The text that follows is a TRANSLATION
O texto que segue é uma TRADUÇÃO

dos Santos, J.L., F.W.S. Correia, W.B. Gomes, L.A. Vergasta & P.M. Fearnside. 2025. **Modelagem Climática de Alta Resolução de Cenários de Desmatamento ao Longo da Rodovia BR-319.** [Tradução]

Please cite the original article:
Favor citar o trabalho original:

dos Santos, J.L., F.W.S. Correia, W.B. Gomes, L.A. Vergasta & P.M. Fearnside. 2025. **High-resolution climate modeling of deforestation scenarios along the BR-319 highway**. *Atmospheric and Climate Sciences Atmospheric and Climate Sciences* 15(4): 908-937. https://doi.org/10.4236/acs.2025.154046

[open access]
ISSN: 2160-0422

Copyright: Scientific Research Publishing (SCIRP)

The original publication is available at:
A publicação original está disponível em:

https://doi.org/10.4236/acs.2025.154046

Modelagem Climática de Alta Resolução de Cenários de Desmatamento ao Longo da Rodovia BR-319

Jerfferson Lobato dos Santos [2,5]; Francisco Wagner Silva Correia [1,2,3]; Wesley de Brito Gomes [3]; Leonardo Alves Vergasta[3]; Paulo Maurício A. Graça [4]; Philip M. Fearnside [2,4]

[1] Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Faculdade de Tecnologia, Av. Darcy Vargas, 1200, Parque 10 de Novembro, 69065-020, Manaus, Amazonas, Brasil.

[2] Programa de Pós-Graduação em Clima e Meio Ambiente, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Av. André Araújo, 2936, CEP 69067-375, Manaus, Amazonas, Brasil e Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Av. Darcy Vargas, 1200, CEP 69050-020, Manaus, Amazonas, Brasil.

[3] Laboratório de Modelagem de Sistemas Climáticos Terrestres (LABCLIM), Universidade Estadual do Amazonas (UEA), Av. Darcy Vargas, 1200, CEP 69050-020, Manaus, Amazonas, Brasil.

[4] Departamento de Dinâmica Ambiental, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Av. André Araújo, 2936, CEP 69067-375, Manaus, Amazonas, Brasil.

[5] Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), SCEN trecho 2, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

E-mail: Jerfferson.santos@ibama.gov.br

Resumo

Este estudo investiga os impactos do desmatamento na área de influência da rodovia BR-319 sobre as condições climáticas locais após sua reconstrução planejada. Modelagem climática de alta resolução indica que a temperatura média do ar pode aumentar em até 0,7 °C no cenário de estrada pavimentada (BAU_2) até 2100, com aumentos locais superiores a 2,5 °C em regiões desmatadas durante a estação seca. A precipitação é projetada para aumentar em média até 0,5 mm dia^{-1}, com aumentos locais acima de 2,5 mm dia^{-1} em paisagens fragmentadas. No entanto, esse efeito é provavelmente temporário e pode se transformar em queda na precipitação à medida que o desmatamento se consolida em grandes áreas contínuas. Esses efeitos são impulsionados pela redução da evapotranspiração, aumento da temperatura da superfície e mudanças nos padrões de circulação atmosférica. Tais alterações resultam em maior convergência de umidade sobre as zonas desmatadas, influenciando, assim, o ciclo hidrológico regional. A comparação de diferentes cenários de desmatamento ressalta a influência significativa do desenvolvimento de rodovias no clima local. Os resultados destacam a importância de incorporar projeções climáticas em avaliações ambientais para informar decisões de políticas públicas relacionadas a projetos de infraestrutura na Amazônia.

Palavras-chave

Desmatamento; Rodovias; BR-319; Modelagem climática; Mudanças no uso do solo.

1. Introdução

A floresta amazônica é amplamente reconhecida como um ativo ambiental crítico em escalas local, regio-

nal e global [1]. Ela desempenha um papel fundamental na manutenção do sistema climático por meio de processos como armazenamento e absorção de carbono, transporte de gases traço e aerossóis e reciclagem de água e nutrientes [2] [3] [4]. Além disso, contribui para a manutenção da circulação atmosférica, dos regimes hidrológicos e da conservação dos recursos hídricos – essenciais para a regulação do clima e para a manutenção da biodiversidade [5] [6] [7] [8] [9].

Por outro lado, o desmatamento e os incêndios florestais surgiram como desafios críticos na Amazónia nas últimas décadas, invadindo grandes áreas de floresta preservada e causando impactos ambientais e sociais substanciais [10] [11]. Estas alterações na utilização e cobertura do solo perturbam os processos de troca de energia, massa e momento entre a superfície e a atmosfera e contribuem para as alterações climáticas globais através do aumento das emissões de gases de efeito estufa [12] [11]. Tais mudanças podem afetar significativamente as escalas regionais e locais, perturbando o ciclo hidrológico e intensificando eventos extremos como secas e inundações [13] [14] [15] [16].

Vários estudos avaliaram os impactos das mudanças na cobertura do solo amazônico no clima local, bem como sua influência nos sistemas regionais e globais [17] [18] [19] [20]. No geral, esses estudos mostraram que o desmatamento na Amazônia leva a mudanças significativas nos balanços de energia, água e carbono, resultando em aumento da temperatura do ar, redução da precipitação, menores taxas de evapotranspiração e maior escoamento superficial em escala regional.

Para compreender e mitigar esses impactos, a modelagem climática numérica tornou-se uma ferramenta essencial. Ela permite a simulação dos efeitos do desmatamento no clima e fornece uma análise detalhada de como as mudanças na cobertura do solo influenciam as variáveis meteorológicas e afetam setores como agricultura, recursos hídricos, segurança alimentar e saúde pública. Essa modelagem constitui uma base sólida para o planejamento e a tomada de decisões de longo prazo [21] [22].

Os modelos climáticos globais e regionais avançaram significativamente nos últimos anos, particularmente na representação de processos físicos, químicos e biogeoquímicos, bem como na resolução espacial e temporal [23] [24] [25]. Esses avanços, apoiados pelo progresso tecnológico e pelo aumento do poder computacional, tornaram os modelos climáticos mais precisos e detalhados, permitindo a avaliação de diversos cenários de desmatamento.

Embora os modelos de circulação global (MCGs) sejam valiosos para capturar tendências em macroescala, eles operam em resoluções espaciais grosseiras. Em contraste, os modelos climáticos regionais (MCRs) fornecem representações mais detalhadas das condições climáticas, reduzindo a escala das projeções dos MCGs, particularmente aquelas relacionadas aos efeitos antropogênicos [26] [27] [22].

Nas últimas décadas, estudos que utilizam modelos climáticos para examinar os impactos do desmatamento no clima amazônico identificaram perturbações significativas nos ciclos de energia, água e carbono, juntamente com mudanças na circulação atmosférica, afetando os ecossistemas e a capacidade de armazenamento de carbono da floresta [17] [18] [19] [20]. Esses modelos sugerem que o desmatamento aumenta a temperatura e altera os padrões de precipitação, com a magnitude do impacto variando de acordo com a extensão do desmatamento [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36]. Em áreas desmatadas menores, a precipitação pode aumentar devido a mudanças na circulação do ar; no entanto, à medida que o desmatamento se expande, a precipitação tende a diminuir, particularmente no “arco do desmatamento” no sul e leste da Amazônia [8].

É importante observar que nas fases iniciais do desmatamento, especialmente quando moldadas por padrões de "espinha de peixe" causados por estradas, a fragmentação florestal pode levar a aumentos localizados na precipitação. Isso se deve ao aumento da circulação em mesoescala gerada pela heterogeneidade da superfície. No entanto, esse efeito é temporário, pois a consolidação adicional do desmatamento em grandes clareiras contínuas normalmente resulta em redução da precipitação. Nosso estudo explora essa fase de transição em detalhes.

No Brasil, o planejamento de reconstrução e pavimentação da rodovia BR-319 — uma estrada de longa distância que liga Manaus e Porto Velho ao longo de 885 km na Amazônia Ocidental (**Figura 1**) — tornou-se objeto de debate. Mesmo antes da reconstrução da rodovia, meros anúncios de pavimentação e melhorias desencadearam ocupações irregulares de terras e aumentaram o desmatamento ao longo da rota. Essas atividades incluem expansão agrícola, pecuária extensiva, exploração madeireira, especulação imobiliária e grilagem de terras na parte sul do estado do Amazonas [37] [38] [39] [40].

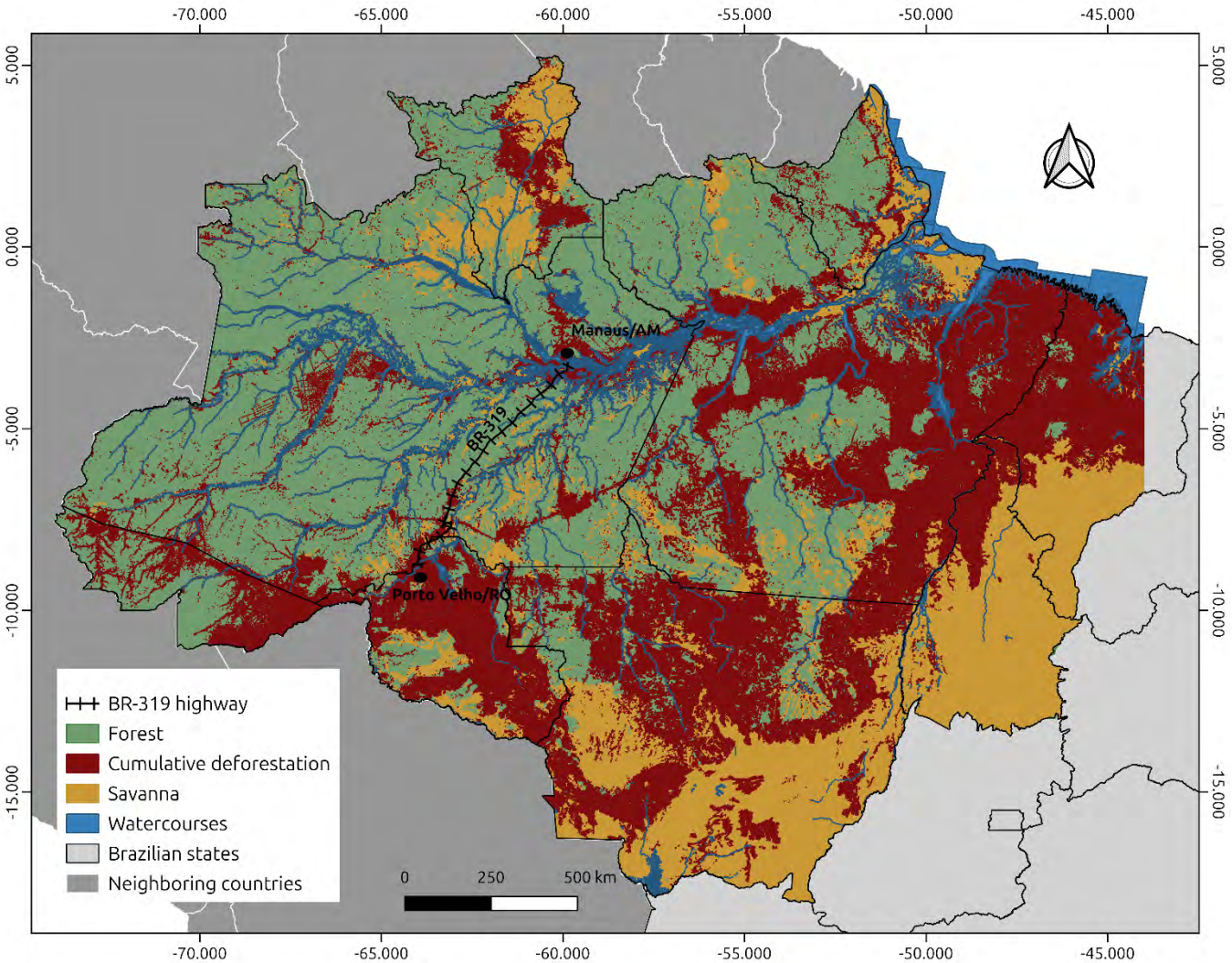

Figura 1. Mapa da Amazônia Legal Brasileira mostrando a rodovia BR-319 (que liga as cidades de Manaus, no Amazonas, e Porto Velho, em Rondônia), juntamente com outras rodovias importantes e a distribuição espacial do desmatamento acumulado de 1988 a 2022. Mapa produzido pelos autores. Fonte dos dados: [46].

É necessária uma governança eficaz para combater essas pressões. No entanto, evidências históricas sugerem que os programas ambientais muitas vezes falham em prevenir os impactos massivos associados às rodovias amazônicas [41] [42]. Um exemplo notável é a tentativa fracassada de controlar o desmatamento e a ocupação ilegal ao longo da rodovia BR-163 (Santarém–Cuiabá), que buscava deter a destruição da floresta [43] [44] [45].

A reconstrução da rodovia BR-319 pode alterar significativamente o padrão atual de desmatamento, deslocando o arco de desmatamento para o norte, na Amazônia Ocidental, atingindo o norte do estado do Amazonas, Roraima, e estendendo-se até a fronteira com a Venezuela [37] [38] [47]. O "arco do desmatamento" é uma vasta área na Amazônia que foi alterada para o estabelecimento da agricultura e da pecuária. Originário das porções leste e sul da Amazônia brasileira, está se expandindo para o sudoeste da Amazônia. Além do extenso desmatamento, essa região também apresenta o maior número de conflitos de terra [53]. Além disso, abriria o acesso às florestas na parte oeste do estado do Amazonas por meio da construção de estradas estaduais conectadas à BR-319 [48] [49].

A ocupação ilegal de terras e a degradação ambiental resultantes da reconstrução e pavimentação de estradas podem levar o desmatamento ainda mais para o interior da bacia amazônica e, consequentemente, desencadear perturbações no clima regional [50] [51] [52] [48]. Portanto, compreender o impacto das alterações ambientais físicas no clima — e como essas alterações nos processos climáticos podem influenciar a biodiversidade e os meios de subsistência locais — deve ser uma prioridade para informar medidas destinadas a mitigar as consequências ambientais da atividade humana.

Considerando os planos em andamento para reconstruir e pavimentar a rodovia BR-319 e os potenciais impactos das mudanças no uso e cobertura do solo, uma questão fundamental surgiu na comunidade científica: em que medida o desmatamento induzido pela reconstrução da BR-319 pode alterar o clima em sua área de influência? Para responder a essa pergunta, o presente estudo visa avaliar os potenciais impactos climáticos do desmatamento causado pela reconstrução da rodovia BR-319.

2. Materiais e Métodos

Esta seção apresenta a abordagem metodológica adotada para avaliar o impacto climático da reconstrução da rodovia BR-319 em sua área de influência. O modelo climático regional Eta foi utilizado para realizar cinco experimentos numéricos simulando diferentes cenários de desmatamento e pavimentação de estradas para os anos de 2050 e 2100. O modelo foi configurado com uma resolução horizontal de 3 km e conduzido por dados de reanálise do ERA5 juntamente com informações climatológicas atualizadas. A validação do modelo foi realizada comparando as simulações com estimativas de precipitação e temperatura do C*limate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) e do *South American Mapping of Temperature* (SAMeT), respectivamente.

2.1. Área de Estudo

A área de estudo é baseada na investigação proposta por [49], que abrangeu todo o estado do Amazonas. No entanto, considerando a necessidade de utilizar a maior resolução espacial possível e as limitações de capacidade computacional e tempo de processamento, o foco foi restringido à rodovia BR-319 e suas vias de acesso associadas (existentes e planejadas). Essa configuração foi selecionada para melhor representar o impacto climático dentro da maior área viável para simulação de alta resolução. Portanto, o domínio de estudo foi definido entre as coordenadas geográficas 67°W a 59°W e 8°S a 2°S (**Figura 2**).

O estudo foca no impacto da reconstrução da rodovia BR-319, que está localizada entre as bacias dos rios Madeira e Purus, conectando as cidades de Manaus e Porto Velho. A BR-319 é a principal via de acesso terrestre às sedes municipais de Careiro, Manaquiri, Careiro da Várzea e Autazes, e também facilita o acesso a Humaitá, Lábrea e Manicoré. Ela serve como a única ligação terrestre às comunidades de Vila Realidade (um distrito do município de Humaitá) e Igapó-Açu (um distrito de Borba). A BR-319 também fornece acesso rodoviário ao estado de Roraima pela rodovia BR-174 e ao estado do Pará pela BR-230 (rodovia Transamazônica).

