

1. ESTADO DA ARTE DO CONHECIMENTO DA VARIABILIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL

Jose A. Marengo¹, Lincoln M. Alves², Sin C. Chou²

INTRODUÇÃO

De acordo com o observatório europeu Copernicus (<https://climate.copernicus.eu/>), o ano de 2024 foi o mais quente já registrado, sendo o primeiro a ultrapassar 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (1850-1900), chegando a 1,6°C. Esse limite de 1,5°C é considerado pelos cientistas como o teto necessário para impedir as piores consequências do aquecimento global, como o desaparecimento de países insulares. Esse limite é também o valor limite pactuado no Acordo de Paris, em 2015. A marca não significa, no entanto, que o planeta já rompeu definitivamente a barreira de 1,5°C e as metas do Acordo de Paris. Para considerar que o limite foi definitivamente violado, seriam necessários vários anos com os termômetros acima desse patamar. Cada um dos últimos 10 anos, de 2015 a 2024, está dentro dos 10 anos mais quentes já registrados. As altas temperaturas globais, juntamente com os níveis recordes globais de vapor de água na atmosfera em 2024, desencadearam a ocorrência de ondas de calor sem precedentes, secas, incêndios, e chuvas intensas, causando significativos impactos e miséria a milhões de pessoas.

1 Centro Nacional de Monitoramento de Alerta de Desastres Naturais. CEMADEN. São José dos Campos, SP

2 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE. São José dos Campos, SP.

Autor correspondente: jose.marengo@cemaden.gov.br

Na América Latina e no Caribe, 2024 foi o ano mais quente já registrado, com $+0,95^{\circ}\text{C}$ acima do normal registrado no período 1991-2020. No Brasil, segundo o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), 2024 foi o ano mais quente desde 1961, com $+0,79^{\circ}\text{C}$ acima do normal entre 1991 e 2020. Segundo a WMO (WMO 2025), o ano de 2024 foi o mais quente já registado em muitas partes da América do Sul. Entre as cidades que apresentaram os maiores registros de temperatura máxima em 2024, destacam-se os municípios de Goiás (GO), com $44,5^{\circ}\text{C}$, no dia 6 de outubro; Cuiabá (MT), com $44,1^{\circ}\text{C}$, também no dia 6 de outubro; Indaiaporã (SP), com $43,3^{\circ}\text{C}$, em 8 de outubro; Aragarças (GO), com $43,3^{\circ}\text{C}$, em 3 outubro; e Rio de Janeiro (Bairro Guaratiba), com $43,2^{\circ}\text{C}$, no dia 28 de novembro

A maior parte do Brasil está sob o efeito do regime de monção, coerente com as variações de chuva geralmente mais abundantes no período de primavera e verão e mais escassas no outono e inverno. De modo geral, a precipitação no noroeste do Brasil permanece intensa durante todo o ano. Já no Brasil Central, a variação sazonal de precipitação é influenciada pela migração sazonal do sistema de alta pressão do Atlântico Sul. Ao sul do Equador, o inverno é a estação seca na faixa tropical ($0\text{-}25^{\circ}\text{S}$), com exceção de regiões costeiras junto ao Atlântico, particularmente na costa do Nordeste. Na maior parte do Sul do Brasil, onde há disponibilidade de vapor de água durante todo o ano, condições dinâmicas na atmosfera favorecem máximos relativos de precipitação no outono, inverno e primavera em diferentes regiões. O Sul do Brasil é uma região de transição entre os regimes de monção de verão e de regime de inverno em latitudes médias, tendo sua precipitação bem distribuída ao longo do ano (Grimm e Tedeschi 2009).

O ciclo sazonal das chuvas no Brasil é afetado pelas variações interanuais, que podem interferir provocando, por exemplo, a ocorrência de seca durante a estação chuvosa, ou mesmo uma estação chuvosa abundante. Uma importante fonte de variabilidade interanual são os eventos El Niño e La Niña e o Oceano Atlântico tropical e sul. Na região Norte do país, verifica-se um clima equatorial chuvoso, praticamente sem estação seca. Na região Nordeste, a estação chuvosa restringe-se a poucos meses caracterizando um clima semiárido. As regiões Sudeste e Centro-Oeste sofrem influência tanto de sistemas tropicais como de latitudes médias, com estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa de verão com chuvas convectivas. A região Sul do Brasil, devido à sua localização latitudinal, sofre mais influência dos sistemas de latitudes médias, onde

os sistemas frontais são os principais causadores de chuvas durante o ano. Com relação às temperaturas, no Brasil, observam-se nas regiões Norte e Nordeste temperaturas elevadas, com pouca variabilidade durante o ano, típicas do clima tropical. Nas médias latitudes, a variação da temperatura no decorrer do ano é mais evidente, com a predominância de baixas temperaturas no período de inverno, quando ocorre maior penetração de massas de ar frio de altas latitudes (Brasil 2020).

