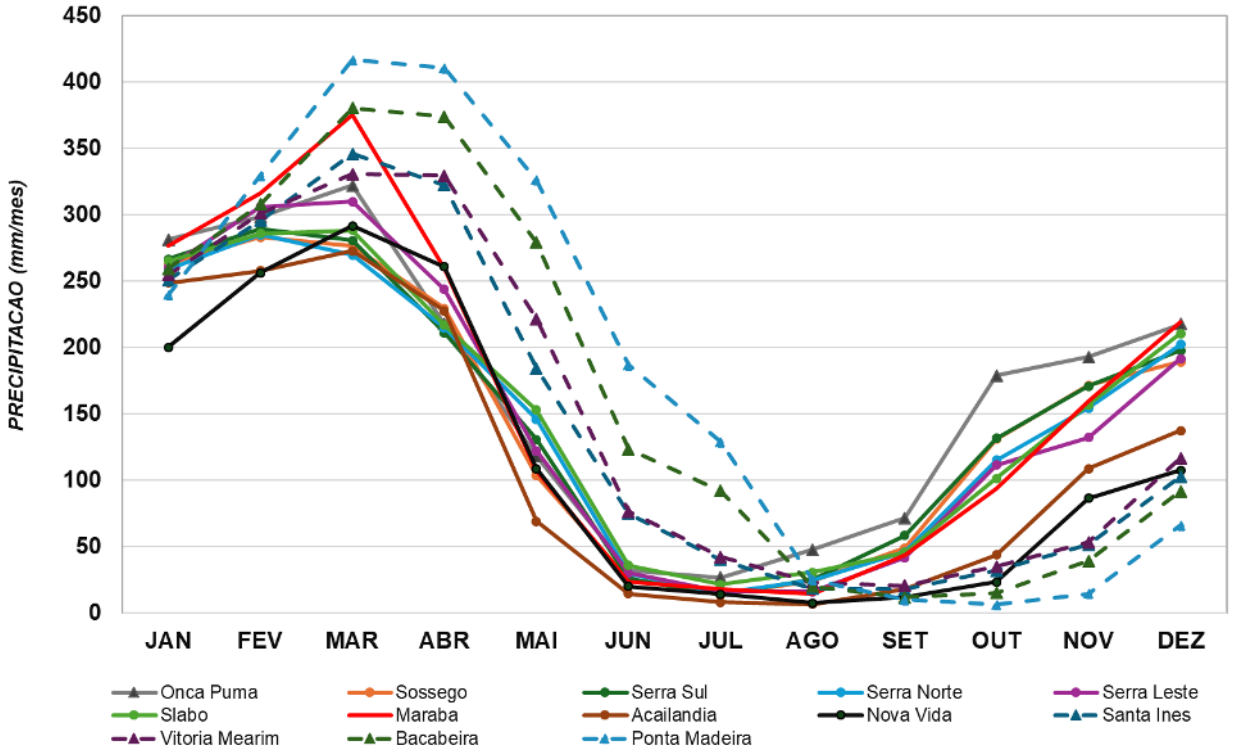
Tabela 1- Coordenadas geográficas em 13 trechos estratégicos da cadeia mineral no leste da Amazônia.

Trecho	Latitude (S)	Longitude (O)
Onça Puma	-6,53	-51,06
Sossego	-6,44	-50,03
Serra Sul	-6,40	-50,32
Serra Norte	-6,09	-50,15
Serra Leste	-5,97	-49,63
Salobo	-5,87	-50,48
Marabá	-5,40	-49,10
Açailândia	-4,91	-47,40
Nova Vida	-4,32	-46,61
Santa Inês	-3,70	-45,41
Vitória do Mearim	-3,53	-44,86
Bacabeira	-2,97	-44,32
Ponta da Madeira	-2,58	-44,37

Fonte: elaborado pelos autores (2024).

A precipitação é um elemento de alta variabilidade espacial e temporal sobre a Amazônia, especialmente em sua porção leste (Marengo *et al.*, 2011), tornando-a a variável meteorológica mais difícil de prever (Reboita *et al.*, 2024). O regime pluviométrico sobre a região é regido pelo sistema de monção e apresenta estações chuvosa e seca bem definidas. A Figura 2 apresenta o ciclo anual da precipitação nos 13 trechos da cadeia mineral. Observa-se que o período chuvoso, definido por acumulados mensais superiores a 150 mm/mês, ocorre predominantemente de dezembro a abril. Exceções são Ponta da Madeira e Bacabeira, onde esse regime se desloca para o intervalo de janeiro a junho. Em contrapartida, os menores volumes pluviométricos (inferiores a 100 mm/mês) concentram-se entre junho e setembro, salvo em Bacabeira e Ponta da Madeira, onde o período seco ocorre de agosto a dezembro.