A rede de estradas oficiais atualmente existente no estado do Amazonas conectada aos 885 km da BR-319 totaliza 1934 km, compreendendo as rodovias federais BR-230 (827 km de Lábrea-AM até a divisa com o Pará), BR-174 (85 km – trecho entre a BR-319 e Manicoré), e as rodovias estaduais AM-254 (94 km da BR-319 até Autazes) e AM-354 (43 km da BR-319 até Manaquiri). Além disso, o governo do estado do Amazonas propôs novas estradas conectando a BR-319 aos municípios de Tapauá, Tefé, Juruá (via AM-366) e Coari (via AM-343), avançando para a área a oeste do Rio Purus. Isso facilitaria o desmatamento em uma das áreas florestais mais intocadas do estado, conhecida como região "Trans-Purus" [54], que também foi incluída em nossa estrutura de modelagem.

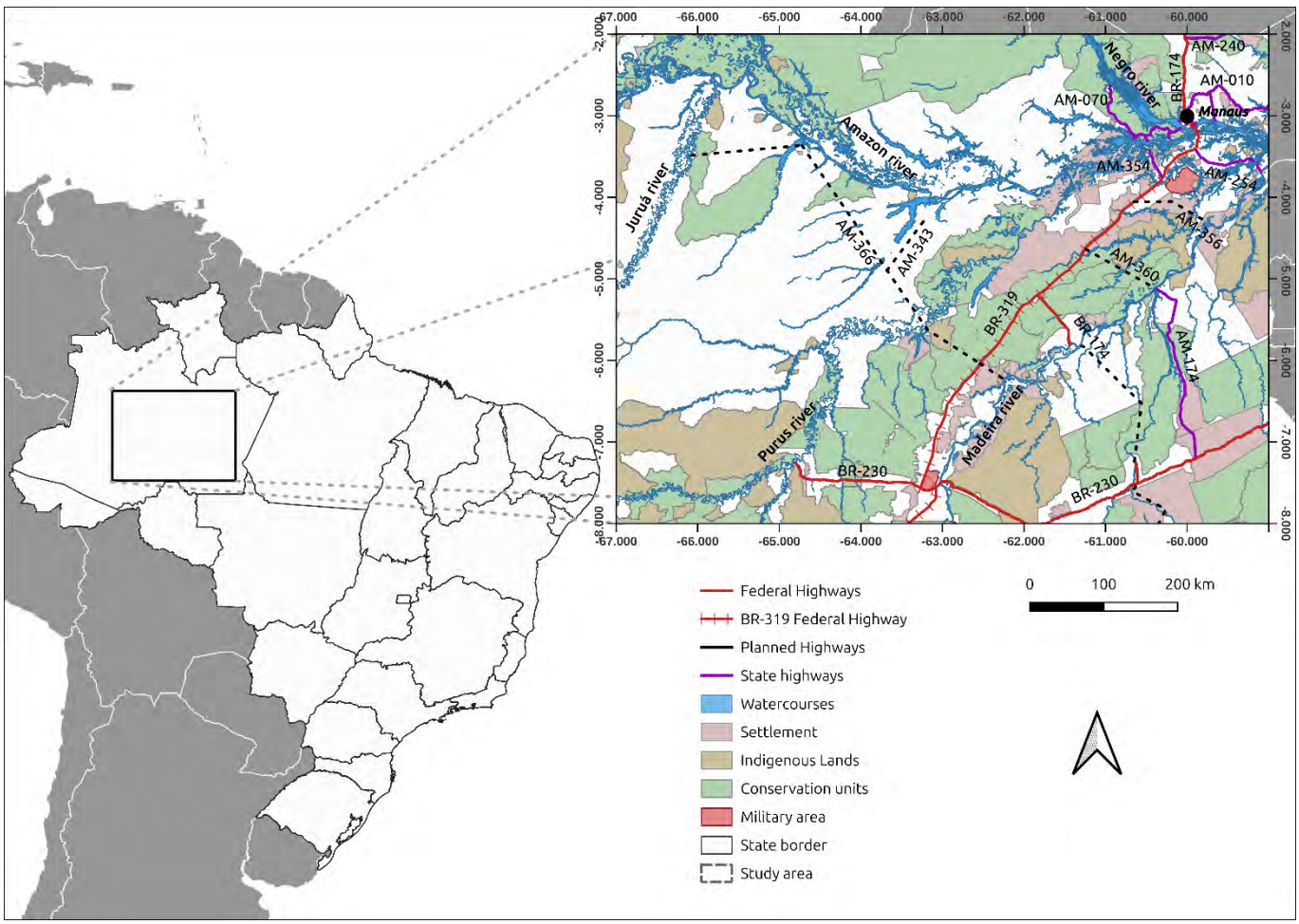

Figura 2. Cobertura da área de estudo, rodovia BR-319 e malha rodoviária adjacente existente e planejada ao redor da BR-319, incluindo Unidades de Conservação Federais e Estaduais, Terras Indígenas, Projetos de Assentamentos Federais e Áreas Militares. Mapa elaborado pelos autores. Fontes de dados: [55] [56] [57] [58].

Os tipos de vegetação dominantes no estado do Amazonas incluem floresta ombrófila densa, campinarana (no extremo norte), floresta ombrófila aberta e savana no sul [55]. Na parte norte do interflúvio Purus-Madeira, predomina a floresta ombrófila densa de terras baixas, enquanto na parte sul, a floresta ombrófila aberta de terras baixas é mais comum [55]. A área de estudo apresenta clima de floresta tropical equatorial (Af) e clima de monções (Am), de acordo com a classificação Köppen-Geiger [59]. As porções central e oeste apresentam condições extremamente úmidas, sem estação seca, enquanto a porção sul

tem clima úmido com 1 a 3 meses secos no leste e sul [55]. Devido à alta radiação solar recebida ao longo do ano, a temperatura do ar apresenta pouca variação sazonal, exceto no extremo sul, onde ocorrem sistemas frontais. A temperatura média anual do ar é de aproximadamente 27 °C e a precipitação anual é de cerca de 2.000 mm [60] [2].

2.2. Modelo de Dinâmica do Desmatamento

Os mapas de desmatamento simulados utilizados neste estudo foram gerados por Santos et al. (2023) e recortados para corresponder à extensão espacial aqui proposta (**Figura 3**). Esses mapas foram produzidos utilizando a plataforma DINAMICA-EGO (*Environment for Geoprocessing Objec*ts) [61].

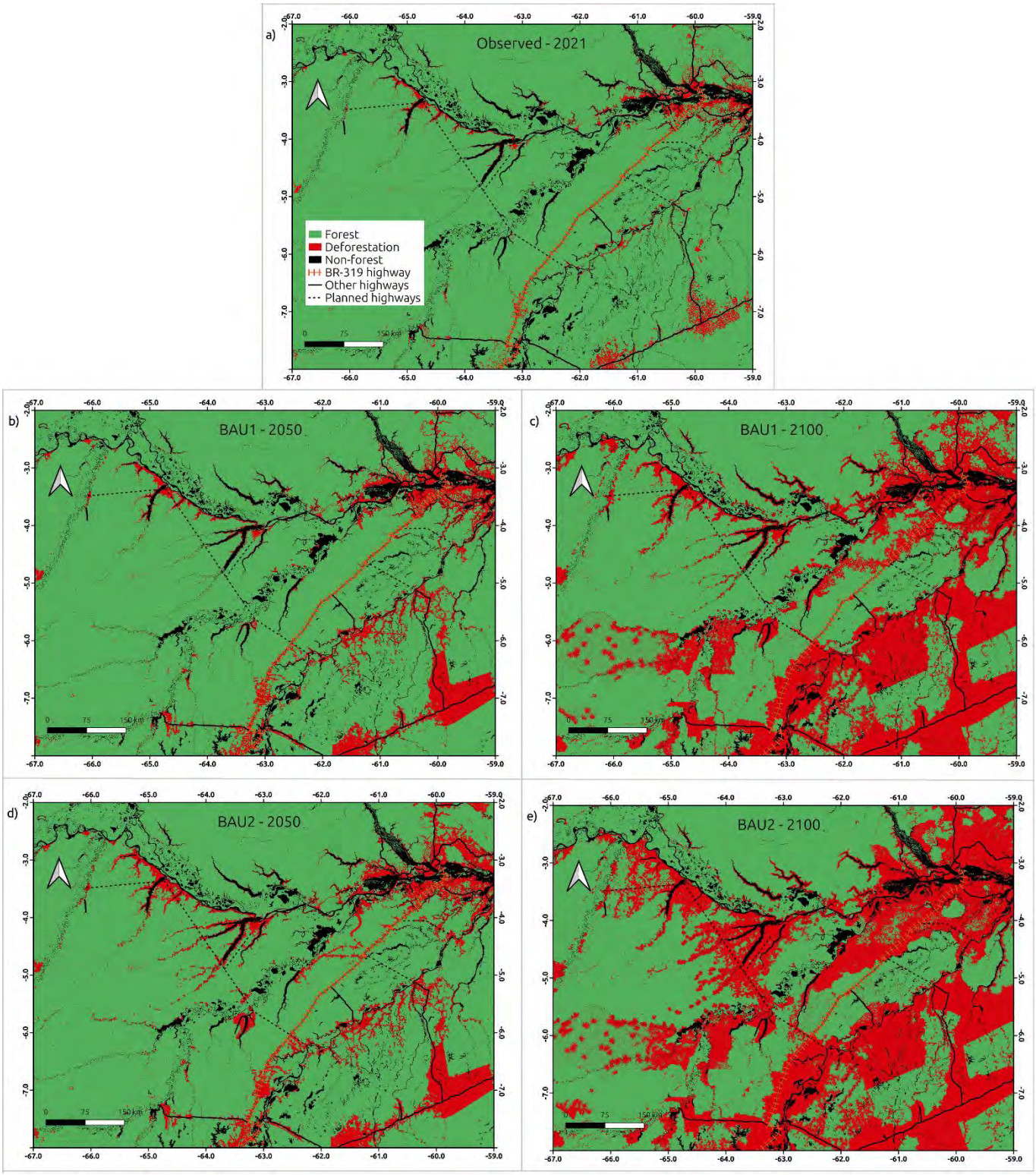

Figura 3. Mapas de uso e cobertura do solo utilizados nas simulações climáticas para a área de influência da rodovia BR-319: A) ano controle 2021; B) Cenário 1 (BAU_1 – 2050), sem pavimentação; C) Cenário 1 (BAU_1 – 2100), sem pavimentação; D) Cenário 2 (BAU_2 – 2050), com pavimentação; e E) Cenário 2 (BAU_2 – 2100), com pavimentação [49].

A abordagem de modelagem considerou as tendências históricas de expansão da ocupação do solo por diferentes grupos locais, refletindo a dinâmica do uso do solo e os conflitos que influenciam as mudanças na paisagem ao longo das redes rodoviárias (Business as Usual – BAU) [43] [45] [41]. Portanto, as projeções não pressupõem uma melhoria na governação ambiental ou nas práticas de gestão do território.

Foram desenvolvidos dois cenários de previsão ambiental a partir do ano de 2021, com projeções para os anos de 2050 e 2100: Cenário 1 (BAU_1): BR-319 sem pavimentação asfáltica (condição atual, presumindo que o processo de reconstrução e pavimentação ainda não foi aprovado); Cenário 2 (BAU_2): BR-319 com pavimentação (presumindo que a pavimentação seja autorizada e comece em 2025). Para detalhes metodológicos adicionais, ver [49].

2.3. Modelo Climático Regional Eta

Para as simulações climáticas foi utilizado o Modelo Climático Regional Eta do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) [62] [27]. O modelo Eta é um modelo atmosférico de área limitada originalmente desenvolvido na Universidade de Belgrado em colaboração com o Instituto Hidrometeorológico da Iugoslávia em 1993 [63].

Uma versão aprimorada do modelo, conhecida como Eta-CPTEC, foi desenvolvida pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE. Essa versão incorporou modificações significativas para melhorar a representação das interações das mudanças climáticas na América do Sul [64] [65] [62] [27]. Os princípios, parametrizações e configurações do modelo são descritos no Apêndice 1 do Material Suplementar.

2.4. Estratégia de Integração Climática

Neste estudo, foram realizados cinco experimentos numéricos utilizando o modelo climático regional Eta, denominados a seguir: CNT-2021, BAU_1-2050, BAU_1-2100, BAU_2-2050 e BAU_2-2100. O experimento controle (CNT) utilizou dados de cobertura vegetal para a região da Amazônia Legal do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e dados de desmatamento do projeto PRODES para o ano base 2021 (INPE, 2021). Os demais experimentos empregaram cenários de desmatamento desenvolvidos por [49], projetados para os anos de 2050 e 2100, respectivamente.

Cada experimento do modelo Eta consistiu em uma integração contínua de 10 anos (120 meses), com início às 00:00 UTC de 1º de novembro de 2011 (estação chuvosa). Cada experimento incluiu um período de spin-up de um ano (12 meses).

As condições atmosféricas iniciais e de contorno foram derivadas de dados de reanálise do ERA5 produzidos pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) [66]. Essas reanálises têm uma resolução horizontal de 0,25° × 0,25° e cobrem o domínio de 57° S a 79,5° N e de 180° W a 180° E, abrangendo todos os continentes, exceto a Antártida. Os dados estão disponíveis em: https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/browse-reanalysis-datasets .

O modelo assimilou os campos de reanálise a cada seis horas por meio de *downscaling* dinâmico. Os valores de temperatura da superfície do mar (TSM) foram derivados das médias mensais de reanálise do ECMWF e atualizados diariamente por interpolação linear. As condições iniciais de umidade do solo e albedo da superfície foram baseadas na climatologia mensal do primeiro mês de integração e na climatologia sazonal, respectivamente.

Para este estudo, o modelo Eta-ERA5 foi configurado com uma resolução horizontal de 3 km, 38 camadas verticais, um passo de tempo de 10 segundos e um domínio espacial de 67,0° W a 59,0° W e de 8,0° S a 2,0° S. Durante as integrações numéricas, a concentração atmosférica de CO_2 no modelo

foi mantida constante no valor médio de 414 ppmv, uma vez que o foco principal era analisar as mudanças climáticas resultantes especificamente do projeto da rodovia BR-319.

2.4.1 Validação do Modelo Regional Eta

Para avaliar o desempenho do modelo regional Eta na simulação do clima da área de estudo, foram utilizadas estimativas de precipitação do CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) [67] e dados de temperatura do SAMeT (*South American Mapping of Temperature*) [68]. A validação foi baseada em campos sazonais médios para a estação chuvosa (verão austral: dezembro-janeiro-fevereiro, DJF) e a estação seca (inverno austral: junho-julho-agosto, JJA). Para a avaliação quantitativa do desempenho do modelo Eta, foram aplicadas as seguintes métricas estatísticas: viés e erro quadrático médio (RMSE).

3. Resultados e Discussão

Os resultados aqui apresentados visam avaliar os potenciais impactos climáticos do desmatamento associado à reconstrução da rodovia BR-319 na área de estudo. Em avaliações de impacto ambiental para projetos de infraestrutura de grande porte, a previsão ambiental desempenha um papel fundamental, examinando cenários hipotéticos para prever as consequências potenciais da implementação ou não da proposta [69].

Analisamos os potenciais impactos da reconstrução versus a não reconstrução da rodovia BR-319. As simulações climáticas consideraram diferenças nos campos médios de temperatura do ar a 2 metros, precipitação, evapotranspiração, convergência de umidade e escoamento superficial durante a estação chuvosa (dezembro-janeiro-fevereiro, DJF) e a estação seca (junho-julho-agosto, JJA).

3.1. Avaliação do Modelo Climático Regional Eta

A avaliação do desempenho do modelo climático regional Eta na representação de padrões climáticos foi realizada para o ano de 2021. Os componentes avaliados foram temperatura do ar e precipitação. A **Figura 4** apresenta a temperatura média do ar observada a partir do conjunto de dados SAMeT e os dados simulados do modelo Eta para as estações chuvosa (DJF) e seca (JJA) em 2021. Além disso, o desempenho do modelo foi avaliado por meio de viés e erro quadrático médio (RMSE).