Variabilidades nos padrões de circulação de grande escala e escala regional que determinam o Brasil podem afetar o clima regional, gerando situação de chuvas intensas, secas, ondas de calor ou frio. Estas mudanças na circulação podem deflagrar episódios de chuvas intensa e inundações, ou deficiência de chuvas que podem levar a secas, e que em algumas regiões podem aumentar o risco de incêndios florestais. Secas afetam todo o Brasil, tais como 2010-2023 no Sul do Brasil, 2012-2028 no Nordeste, 2019-2023 no centro oeste (Pantanal), 2005, 2010, 2015-16 e 2023-2024 na região Norte (Amazonia). Inundações y deslizamentos de terra são os desastres que mais matam pessoas e juntos com as secas estes desastres são induzidos por eventos extremos de chuva, que são consequência da variabilidade natural de clima e devido ao efeito humano associado ao aquecimento global.

O ano de 2024 foi o mais quente já registrado, sendo o primeiro a ultrapassar 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (1850-1900), chegando a 1,6°C. Esse limite de 1,5°C é considerado pelos cientistas como o teto necessário para impedir as piores consequências do aquecimento global, como o desaparecimento de países insulares. Esse limite é também o valor limite pactuado no Acordo de Paris, em 2015. A marca não significa, no entanto, que o planeta já rompeu definitivamente a barreira de 1,5°C e as metas do Acordo. Para considerar que o limite foi definitivamente violado, seriam necessários vários anos com os termômetros acima desse patamar. Cada um dos últimos 10 anos, de 2015 a 2024, está dentro dos 10 anos mais quentes já registrados. As altas temperaturas globais, juntamente com os níveis recordes globais de vapor de água na atmosfera em 2024, desencadearam a ocorrência de ondas de calor sem precedentes, secas, incêndios, e chuvas intensas, causando significativos impactos e miséria a milhões de pessoas.

Neste capítulo apresentamos uma revisão sobre o estado da arte sobre estudos de clima e variabilidade de clima, com ênfase em extremos do tempo e clima e desastres deflagrados por estos extremos no Brasil.

Também apresentamos uma evolução sobre modelagem de clima no Brasil e geração de cenários de mudanças de clima, apresentando também uma revisão sobre impactos setoriais de mudança de clima.

CLIMA A EXTREMOS CLIMÁTICOS NO BRASIL E OS SEUS IMPACTOS

O Brasil é um país continental. Alguns estudos se referem a um evento como “extremo” se ele não tiver precedentes; outros se referem a eventos que ocorrem várias vezes ao ano como eventos extremos moderados. A raridade de um evento com magnitude fixa também pode mudar sob mudanças climáticas induzidas pelo homem, tornando eventos sem precedentes até agora bastante prováveis sob as condições atuais, mas únicos no registro observacional - e, portanto, frequentemente considerados como “surpresas” (Seneviratne et al. 2021).

Extremos climáticos afetam diretamente os sistemas humanos e naturais no Brasil, na América do Sul e no mundo. Um extremo meteorológico, como uma chuva intensa, não é um desastre. Nesse caso, o desastre são os impactos causados pela chuva sobre uma população vulnerável e morando em áreas expostas a esse fenômeno extremo. Precipitações abundantes levam a inundações, enxurradas e deslizamentos de terra, e as secas aumentam o risco de incêndios florestais e também impactos na agricultura e hidrologia. A América do Sul tem experimentado nas últimas décadas enxurradas, inundações (como em Rio Grande do Sul em Maio 2024-Marengo et al 2024a, 2025a Reboita et al 2024), deslizamentos de terra como aconteceu em Petrópolis e Recife em 2022 e em São Sebastião em 2023-Marengo et al 2022, 2024b, Alcântara et al 2023), períodos de secas como a Seca do Nordeste de 2012-2018, no Sudeste do Brasil em 2013-15, na Amazônia e Pantanal em 2020 e em 2023, 2024-Marengo et al 2017, Alvalá et al 2017, Marengo et al 2021, 2024, 2022, et al 2024), ondas de calor (Marengo et al 2025b) e incêndios florestais que afetam os biomas Amazônia e Pantanal, Nordeste do Brasil (WMO 2024, 2025).