Figura 2 – Climatologia (1982 a 2012) mensal da precipitação (mm) observada (dados Chirps) em 13 trechos estratégicos da cadeia mineral no leste da Amazônia.



Fonte: elaborado pelos autores (2024).

2.1. Dados observacionais

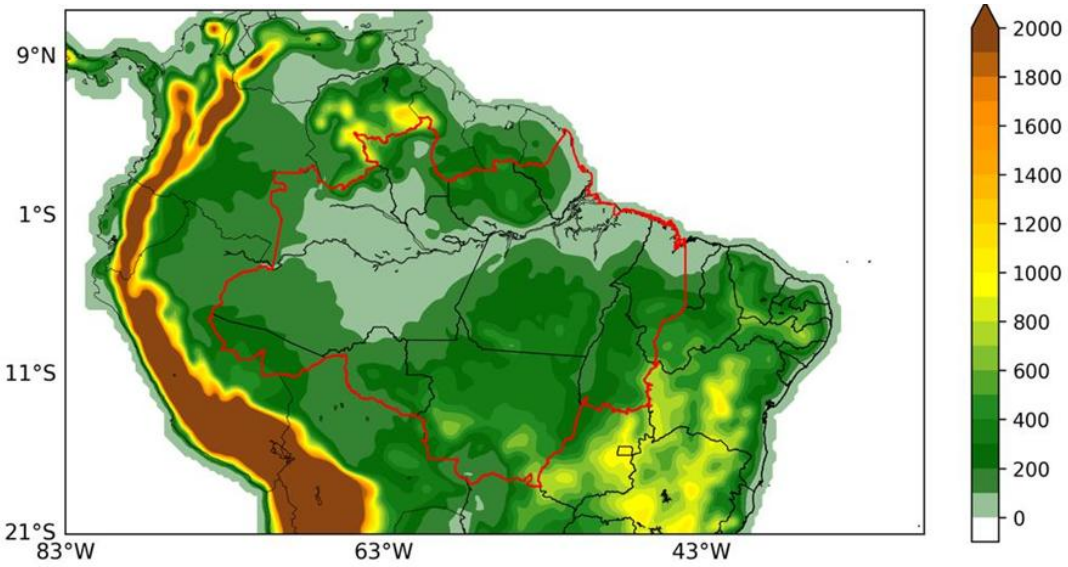
Como referência da precipitação observada na região de estudo, utilizou-se dados diários do CHIRPS (Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations) na resolução espacial de 0,05° de latitude por 0,05° de longitude no período de 1982 a 2012, a partir daqui chamado por Chirps. O Chirps utiliza uma técnica de interpolação de alta resolução baseada em estimativas de precipitação observadas por satélite, combinada com observações de superfície do Sistema Global de Telecomunicações da Organização Meteorológica Mundial e in situ (Funk *et al.*, 2015). A precipitação estimada pelo Chirps tem sido muito bem avaliada em representar a variabilidade espacial e temporal sobre a Amazônia, bem como os eventos extremos (Cavalcante *et al.*, 2020; Dos Santos Silva *et al.*, 2023).

2.2. Configuração do experimento com modelagem climática regional sobre a Amazônia

O clima sobre a Amazônia foi regionalizado com o modelo climático regional RegCM – Versão 4.7.1, atualmente mantido pelo ICTP (Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP – Giorgi; Elguindi, 2014), a partir daqui denominado por RegCM. As condições iniciais e de contorno foram definidas pelo modelo do sistema Terrestre (ESM, sigla em inglês) de alta resolução (HR, sigla em inglês) do Max Planck Institute (MPI-ESM1-2-HR - Müller *et al.*, 2018), denominado no estudo por MPI, obtido em https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/, com resolução horizontal de aproximadamente 100 km (0,9°de latitude por 0,9°de longitude). O MPI-ESM1-2-HR tem sido indicado como um dos modelos CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) em reproduzir de forma satisfatória a variabilidade espaço-temporal da precipitação na Amazônia no clima presente, sendo também confiável em estudos do clima futuro (Oliveira *et al.*, 2023).

Utilizou-se a versão hidrostática do RegCM com resolução horizontal de aproximadamente 25 km, 23 níveis verticais e com topo do modelo em 50 hPa, acoplado ao modelo de superfície dinâmico Community Land Model version 4.5 (CLM4.5), usado para resolver os processos na interface solo-planta-atmosfera. Para as simulações climáticas foi utilizada a projeção Mercator Normal, passo de tempo de 30 minutos e número de pontos de grade em Y e X de 145 e 240, respectivamente. Na parametrização de convecção cumulus, foram utilizados o esquema Tiedtke (Tiedtke, 1996) sobre as áreas continentais e o esquema Kain-Fritsch (Kain-Fritsch, 1990; Kain, 2004) sobre as áreas oceânicas, enquanto para a escala da sub-grade foi usado a umidade explícita (Pal *et al.*, 2007). Para a camada limite adotou-se o esquema Holtslag PBL (Holtslag *et al.*, 1990). O domínio das simulações climáticas cobre parte da América do Sul, incluindo a Amazônia Brasileira, e oceano Atlântico Sul, conforme pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Domínio e topografia (metros - área hachurada) das simulações climáticas do RegCM com resolução horizontal de 25 km. A linha sólida vermelha representa a área da Amazônia Legal Brasileira.