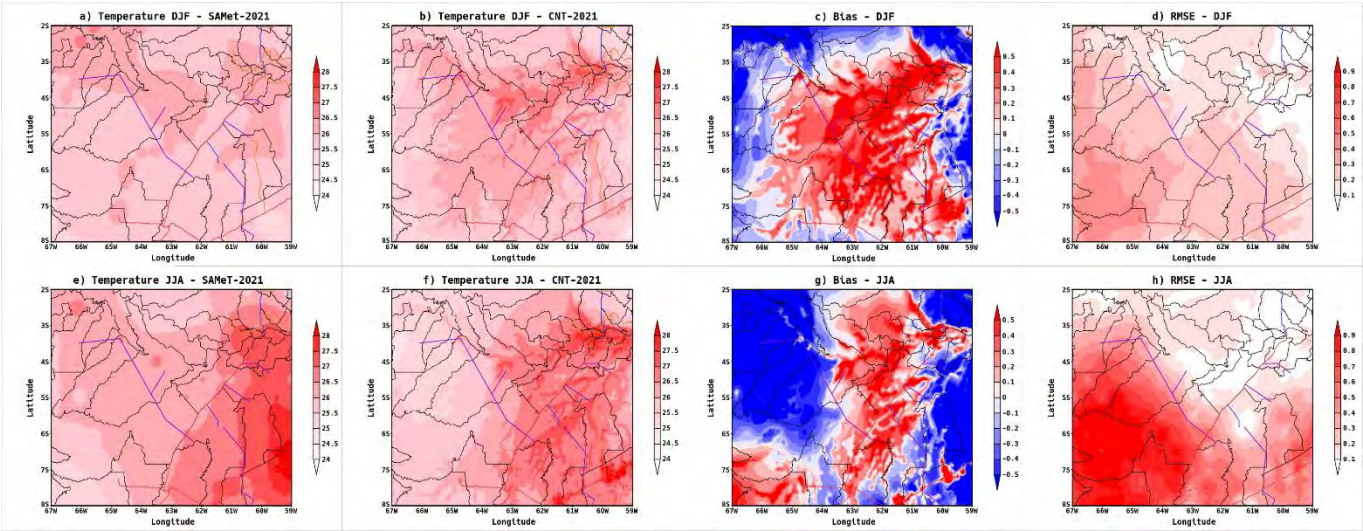

Figura 4. Avaliação do modelo climático Eta na representação da temperatura do ar de 2 m (°C) para a estação chuvosa (DJF): (a) SAMeT 2021 observado, (b) Modelo Eta 2021 simulado, (c) Viés (°C), (d) RMSE (°C); e a estação seca (JJA): (e) SAMeT 2021 observado, (f) Modelo Eta 2021 simulado, (g) Viés (°C), (h) RMSE (°C).

O modelo Eta reproduziu com sucesso a variabilidade espacial da temperatura do ar na área de estudo durante as estações chuvosa e seca. Ao comparar os valores simulados com os dados observados, a diferença média de temperatura para a estação chuvosa (DJF) foi de 0,003 °C, enquanto para a estação seca (JJA) foi de -0,29 °C. Essas diferenças correspondem a 0,01% e -1,08% em relação às temperaturas observadas para cada estação respectiva. Em relação ao RMSE, valores mais baixos foram observados durante DJF (0,19 °C), enquanto discrepâncias maiores foram encontradas durante JJA (0,39 °C). Apesar dessas diferenças, os valores ficaram próximos da variação média anual, indicando que o modelo capturou razoavelmente os padrões sazonais de temperatura. Portanto, os resultados sugerem que o modelo Eta foi eficaz na simulação da temperatura do ar na região.

A **Figura 5** mostra os dados de precipitação observados do CHIRPS e os campos de precipitação simulados produzidos pelo modelo climático regional Eta para a estação chuvosa (DJF) e a estação seca (JJA) do ano de 2021. Além disso, métricas de viés e erro quadrático médio (RMSE) foram calculadas para avaliar o desempenho do modelo.

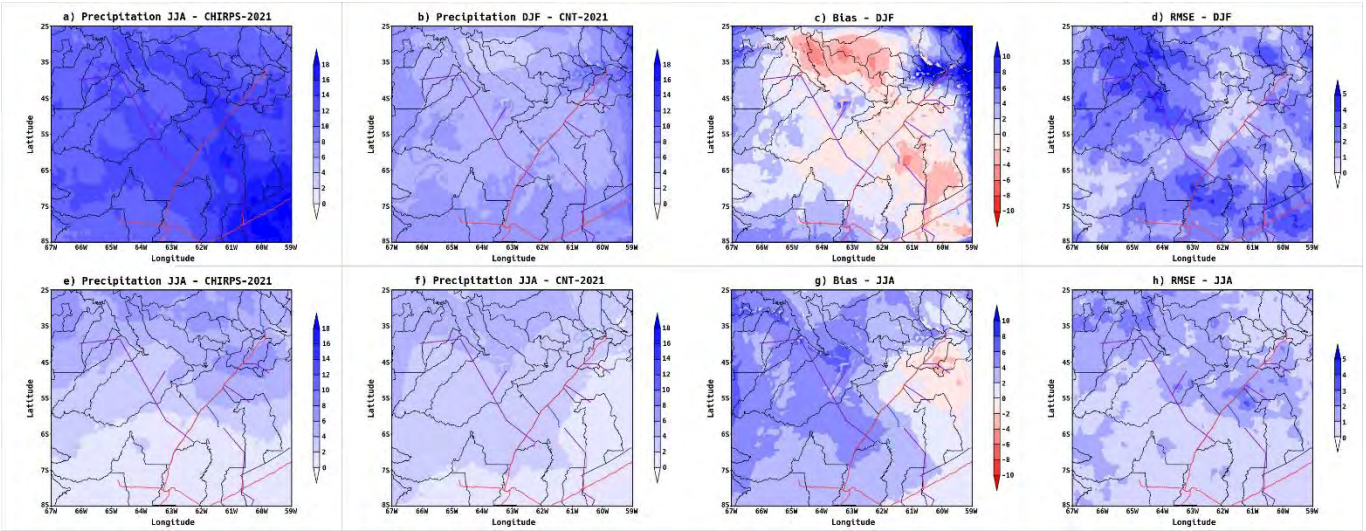

Figura 5. Avaliação do desempenho do modelo climático regional Eta na simulação de precipitação (mm dia⁻¹) para a estação chuvosa (DJF): (a) observada – CHIRPS 2021; (b) simulada – Modelo Eta 2021; (c) viés (mm dia⁻¹); (d) RMSE (mm dia⁻¹); e para a estação seca (JJA): (e) observada – CHIRPS 2021; (f) simulada – Modelo Eta 2021; (g) viés (mm dia⁻¹); (h) RMSE (mm dia⁻¹).

No geral, o modelo Eta reproduziu com sucesso a variabilidade espacial da precipitação em ambas as estações na maior parte da área de estudo. No entanto, subestimou sistematicamente os valores de precipitação, com um desvio médio de -37,5% em DJF e -5,7% em JJA em comparação com os dados observados. Essa subestimação pode ser atribuída a limitações nas parametrizações físicas de precipitação do modelo ou ao período de integração numérica, que pode ter sido insuficiente para que o modelo atingisse o equilíbrio dinâmico. Além disso, conforme observado por [70], o modelo Eta geralmente tende a subestimar a precipitação em grandes porções da América do Sul.

Deve-se notar que o modelo Eta subestima sistematicamente a precipitação, particularmente durante a estação chuvosa (em -37,5%). Esse viés afeta os valores absolutos da precipitação, mas não compromete a capacidade do modelo de capturar padrões espaciais e contrastes sazonais. Consequentemente, as mudanças simuladas na precipitação em cenários de desmatamento devem ser interpretadas como robustas em termos de direção e magnitude relativa, embora os valores absolutos possam estar um pouco subestimados.

Em relação ao erro residual, valores de RMSE semelhantes foram observados para ambas as estações: 0,17 mm dia⁻¹ para DJF e 0,15 mm dia⁻¹ para JJA. Apesar da subestimação durante DJF, os valores simulados capturaram o padrão de variação sazonal da precipitação anual. Portanto, considera-se que o modelo teve um desempenho satisfatório na representação do comportamento da precipitação e é adequado para investigar os impactos climáticos associados ao desmatamento.

Parâmetros estatísticos detalhados usados para avaliação do modelo (viés e RMSE) são fornecidos no Material Suplementar (Apêndice B, Tabelas S2 e S3), juntamente com uma comparação dos ciclos sazonais de temperatura do ar e precipitação observados e simulados (Figura S1).

3.2. Impacto na temperatura do ar (2 m)

A **Figura 6** mostra um aumento na temperatura do ar durante a estação chuvosa (DJF) e a estação seca (JJA) ao comparar o cenário BAU_1 (rodovia BR-319 não pavimentada) e o cenário BAU_2 (rodovia BR-319 pavimentada) com a linha de base climática atual (ano de referência 2021). Em relação ao clima

atual, o cenário BAU_1 projeta um aumento médio da temperatura de 0,1 °C nas estações chuvosa e seca até 2050. No cenário BAU_2, o aumento médio até 2050 é de 0,1 °C durante a estação chuvosa e 0,5 °C durante a estação seca. Para o ano de 2100, o aumento da temperatura atinge 0,3 °C (estação chuvosa) e 0,5 °C (estação seca) em BAU_1, e 0,4 °C (estação chuvosa) e 0,7 °C (estação seca) em BAU_2. Conforme ilustrado na **Figura 6**, o aumento da temperatura local pode exceder 2,5°C em algumas regiões desmatadas durante a estação seca.

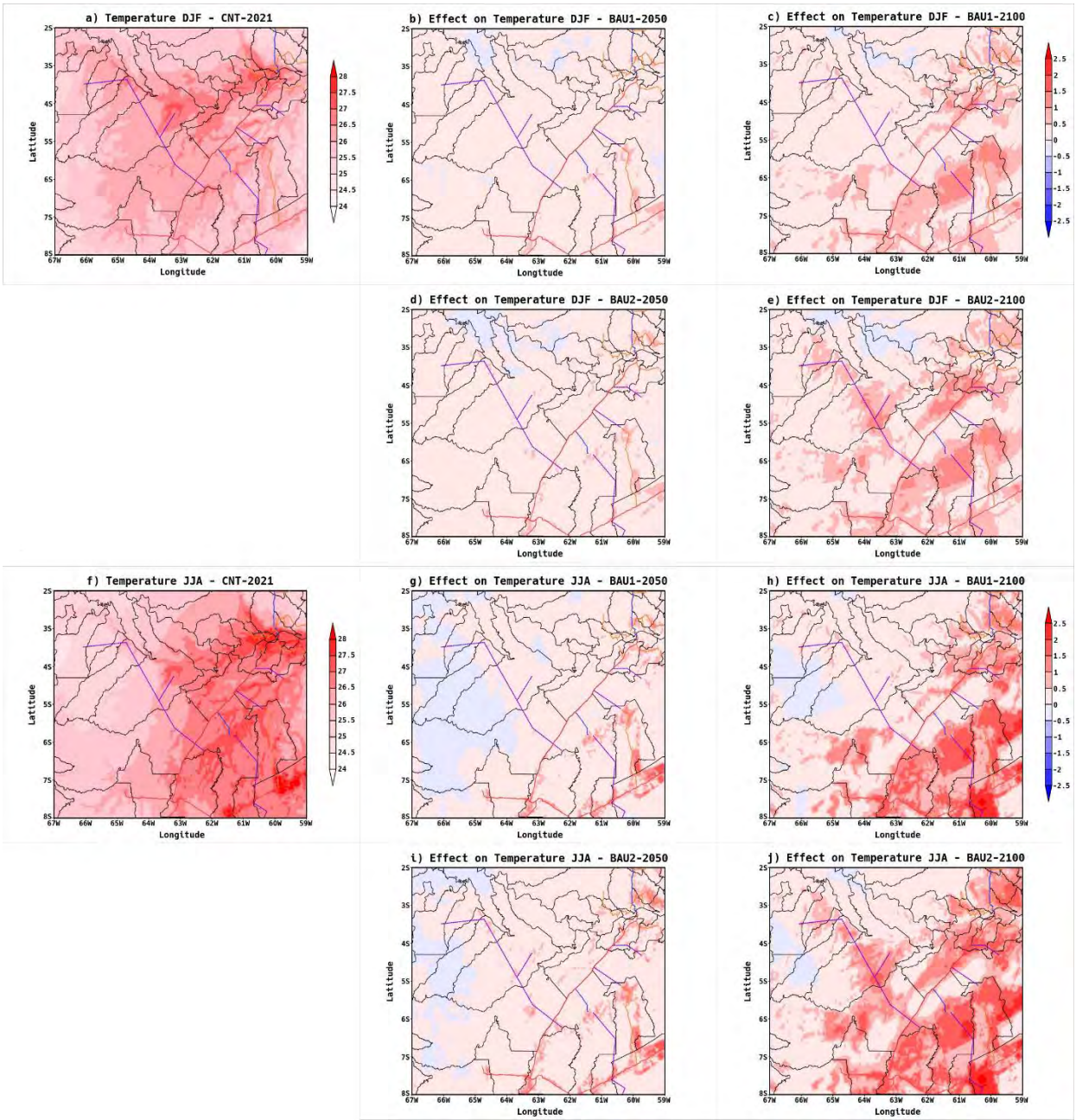

Figura 6. Impacto na temperatura do ar (°C) a 2 m acima do solo em 2050 e 2100 resultante dos cenários de mudança de uso do solo BAU_1 (BR-319 sem pavimentação) e BAU_2 (BR-319 pavimentada), comparado ao clima atual (CNT – 2021), para a estação chuvosa (DJF - painéis b, c, d, e) e estação seca (JJA - painéis g, h, i, j).

O aumento da temperatura do ar em áreas desmatadas está relacionado a diversos fatores associados à remoção da vegetação, particularmente alterações no balanço hídrico e energético da superfície. Alterações nos parâmetros do solo e da vegetação — como porosidade, índice de área foliar, comprimento da rugosidade e condutância estomática — modificam os componentes de energia superficial e fluxo hídrico, afetando consequentemente o clima regional em áreas desmatadas. Neste estudo, a redução do fluxo de calor latente (evapotranspiração) e o aumento do fluxo de calor sensível sobre regiões desmatadas contribuíram para o aumento da temperatura do ar, especialmente durante a estação seca.

Durante a estação chuvosa, o experimento indicou um aumento no fluxo de calor latente e uma diminuição no fluxo de calor sensível, que atua na direção oposta à do aumento da temperatura. O aumento no fluxo de calor latente pode ter mitigado parcialmente o aquecimento do ar local, mas não o reverteu completamente. Esse fenômeno pode estar ligado a mudanças na disponibilidade de energia na superfície. Um resultado semelhante foi relatado por [71] em estudos sobre os impactos climáticos do desmatamento na Amazônia central, que sugeriram que o aumento da temperatura da superfície, juntamente com a redução do fluxo de calor sensível, pode ser explicado por uma redução no gradiente de temperatura modelado.

A **Figura 7** ilustra o impacto da pavimentação da rodovia BR-319 (BAU_2) na temperatura do ar a 2 m, em relação ao cenário sem pavimentação (BAU_1). O maior impacto é observado sobre as áreas desmatadas na porção norte da BR-319 e na região central dos mapas, notadamente ao redor da rodovia AM-366, onde novas manchas de desmatamento estão surgindo dentro da floresta. Aumentos de temperatura estão presentes em todos os períodos analisados, atingindo quase 1,0 °C durante a estação chuvosa e 1,5 °C durante a estação seca em regiões desmatadas.

