

CENÁRIOS DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS AO LONGO DA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS

Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão¹; João Henrique Macedo Sá¹; Juliana Andrade Campos¹; Paulo Roberto Estumano Beltrão Junior¹; Renata G. Tedeschi¹; Rosane Barbosa Lopes Cavalcante¹; Paulo Rógenes Monteiro Pontes¹.

Resumo: As ferrovias são fundamentais para o escoamento de cargas no Brasil, especialmente de minérios e grãos, garantindo eficiência logística e competitividade econômica. No entanto, o setor ferroviário está cada vez mais exposto aos impactos das mudanças climáticas, como chuvas intensas e longos períodos de seca. Esses eventos extremos ameaçam a integridade da infraestrutura, podendo causar interrupções operacionais e prejuízos socioeconômicos. Este estudo avaliou os impactos das mudanças climáticas sobre os extremos de precipitação nas bacias hidrográficas da Estrada de Ferro Carajás (EFC), abrangendo uma zona de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado. Foram analisados os índices CDD (períodos secos), CWD (períodos chuvosos) e Rx5Day (chuvas intensas em 5 dias), utilizando dados históricos do CHIRPS e projeções futuras (2030–2060) de três modelos climáticos (MIROC6, HadGEM3, GFDL-ESM4) sob o cenário SSP5-8.5, além de um ensemble multimodel. Os resultados indicam que, historicamente, as bacias ao norte como São Luís, Mearim e Gurupi concentram os maiores volumes de precipitação, enquanto as regiões central e sul, como Médio Tocantins e Baixo Araguaia, apresentam menores valores. As projeções futuras indicam uma tendência generalizada de redução da precipitação anual média, especialmente no centro-sul da área de estudo, com destaque para os modelos MIROC6 e HadGEM3. O índice CDD projeta aumentos significativos na duração de períodos secos em praticamente todas as bacias, o que implica maior risco de estiagens prolongadas. Em contrapartida, o CWD mostra tendência de aumento em áreas do norte, indicando maior persistência de chuvas em algumas regiões. Já o índice Rx5Day aponta para intensificação dos eventos extremos de chuva, com elevação dos valores máximos principalmente em São Luís, Médio Tocantins e Baixo Araguaia, reforçando a possibilidade de desastres hidrológicos. Tais alterações têm implicações diretas para a segurança da EFC, cuja operação poderá ser afetada por deslizamentos, alagamentos ou escassez hídrica, reforçando a necessidade de estratégias de adaptação climática específicas para a região.

Palavras-Chave – ETCCDI, Mudanças Climáticas, Estrada de Ferro Carajás.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm provocado transformações significativas no regime hidrológico em diversas partes do planeta, especialmente em regiões tropicais como a Amazônia e o Cerrado. Essas transformações se manifestam por meio de alterações na frequência, duração e intensidade de eventos extremos de precipitação, o que representa um desafio crescente para a gestão dos recursos hídricos e para a segurança de infraestruturas estratégicas como ferrovias, rodovias e reservatórios (KOUTROULIS et al., 2019; LUCAS et al., 2021).

A Estrada de Ferro Carajás (EFC), importante via de escoamento mineral operada pela Vale, percorre parte significativa dos estados do Pará e Maranhão, atravessando oito bacias hidrográficas

1) Afiliação: Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável – ITVDS; Belém, PA, 66055-090, edivaldo.serrao@pq.itv.org; joao.macedo@pq.itv.org; juliana.campos@pq.itv.org; paulo.junior@pq.itv.org; renata.tedeschi@itv.org; rosane.cavalcante@itv.org; paulo.pontes@itv.org.

(Itacaiúnas, Gurupi, Baixo Tocantins, Médio Tocantins, Baixo Araguaia, Pindaré, Mearim e São Luís). A ferrovia é vital para o transporte de minérios das minas de Carajás até o Porto de Ponta da Madeira, no litoral maranhense. Entretanto, a operação segura e eficiente dessa infraestrutura pode ser comprometida por eventos hidrológicos extremos, como períodos prolongados de seca ou chuvas intensas concentradas em poucos dias, que vêm se tornando mais frequentes e intensos sob os efeitos das mudanças climáticas (FAGUNDES et al., 2023; MARQUES et al., 2022).