Entre 1948 e 2023, cerca de 11 milhões de pessoas foram afetadas por eventos hidro meteorológicos no país, destacando a necessidade de ações preventivas. Os desastres climáticos destacaram a importância dos sistemas de alerta precoce como uma forma eficaz de minimizar fatalidades, juntamente com uma melhoria na percepção de risco de desastre pela população e tomadores de decisão, para informar o que as pessoas

precisam fazer quando um alerta de risco de desastre é emitido. Embora o clima extremo possa ser bem previsto, cada país precisa implementar, testar e melhorar continuamente os sistemas de alerta precoce para garantir a segurança das pessoas e aumentar a resiliência da população.

Chuvas abundantes e extremas

Extremos de precipitação deflagram inundações, enchentes, enxurradas deslizamentos de terra. Eventos compostos extremos de seca-calor amplificam a seca e os seus impactos e aumentam o risco de incêndios florestais. É importante de distinguir que uma previsão de chuva abundante representa um alerta meteorológico, e que a previsão de alerta de risco de desastre representa o impacto de uma chuva intensa em áreas vulneráveis e expostas afetando diretamente a população morando nessas áreas. Os relatórios AR5 e AR6 do IPCC (IPCC 2013, 2021, 2022) mostram que a frequência e a intensidade de eventos de chuvas intensas provavelmente aumentaram em escala global na maioria das regiões terrestres com boa cobertura observacional. O volume e intensidade da precipitação aumentou em escala continental e no Sul do Brasil nos últimos 50-60 anos, (Figura 1) e a variabilidade natural de clima associada a El Niño, La Niña e o aquecimento do Atlântico tropical norte e sul), assim como a influência humana, em particular as emissões de gases de efeito estufa, é o principal impulsionador de este aumento (IPCC 2021, Dunn et al 2024).

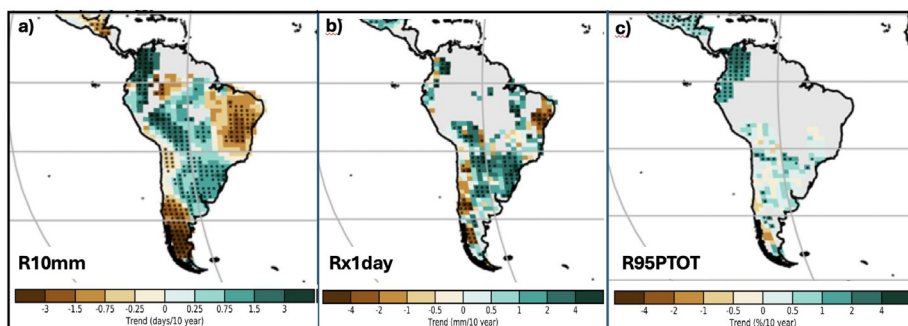


Figura 1: Tendências lineares em séries anuais de índices extremos de precipitação para a América do Sul: (a) R10mm (dias/década); (b) R95pTOT (%/década) e (c) Rx1day (mm/década) durante 1950–2018). As tendências foram calculadas apenas para caixas de grade com dados suficientes (pelo menos 66% dos anos com dados e o último ano da série sendo 2009 ou posterior). Tendências significativas são indicadas com pontilhado. Todos os painéis usam um período de referência de 1961 a 1990, com mapas apresentados em uma grade de longitude-latitude de 1,875° x 1,25°. Adaptado de Dunn et al. 2020.

Para o Brasil a avaliação de extremos e os seus impactos tem sido discutida na literatura publicada entre eles os relatórios do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC 2013, 2014, 2016), e os resultados da Quarta Comunicação Nacional do Brasil a UNFCCC (Brasil 2020), e no Plano Nacional de Adaptação (Brasil 2016) e o Relatório de Clima e Desastres do CEMADEN para 2024 (CEMADEN 2025). Os relatórios AR5 e AR6 do IPCC (IPCC 2013, 2021, 2022), no WMO State of Climate for Latin America and the Caribbean desde 2019 (WMO 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025) e o Relatório Especial do IPCC sobre Extremos SREX (IPCC, 2012) discutem sobre extremos no passado e projeções para mudanças em extremos de chuva intensa para o Brasil. Desde o IPCC AR5 (IPCC, 2013), houve novos desenvolvimentos importantes e avanços de conhecimento sobre mudanças em extremos climáticos e de tempo em relação à influência humana em eventos extremos individuais que levam a desastres hidro-geo-meteorológicos.