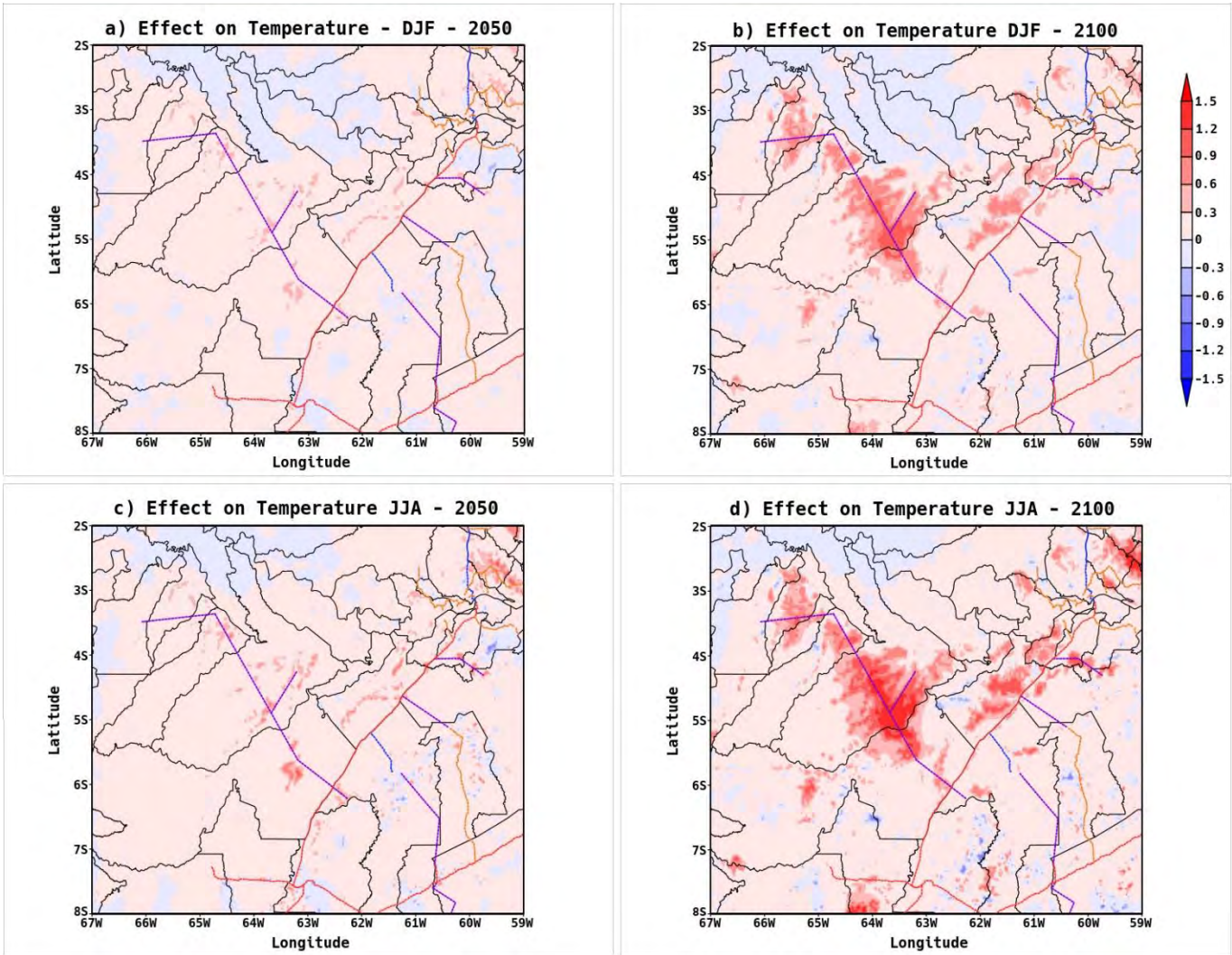

Figura 7. Impacto na temperatura do ar na superfície (°C) a 2 m acima do solo em 2050 e 2100, resultante da comparação entre os cenários BAU_1 (rodovia BR-319 não pavimentada) e BAU_2 (rodovia BR-319 pavimentada), para o período chuvoso (DJF: painéis a, d) e seco (JJA: painéis c, d).

Uma limitação da nossa abordagem é que a concentração atmosférica de CO_2 foi mantida constante em todos os experimentos para isolar os efeitos das mudanças no uso do solo. No entanto, é bem sabido que o aumento do CO_2 interage com a fisiologia e a estrutura da vegetação de maneiras complexas. Concentrações mais elevadas de CO_2 tendem a reduzir a condutância estomática e a evapotranspiração, intensificando o aquecimento regional e a seca, mas também podem estimular o crescimento da biomassa e a expansão da área foliar, mitigando parcialmente esses impactos [72]. [73]. Estes aspectos sugerem que os efeitos combinados das alterações na utilização dos solos e do aumento do CO_2 são susceptíveis de produzir respostas climáticas mais complexas.

3.2. Impacto na precipitação

A **Figura 8** apresenta o impacto na precipitação sob os cenários BAU_1 e BAU_2 durante as estações chuvosa (DJF) e seca (JJA) para a área de estudo. Um aumento na precipitação é observado, especialmente em áreas de novos padrões de desmatamento “espinha de peixe”, onde o desmatamento se intensificou

devido à reconstrução da rodovia BR-319 e à abertura de novas estradas de conexão. Comparando os cenários simulados para 2050 com o clima atual, há um aumento médio de 0,1 mm dia^{-1} nas estações chuvosa e seca para os cenários BAU_1 e BAU_2. Em 2100, o cenário BAU_1 mostra um aumento médio de 0,4 mm dia^{-1} durante a estação chuvosa e 0,3 mm dia^{-1} durante a estação seca, enquanto o cenário BAU_2 exibe um aumento de 0,5 mm dia^{-1} e 0,4 mm dia^{-1} para as estações chuvosa e seca, respectivamente. Conforme ilustrado na **Figura 8**, os aumentos de precipitação excederam 2,5 mm dia^{-1} em algumas regiões desmatadas. Notamos que, ao longo do período simulado, o desmatamento segue o padrão espinha de peixe e que, como ocorreu em outras fronteiras amazônicas, ele será posteriormente "consolidado" em vastas extensões de terra desmatada. O aumento da precipitação na fase intermediária de desmatamento representada na simulação é o esperado, mas, com a consolidação progressiva da paisagem desmatada, o efeito mudará para uma grande redução da precipitação [74]. A alta heterogeneidade espacial, aqui na forma do padrão "espinha de peixe", pode ter um efeito pelo menos tão importante quanto a área de desmatamento na formação das circulações anômalas que levaram aos aumentos de precipitação simulados durante o período de nosso estudo [75]. Esse efeito é temporário e várias suposições conservadoras na simulação do desmatamento [49] podem significar que a redução da precipitação começa mais cedo do que o clima simulado sugere.

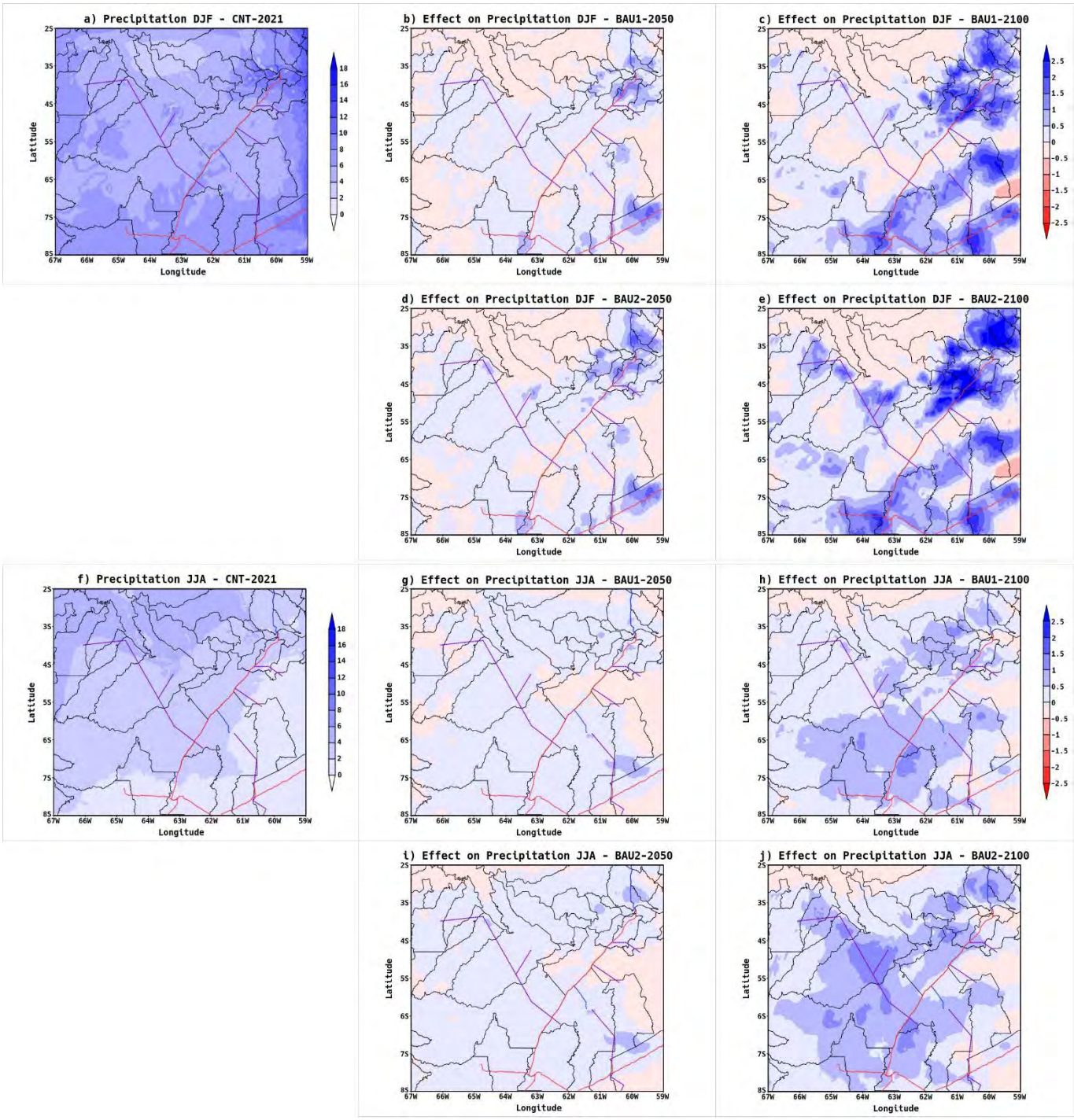

Figura 8. Impacto na precipitação (mm dia⁻¹) em 2050 e 2100 resultante dos cenários de mudança de uso do solo BAU_1 (rodovia BR-319 não pavimentada) e BAU_2 (rodovia BR-319 pavimentada), comparado ao clima atual (CNT – 2021), durante as estações chuvosa (DJF) painéis b, c, d, e) e seca (JJA) painéis g, h, i, j).

Embora esteja bem estabelecido que o avanço do desmatamento resulta no aquecimento local, os impactos na precipitação permanecem incertos e continuam a ser objecto de estudos extensivos [74] [76]. De modo geral, a literatura aponta para uma redução da precipitação como consequência do desmatamento. Entretanto, alguns estudos, como [29] [31] [32] [33] [34] [35] e [19] relatam resultados contrastantes. Eles sugerem que, em certas áreas, a precipitação pode aumentar devido à fragmentação florestal e à predominância de circulações locais e de mesoescala, impulsionadas pela heterogeneidade da superfície, que é determinada pela extensão do desmatamento. Isso implica que, em áreas de desmatamento em menor escala, a heterogeneidade nos fluxos de calor sensível e latente pode gerar circulações intensas de mesoescala, afetando a estrutura da camada limite planetária e influenciando a formação de nuvens e os padrões de precipitação [30] [36] [77].

A **Figura 9** ilustra o impacto da pavimentação da rodovia BR-319 (cenário BAU_2) na precipitação em 2050 e 2100 em comparação com o cenário não pavimentado (BAU_1). O maior impacto ocorre nas áreas influenciadas pelas rodovias BR-319 e AM-366, onde novas áreas desmatadas estão sendo abertas. O impacto se intensifica até 2100 em ambas as estações, com um aumento médio de 0,1 mm dia^{-1} para a área de estudo. Notavelmente, maiores discrepâncias são observadas durante a estação chuvosa, com aumentos de precipitação superiores a 1,5 mm dia^{-1} em regiões desmatadas, juntamente com reduções na precipitação dentro de fragmentos florestais circundantes e em áreas onde o desmatamento se torna mais extenso — particularmente na porção sudeste da área de estudo.

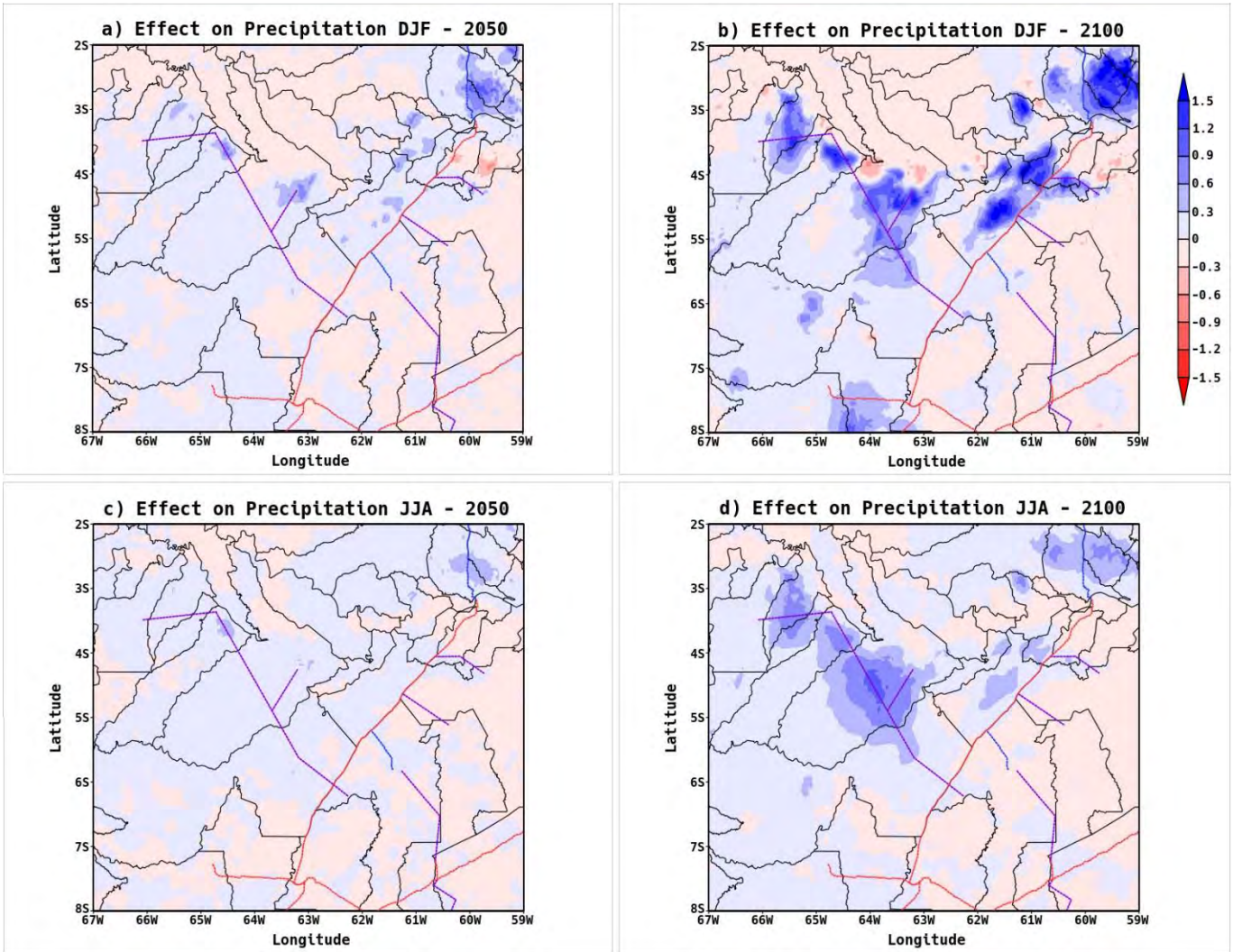

Figura 9. Impacto na precipitação (mm dia^{-1}) em 2050 e 2100 resultante da comparação entre os cenários BAU_1 (rodovia BR-319 não pavimentada) e BAU_2 (rodovia BR-319 pavimentada), para os períodos chuvoso (DJF) painéis a, d) e seco (JJA) painéis c, d).

Os resultados corroboram estudos mencionados anteriormente, indicando que, à medida que o desmatamento se expande além da fase inicial de "espinha de peixe", ocorre uma diminuição geral na precipitação. As comparações de cenários sugerem que o aumento do desmatamento leva à diminuição da precipitação e ao aumento da aridez regional devido à menor disponibilidade de umidade e à alteração da dinâmica atmosférica.

Em 2100, a paisagem simulada ainda representa um estágio de transição, onde coexistem desmatamentos fragmentados em espinha de peixe e clareiras mais consolidadas. Em áreas onde o desmatamento já é extenso, a diminuição da precipitação é evidente, enquanto em regiões com fragmentos relativamente menores, ainda se observam aumentos na precipitação. É importante enfatizar que 2100 não representa o ponto final do desmatamento na Amazônia, mas sim um instantâneo temporal no cenário "Business as Usual". À medida que o desmatamento continua a se expandir e se consolidar além de 2100, espera-se que as tendências de precipitação mudem para declínios significativos a longo prazo.

3.4. Impacto na Evapotranspiração

A Figura 10 ilustra o impacto dos cenários na evapotranspiração, mostrando um aumento nos efeitos da evapotranspiração em ambos os cenários durante a estação chuvosa (DJF) e uma redução durante a estação seca (JJA). É evidente que, durante a estação chuvosa, a evapotranspiração aumenta, como representado pelo aumento do fluxo de calor latente.