Para avaliar tais impactos, a literatura recomenda o uso de índices climáticos padronizados, que permitem monitorar alterações nos padrões hidrológicos e comparar tendências em diferentes regiões e escalas temporais (WMO, 2012; LUCAS et al., 2021). Entre os índices mais relevantes para avaliação de extremos hidrológicos estão o CDD (número máximo de dias consecutivos secos), que mede a duração de períodos de estiagem; o CWD (número máximo de dias consecutivos chuvosos), que avalia a persistência de períodos úmidos; e o Rx5Day (maior precipitação acumulada em 5 dias consecutivos), que representa a intensidade dos eventos concentrados de chuva, frequentemente associados a alagamentos e deslizamentos (SUN et al., 2023; ANA, 2021)

Estudos na Amazônia Legal demonstram que áreas do leste da região, como Maranhão e Tocantins, vêm apresentando tendência de aumento no CDD, indicando períodos mais longos sem precipitação significativa (ESPINOZA et al., 2019). Por outro lado, o CWD também tem mostrado tendência de aumento em certas áreas, sugerindo chuvas mais persistentes em eventos concentrados. Já o índice Rx5Day, associado ao risco de inundações e instabilidade de encostas, tem se mostrado particularmente sensível à variabilidade climática, com episódios mais intensos sendo registrados em anos sob influência de El Niño ou mudanças no padrão da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) (CARVALHO et al., 2004; SUN et al., 2023).

No contexto das bacias transientes à EFC, esses índices assumem papel estratégico para o planejamento e manutenção da infraestrutura ferroviária. A ocorrência de eventos como chuvas intensas concentradas em curtos períodos (Rx5Day elevado) pode comprometer a estabilidade de taludes e pontes. Já períodos prolongados de estiagem (altos valores de CDD) podem afetar a navegabilidade de rios próximos e influenciar o transporte de materiais ou abastecimento de água em áreas adjacentes à ferrovia. Por sua vez, aumento no CWD pode indicar maior suscetibilidade a enchentes persistentes, exigindo adaptações no calendário logístico ou melhorias nas obras de drenagem existentes.

Nesse sentido o uso de dados de satélite, como os fornecidos pelo produto CHIRPS, tem se tornado essencial para o monitoramento desses índices em regiões com baixa densidade de estações meteorológicas, como parte das bacias estudadas. Assim o objetivo desse estudo é avaliar três (CDD, CWD e Rx5day) índices de extremos de precipitação para oito bacias hidrográficas entre a Amazônia e o Cerrado brasileiro, estas que são importantes regiões de transição hidroclimáticas ao longo da Estrada de Ferro de Carajás (EFC).

METODOLOGIA

Área de Estudo

A área de estudo é representada pelas bacias hidrográficas que cortam a EFC (Fig. 1A): Itacaiúnas (41.529 km²), Gurupi (34.830 km²), Baixo Tocantins (5.162 km²), Médio Tocantins (32.991 km²), Baixo Araguaia (36.174 km²), Pindaré (40.533 km²), Mearim (55.843 km²) e São Luís

(3.088 km²). Essas oito bacias estão na área de transição entre os dois maiores biomas brasileiros: Amazônia e Cerrado. A EFC possui 892 km de extensão e liga o Porto de Itaqui e Ponta da Madeira, no Maranhão, às províncias minerais da Serra dos Carajás, no Estado do Pará. Trata-se de uma ferrovia de alta capacidade, tendo como principal produto transportado o minério de ferro (PPI, 2025), além de transportar passageiros entre os municípios da região. Esta capacidade de transporte, entretanto, pode ser afetada pelas mudanças climáticas, visto que a EFC possui trechos classificados com altos riscos climáticos (BRASIL, 2023).