Fonte: elaborado pelos autores (2024).

Conforme mencionado anteriormente, as integrações com o RegCM foram realizadas para o clima presente, de 1980 a 2012, e para o clima futuro, de 2015 a 2050 considerando o cenário pessimista do IPCC em seu sexto relatório sobre mudanças climáticas: SSP5-8.5. No entanto, descartou-se o primeiro ano de integrações, denominado spin-up, que equivale ao tempo necessário para que a atmosfera e a superfície terrestre sejam ajustadas a um estado de equilíbrio mútuo (Wilson *et al.*, 2015). Sendo assim, o período considerado para as análises da simulação histórica foi de 1982 a 2012 (30 anos) e para o cenário futuro, o período de 2020 a 2050 (31 anos).

De acordo com a síntese do sexto relatório do IPCC (AR6), a queima de combustíveis fósseis é a principal causa do aquecimento global (IPCC, 2023). Todavia, apesar das diversas frentes mundiais para redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) - na tentativa de manter o aumento da temperatura da superfície do planeta em até 1,5°C, as projeções ainda indicam um aumento das emissões provenientes de infraestruturas (existentes ou planejadas) baseadas na queima de combustíveis fósseis. Ressalta-se a importância do controle do CO_2, devido ao seu alto potencial de aquecimento.

Os novos cenários adotados no AR6-IPCC combinam narrativas socioeconômicas de base ou SSPs (Shared Socio-economic Pathways) com as diferentes trajetórias de emissões, baseadas nas forçantes radiativas conhecidas por RCPs (Representative Concentration

Pathways - van Vuuren *et al.*, 2011). Assim, os novos cenários incorporam suposições sobre desenvolvimentos socioeconômicos futuros, como crescimento populacional, tendências econômicas e avanços tecnológicos (O'Neill *et al.*, 2017).

Nesse sentido, a análise do clima futuro pautou-se na narrativa SSP5 - 8.5, que descreve uma trajetória de desenvolvimento baseada na queima de combustíveis fósseis, com altos desafios para a mitigação e baixos para a adaptação, associada a elevadas taxas de emissão (van Vuuren *et al.*, 2011; O'Neill *et al.*, 2016; Riahi *et al.*, 2017).

2.3. Procedimentos Metodológicos

Devido a diferença na resolução horizontal entre os dados observados (Chirps: 0,05°) e simulados (RegCM: 0,225°), realizou-se a padronização das grades para viabilizar a análise qualitativa. Os dados do Chirps foram interpolados para a resolução de 0,225° (~25km) através da interpolação bilinear (função remapbil) utilizando o sofware Climate Data Operator (CDO). De modo análogo, os dados do RegCM também foram remapeados para a grade regular de 0,225°. Posteriormente, os dados diários de precipitação de ambos os conjuntos foram acumulados mensalmente para a Amazônia oriental. Calculou-se, então, a média sazonal para o trimestre de verão austral (dezembro, janeiro, fevereiro - DJF), visando analisar as mudanças futuras de precipitação e a probabilidade de extremos climáticos.

A mudança na precipitação no futuro próximo (2020 a 2050) foi obtida pela diferença entre a projeção do RegCM - submetida previamente à correção de viés (De Souza *et al.*, 2014), e a climatologia atual observada (1982 a 2012).

Os extremos chuvosos e secos nos 13 trechos ao longo da cadeia mineral no leste da Amazônia foram caracterizados utilizando o Índice de Precipitação Normalizada (SPI, sigla em inglês) desenvolvido por McKee *et al.* (1993). O cálculo baseou-se nos dados mensais do Chirps e do RegCM (cenários Histórico e SSP5-8.5), conforme a equação abaixo:

(1)
$$SPI = Z_i = \frac{(P_i - \bar{P}_i)}{\sigma_i}$$

Onde: P_i é a precipitação observada, $\bar{P}_i$ e σ_i são a média e o desvio padrão da série ajustada, respectivamente.