Na América do Sul, as tendências observadas indicam um aumento na intensidade e frequência de extremos de chuva na sua porção Sudeste do seu território. No Brasil, alguns desses eventos de chuvas intensas foram considerados “incomuns e sem precedentes” em 2023 e 2024. Em fevereiro de 2023, chuvas intensas e deslizamentos de terra mataram 65 pessoas em São Sebastião/São Paulo, e 683 mm foram acumulados em

15 horas, o maior volume de chuva observado na história brasileira em intervalos tão curtos. Em maio de 2024, chuvas intensas de mais de 200 mm/24 horas no vale do Rio Taquari desencadearam enchentes que afetaram a cidade de Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul, no que é considerado o pior desastre climático do Brasil, deixou 184 mortes e quase 7 bilhões de dólares em perdas econômicas (Marengo et al. 2024a, WMO 2025). Desastres como inundações, enchentes repentinas e deslizamentos de terra, por causa de episódios de chuvas extremas, desencadeiam desastres que matam centenas de pessoas todos os anos no Brasil e na América do Sul.

No Brasil, desastres climáticos aumentam 460% em desde 1991 a 2023. Nos 32 anos analisados pela Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica (2025), foram registrados 64.280 desastres climáticos em 5.117 municípios brasileiros (quase 92% do total). Metade dos desastres computados são secas; inundações, enxurradas e enchentes representam 27% e tempestades, 19%. Mais de 219 milhões de pessoas foram afetadas, incluindo mortos, desalojados, desabrigados e enfermos, sendo 78 milhões somente nos últimos quatro anos. Os prejuízos econômicos também aumentaram ao longo das décadas somaram R\$ 547,2 bilhões entre 1995 (primeiro ano desses dados) e 2023. O prejuízo anual médio desde 2020 é de R\$ 47 bilhões por ano, mais que o dobro da média anual da década anterior, de R\$ 22 bilhões anuais. A Tabela 1 mostra uma lista de extremos de precipitação associados aos sistemas acima que geraram extremos de precipitação e desencadearam desastres que causaram fatalidades na região.

Tabela 1: Exemplos de extremos de precipitação de 2022 a 2024 e desastres hidro-geo-meteorológicos subsequentes no Brasil. As informações incluem local, data, valores da precipitação extrema e evento hidrológico, se houver, e referência (Fonte: CEMADEN 2024)

DATA E LUGAR	CHUVAS EXTREMAS E IMPACTOS	REFERÊNCIA
Petrópolis/Rio de Janeiro, fevereiro 15 2022	258 mm/3 horas, fevereiro climatologia 200mm, deslizamentos de terra e enxurradas, 231 mortes	Alcantara <i>et al</i> (2023)
Recife/Per-nambuco, Maio 25-20 2022	551 mm/5 dias, climatologia: 411 mm, deslizamentos de terra e enxurradas, 130 mortes	Marengo <i>et al</i> (2023)
Gravatá, Maquiné/ Rio Grande do Sul, junho 16 2023	300 mm/24 horas, 11 mortes, 18 desaparecidos devido a inundações.	Floodlist (2023)
São Sebastião/São Paulo, Brasil Fevereiro 18-19 2023	683 mm/15 horas, climatologia: 120 mm, deslizamentos de terra deixaram 65 mortes	Marengo <i>et al</i> (2024b)
Vale do Taquari/Rio Grande do Sul, setembro 3-5 2023	100 mm/24 horas, aumento da cota do rio Taquari em 12 m, setembro 6-7, inundações deixaram 48 mortes	WMO (2024), Alvala <i>et al</i> (2024)
Rio de Janeiro/Rio de Janeiro, fevereiro 21-22 2024	42.8 mm/1 hora, deslizamentos de terra fora da capital, incluindo bairros Barra do Pirai, Japeri, Mendes e Nova Iguaçu, 8 mortes	Floodlist (2024a)
Mimoso do Sul/Es-pírito Santos, Brasil, março 22-23 2024	Acumulados de chuva variam entre 300 e 600 mm/48 horas, 20 mortes devido a inundações e enxurradas. Perdas da ordem de US 200 milhões na produção de café n	INMET (www.inmet.gov.br)
Vale do Taquari e Porto Alegre Metropolitan Region/ Rio Grande do Sul, maio 1-5 2024	A inundação em Porto Alegre foi deflagrada pelas chuvas intensas na bacia do Lago Guaíba, com acumulados que ultrapassaram os 500 mm/5 horas, gerando níveis do lago de 5,35 m em maio 5, maior que a inundação de 1941. 183 mortes	Marengo <i>et al</i> (2024 a, 2025b), Reboita <i>et al</i> (2024), Floodlist (2024b)