Dados climáticos e Hidrológicos

As projeções climáticas utilizadas neste trabalho foram obtidas através do projeto CLIMBRA (Climate Change Dataset for Brazil) (Ballarin et al., 2024). O repositório possui informações de 19 modelos climáticos de circulação global incluindo o experimento histórico e dois cenários SSP (Shared Socioeconomic Pathways; SSP2-4.5, SSP5-8.5) do CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), com correção de viés já aplicada e resolução espacial de 0.25° em formato Netcdf (para mais informações, acesse: <https://doi.org/10.57760/sciencedb.02316>). Para o presente estudo foi utilizado três modelos MIROC6, HadGem3 e GFDL-4ESM, além da criação de um Ensemble entre esses modelos, para o cenário mais extremo (SSP5-8.5), este assume que a radiação irá aumentar em 8.5 W/m² próximo a 2100, (equivalente a uma concentração de 1370 ppm de CO₂ na atmosfera).

Os dados de precipitação histórica são oriundos do produto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) O algoritmo combina dados de estações meteorológicas e incorpora informações de satélite (estimativa do canal infravermelho) para representar locais medidos esparsamente, e estimativas de precipitação diária em pentada e mensal em grade de 0,05° de 1981 ao presente, estes dados estão hospedados na plataforma Google Earth Engine (GEE).