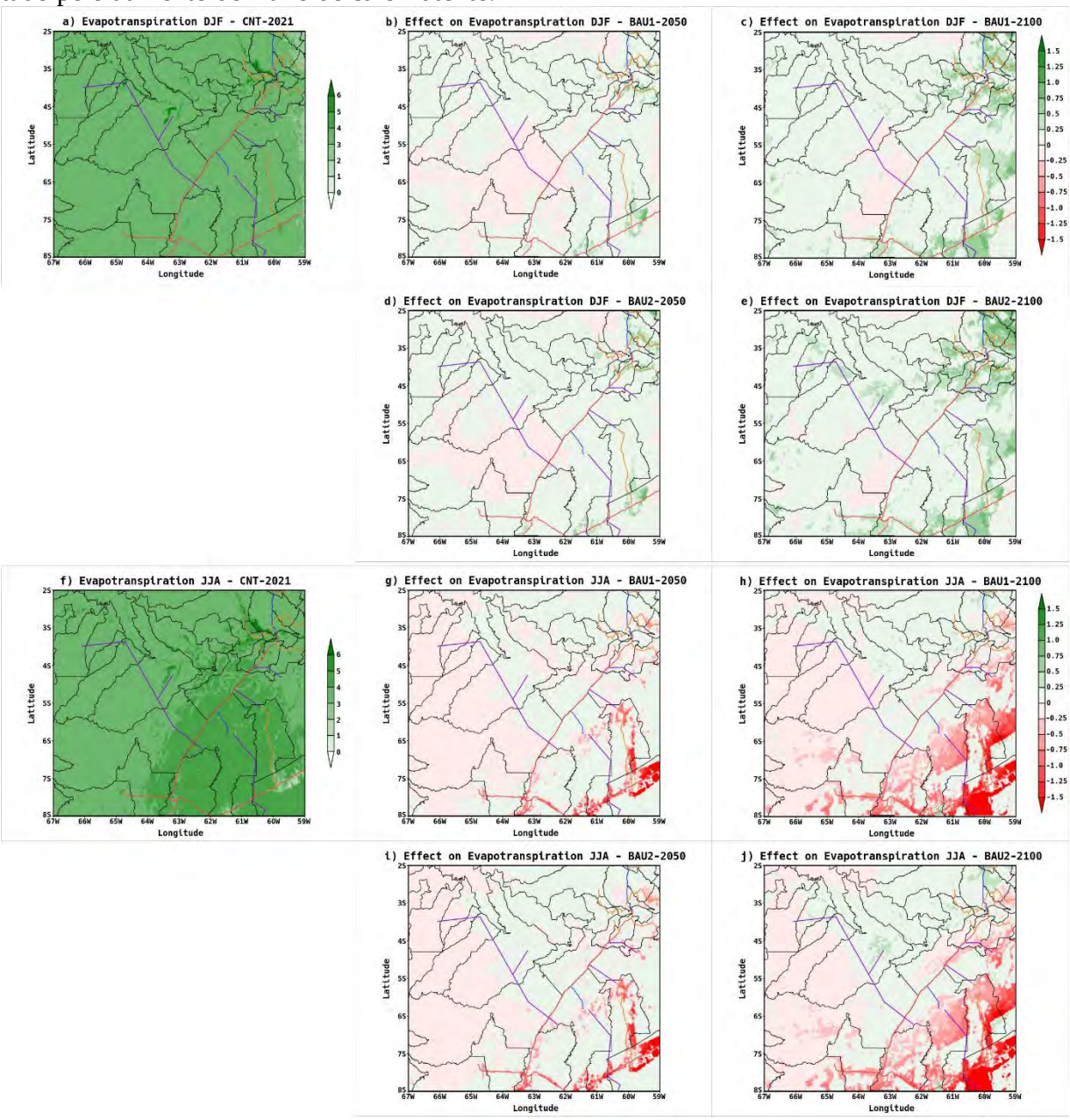

Figura 10. Impacto na evapotranspiração (mm dia^{-1}) em 2050 e 2100 resultante dos cenários de mudança de uso do solo BAU_1 (rodovia BR-319 não pavimentada) e BAU_2 (rodovia BR-319 pavimentada), comparado ao clima atual (CNT – 2021), durante as estações chuvosa (DJF) painéis b, c, d, e) e seca (JJA) painéis g, h, i, j).

A evapotranspiração abrange tanto a evaporação da água do solo e da superfície quanto a transpiração das plantas, o que é explicado pelo aumento do fluxo de calor latente. O desmatamento reduz a transpiração devido à remoção de árvores e outras vegetações que anteriormente desempenhavam essa função. Consequentemente, a quantidade de vapor d'água liberado na atmosfera diminui significativamente.

Por outro lado, os resultados indicam um aumento da evapotranspiração durante a estação chuvosa (DJF), o que pode ser atribuído ao aumento da precipitação local. Isso modifica a disponibilidade de vapor d'água, uma vez que a remoção da floresta compromete a reciclagem da água via evapotranspiração e intensifica a evaporação direta de superfícies de solo expostas ou corpos d'água. Esse processo pode aumentar a umidade local, promover a formação de nuvens e potencialmente aumentar a ocorrência de chuvas, especialmente durante os períodos chuvosos [78] [79]. Além disso, a resistência estomática é menor em áreas de pastagem do que em florestas, contribuindo para o aumento da evaporação em áreas não florestadas [80].

O aumento do fluxo de calor latente também pode ser explicado pela intensificação da velocidade do vento em áreas fragmentadas e pelo efeito da mistura turbulenta sobre superfícies úmidas na Amazônia [71] [81]. De uma perspectiva micrometeorológica, as árvores nas bordas das florestas tendem a transpirar mais do que aquelas no interior da floresta [82]. Isso sugere que, em escala local, a fragmentação florestal pode levar ao aumento da evapotranspiração, compensando parcialmente as reduções causadas pelo desmatamento [36].

Durante a estação seca (EJA), a evapotranspiração diminui enquanto a precipitação aumenta. Esse padrão resulta de circulações em mesoescala induzidas pela heterogeneidade da paisagem. De acordo com [32], esses processos aumentam a convergência de umidade, que compensa a redução da evapotranspiração e, consequentemente, aumenta a precipitação.

A **Figura 11** descreve o impacto da pavimentação da rodovia BR-319 (cenário BAU_2) na evapotranspiração em comparação com o cenário sem pavimentação (BAU_1). O impacto mais pronunciado é observado em áreas desmatadas na porção norte da BR-319 e partes centrais dos mapas, particularmente próximo à rodovia AM-366, onde novas manchas de desmatamento se formaram dentro da matriz florestal. Nessas ilhas de desmatamento influenciadas pelo desenvolvimento rodoviário, os aumentos na evapotranspiração podem exceder 0,5 mm por dia^{-1}.

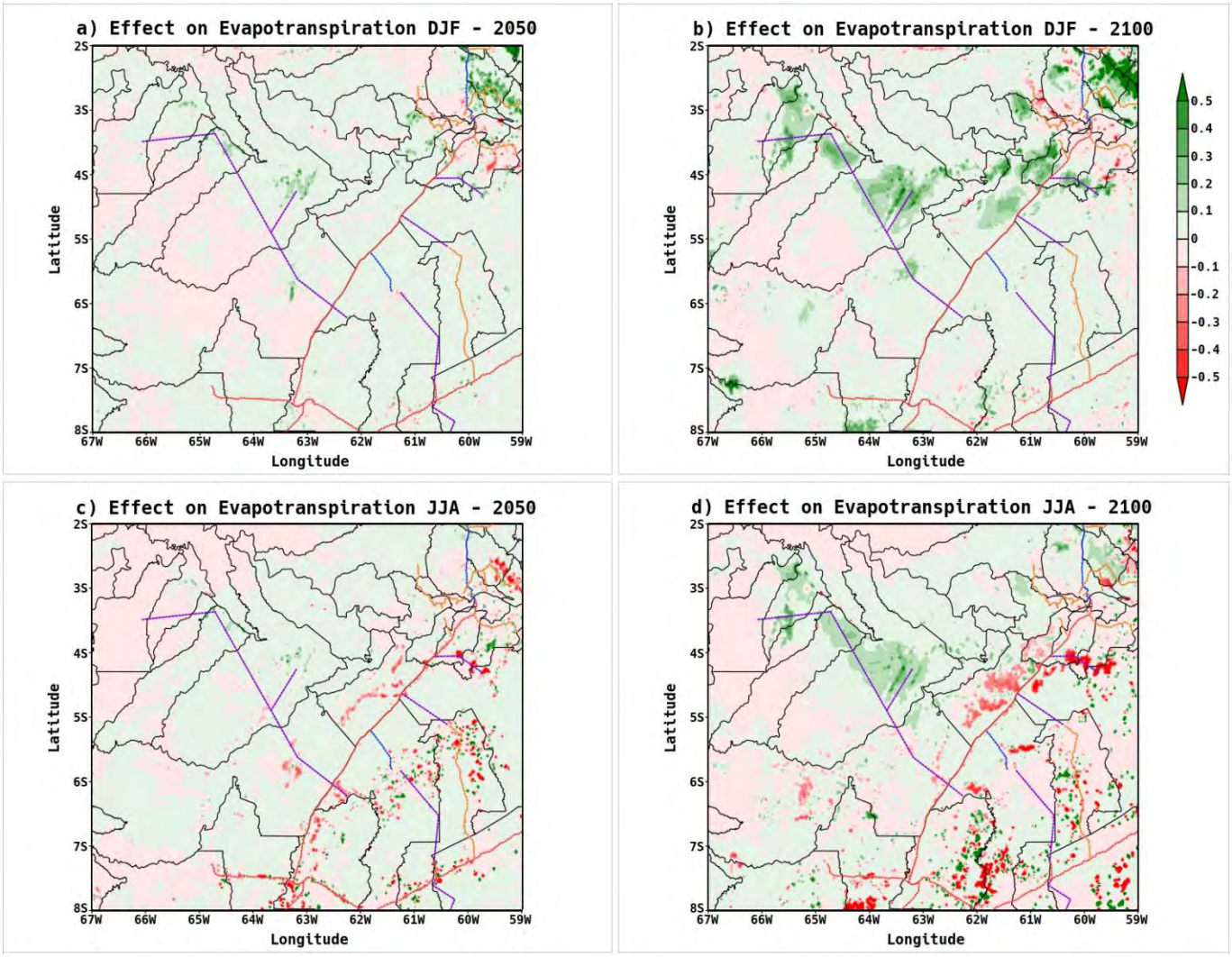

Figura 11. Impacto na evapotranspiração (mm dia^{-1}) em 2050 e 2100 resultante da comparação entre os cenários BAU_1 (rodovia BR-319 não pavimentada) e BAU_2 (rodovia BR-319 pavimentada), para os períodos chuvoso (DJF) painéis a, d) e seco (JJA) painéis c, d).

3.5. Impacto na Convergência de Umidade

A **Figura 12** mostra um aumento na convergência de umidade na área de estudo em todos os cenários, em comparação com o experimento de controle, especialmente em regiões recentemente desmatadas. Este resultado está alinhado com os dados apresentados anteriormente, indicando que o aumento na precipitação é consequência do aumento da convergência de umidade.

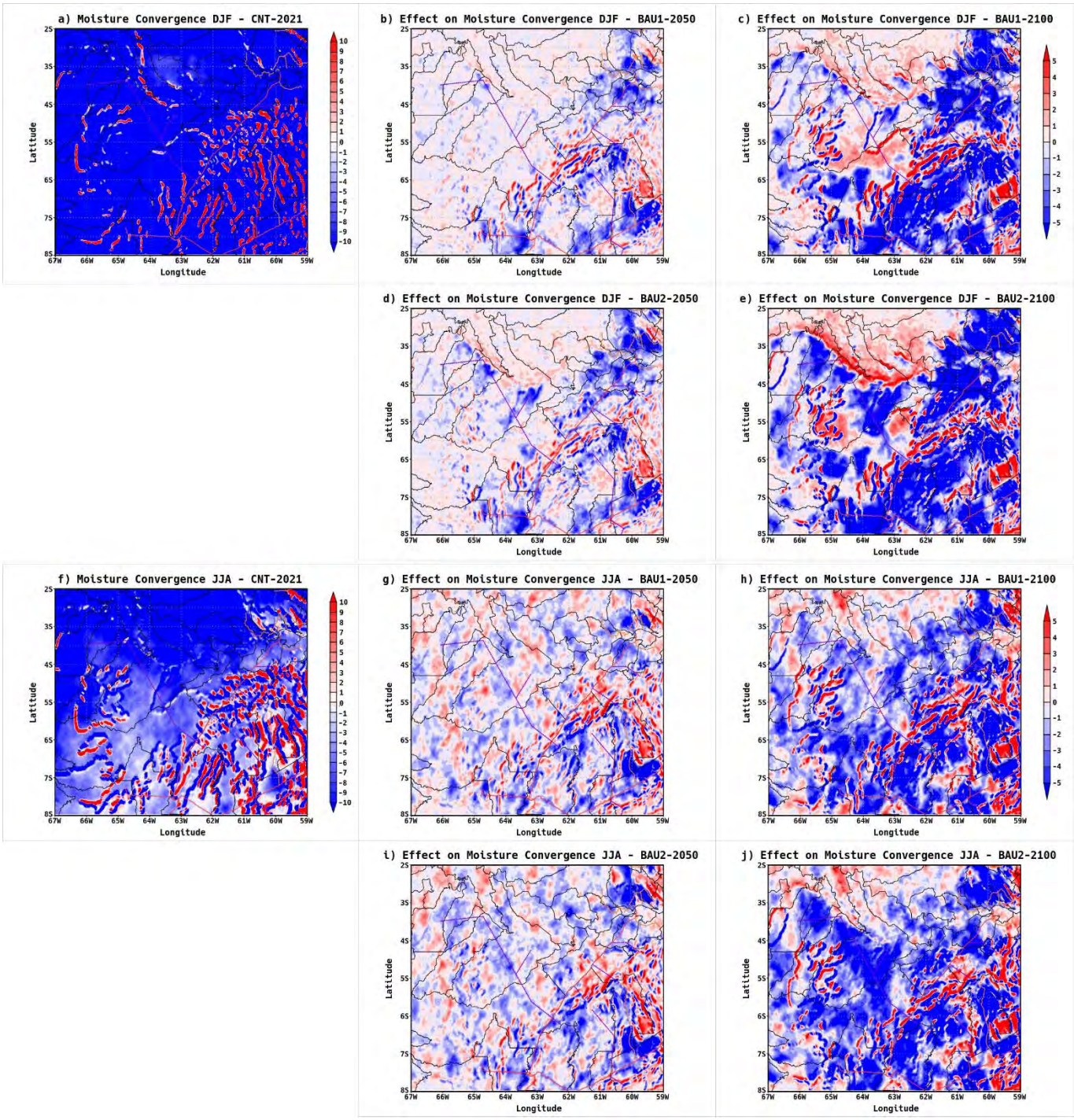

Figura 12. Impacto na convergência de umidade (mm dia^{-1}) em 2050 e 2100 resultante dos cenários de mudança de uso do solo BAU_1 (rodovia BR-319 não pavimentada) e BAU_2 (rodovia BR-319 pavimentada), comparado ao clima atual (CNT – 2021), durante as estações chuvosa (DJF) painéis b, c, d, e) e seca (JJA) painéis g, h, i, j).

Vale ressaltar que, durante a estação seca (JJA), os impactos na convergência de umidade e na evapotranspiração atuaram de forma oposta. O aumento da convergência de umidade sobre as áreas desmatadas

foi suficientemente forte para compensar a redução da evapotranspiração. Esse aumento na precipitação pode ser explicado por mudanças na circulação local, visto que alterações na heterogeneidade da superfície devido ao desmatamento geram circulações de mesoescala, favorecendo o aumento da convergência de umidade e, consequentemente, o aumento da precipitação sobre as regiões desmatadas [32] [83] [19].

A **Figura 13** apresenta o impacto na convergência de umidade a partir da comparação entre os dois cenários analisados. O maior impacto é observado ao longo das rodovias, com redução da convergência de umidade (sinal positivo) na porção leste da BR-319 e aumento da convergência (sinal negativo) nas ilhas de desmatamento, especialmente considerando a abertura de novas rodovias, como a AM-366, localizada mais centralmente nos mapas.