Foram necessários alguns procedimentos de ajustes na distribuição dos dados de precipitação antes do cálculo do SPI e que seguiram a metodologia empregada em Da Costa *et al.* (2021). Desta forma, os valores quantitativos de SPI que ultrapassam a magnitude, em módulo, o valor de 1,5 são definidos como extremos climáticos. Assim, o Extremo Chuvoso foi categorizado quando o valor do SPI ultrapassa +1,5, ao passo que, o Extremo Seco, definido quando o valor do SPI for inferior a -1,5. Posteriormente, agrupou-se os valores mensais do SPI considerando o trimestre dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) e, por fim determinou-se a frequência relativa (***Fr***) dos eventos de ocorrências de extremos secos e chuvosos, através da equação 2.

(2)
$$\boldsymbol{Fr} = \left(\frac{F_a}{n}\right) \times 100$$

Onde: F_a é a frequência absoluta (número de vezes em que determinada classe ou categoria aparece na série de dados), e *n*, o número de elementos da amostra.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados da regionalização de alta resolução da precipitação, via RegCM, em 13 trechos ao longo da cadeia mineral no leste da Amazônia. A Figura 4 ilustra as projeções de mudança nos padrões médios da precipitação (mm) para o futuro próximo (2020 - 2050), enquanto a Tabela 2 exibe as probabilidades de eventos extremos secos e chuvosos, tendo como referência o período de 1982 a 2012. O foco das análises é o verão austral (dezembro a fevereiro – DJF).

A Figura 4a mostra a climatologia da precipitação observada sobre a cadeia mineral no leste da Amazônia no verão austral. Nela, é possível notar que a região de estudo já se encontra no período chuvoso, especialmente os trechos representativos das minas, com média entre 225 e 275 mm/mês, o que pode ser explicado por episódios de ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), comuns durante esse trimestre (Carvalho *et al.*, 2004). Essa condição, indica que o minério expedido das minas já apresenta umidade elevada. Ao longo do trajeto ferroviário, o produto absorve mais umidade, visto que os vagões, desprovidos de cobertura, permanecem expostos às intempéries. Por fim, no porto Ponta da Madeira (PdM) - onde a precipitação média varia de 200 a 225 mm/mês, associada a Zona de Convergência

Intertropical (De Souza *et al.*, 2004), a cadeia produtiva mineral enfrenta gargalos operacionais. A necessidade de aguardar a redução da umidade do minério até níveis mais seguros para o embarque (Limite de Umidade Transportável – TML, sigla em inglês) dificulta o aumento da vazão da produção (Figueiredo *et al.*, 2019; Fadel *et al.*, 2020, 2022, 2023). Adicionalmente, a variabilidade climática de grande escala, como o El Niño-Oscilação Sul (ENSO) e o Dipolo do Atlântico, modula o regime de chuvas na região. Condições favoráveis à precipitação, como o estabelecimento de La Niña e/ou dipolo negativo no Atlântico (Atlântico Tropical Sul mais aquecido que o Atlântico Tropical Norte) podem elevar significativamente os volumes pluviométricos no final do trimestre DJF. Tal cenário aumenta a probabilidade de deslizamento de terra na ferrovia, podendo paralisar trechos e impedir a circulação de trens de carga e passageiros, a exemplo do evento ocorrido em março/2022 (VALE, 2022). Além disso, essa condição pode favorecer elevação dos níveis de rios na região causando enchentes que podem também afetar as comunidades vizinhas ao empreendimento (VALE, 2023).

Para um cenário mundial no futuro próximo (2020 a 2050) com as características descritas no SSP5-8.5, a regionalização do MPI/RegCM aponta para um aumento da precipitação de verão (acima de 10 mm/mês) sobre a cadeia mineral, especialmente no Porto Ponta da Madeira e Marabá (Figura 4b). Dado o histórico de inundações em Marabá-PA (Almeida, 2012), a combinação entre o incremento pluviométrico projetado e a urbanização desordenada sugere que o município poderá enfrentar eventos de cheia cada vez mais intensos. Essa condição potencializa os riscos de interrupção no tráfego ferroviário de minério e os impactos sobre a população residente no entorno da ferrovia, como o observado durante as cheias do Rio Vermelho (2009) e do Rio Tocantins (2018). Ressalta-se a atenção necessária ao trecho entre Açailândia e Nova Vida, área já suscetível a frequentes deslizamentos de terra, que obstruem rodovias e ferrovias (Jesus *et al.*, 2024). Para esta região, o modelo projeta aumento na precipitação de verão entre 15 e 20 mm/mês, o que pode elevar ainda mais os riscos geotécnicos. Dentre as minas localizadas no sudeste do Pará, apenas para Onça Puma e Serra Sul não são projetadas alterações nos padrões de precipitação em DJF.