Foi utilizado três (CDD, CWD e Rx5Day) índices hidrometeorológicos neste estudo, e são recomendados pelo ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) para verificação de mudanças climáticas (http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml). Todo o procedimento de extração e computo dos índices se deu em ambiente virtual Python (Colab), os dados foram extraídos e processados em grade de 0,25 para coincidir com a resolução originais dos modelos, os dados do CHIRPS foram reamostrados na mesma escala.

Com objetivo de reduzir a incerteza existente em simulações de um único modelo de circulação global foi realizado um ensemble multi-modelos com as precipitações diárias dos cenários avaliados. O ensemble foi montado seguindo a relação:

$$MME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$$

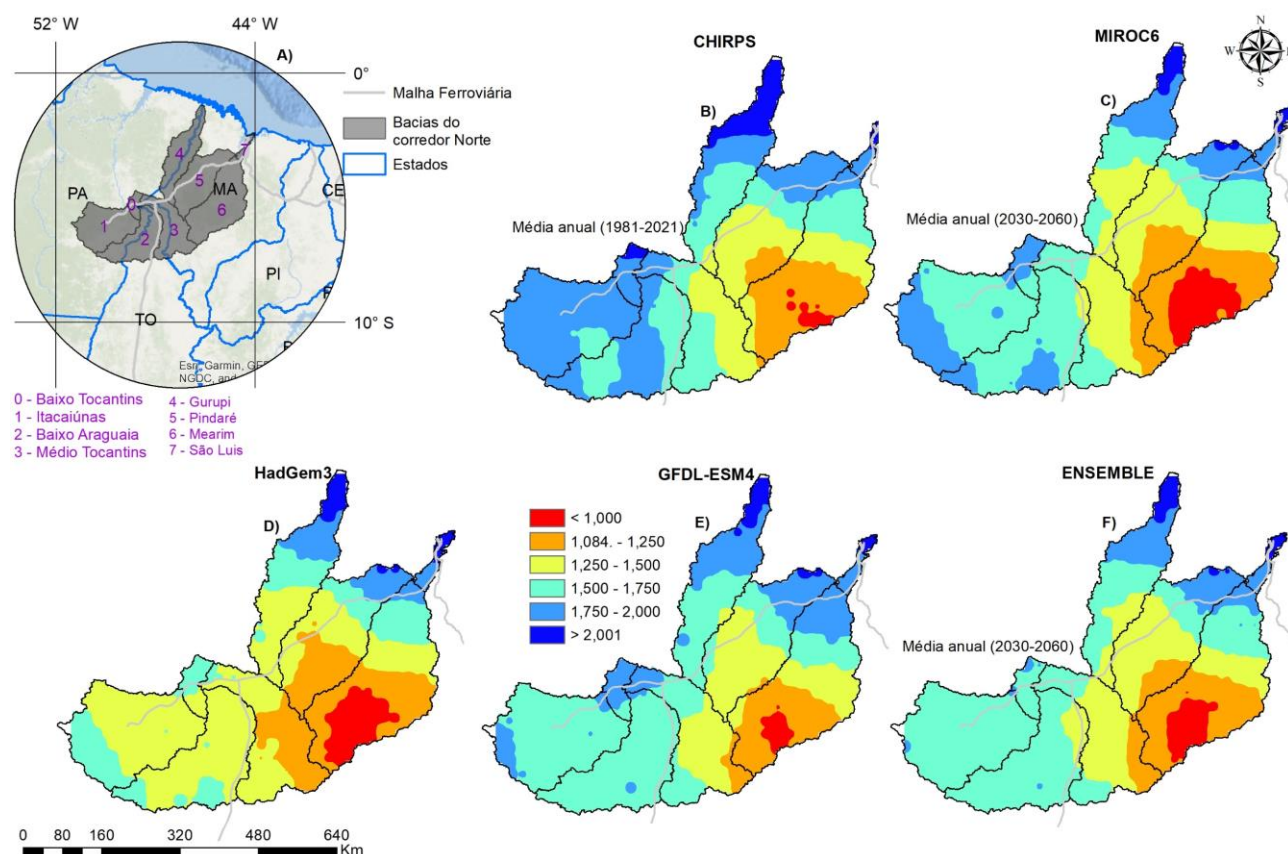
Em que: MME é média do ensemble multi-modelos, N é o número de membros no ensemble (neste caso 3); e P_i é a projeção de precipitação do modelo.