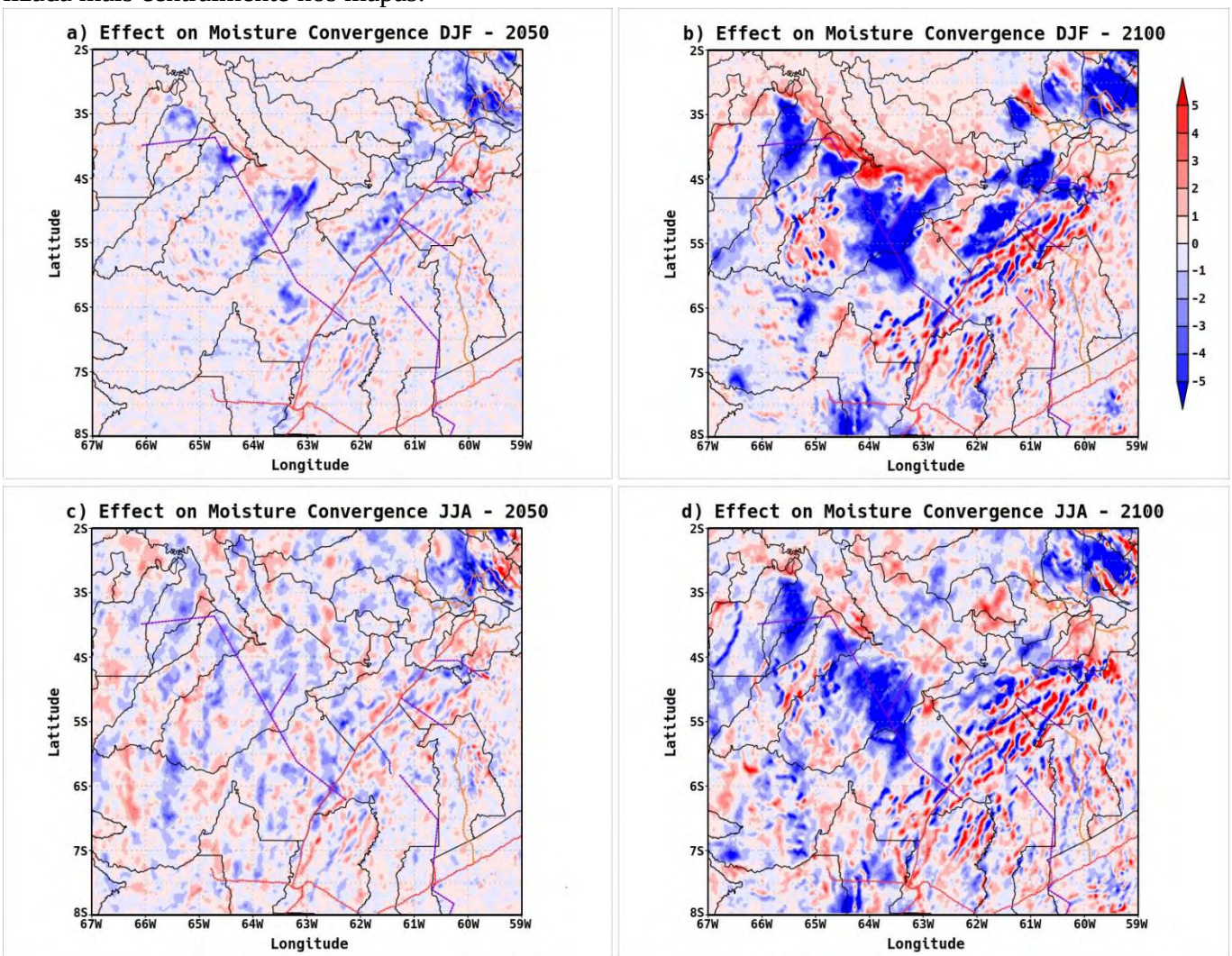

Figura 13. Impacto na convergência de umidade (mm dia^{-1}) em 2050 e 2100 resultante da comparação entre os cenários BAU_1 (rodovia BR-319 não pavimentada) e BAU_2 (rodovia BR-319 pavimentada), para os períodos chuvoso (DJF) painéis a, d) e seco (JJA) painéis c, d).

3.5. Impacto no escoamento superficial

A **Figura 14** apresenta o escoamento total médio simulado pelo modelo Eta para as estações chuvosa (DJF) e seca (JJA). Durante ambas as estações, os valores de escoamento foram positivos (Precipitação >

Evapotranspiração) na maior parte da área de estudo, com valores mais elevados (> 1,5 mm dia^{-1}) observados em áreas desmatadas durante a estação chuvosa.

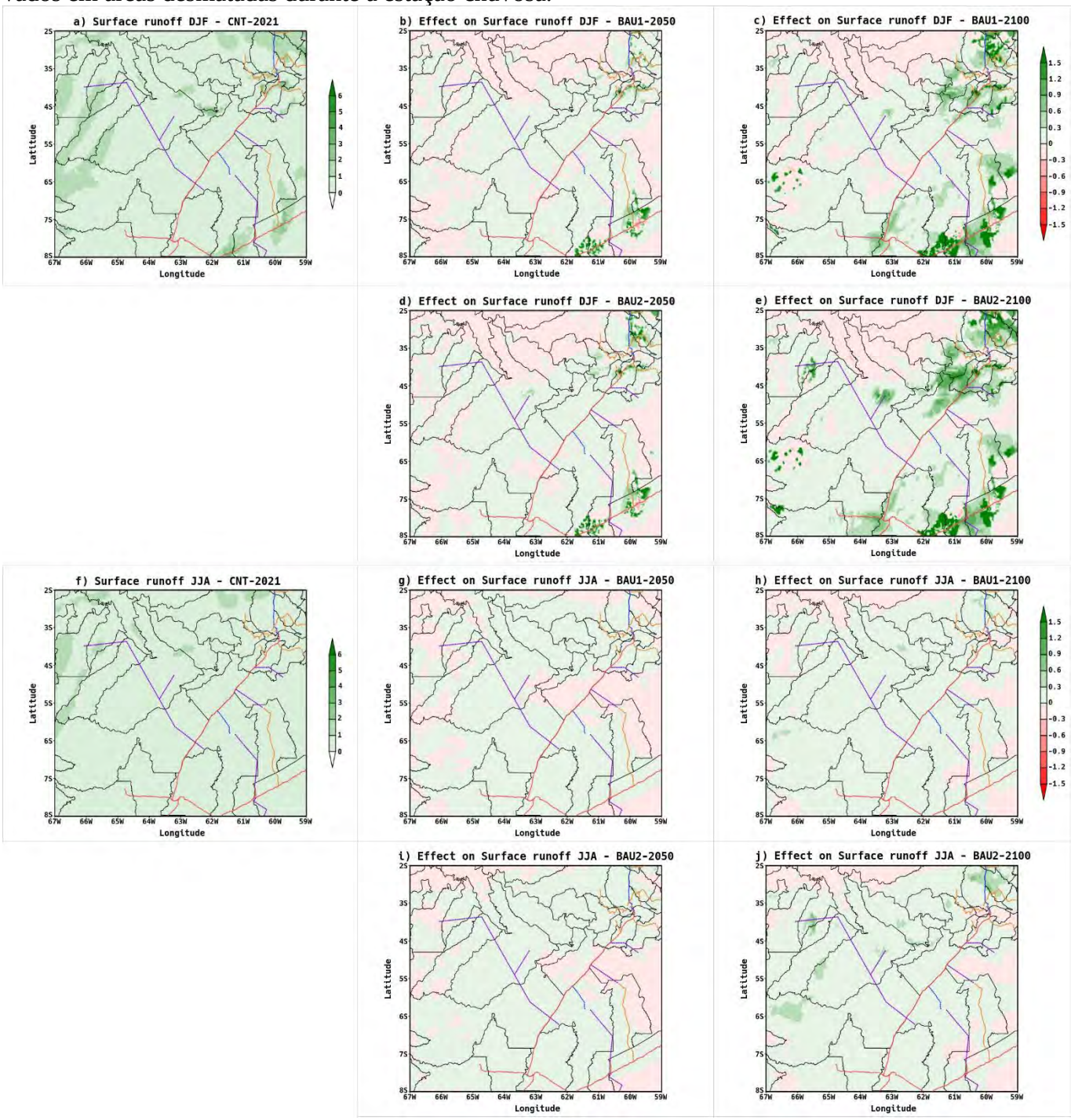

Figura 14. Impacto no escoamento superficial (mm dia^{-1}) em 2050 e 2100 resultante dos cenários de mudança de uso do solo BAU_1 (rodovia BR-319 não pavimentada) e BAU_2 (rodovia BR-319 pavimentada), comparado ao clima atual (CNT – 2021), durante as estações chuvosa (DJF) painéis b, c, d, e) e seca (JJA) painéis g, h, i, j).

O aumento do escoamento superficial foi impulsionado principalmente pelo aumento da precipitação na área de estudo. Convencionalmente, a conversão de florestas em agricultura ou pastagem aumenta o escoamento superficial, em parte devido à redução da evapotranspiração [84], observada durante a estação seca (JJA) do experimento. No entanto, durante a estação chuvosa (DJF), o aumento da precipitação resultou em um aumento proporcional do escoamento superficial. Essa disponibilidade hídrica favoreceu o aumento do fluxo de calor latente, responsável pela evaporação da água, e a redução do fluxo de calor sensível [85] .

A **Figura 15** mostra o impacto da pavimentação da rodovia BR-319 (BAU_2) no escoamento superficial em comparação com o cenário sem pavimentação (BAU_1). Um aumento médio no escoamento superficial de 0,1 mm dia^{-1} foi observado em toda a área de estudo para ambas as estações até 2100. Em algumas áreas desmatadas, os valores de escoamento podem exceder 1,0 mm dia^{-1} tanto na estação chuvosa quanto na seca até 2100, seguindo o mesmo padrão observado para a precipitação.

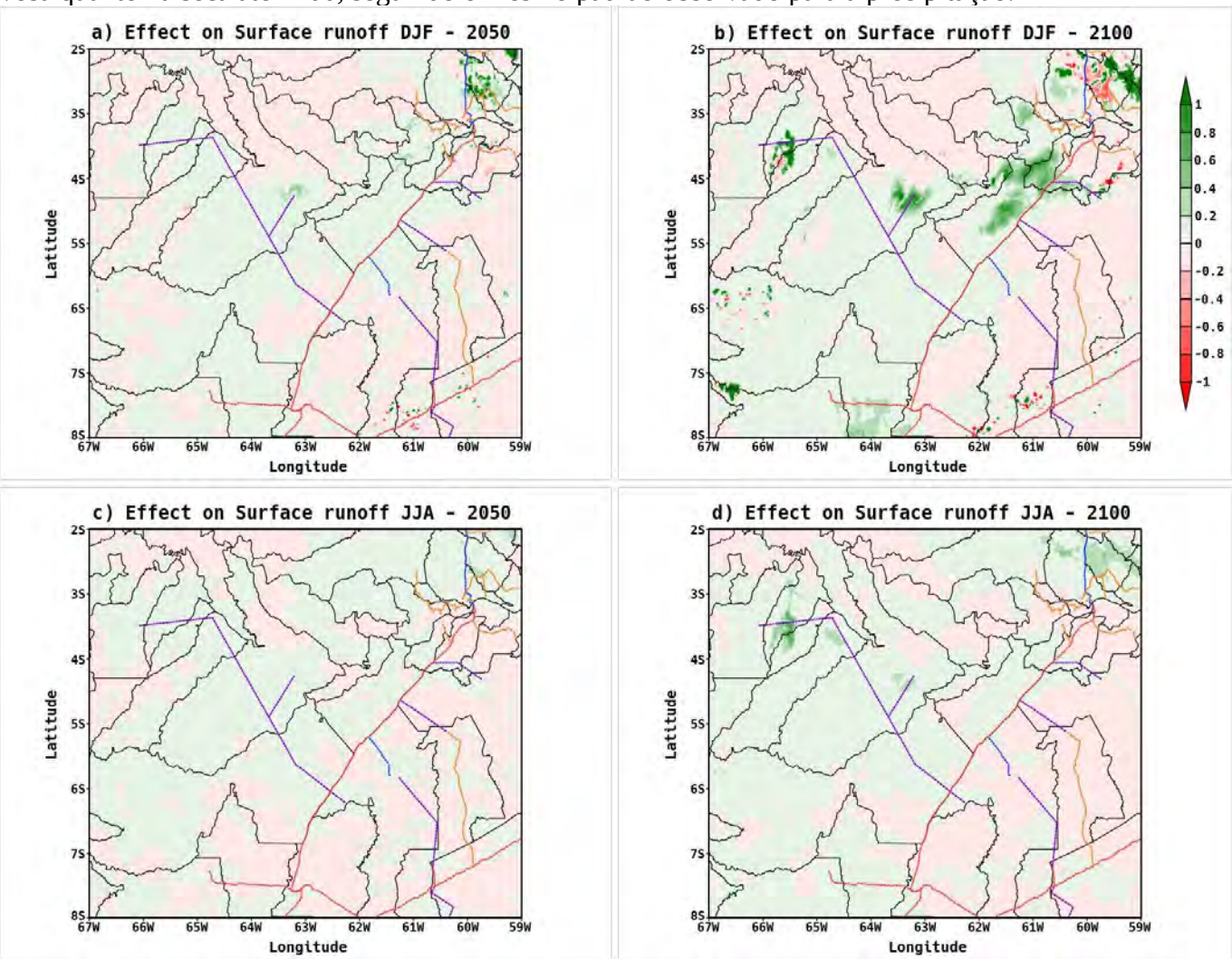

Figura 15. Impacto no escoamento superficial (mm dia^{-1}) em 2050 e 2100 resultante da comparação entre os cenários BAU_1 (rodovia BR-319 não pavimentada) e BAU_2 (rodovia BR-319 pavimentada), para os períodos chuvoso (DJF) painéis a, d) e seco (JJA) painéis c, d).

4. Conclusão

Nossas simulações mostram um sinal de aquecimento em todos os cenários de desmatamento, com a resposta mais intensa associada à pavimentação da rodovia BR-319 até o final do século, particularmente durante a estação seca, quando a temperatura média do ar aumenta para perto de 0,7 °C. Em escala local, as áreas desmatadas apresentam anomalias mais fortes, em alguns casos excedendo 2,5 °C.

Mudanças na precipitação também ocorrem: em média, aumentos de cerca de 0,5 mm dia^{-1} foram simulados em toda a área de estudo, com incrementos locais acima de 2,5 mm dia^{-1}. Esses efeitos estão ligados a mudanças na circulação local, visto que a heterogeneidade da superfície induzida pelo desmatamento favorece processos de mesoescala que aumentam a convergência regional de umidade. No entanto, esse efeito é transitório e tende a se deslocar para o declínio da precipitação à medida que o desmatamento se consolida em grandes clareiras contínuas.

O aquecimento em áreas desmatadas resulta de alterações no balanço energético e hídrico da superfície. Embora um aumento no fluxo de calor latente possa exercer um efeito de resfriamento localizado, ele é compensado pelo aquecimento geral induzido pela perda florestal. Nossos resultados também indicam que o desmatamento intensificado contribui para o ressecamento das florestas adjacentes e agrava os desafios climáticos existentes na Amazônia, como o aumento das temperaturas e a intensificação das estações secas.

Estas descobertas fornecem informações importantes para a tomada de decisões sobre projetos de infraestrutura rodoviária em a Amazônia, como a BR-319 e a AM-366. As consequências climáticas do desenvolvimento de estradas de larga escala precisam ser consideradas nos processos de planejamento e aprovação de tais projetos.

Com base em nossos resultados, recomendamos a incorporação de modelagem climática regional de alta resolução em Avaliações Ambientais Estratégicas (AAEs) de Políticas, Planos e Programas (PPPs) governamentais para projetos de infraestrutura rodoviária na Amazônia. Essa abordagem é essencial para avaliar os impactos locais da expansão rodoviária no desmatamento e para garantir que as decisões de políticas públicas sejam orientadas pelas melhores evidências científicas disponíveis.

Agradecimentos

Este estudo foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Clima e Meio Ambiente (CLIAMB), coordenado conjuntamente pela Universidade Estadual do Amazonas (UEA) e o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Todos os autores agradecem ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) pela disponibilização dos conjuntos de dados de integrações numéricas, ao Centro Nacional de Processamento de Alto Desempenho (CENAPAD/UNICAMP) e ao Laboratório de Modelagem de Sistemas Climáticos Terrestres (LABCLIM/UEA) pelo fornecimento da infraestrutura computacional (Cluster TAMBAQUI). À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) (Resolução 003/2019; 01.02.016301.02529/2024-87) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Código de Financiamento 001), pelo apoio institucional. O primeiro autor agradece ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) pelo apoio. Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) 312450/2021-4; 406941/2022-0), e a Rede Brasileira de Pesquisa em Mudanças Climáticas (Rede Clima) (FINEP/Rede Clima 01.13.0353-00).