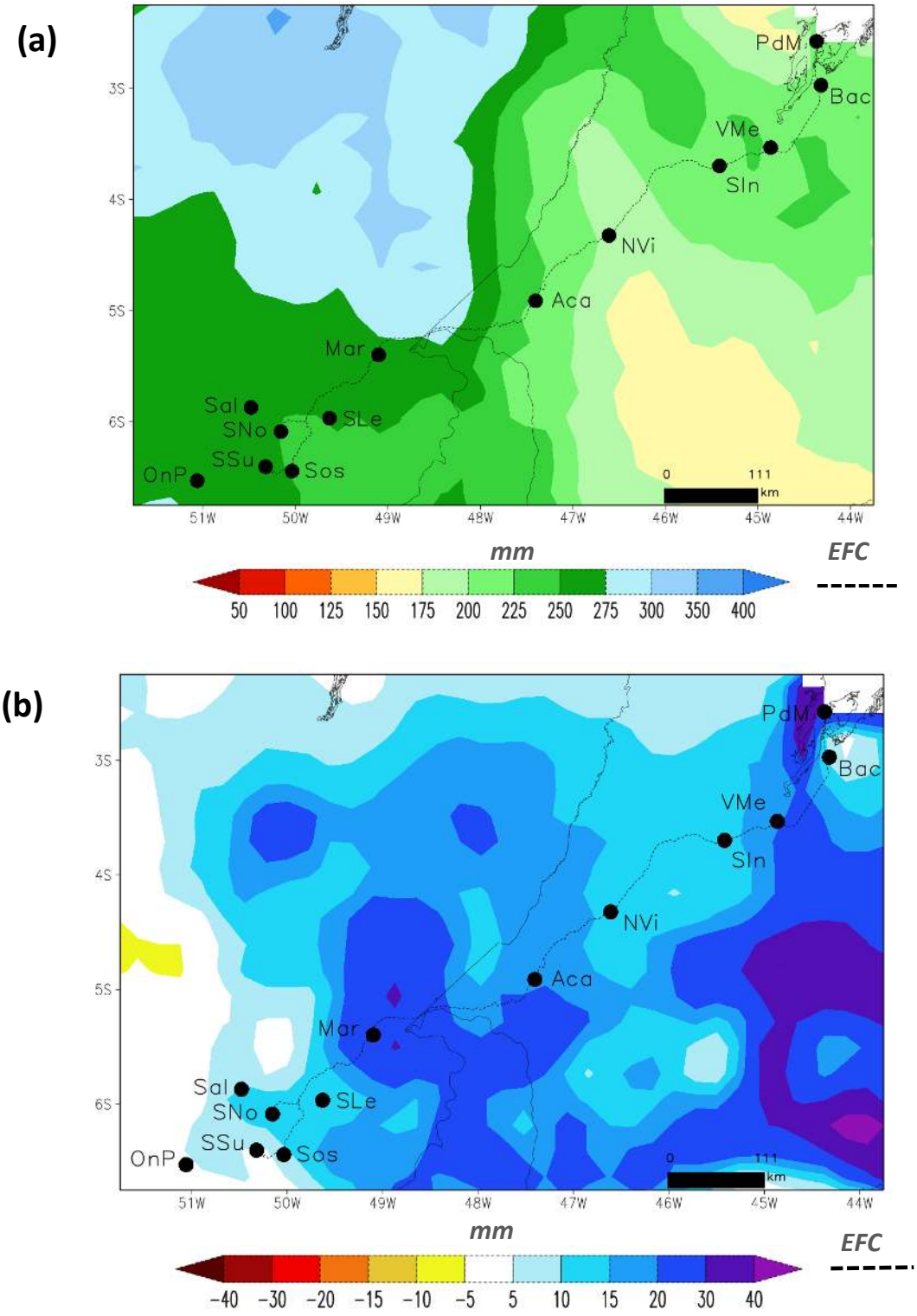
A análise da ocorrência de eventos extremos no verão austral sobre a cadeia mineral foi avaliada a partir da frequência relativa das classes de extremos secos e chuvosos (Tabela 2). Avaliou-se, também, a capacidade do RegCM em representar a frequência de extremos no clima atual (1982 a 2012) através da análise do viés com referência ao observado pelo Chirps. Valores positivos indicam superestimativa da frequência pelo modelo; valores negativos,

subestimativa; e valores nulos (em verde) denotam boa acurácia do RegCM.