Por fim, a delimitação das bacias hidrográficas, bem como suas áreas de contribuição foram extraídos dos dados do Hydrosheds, através do produto HydroBasins (<https://www.hydrosheds.org/products/hydrobasins>), que são série de camadas poligonais

vetorizadas que representam os limites das sub-bacias em escala global, com resolução de 15 segundos de arco. Para este estudo foi utilizado as bacias em 6º ordem.

Para avaliar a distribuição temporal dos índices e da precipitação, foi calculada uma média aritmética de todos os pixels, por período (histórico: 1891-2021 e futuro próximo: 2030-2060), e gerada uma série temporal anual para cada bacia. Para avaliar a distribuição espacial dos índices, foi calculada uma média de longo prazo para todos os anos, por pixel, e gerado a espacialização dos índices que resultou nos produtos em mapas apresentados.

Figura 1 – Localização da área de estudo (A), Precipitação média anual histórica do produto CHIRPS (B), Precipitação média anual no futuro próximo do modelo MIROC6 (C), HadGem3 (D), GFDL-4ESM (E) e Precipitação média anual no futuro próximo do Ensemble entre os modelos (F).



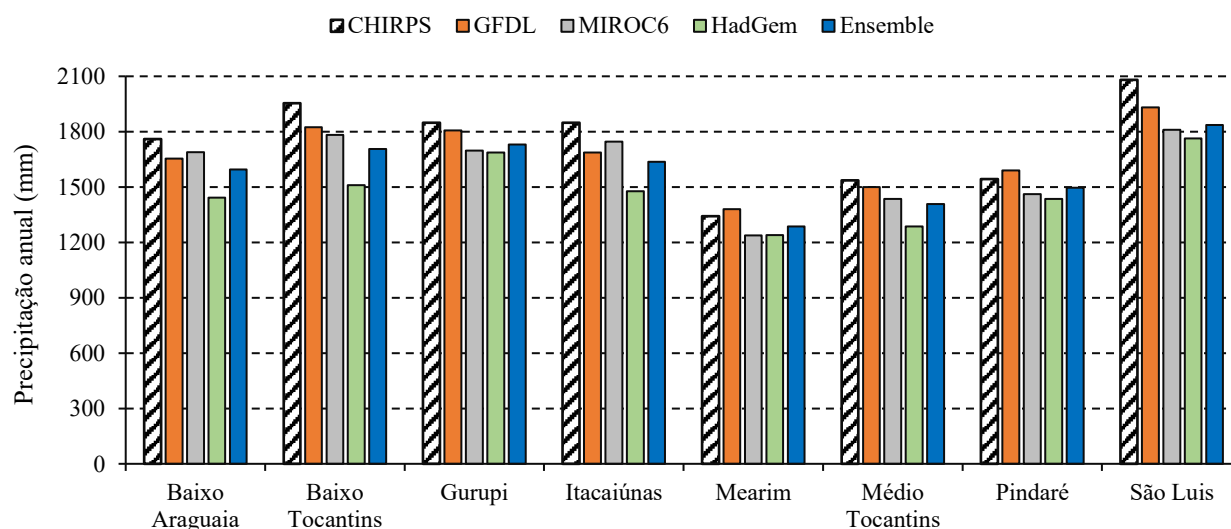
RESULTADOS

A espacialização da precipitação anual (Fig1) é observada, considerando o período histórico (1981–2021) a partir do CHIRPS (Fig1. B) e as projeções climáticas para 2030–2060 com os modelos MIROC6 (Fig1. C), HadGEM3 (Fig1. D), GFDL-ESM4 (Fig1. E) e ENSEMBLE (Fig1. F). No cenário histórico, observa-se maior precipitação (>2.000 mm) concentrada nas bacias ao norte, como São Luís (7), Mearim (6) e Gurupi (4), enquanto valores mais baixos (entre 1.250–1.500 mm) aparecem na região central, abrangendo partes do Médio Tocantins (3) e Baixo Araguaia (2) e na porção sul do Mearim e Pindaré.

Nas projeções futuras, o modelo MIROC6 indica forte redução de chuvas nas regiões centrais e sudeste das bacias, com valores abaixo de 1.000 mm, afetando especialmente as bacias do Baixo Araguaia, Médio Tocantins e Mearim. O HadGEM3 reforça esse padrão de seca, destacando uma mancha vermelha (<1.000 mm) no sudeste da região, o que sugere agravamento da aridez. O GFDL-ESM4 também projeta significativa redução de precipitação nas mesmas áreas, embora com uma transição mais suave entre as zonas áridas e úmidas. Já o ENSEMBLE, que agrega os diferentes modelos, confirma a tendência de redução de chuvas no centro-sul (Médio Tocantins e Baixo Araguaia) e manutenção de maiores volumes ao norte (Mearim, São Luís e Gurupi), evidenciando um gradiente climático importante que pode influenciar a disponibilidade hídrica e a segurança operacional da ferrovia.