Segundo a Tabela 1, em 2023, a precipitação acumulada de 683 mm em 15 horas durante os eventos de deslizamento de terra e inundação repentina de São Sebastião, estado de São Paulo, entre 18 e 19 de fevereiro de 2023, matou 65 pessoas (Marengo et al., 2024). As chuvas de 22 e 23 de março tiveram impacto de grande magnitude no Sudeste, com 4 mortes em Petrópolis, 20 em Mimoso do Sul e 183 mortes no Rio Grande do Sul em maio 2024. Chuvas intensas afetaram o estado do Rio de Janeiro no sudeste do Brasil e o estado da Bahia no nordeste do Brasil, causando inundações com vítimas e danos. Inundações ao longo do rio Acre na região oeste da Amazônia causaram danos generalizados e deslocamento em comunidades ribeirinhas no Peru, Brasil e Bolívia em fevereiro de 2024, onde os níveis do rio Acre aumentaram em 6-7 m no espaço de alguns dias. Na Bolívia, em Cobija, os níveis do Rio Acre atingiram 15,83 m. Chuvas fortes afetaram os estados do Espírito Santo e do Rio de Janeiro, causando inundações e desencadeando deslizamentos de terra, causando a morte 27 pessoas (INMET).

Em uma semana de chuva o Rio Grande do Sul viu grande parte de suas cidades e a própria capital invadidas pela água. Imóveis destruídos, mortos, desaparecidos e dezenas de milhares de desabrigados. A tempestade fez com que os rios tributários do Lago Guaíba (rios Taquari, Caí, Pardo, Jacuí, Sinos e Gravataí) transbordassem, levando a níveis recordes de 5,35 m em 5 de maio, mais altos do que a enchente anterior em 1941, contribuindo para inundações em áreas vulneráveis da Região Metropolitana de Porto Alegre e municípios próximos. As chuvas começaram na madrugada do dia 26 de abril, com vários dias de chuva ininterrupta e acúmulo diário acima de 200 mm entre os dias 29 de abril e 3 de maio, retornando no dia 11 de maio (Marengo et al 2024a, 2025 a) (Figura 2). O ENSO foi considerado importante para explicar a variabilidade nas chuvas observadas, e a frente fria que trouxe chuvas permaneceu estacionária no sul do Brasil, uma vez que não pôde se mover para o centro do Brasil devido a um bloqueio atmosférico. Essa foi a catástrofe climática mais extensa e uma das mais devastadoras da história recente do Brasil. O custo estimado da limpeza é de 3,7 bilhões de dólares (Debone et al., 2024), e o impacto econômico desse desastre foi de cerca de 16 bilhões de dólares (1,8% do PIB do estado, em 2024).

A população que vive em áreas vulneráveis e expostas foi avisada e evacuada a tempo. No entanto, o número de fatalidades ainda foi alto. Há necessidade de implementar ações preventivas com a população mais

vulnerável e atividades de educação ambiental para a sociedade. É necessário aumentar a percepção do risco de desastres pela população e pelas autoridades públicas. É necessário melhorar os sistemas de previsão do tempo e alerta sobre o risco de desastres causados por extremos climáticos e, assim, salvar vidas e proteger populações em áreas de risco. O ponto principal deste caso é o aumento do risco de extremos e vulnerabilidade, bem como a gestão territorial insuficiente ou deficiente, o planejamento urbano e os problemas de governança remanescentes nos níveis federal, estadual e local. O Brasil é um exemplo dessa combinação complexa.

A Figura 2 mostra alguns impactos das chuvas extremas e inundações no estado de Rio Grande do Sul de Maio 2024.

a)



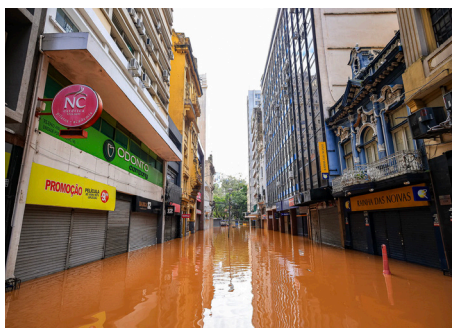
b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



Figura 2: Fotos gerais da enchente em Porto Alegre, 5/5/2024. Foto: Gustavo Mansur/Palácio Piratini. Fonte: <https://bit.ly/4mLYZJt>.