Nota-se na tabela 2, que o modelo tende a subestimar a ocorrência dos extremos secos em comparação aos chuvosos na região de estudo, especialmente nos trechos localizados na porção norte da ferrovia (Santa Inês, Vitória Mearim, Bacabeira) e no porto. No entanto, teve boa performance ao representar os extremos secos sobre Açailândia. Quanto aos extremos chuvosos, a performance do RegCM foi heterogênea: houve subestimativa para Onça Puma, Serra Norte, Serra Leste, Açailândia, Santa Inês e Bacabeira, e superestimativa em Serra Sul, Marabá, Nova Vida e Vitória do Mearim. Mas, demonstrou habilidade em identificar os extremos chuvosos sobre Sossego, Salobo e Ponta da Madeira. Importante destacar que, embora os modelos climáticos frequentemente demonstram dificuldade em representar eventos úmidos, a regionalização do MPI com o RegCM apresentou resultados razoavelmente melhores para essa classe de eventos. Desta forma, as projeções de eventos extremos no cenário SSP5-8.5 indicam maior probabilidade de ocorrência de extremos chuvosos no futuro próximo sobre a cadeia mineral, especialmente sobre a Serra Sul (17%). Todavia, deve-se considerar o viés sistemático de superestimativa do modelo para essa localidade. Para os trechos onde o RegCM apresentou boa acurácia histórica, a probabilidade de ocorrência de extremos chuvosos até 2050 é de 13% em Sossego e de 10% em Salobo e PdM. Em outras palavras, dentre todas as classes do SPI (extremos secos, seco, normal, chuvoso, extremos chuvosos) identificadas no período de 2020 a 2050 para Sossego, por exemplo, 13% da série de dados de projeções referem-se somente a ocorrência de extremos chuvosos. Por fim, as projeções do RegCM não indicam extremos secos ao longo da ferrovia no início da estação chuvosa.

Os resultados obtidos para o leste da Amazônia corroboram com os encontrados por Da Costa *et al.* (2021). Embora esses autores tenham utilizado diferentes modelos e bases de dados observacionais suas projeções para um cenário intermediário (RCP 4.5 – IPCC AR5) também apontaram maior probabilidade de ocorrência de extremos chuvosos sobre a região de estudo, especialmente na porção norte da cadeia mineral, onde se localiza o porto Ponta da Madeira – local crítico onde o embarque de minério é interrompido sob chuva.

Figura 4 – Distribuição espacial da precipitação sobre a cadeia mineral no leste da Amazônia, no verão austral (Dez, Jan, Fev): (a) Média observada entre 1982 e 2012; (b) Cenário de mudança na precipitação no futuro próximo (2020-2050) considerando SSP5-8.5, com referência ao período de 1982 a 2012. Os círculos indicam os 13 trechos analisados ao longo da cadeia mineral. *EFC*: Estrada de Ferro Carajás. Unidade: milímetros (mm). Na barra de cores em (b), valores positivos(negativos) indicam aumento (redução) da precipitação no futuro.



Fonte: elaborado pelos autores (2024).

Tabela 2 - Frequência relativa (Fr) para as classes de Extremos Seco e Chuvoso nos 13 trechos ao longo da cadeia mineral no leste da Amazônia: Viés de Fr no clima presente (1982 – 2012) obtido pela diferença entre RegCM e Chirps, onde valores positivos(negativos) indicam que o RegCM superestima(subestima) a classe de extremos; Probabilidade de ocorrência de extremos secos e chuvosos nos próximos 31 anos (2020 a 2050). Unidade: %.

Trecho	VIÉS (RegCM – CHIRPS)		PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA NO FUTURO (2020 -2050)	
	EXTREMOS SECOS	EXTREMOS CHUVOSOS	EXTREMOS SECOS	EXTREMOS CHUVOSOS
Onça Puma	-3	-3	3	10
Sossego	3	0	3	13
Serra Sul	-3	3	3	17
Serra Norte	3	-3	3	13
Serra Leste	-3	-3	0	13
Salobo	-3	0	0	10
Marabá	-3	3	0	10
Açailândia	0	-3	0	10
Nova Vida	-3	3	0	7
Santa Inês	-7	-3	0	13
Vitória do Mearim	-7	3	0	7
Bacabeira	-10	-3	0	7
Ponta da Madeira	-7	0	3	10

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo trouxe uma breve análise do cenário climático futuro (2020 a 2050) da precipitação no verão austral (dezembro a fevereiro) para a cadeia mineral localizada no leste da Amazônia Brasileira, a partir de downscaling dinâmico com modelo regional RegCM acoplado ao modelo global MPI tendo como base a narrativa SSP5-8.5.

Para um cenário mundial condizente com a narrativa SSP5-8.5, a regionalização do MPI/RegCM indica aumento da precipitação na região de estudo, especialmente em Marabá e Ponta da Madeira. Destaca-se a projeção de intensificação do volume pluviométrico sobre os trechos Açailândia e Nova Vida, áreas que já sofrem com eventos cada vez mais frequentes de deslizamento de terra, tendo como gatilho a chuva. Não há projeções de alterações na precipitação para as minas de Onça Puma e Serra Sul.

Adicionalmente, avaliou-se a probabilidade de ocorrência de extremos climáticos secos e chuvosos em 13 trechos ao longo da cadeia mineral. A análise de viés mostrou que o modelo tende a subestimar a frequência de extremos secos, comparado à percepção de extremos chuvosos. Para o período futuro (2020 – 2050), as projeções indicam maior probabilidade de ocorrência de extremos chuvosos ao longo de toda a cadeia mineral, especialmente nos trechos Sossego, Salobo e Ponta da Madeira, onde a acurácia do modelo é maior (viés próximo de zero).