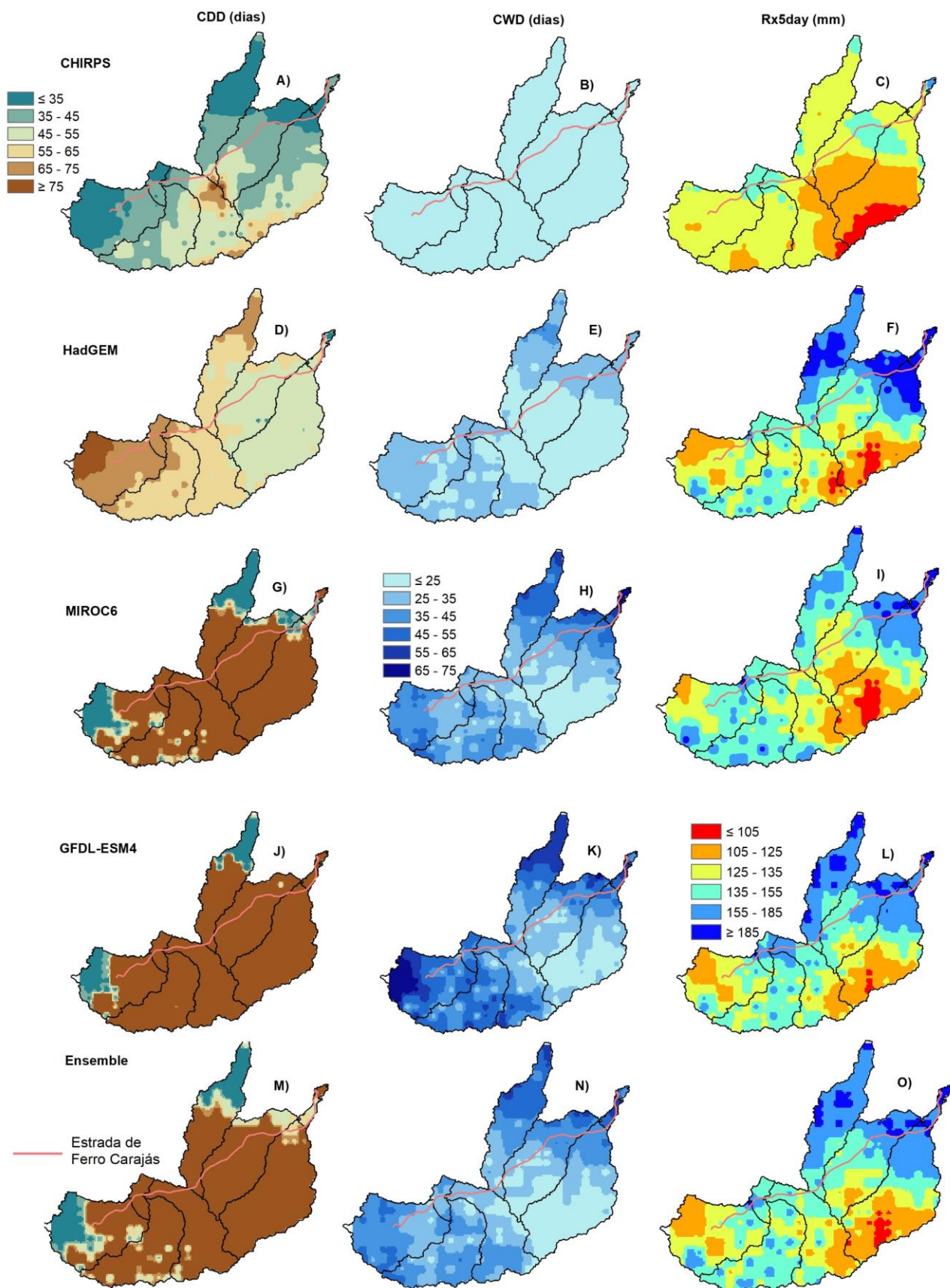
Em uma análise quantitativa (Fig. 2) entre as médias anuais futuras em relação ao histórico por bacia, é observado que o modelo GFDL projeta um acumulado anual de chuva maior que os demais modelos e o ensemble em 6 das oito bacias, especialmente no Pindaré (1590 mm), onde os valores ultrapassam a série histórica (1543 mm) observado pelo CHIRPS. Nas bacias do Itacaiúnas e Baixo Araguaia o modelo MIROC6 representa os maiores valores de chuva entre os demais modelos. Porém de forma geral a maioria dos modelos e o ensemble projetam precipitações abaixo da normal climatológica anual para as bacias estudadas.

Figura 2 – Precipitação média anual histórica e futura para as bacias hidrográficas.



A Figura 3 (Fig. 3) apresenta a espacialização dos índices climáticos extremos CDD, CWD e Rx5Day, para o período histórico (CHIRPS) e para projeções futuras (SSP5-8.5) dos modelos HadGEM, MIROC6, GFDL-ESM4 e o ensemble multimodelo. Esses índices são fundamentais para a avaliação de riscos hidrológicos em bacias hidrográficas, como alagamentos, estiagens prolongadas e deslizamentos de encosta, especialmente em áreas sensíveis como aquelas adjacentes a Estrada de Ferro Carajás (CARVALHO et al., 2004).

Figura 3. Espacialização dos índices CDD, CWD e Rx5day (colunas) para o período (linhas) histórico e futuro próximo, onde: de A - C são os índices para os dados do CHIRPS; D - F, HadGEM; G - I, MIROC; J - L, GFDL e M - O, Ensemble.