Referências

[1] Nobre, C. A.; Sampaio, G.; Borma, L. S; Cardoso, M. 2016a. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 113(39), 10759-10768.

https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113
[2] Marengo, J.A.; Nobre, C.A. 2009. Clima da região amazônica. In: Cavalcanti, I.F.A.; Ferreira, N.J.; da Silva, M.G.A.J.; Silva Dias, M.A.F. (Eds). Tempo e Clima no Brasil. *Oficina de Textos*, São Paulo, SP. p. 197-212. https://www.researchgate.net/publication/329466396_Mudancas_Climaticas_impactos_e_cenarios_para_a_Amazonia
[3] Nobre, C. A., Marengo, J. A., Artaxo, P. 2009. Understanding the climate of Amazonia: Progress from LBA. *Geophysical Monograph Series*, 145–147. doi:10.1029/2009gm000903
[4] Zemp, D. C., Schleussner, C.-F, Barbosa, H. M. J., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., et al. 2017. Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. Nat. *Commun*. 8:14681. https://doi.org/10.1038/ncomms14681
[5] Fearnside, P.M.; Barbosa, R. I.; Pereira, V.B. 2013. Emissões de gases do efeito estufa por desmatamento e incêndios florestais em Roraima: fontes e sumidouros. Artigo de Revisão Temática. *Revista Agro@mbiente On-line*, 7(1), 95-111. https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v7i1.971
[6] Rocha V.M.; Correia F.W.S.; Satyamurty P.; de Freitas S.R.; Moreira D.S.; da Silva P.R.T.; Fialho E.S. 2015. Impacts of land cover and greenhouse gas (GHG) concentration changes on the hydrological cycle in Amazon basin: A regional climate model study. *Revista Brasileira de Climatologia*, 15, 7-27. https://doi.org/10.5380/abclima.v15i0.36386
[7] Nobre, C. A., Sampaio, G., Borma, L. S., Castilla-Rubio, J. C., Silva, J. S., Cardoso, M., *et al*. 2016b. The Fate of the Amazon Forests: land-use and climate change risks and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc. Natl. Acad. Sci*. U.S.A. 113, 10759–10768. doi:10.1073/pnas.1605516113
[8] Marengo, J. A., Souza, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves, L. M., & Soares, W. R. 2018. Changes in climate and land use over the Amazon region: Current and future variability and trends. *Frontiers in Earth Science*, 6 (December), 1–21. DOI:10.3389/feart.2018.00228
[9] Weng, W., Luedeke, M. K., Zemp, D. C., & Lakes, T. 2018. Aerial and surface rivers: downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 911-927. https://doi.org/10.5194/hess-22-911-2018
[10] Marengo, J. A., Souza-Jr, C. M. 2018. Mudanças Climáticas: Impactos e cenários para a Amazônia. *PPG em Ciência Ambiental* - USP. https://www.oamanhaehoje.com.br/assets/pdf/Relatorio_Mudancas_Climaticas-Amazonia.pdf
[11] Fearnside, P.M. 2020. Uso da terra na Amazônia e as mudanças climáticas globais. pp. 21-38. In: Fearnside, P.M. (ed.) Destruição e Conservação da Floresta Amazônica, Vol. 1. *Editora do INPA*, Manaus. 368 p. https://www.researchgate.net/publication/340923492_Uso_da_terra_na_Amazonia_e_as_mudancas_climaticas_globais
[12] Pielke, R.A.; Pitman, A.; Niyogi, D.; Mahmood, R.; McAlpine, C.; Hossain, F.; Goldewijk, K. K.; Nair, U.; Betts, R.; Fall, S.; Reichstein, M.; Kabat, P. & Noblet, N. 2011. Advanced Review Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. WIREs Clim Change 2011. doi:10.1002/wcc.144
[13] Gash, J. H. C., & Nobre, C. A. (1997). Climatic effects of Amazonian deforestation: Someresults from ABRACOS. *Bulletin of the American meteorological society*, 78(5), 823-830. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0823:CEOADS>2.0.CO;2
[14] Marengo, J.A., Espinoza, J.C. 2016. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033-1050. https://doi.org/10.1002/joc.4420
[15] Seymour, F., M. Wolosin, and E. Gray. 2022. "Not Just Carbon: Capturing All the Benefits of Forests for Stabilizing the Climate from Local to Global Scales." Report. Washington, DC: *World Resources Institute*. https://doi.org/10.46830/wrirpt.19.00004
[16] Gerow, A. & Seymour, F. 2023. RESUMO PARA GESTORES DE POLÍTICA Implicações para o setor privado sobre os efeitos do desmatamento de florestas tropicais para além do carbono https://files.wri.org/d8/s3fs-public/2023-09/implicacoes-para-o-setor-privado.pdf
[17] Guimberteau, M., Ciais, P., Ducharne, A., Boisier, J. P., Dutra Aguiar, A. P., Biemans, H., De Deurwaerder, H., Galbraith, D., Kruijt, B., Langerwisch, F., Poveda, G., Rammig, A., Rodriguez, D. A., Tejada, G., Thonicke, K., Von Randow, C., Von Randow, R. C. S., Zhang, K., and Verbeeck, H.. 2017. Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios, Hydrol. *Earth Syst. Sci.*, 21, 1455–1475, https://doi.org/10.5194/hess-21-1455-2017.
[18] Gomes, W.B.; Correia, F.W.S.; Capistrano, V.B; Veiga, J.A.P.; Vergasta, L.A., Chou, S.C., Lyra, A.A., Rocha, V.M. 2020. Avaliação dos Impactos das Mudanças na Cobertura da Terra e Cenário de Emissões (RCP 8.5) no Balanço de água na Bacia do Rio Madeira. *Revista Brasileira de Meteorologia*,v. 35(4), 689-702. DOI:10.1590/0102-77863540076
[19] Qin, Y.; Wang, D.; Ziegler, A.D.; Fu, B.; Zeng, Z. 2025. Impact of Amazonian deforestation on precipitation reverses between seasons. *Nature*, Vol 639. 102–108 (2025). https://doi.org/10.1038/s41586-024-08570-y
[20] Yoon, A. & Hohenegger, C. 2025. Muted Amazon Rainfall Response to Deforestation in a Global Storm-Resolving Model. *Geophysical Research Letters*, 52(4), e2024GL110503. https://doi.org/10.1029/2024GL110503
[21] Lyra, A.; Chou, S.C.; Dereczynski, C.P. 2007. Indicadores de turbulência a partir de previsões do modelo regional Eta. Revista Brasileira de Meteorologia, 22, 160-181. https://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/SBMET-1_e6cf9131a1b15ce00782d3715d01ab77
[22] Chou, S.C, Nobre, P., Maia, A., Freitas, E. D. de, Sampaio, G., Cavalcanti, I. F. A., *et al*. 2014. Avaliação de modelos globais e regionais climáticos. In Base Científica das Mudanças Climáticas: V1 - Primeiro Relatório da Avaliação Nacional. Rio de Janeiro: UFRJ/PBMC. http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2012/01.04.16.25/doc/PBMC-VOLUME1-RAN1_8.pdf
[23] Feser, F., Rockel, B., von Storch, H., Winterfeldt, J., & Zahn, M. (2011). Regional climate models add value to global model

data: a review and selected examples. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(9), 1181-1192. https://doi.org/10.1175/2011BAMS3061.1

[24] Rockel, B. 2015. The regional downscaling approach: a brief history and recent advances. *Current Climate Change Reports*, 1, 22-29. https://doi.org/10.1007/s40641-014-0001-3

[25] Ambrizzi, T., Reboita, M. S., da Rocha, R. P., & Llopart, M. (2019). The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1), 98-120. https://doi.org/10.1111/nyas.13932

[26] Goddard, L.; Mason, S.; Zebiak, S.; Ropelewski, C.; Basher, R. & Cane, M. 2001. Current approaches to seasonal to interannual climate predictions. *Int. J. Climatol*., 21, 1111–1152. doi:10.1002/joc.636

[27] Chou, S. C.; Marengo J. A.; Lyra, A.; Sueiro, G.; Pesquero, J.; Alves, L. M.; Kay, G.; Betts, R.; Chagas, D.; Gomes, J. L. Bustamante, J.; Tavares, P. 2011. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs, *Climate Dynamics*. 38(3):635-653. https://doi.org/10.1007/s00382-011-1002-8

[28] Avissar, R. 2002. The Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA): Insights and future research needs. *Journal of Geophysical Research* 107(D20), 8086, doi:10.1029/2002JD002704.

[29] Werth, D.; Avissar, R. 2002. The local and global effects of Amazon deforestation. *Journal of Geophysical Research* 107(D20), 8087. https://doi.org/10.1029/2001JD000717

[30] Baidya Roy, S.; R. Avissar. 2002. Impact of land use/land cover change on regional hydrometeorology in Amazonia, *J. Geophys. Res*. 107, 8037. doi:10.1029/2000JD000266.

[31] Correia, F., Alvalá, R. & Manzi, A. 2006. Impacto das modificações da cobertura vegetal no balanço de água na Amazônia: Um estudo com modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3, 1-15. http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.23.18.44/doc/correia_rbm.pdf

[32] Correia, F. W. S., Manzi, A. O., Cândido, L. A., Santos, R. M. N., Pauliquevis, T. 2007. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. *Ciência e Cultura* 59(3), 39-43. http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v59n3/a16v59n3.pdf

[33] Correia, F., Alvalá, R. & Manzi, A. 2008. Modeling the impacts of land cover change in Amazonia: a regional climate model (RCM) simulation study. *Theor Appl Climatol* 93, 225–244. https://doi.org/10.1007/s00704-007-0335-z

[34] Pitman, A.J. & R Lorenz, R. 2016. Scale dependence of the simulated impact of Amazonian deforestation on regional climate. Environmental Research Letters. 11. 9. DOI:10.1088/1748-9326/11/9/094025

[35] Chambers, J. Q., & Artaxo, P. (2017). Deforestation size influences rainfall. *Nature Climate Change*, 7(3), 175-176. doi:10.1038/nclimate3238

[36] Spracklen, D.V.; Baker, J.C.A.; Garcia-Carreras, L.; & Marsham, J.H. 2018. The Effects of Tropical Vegetation on Rainfall. *Annual Review of Environment and Resources*. Vol. 43: 193-218. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030136

[37] Fearnside, P. M., Graça, P. M. L. A., Keizer, E. W. H., Maldonado, F. D., Barbosa, R. I.; Nogueira, E. M. 2009. Modelagem do desmatamento e emissões de gases do efeito estufa na região sob influência da Rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.24, n.2, 208-233. https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000200009

[38] Fearnside, P. M., Graça, P. M. L. A. 2009. Br-319: a rodovia Manaus-Porto Velho e o impacto potencial de conectar o arco de desmatamento à Amazônia central. *Novos Cadernos NAEA*. v. 12, n. 1, p. 19-50. https://doi.org/10.5801/ncn.v12i1.241

[39] Andrade, M.B.T.; Ferrante, L.; Fearnside, P.M. 2021. Brazil's Highway BR-319 demonstrates a crucial lack of environmental governance in Amazonia. *Environmental Conservation* 48(3): 161-164. https://doi.org/10.1017/S0376892921000084

[40] Ferrante, L.; Andrade, M.B.T.; Fearnside, P.M. 2021. Land grabbing on Brazil's Highway BR-319 as a spearhead for Amazonian deforestation. *Land Use Policy*, 108, 105559. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105559

[41] Fearnside, P.M. 2024a. Impactos da rodovia BR-319 – 9: O discurso de governança. *Amazônia Real*, 26 June 2024. https://amazoniareal.com.br/impactos-da-rodovia-br-319-9-o-discurso-de-governanca/

[42] Fearnside, P.M. 2024b. O relatório do GT BR-319 de DNIT: A mais recente manobra para obter aprovação para um desastre ambiental. *Amazônia Real*, 13 June 2024. https://amazoniareal.com.br/o-relatorio-do-gt-br-319-de-dnit-a-mais-recente-manobra-para-obter-aprovacao-para-um-desastre-ambiental/

[43] Castro, E. R., Monteiro, R., Castro, C. P. 2004. Dinâmica de atores, uso da terra e desmatamento na rodovia Cuiabá-Santarém. *Paper do NAEA* 179. 61 p. http://dx.doi.org/10.18542/papersnaea.v13i1.11558

[44] Passos, M.M., 2017. BR-163, de Cuiabá a Santarém: o papel dos agentes e sujeitos no ordenamento do território e na implementação de políticas públicas. *Ci. & Tróp.* Recife, v. 41, n. 1, p. 139-164. https://periodicos.fundaj.gov.br/CIC/article/view/1609/1334

[45] Brito, R. e Castro, E. R. 2018. Desenvolvimento e conflitos na Amazônia: um olhar sobre a colonialidade dos processos em curso na BR-163. *Rev. NERA*. Presidente Prudente. ano 21, n. 42, pp. 51-73. https://ednacastro.com/wp-content/uploads/2023/03/19-DESENVOLVIMENTO-E-CONFLITOS-NA-AMAZONIA.pdf

[46] INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2023. PRODES. http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates

[47] Barni, P.E.; Fearnside, P.M.; Graça, P.M.L.A. 2018. Simulando desmatamento e perda de carbono na Amazônia: Impactos no Estado de Roraima devido à reconstrução da BR-319 (Manaus-Porto Velho). In: Oliveira, S.K.S. e Falcão, M.T. (Eds.). Roraima: Biodi-

versidade e Diversidades. *Editora da Universidade Estadual de Roraima* (UERR), Boa Vista, Roraima. p. 154-173. https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/35364

[48] Fearnside, P. M. 2018. BR-319 e a destruição da floresta amazônica. *Amazônia Real* 19 October 2018. https://amazoniareal.com.br/br-319-e-destruicao-da-floresta-amazonica/

[49] Santos, JL, AM Yanai, PMLA Graça, FWS Correia & PM Fearnside. 2023 Amazon deforestation: Simulated impact of Brazil's proposed BR-319 highway project. *Environmental Monitoring and Assessment* 195(10): art. 1217. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11820-7

[50] Laurance, W.F.; Cochrane, M. A.; Bergen, S.; Fearnside, P. M.; Delamônica, P.; Barber, C.; D'Angelo, S.; Fernandes, T. 2001. The future of the Brazilian Amazon. *Science*, v.291, p.438-439. http://dx.doi.org/10.1126/science.291.5503.438

[51] Laurance, W.F.; Clements, G.R.; Sloan, S.; O'Connell, C.S; Mueller, N.D.; Goosem, M.; Venter, O.; Edwards, D.P.; Phalan, B.; Balmford, A.; Van Der Ree, R. & Arrea, I.B. 2013. A global strategy for road building. *Nature* 513, 229–232 (2014). https://doi.org/10.1038/nature13717

[52] Barber, C.P.; Cochrane, M.A.; Souza, C.M.; Laurance, W.F. 2014. Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon, *Biological Conservation* 177, 203-209. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.07.004

[53] Ferrante, L. & Fearnside, P.M. (2019). Brazil's new president and "ruralists" threaten Amazonia's environment, traditional peoples and the global climate. *Environ. Conserv*. 46(4), 261–263. https://doi.org/10.1017/S0376892919000213

[54] Fearnside, P.M.; Ferrante, L.; Yanai, A.M.; Isaac-Júnior, M.A. 2020. Trans-Purus: Brazil's last intact Amazon forest at immediate risk (commentary). *Mongabay*. https://news.mongabay.com/2020/11/trans-purus-brazils-last-intact-amazon-forest-at-immediate-risk-commentary/

[55] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2017. Geociências. . https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html

[56] ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. 2019. Limites das Unidades de Conservação Federais (atualizado em julho de 2019): Unidades de Conservação Federais – SHP (SIRGAS2000). https://www.icmbio.gov.br/portal/geoprocessamento1/51-menu-servicos/4004-downloads-mapa-tematico-e-dados-geoestatisticos-das-uc-s

[57] INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. s.d. (No update data information). http://certificacao.incra.gov.br/csv_shp/export_shp.py

[58] FUNAI (Fundação Nacional do Índio). n.d. Download de dados geográficos: Terra Indígena (Regularizada, Homologada, Declarada, Delimitada e Área em Estudo). .http://www.funai.gov.br/index.php/shape

[59] Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. In: *Meteorologische Zeitscrift*. Vol. 22, No 6, 711-728. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

[60] Fisch, G., Marengo, J. A., Nobre, C. A. 1996. Clima da Amazônia. *Revista Climanálise*, 1996. https://www.ecodebate.com.br/2014/11/13/clima-da-amazonia-por-gilberto-fisch-jose-a-marengo-e-carlos-a-nobre/

[61] Leite-Filho, A.T.; Soares-Filho, B.S.; Davis, J.L.; Rodrigues, H.O. (2020). Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. Retrieved 20 October 2020, from https://www.csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=guidebook_start

[62] Chou, S. C., Bustamante, J. F., & Gomes, J. L. 2005. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. *Nonlinear Processes in Geophysic*s 12(4), 537–555. https://doi.org/10.5194/npg-12-537-2005

[63] Mesinger, F.; Janjic, Z.I.; Nickovic, S.; Gavrilov, D.; Deaven, D.G. 1988. The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. *Monthly Weather Review*, v.116, n.7, p.1493-1518. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<1493:TSMCMD>2.0.CO;2

[64] Janjic, Z.I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, v.122, n-5, p.927–945. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2

[65] Chou, S.C. 1996. Modelo regional Eta. Climanálise, Edição Comemorativa de 10 anos. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Cachoeira Paulista, São Paulo. http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/especial.html

[66] Harrigan, S., Zsoter, E., Alfieri, L., Prudhomme, C., Salamon, P., Wetterhall, F., Pappenberger, F. (2020). GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979-present. Hydrol. *Soil Sci. Hydrol*. https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020

[67] Funk, C.; Peterson, P.; Landsfeld, M. *et al*. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

[68] INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2024. Dados SAMeT . http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/SAMeT/Read-me.pdf

[69] Sánchez, L. E. 2013. Avaliação de Impacto Ambiental: Conceitos e Métodos. São Paulo: Oficina de Textos. https://repositorio.usp.br/directbitstream/b5f8d784-dfa9-40de-8857-add664ab3f88/Sanchez-2013-Avalia%C3%A7%C3%A3o_de_impacto_ambiental.pdf.