Quanto aos impactos da chuva sobre processos da cadeia mineral - como o aumento da umidade do minério, obstrução de via férrea por deslizamentos de terra ou inundações fluviais e dificuldades no manuseio e na secagem para embarque seguro, os cenários climáticos projetados para o futuro sugerem potencial para intensificação do volume pluviométrico, o que pode amplificar perdas operacionais e riscos para a vida humana na região. Embora a presente pesquisa tenha considerado apenas um modelo climático, os resultados são consistentes do ponto de vista científico e oferecem informações úteis para o planejamento. Desta forma, é possível recomendar ações aos tomadores de decisão, tais como: Integrar as projeções climáticas regionais como insumo em modelos de planejamento operacional e de gestão de risco da cadeia mineral; adotar medidas preventivas que mitiguem os impactos de extremos chuvosos, especialmente nos trechos mais sensíveis (Sossego, Salobo e Ponta da Madeira), bem como nas áreas sujeitas a deslizamentos de terra (entre Açailândia e Nova Vida); implementar monitoramento hidrometeorológico e planos de resposta a desastres para reduzir perdas de produção e proteger vidas.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a Yoko Ishida e a Andrew Gray-Spence pela revisão final do abstract; a Ronal Parra pela revisão final do resumen; e por fim, a Eddie da Silva pelo auxílio na normatização das referências.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. J. de. Os riscos naturais e a história: o caso das enchentes em Marabá (PA)**. Tempos Históricos**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 205-238, 2012.

ALVES, L. M.; MARENGO, J. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3, p. 337-350, 2010.

AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R.P.; LLOPART, M. The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. Ann. **N.Y. Acad. Sci.**, p. 98-120, 2019. https://doi.org/10.1111/nyas.13932

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zne: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88-108, 2004.

CAVALCANTE, R. B. L.; FERREIRA, D. B. S.; PONTES, P. R. M.; TEDESCHI, R. G.; COSTA, C. P. W.; SOUZA, E. B. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmos. Res**., 2020. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104879

DA COSTA, C. P. W.; DA SILVA FERREIRA, D.; CARNEIRO, N. J. Climate Extremes along the Mining Chain over the Eastern Amazon: Projections to 2050. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 11, p. 125-147, 2021.

DE SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. The regional precipitation over the eastern Amazon/northeast Brazil modulated by tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 113–122, 2004.

DE SOUZA, E.; DE MORAES, B.; FERREIRA, D.; MEIRA FILHO, L. G. Dynamical Donwscaling for Railroad Areas in Eastern Amazon and Southeastern Brazil: Current Climate and Near-Future Projections. **Atmospheric and Climate Sciences**, 2014. http://dx.doi.org/10.4236/acs.2014.42018

DOS SANTOS SILVA, F. D. et al. Intercomparison of Different Sources of Precipitation Data in the Brazilian Legal Amazon. **Climate**, v. 11, n. 241, 2023. https://doi.org/10.3390/cli11120241

FADEL, I. Produção e vendas da VALE no 1T20. VALE, Rio de Janeiro, 2020. **Relatórios trimestrais**. Disponível em: https://vale.com/pt/comunicados-resultados-apresentacoes-e-relatorios. Acesso em: 2 out. 2024.

FADEL, I. Produção e vendas da VALE no 1T22. VALE, Rio de Janeiro, 2022. **Relatórios trimestrais**. Disponível em: https://vale.com/pt/comunicados-resultados-apresentacoes-e-relatorios. Acesso em: 2 out. 2024.

FADEL, I. Produção e vendas da VALE no 1T23. VALE, Rio de Janeiro, 2023. **Relatórios trimestrais**. Disponível em: https://vale.com/pt/comunicados-resultados-apresentacoes-e-relatorios. Acesso em: 2 out. 2024.

FIGUEIREDO, A. Produção e vendas da VALE no 2T19. VALE, Rio de Janeiro, 2019. **Relatórios trimestrais**. Disponível em: https://vale.com/pt/comunicados-resultados-apresentacoes-e-relatorios. Acesso em: 2 out. 2024.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations: A new environmental record for monitoring extremes. **Sci. Data**, 2015. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

GIORGI, F.; ELGUINDI, N. Regional Climatic Model RegCM User's Guide Version 4.4. **Trieste, Italy**, 2014.

HOLTSLAG, A. A. M.; DE BRUIJN, E. I. F.; PAN, H-L. A high-resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting, **Monthly Weather Review**, 1990. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1990)118<1561:AHRAMT>2.0.CO;2

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. **IPCC, Geneva, Switzerland**, p. 1-34, 2023.