Para o CDD, observa-se que no período histórico (CHIRPS – Fig. 3A), as bacias do Baixo Araguaia, Médio Tocantins e Itacaiúnas já apresentavam valores elevados (acima de 65 dias). Nas projeções futuras, especialmente nos modelos GFDL (Fig. 3J) e MIROC6 (Fig. 3G), há um aumento expressivo no número de dias consecutivos secos, com grande parte das bacias apresentando valores superiores a 75 dias, indicando maior risco de estiagens prolongadas. O HadGEM (Fig. 3D) também aponta tendência de aumento, embora com menor intensidade. O ensemble multimodelo (Fig. 3M) confirma esse padrão de intensificação da seca, com destaque para as regiões sul e central das bacias.

Para o CWD, os dados históricos (Fig. 3B) indicam valores relativamente baixos (menos de 25 dias) em toda a região. No futuro, os modelos HadGEM (Fig. 3E), GFDL (Fig. 3K) e ensemble (Fig. 3N) projetam aumentos na persistência dos períodos chuvosos, com destaque para as bacias ao norte, como Gurupi, Mearim e São Luís, e sudoeste do Itacaiúnas, onde os valores ultrapassam os 45 dias em alguns pontos. Isso indica maior probabilidade de eventos prolongados de chuva, o que pode aumentar o risco de saturação do solo e consequentes alagamentos ou escorregamentos.

Já o índice Rx5Day (coluna da direita) evidencia a intensidade dos eventos extremos de chuva. Historicamente (Fig. 3C), o maior valor (>185 mm) está concentrado no norte e sudeste da área de estudo, especialmente na bacia de São Luís, Baixo Araguaia e Médio Tocantins. Essa tendência persiste e se intensifica nos modelos HadGEM (Fig. 3F), MIROC6 (Fig. 3I) e GFDL (Fig. 3L), e se amplia para a porção central do Gurupi, isso indicam elevação dos valores máximos, o que sugere maior risco de desastres hidrológicos como enxurradas e deslizamentos. O ensemble (Fig. 3O) reforça esse padrão de intensificação, indicando um cenário preocupante para o futuro próximo (2030–2060). Embora o CHIRPS apresente limitações, especialmente para eventos extremos como o Rx5Day, ele fornece uma alternativa robusta para análises de tendência de longo prazo, particularmente para o índice CDD (CAVALCANTE et al., 2020)

Os resultados demonstram um cenário de aumento na variabilidade e intensidade dos extremos hidrometeorológicos nas bacias hidrográficas que compõem a área de influência da Estrada de Ferro Carajás (EFC), reforçando a necessidade urgente de adaptação das políticas públicas e da infraestrutura crítica diante das projeções climáticas (KOUTROULIS et al., 2019; MARQUES et al., 2022; SUN et al., 2023). Estudos como este são fundamentais para reduzir a incerteza no planejamento hídrico (LUCAS et al., 2021; WMO, 2012) e garantir a resiliência dos sistemas socioeconômicos locais frente às mudanças climáticas (FAGUNDES et al., 2023; ESPINOZA et al., 2019). Além disso, os dados aqui apresentados complementam as análises do relatório ADAPTAVIAS, que aponta trechos da EFC com risco médio de deslizamentos e erosão, e alto risco térmico (apesar de não ser avaliado aqui). Diferentemente do relatório, este estudo incorpora a perspectiva das bacias hidrográficas, essenciais para avaliar riscos como inundações e restrição de acesso por vias secundárias, que também podem comprometer o funcionamento da ferrovia. Portanto, os resultados contribuem significativamente para a formulação de planos de adaptação mais abrangentes e eficazes para a região.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram com clareza que as bacias hidrográficas atravessadas pela Estrada de Ferro Carajás estão sujeitas a intensificação de extremos hidrológicos sob as mudanças climáticas. A elevação do índice CDD em toda a região central e sul sugere um cenário futuro mais seco e com longos períodos de estiagem, o que pode impactar a disponibilidade de água e aumentar a vulnerabilidade de ecossistemas e atividades produtivas dependentes do regime hídrico.