[70] Ambrizzi, T.; Rocha; R.P. da; Marengo, J.A.; Pisnitchenco, I.; Nunes, L.A.; Fernandez, J.P.R. 2007. Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais (Relatório 3). *Ministério do Meio Ambiente – MMA*. http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Relatorio_3.pdf.

[71] Pilotto, I.L. 2015. Representação dos Efeitos de Heterogeneidades da Superfície sobre o Clima Local em uma Região de Pai-

sagem Fragmentada na Amazônia Utilizando o Modelo Eta/Noah-MP. São José dos Campos: *INPE*. http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.29.21.37/doc/publicacao.pdf

[72] Umair M, Kim D, Choi M. Impact of climate, rising atmospheric carbon dioxide, and other environmental factors on water-use efficiency at multiple land cover types. *Scientific Reports*. 2020;10:11644. https://doi.org/10.1038/s41598-020-68472-7

[73] Pitman AJ. (2013). The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*. 2003;23:479–510. https://doi.org/10.1002/joc.893

[74] D'Almeida, C.; Vörosmarty, C.J.; Hurtt, G.C.; Marengo, J.A.; Dingman, S.L.; Keime B.D. 2007. The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *International Journal of Climatology* 27, 633–647. https://doi.org/10.1002/joc.1475

[75] Pielke, R.A. 2001. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. *Reviews of Geophysics* 39, 151-177. https://doi.org/10.1029/1999RG000072

[76] Mahmood R, Pielke RA, Hubbard KG, Niyogi D, Dirmeyer PA, *et al*. 2014. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *Int. J. Climatol*. 34: 929–953. https://doi.org/10.1002/joc.3736

[77] Parween, N.; Anamika, K.; Kumar, S. 2024. The Impact of Deforestation on Local Climates and Weather Patterns. *International Journal of Research Publication and Reviews*, Vol 5, no 5, pp 12170-12175. DOI: https://doi.org/10.55248/gengpi.5.0524.1431

[78] Dekker, S. C., O'Connor, J. C., Staal, A., Tuinenburg, O. A., Rebel, K. T., Santos, M. J. 2022. How forests transpiration and interception evaporation can buffer variations in precipitation downwind, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-2794, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-2794

[79] Barbarón, H.Y.S.; Deyci, E. T. Ildefonso; D. M. G. Jimenez. (2023). The relationship between forest cover loss and annual rainfall in the departments of Peru, 2013-2022. *Decision Science Letters*, 13(4):881-886. doi:10.5267/j.dsl.2024.8.004

[80] Pilotto, I. L.; Rodríguez, D. A.; Chou, S.H.; Tomasella, J.; Sampaio, G.; Gomes, J.L. 2017. Effects of the surface heterogeneities on the local climate of a fragmented landscape in Amazonia using a tile approach in the Eta/Noah-MP model. *Q. J. R. Meteorol. Soc*. 143: 1565–1580, April, DOI:10.1002/qj.3026

[81] Vale, R.S.; Santana, R.A.S.; Silva, J.T.; Miller, S.D.; Souza, R.A.F.; Picanço, G.A.S.; Gomes, A.C.S.; Tapajós, R.P.; Pedreiro, M.R. 2016. Medições por covariância de vórtices turbulentos dos fluxos de calor latente, sensível, momentum e CO_2 sobre o reservatório da Usina Hidrelétrica de Curuá-Una – PA. *Ciência e Natura* v.38 Ed. Especial- IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia Nº1, 2016, p. 15– 20. DOI:10.5902/2179460X20077

[82] Giambelluca TW, Ziegler AD, Nullet MA, Truong DM, Tran LT. 2003. Transpiration in a smalltropical forest patch. Agric. For. Meteorol. 117:1–22. DOI:10.1016/S0168-1923(03)00041-8

[83] Khanna, J.; Medvigy, D.; Fueglistaler, S.; Walko, R.L. 2017. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. *Nature Climate Change*, 7(3):200-204. doi:10.1038/NCLIMATE3226

[84] Sterling SM, Ducharne A, Polcher J. 2013. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. Nat. Clim. Chang. 3, 385–390. https://doi.org/10.1038/nclimate1690

[85] Duarte, L.G.; Romera, K.; Sabino, M.; Curado, L.F.A.; Palácios, R.S.; Nogueira, J.S. 2018. Dinâmica dos fluxos de calor latente, calor sensível e fluxo de calor no solo no Pantanal Mato-Grossense. Anais 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Jardim, MS, 20 a 24 de outubro 2018. *Embrapa Informática Agropecuária/INPE*, p. 431-440. https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/Anais-Geopantanal/pdfs/p65.pdf

SUPPLEMENTARY MATERIAL

APPENDIX A

A.1. Eta Regional Model

The Eta regional model was adapted to perform long-term integrations (Pesquero et al., 2010; Chou et al., 2014a, b). Due to the higher resolution of the Eta regional model, it is possible to simulate mesoscale phenomena in greater detail, such as frontal systems, orography, sea breeze, severe storms, squall lines, and organized mesoscale systems (Chou, 1996). The dynamics of the regional model are developed using a vertical coordinate (η) in the form of discrete steps (Mesinger, 1984).

$$\eta = \left(\frac{p - p_t}{p_{sfc} - p_t}\right) * \eta_{sfc} \tag{1}$$

Where:

$$\eta_{sfc} = \frac{p_{ref}(Z_{ref}) - p_t}{p_{ref}(0) - p_t} \tag{2}$$

Where, η_{sfc} is the conversion from the sigma vertical coordinate (which follows the terrain) to the Eta coordinate (in the form of discrete steps); P_t is the pressure at the top of the domain; P_{sfc} and Z_{sef} are the pressure and elevation at the lower boundary of the model, respectively. The reference pressure (P_{ref}) is a function of the height above mean sea level.

The physical parameterizations included in the model are:

a) turbulent processes in the atmosphere, represented by the Mellor–Yamada (1974) scheme, updated with the parameters of Nakanishi & Niino (2009), which calculates turbulent kinetic energy and vertical fluxes;

b) turbulent energy diffusion in the surface planetary boundary layer (PBL), determined using the Mellor–Yamada 2.0 scheme (Mellor & Yamada, 1974);

c) the shortwave radiation scheme is based on the model by Lacis & Hansen (1974);

d) the longwave radiation scheme follows the model of Fels & Schwarzkopf (1975);

e) precipitation in the model is produced by cumulus parameterization schemes proposed by Betts–Miller–Janjic (Janjic, 1994);

f) cloud microphysics follows the approach described by Zhao et al. (1997);

g) the surface layer over land is resolved using the Monin–Obukhov scheme with stability functions from Paulson (1970), while the surface layer over the ocean uses the Charnock (1955) scheme;

h) biosphere–atmosphere interaction processes are represented by the NOAH land surface scheme (Ek et al., 2003), which distinguishes 16 vegetation types, 15 soil classes, and eight soil layers with roots extending to a depth of up to 12 meters (Pilotto et al., 2023).

Table S1 – Parameterizations included in the Eta-CPTEC regional model.

Parameter	Reference
Turbulent diffusion in the PBL	Mellor & Yamada (1974)
Shortwave radiation	Lacis & Hansen (1974)
Longwave radiation	Fels & Schwarzkopf (1975)
Cumulus parameterization	Betts–Miller–Janjic (Janjic, 1994)
Cloud microphysics	Zhao et al. (1997)
Surface layer (over land)	Monin–Obukhov–Paulson (Paulson, 1970)
Surface layer (over ocean)	Charnock (1955)
NOAH land surface scheme	Ek et al. (2003)

The land use and land cover map is derived from the ESA-CCI-LC (European Space Agency – Climate Change Initiative Land Cover) for the year 2000. The soil map is from STATSGO/FAO (State Soil Geographic/Food and Agriculture Organization) (Miller & White, 1998), with a spatial resolution of 1 km.

The model will be configured with 38 vertical levels, with the model top defined at 25 hPa. Time integration uses the split-explicit technique. The terms adjusted by inertial gravity waves are integrated separately from the advective terms. A forward–backward scheme handles the terms responsible for this adjustment (Janjic, 1979), while a modified Euler–backward scheme is applied to the horizontal and vertical advection terms (Janjic, 1984). The prognostic variables are: air temperature, specific humidity, horizontal wind, surface pressure, turbulent kinetic energy, and cloud hydrometeors. These variables are distributed on an Arakawa E-grid (Arakawa & Lamb, 1977), in which the distance between adjacent mass or wind points is used to define the model's horizontal resolution.

APPENDIX B.

B.1. Bias

Bias indicates the systematic tendency of the simulations. In other words, if the bias is greater than zero, the forecasts are, on average, overestimated; whereas if it is less than zero, the forecasts are underestimated.

$$b=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\varphi_i-\psi_i\right) \tag{1}$$

B.2. Root Mean Square Error (RMSE)

The root mean square error (RMSE) method will also be used to assess the accuracy of the simulations, where high RMSE values indicate high levels of discrepancy between the simulations (ϕ) and the observed and reanalysis data (ψ). The RMSE formula is given by:

$$RMSE=\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\varphi_i-\psi_i\right)^2\right]^{1/2} \tag{2}$$

Table S2. Monthly average values observed and simulated by the Eta model for Temperature (SAMeT) and Precipitation (CHIRPS) for the year 2021, and monthly observed averages for the period 2012 to 2021.

	Temperature (°C)			Precipitation (mm dia^{-1})		
	SAMeT 2012 -2021	SAMeT 2021	Model 2021	CHIRPS 2012 - 2021	CHIRPS 2021	Model 2021
JAN	26,11	25,68	25,74	9,75	12,50	5,89
FEB	26,08	25,82	26,02	10,17	12,88	6,67
MAR	26,23	25,51	26,02	10,89	12,47	6,70
APR	26,23	26,14	25,91	10,06	11,52	6,12
MAY	26,3	26,25	25,84	7,28	6,12	5,09
JUN	26,18	25,77	25,89	3,56	5,05	3,18
JUL	26,2	26,14	25,96	2,68	2,67	2,51
AUG	27,04	27,35	26,56	2,67	2,74	2,71
SEP	27,26	27,01	26,65	4,24	5,18	3,50
OCT	27,01	27,23	26,58	5,32	5,95	4,37
NOV	26,79	26,39	26,29	8,06	8,52	4,85
DEC	26,28	26,23	25,98	9,29	12,53	5,67

Table S3 – Values found for bias and root mean square error for average temperature (°C) at 2 m above ground level (SAMeT) and precipitation (mm day^{-1}) (CHIRPS) in the simulation of the Eta regional model for the area influenced by highway BR-319.

	DJF	JJA	ANUAL - 2021	ANUAL 2012 - 2021
BIAS - SAMeT	0,003	-0,287	-0,173	-0,356
RMSE - SAMeT	0,189	0,379	0,351	0,144
BIAS - CHIRPS	-3,267	-0,171	-3,405	-2,225
RMSE - CHIRPS	0,150	0,171	3,561	1,596

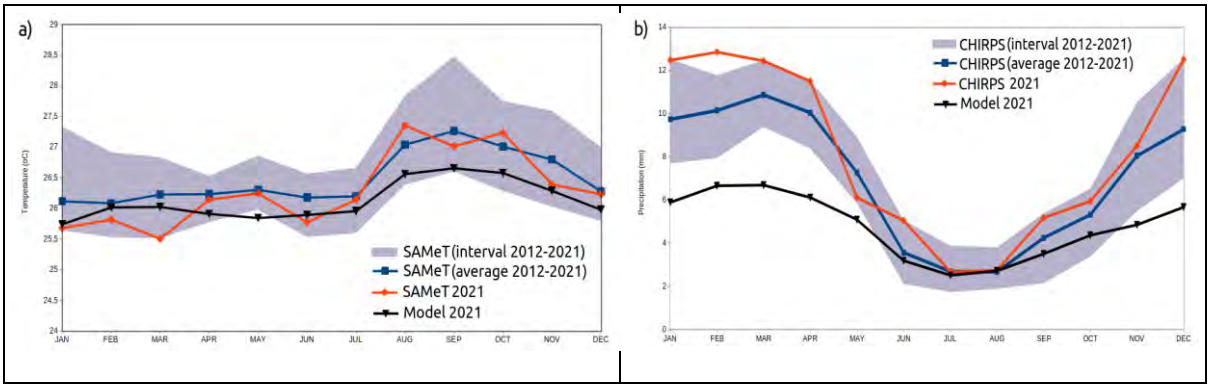

Figure S1. Seasonal cycle of (a) air temperature (°C) at 2 m above ground level and (b) precipitation (mm day^{-1}). The black lines correspond to the Eta model simulation (Model 2021); the lilac shaded area represents the standard deviation (2012–2021 observed climate range); the blue line is the mean (2012–2021 observed climate average); and the red line is the monthly observed mean for the year 2021.

.

REFERENCES

Arakawa, A., Lamb, V. R. 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. General circulation models of the atmosphere, 17(Supplement C), 173-265.

Charnock, H., 1955: Wind stress over a water surface. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.,81, 639–640.

Chou, S.C. 1996. Modelo regional Eta. Climanálise, Edição Comemorativa de 10 anos, Cachoeira Paulista, 1996.

Chou, S.C.; Lyra, A.A.; Mourão, C.; Dereczynski, C.; Pilotto, I.; Gomes, J.; *et al.* 2014a. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 3: 438-454.

Chou, S.C.; Lyra, A.; Mourão, C.; Dereczynski, C.; Pilotto, I.; Gomes, J.; Bustamante, J.; Tavares, P.; Silva, A.; Rodrigues, D.; Campos, D.; Chagas, D.; Sueiro, G.; Siqueira, G.; Marengo, J. 2014b. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 512-525.

Ek, M. B., Mitchell, K.E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Korev, V., Gayno, G., Tarpley, J.D. 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. Journal of Geophysical Research, v.108, n-D22, p.8851.

Fels, S. B., Schwarzkopf, M. D. 1975. The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations. Journal of the Atmospheric Sciences, 32(7), 1475-1488.

Janjic, Z. I. 1979. Forward-backward scheme modified to prevent two-grid-interval noise and its application in sigma coordinate models. Contrib. Atmos. Phys, 52, 69-84.

Janjić, Z. I. 1984. Nonlinear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids. Monthly Weather Review, 112(6), 1234-1245.

Janjic, Z.I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Monthly Weather Review, v.122, n-5, p.927–945.

Lacis, A. A., Hansen, J. 1974. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. Journal of the atmospheric sciences, 31(1), 118-133.

Mellor, G. L., & Yamada, T. 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. Journal of the atmospheric sciences, 31(7), 1791-1806.

Mesinger F (1984). A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models.

Rivista di Meteorologia Aeronautica, 44:195-202.

http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=8419610

Miller, D.A.; White, R.A. 1998. A conterminous United States multilayer soil characteristics dataset for regional climate and hydrology modeling. Earth Interact 2(2):1–26.

Nakanishi M, Niino H. 2009. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. J Meteorol Soc Jpn 87:895–912. https://doi.org/10.2151/jmsj.87.895

Paulson, C. A. 1970. The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. J. of Applied Meteorology, 9, 857-861.

Pesquero, J.F.; Chou, S.C.; Nobre, C.A. and Marengo, J.A. 2010. Climate Downscaling over South America for 1961-1970 Using the Eta Model. Theoretical and Applied Climatology, 99, 75-93.

Pilotto I.L.; Rodriguez D.A.; Chou S.C.; Garofolo L.; Gomes J.L. 2023. Impact of land-use and land-cover changes on local hydroclimate in southwestern Amazon. Climate Dynamics, 61(11-12):1-16. DOI:10.1007/s00382-023-06872-x.

Zhao, Q., Black, T. L., Baldwin, M. E. 1997. Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta Model at NCEP. Weather and forecasting, 12(3), 697-712.