JESUS, E. S. et al. Danos causados por chuvas fortes em trecho da rodovia federal a oeste do Maranhão. **Anais do 21°Congresso Nacional de Meio Ambiente** - Extremos Climáticos: impactos atuais e riscos futuros, Poço Caldas – MG, 2024 Disponível em: https://www.meioambientepocos.com.br/Anais2024/Danos%20Causados%20Por%20Chuvas%20Fortes%20Em%20Trecho%20Da%20Rodovia%20Federal%20A%20Oeste%20Do%20Maranhão.pdf. Acesso em: 11 nov. 24.

KAIN, J. S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update, **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, n. 1, p. 170-181, 2004.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M**.** A one-dimensional entraining/ detraining plume model and its application in convective parameterization, **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, n. 23, p. 2784-2802, 1990.

KATZ, F. Recursos Minerais e a Economia do Conhecimento. In Produção de Commodities e Desenvolvimento Econômico. Organizadores: Luiz G. de Mello Belluzzo, Cláudio R. Frischtak, Mariano Laplane. **Campinas: UNICAMP. Instituto de Economia**, 126 pp., 2014.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region, **Geophys. Res. Lett.**, v. 38, 2011. https://doi.org/10.1029/2011GL047436

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. **Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology**, American Meteorological Society, p. 179-184, 1993.

MÜLLER, W. A et al. A higher-resolution version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM 1.2-HR), **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 10, p. 1383–1413, 2018. https://doi.org/10.1029/2017MS001217

PAL, J. S. et al. The ICTP RegCM3 and RegCNET: regional climate modeling for the developing World, **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 1, p. 1395-1409, 2007.

PALHETA, J. M.; SILVA, C. N.; MEDEIROS, G. N. Territórios com mineração na região sudeste do Pará – Norte do Brasil. **Revista da Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Geografia (Anpege)**, v. 11, n. 15, p. 281-308, 2015.

PEARCE, T. D. et al. Climate change and mining in Canada. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 16, p. 347-368, 2011. https://doi.org/10.1007/s11027-010-9269-3

PREIN, A. F. Simulating North American Weather Types with Regional Climate Models. **Front. Environ. Sci.** v. 7, 2019. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00036

TIEDTKE, M. An Extension of Cloud-Radiation Parameterization in The ECMWF Model: The Representation of Subgrid-Scale Variations of Optical Depth**, Monthly Weather Review**, v. 124 n. 4, p. 745-750, 1996. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<0745:AEOCRP>2.0.CO;2

OLIVEIRA, D. M.; RIBEIRO, J. G. M.; DE FARIA, L. F.; REBOITA, M. S. Performance dos modelos climáticos do CMIP6 em simular a precipitação em subdomínios da América do Sul no período histórico, **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 116–133, 2023. https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p116-133

O'NEILL, B. C *et al*. The roads ahead: narratives for Shared Socioeconomic Pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169-180, 2017. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004

REBOITA, M. S.; FERREIRA, G. W. S.; RIBEIRO, J. G. M.; ALI, S. Assessment of precipitation and near-surface temperature simulation by CMIP6 models in South America. **Environmental Research: Climate**, v. 3, n. 4, 2024. https://doi.org/10.1088/2752-5295/ad3fdb

RIAHI, K. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153-168, 2017. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

SOUZA FILHO, P. W. M. et al. The sustainability index of the physical mining Environment in protected areas, Eastern Amazon, **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 8, 2020. https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100074

WILSON, S. et al. Tecnical Manual for PRECIS. The Met Office Hadley Centre regional climate modelling system – version 2.0. 2015. Disponível em: https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/research/applied-science/precis/tech_man_v2.pdf. Acesso em: 05 maio 2024.

VALE. Mineração. [s.d.]. Disponível em: https://vale.com/pt/mineracao. Acesso em: 28 nov. 2024.

VALE. Vale informa sobre parada temporária de operações da Estrada de Ferro Carajás. [Rio de Janeiro], 7 mar. 2022. Disponível em: https://vale.com/pt/w/vale-informa-sobre-parada-temporaria-de-operacoes-da-estrada-de-ferro-carajas. Acesso em: 2 out. 2024.

VALE. Comunidades afetadas por enchentes recebem apoio da Vale ao longo da ferrovia no Maranhão. [Rio de Janeiro], 31 mar. 2023. Disponível em:

https://vale.com/pt/w/comunidades-afetadas-por-enchentes-recebem-apoio-da-vale-ao-longo-da-ferrovia-no-maranhao. Acesso em: 2 out. 2024.

VAN VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview, **Clim. Change**, v. 109, p. 5–31, 2011.

WANZELER DA COSTA, C. et al. Avaliação de simulação histórica da precipitação e temperatura na Amazônia oriental utilizando um modelo de alta resolução. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019. https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.57690