Ao mesmo tempo, a ampliação do CWD em determinadas regiões ao norte, aliada ao aumento de eventos intensos registrados pelo índice Rx5Day, aponta para um crescimento do risco de eventos extremos de precipitação. Esses fenômenos têm potencial de comprometer taludes, pontes e sistemas

de drenagem da ferrovia, além de gerar prejuízos socioeconômicos às comunidades do entorno. O padrão de redução de chuva anual aliado ao aumento da variabilidade temporal evidencia um cenário de maior incerteza para o planejamento hídrico da região.

Por fim, compreender as tendências nos índices CDD, CWD e Rx5Day nas oito bacias hidrográficas cortadas pela EFC é fundamental para avaliar os riscos hidrológicos associados às mudanças climáticas, garantindo a resiliência da infraestrutura ferroviária, a sustentabilidade da gestão hídrica regional e a segurança das comunidades que vivem em seu entorno. Diante disso, é essencial que políticas públicas, privadas e estratégias de gestão territorial considerem essas projeções climáticas no planejamento de infraestrutura, conservação de recursos hídricos e ações de adaptação climática. A integração entre monitoramento por satélite, modelagem climática e avaliação de riscos permitirá maior resiliência frente aos impactos esperados e contribuirá para a segurança da operação ferroviária e o desenvolvimento sustentável das bacias estudadas.

REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021). *Conjuntura de Recursos Hídricos*. Acesso em 26/05/2023. Disponível em: <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/apresentacao>.

BRASIL. Ministério dos Transportes. *Sumário Executivo – ADAPTAVIAS: Avaliação da Vulnerabilidade da Infraestrutura de Transportes frente às Mudanças Climáticas*. Brasília: Ministério dos Transportes, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/sustentabilidade/Sumario_Executivo_ADAPTAVIAS.pdf. Acesso em: 23 jun. 2025.

CAVALCANTE, R. B. L.; FERREIRA, D. B. S.; PONTES, P. R. M.; TEDESCHI, R. G.; COSTA, C. P. W.; SOUZA, E. B. (2020). “Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia”. *Atmospheric Research*, 238, 104879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104879>.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. (2004). “The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall”. *Journal of Climate*, 17, pp. 88–108. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2).

ESPINOZA, J. C.; RONCHAIL, J.; MARENGO, J. A.; SEGURA, H. (2019). “Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017)”. *Climate Dynamics*, 52, pp. 5413–5430. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>.

FAGUNDES, H. O.; DIAS DE PAIVA, R. C.; BRÊDA, J. P. L. F.; FASSONI-ANDRADE, A. C.; BORRELLI, P.; FAN, F. M. (2023). “An assessment of South American sediment fluxes under climate changes”. *Science of the Total Environment*, 879, 163056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163056>.

KOUTROULIS, A. G.; PAPADIMITRIOU, L. V.; GRILLAKIS, M. G.; TSANIS, I. K.; WARREN, R.; BETTS, R. A. (2019). “Global water availability under high-end climate change: A vulnerability

based assessment”. *Global and Planetary Change*, 175, pp. 52–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.01.013>.

LUCAS, E. W. M.; SOUSA, F. A. S.; SILVA, F. D. S.; ROCHA JÚNIOR, R. L.; PINTO, D. D. C.; SILVA, V. P. R. (2021). “Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin - Brazilian Amazon”. *Weather and Climate Extremes*, 31, 100306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>.

PPI - Programa de Parcerias de Investimentos. *Estrada de Ferro Carajás – EFC*. Acesso em 19/06/2023. Disponível em: <https://ppi.gov.br/projetos/estrada-de-ferro-carajas-efc/>.

MARQUES, A. C.; VERAS, C. E.; RODRIGUEZ, D. A. (2022). “Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios”. *Journal of Hydrology*, 608, 127690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127690>.

SUN, P.; ZOU, Y.; YAO, R.; MA, Z.; BIAN, Y.; GE, C.; LV, Y. (2023). “Compound and successive events of extreme precipitation and extreme runoff under heatwaves based on CMIP6 models”. *Science of the Total Environment*, 878, 162980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162980>.

WMO – World Meteorological Organization (2012). *Standardized Precipitation Index: User Guide*. WMO Technical Document No. 1090, Geneva, 24 p.