Deficiência hídrica e seca

As grandes secas são os desastres naturais mais custosos, superando outros desastres naturais, tais como, inundações, furacões, terremotos e tsunamis. A Figura 3 mostra a evolução temporal da seca no país, com as barras azuis indicando períodos mais úmidos, enquanto as barras vermelhas apontam condições de seca. No Brasil, a partir da década de 1990, as condições de seca se tornaram mais frequentes e severas, culminando em um período mais crítico nos últimos anos. A seca mais intensa aparece em 2024.

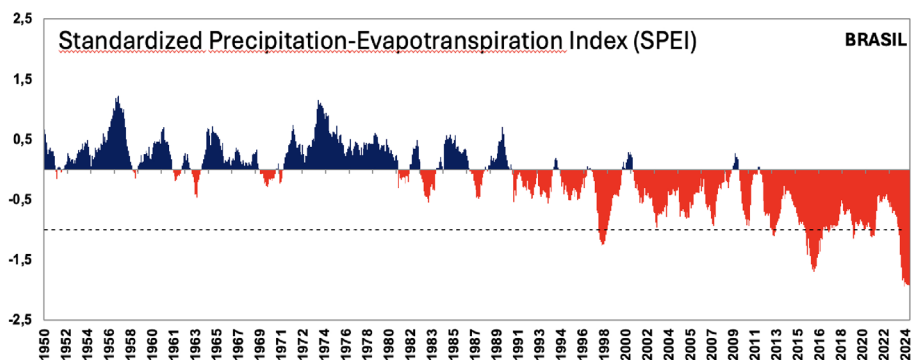


Figura 3: Evolução temporal de secas no Brasil, indicado pelo SPEI (Standard Precipitation Evapotranspiration Index). Fonte: CEMADEN.

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) vivenciou uma das maiores secas da sua história. A combinação de baixos índices pluviométricos durante o verão 2014 e 2015 e um grande crescimento da demanda de água, assim como a ausência de um planejamento minimamente adequado para o gerenciamento dos recursos hídricos (e sem contar a parcela de culpa que pode ser atribuída à ausência de consciência coletiva dos consumidores brasileiros para o uso racional da água), tem gerado o que chamamos de “crise hídrica”, uma crise já anunciada, pois enfrentamos situação semelhante durante a “crise do apagão” durante a seca de 2001-2002. Os baixos totais acumulados de chuva sobre a região da Cantareira, ao nordeste da RMSP afetaram significativamente a disponibilidade hídrica dos reservatórios do Sistema Cantareira, localizado na divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais. O Cantareira é o principal sistema de abastecimento de São Paulo, fornecendo água a 6 milhões de habitantes na região metropolitana. O sistema também é responsável pelo abastecimento de uma população de 5 milhões de pessoas nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Como consequência grave, a população vem sofrendo com o abastecimento de água em grande parte da RMSP e em diversas cidades do estado de São Paulo, sendo o racionamento de água parte da realidade atual do paulistano (Marengo e Alves 2014).

Segundo o CEMADEN, o Brasil enfrentou em 2024 a maior seca dos últimos 70 anos, em extensão e intensidade. Em setembro, 4.748 cidades do Brasil – mais de 80% do total de municípios do país – enfrentavam algum grau de seca, sendo que 1.349 encontravam-se em níveis severos e extremos.

Na Bacia Amazônica a seca severa está relacionada, em parte, com o impacto do El Niño, um padrão climático que esteve presente no segundo semestre de 2023 e no primeiro semestre de 2024 (Espinoza et al 2024, Marengo et al., 2024b; Toreti et al., 2024). No estado brasileiro do Amazonas, até o final de setembro de 2024, das 745 mil pessoas afetadas pela seca, cerca de 330 mil, incluindo aproximadamente 115 mil crianças e adolescentes, que vivem em 2.200 aldeias indígenas e comunidades ribeirinhas, ficaram isoladas ou em risco de isolamento, com graves impactos na saúde, nutrição, acesso à água, proteção e educação. O nível do rio Negro em Manaus registrou 12,11 m em 10 de outubro (Figura 4), sendo esse o nível mais baixo já observado desde o início das medições, em 1902. A figura 5 mostra alguns impactos da seca na região Amazônica.

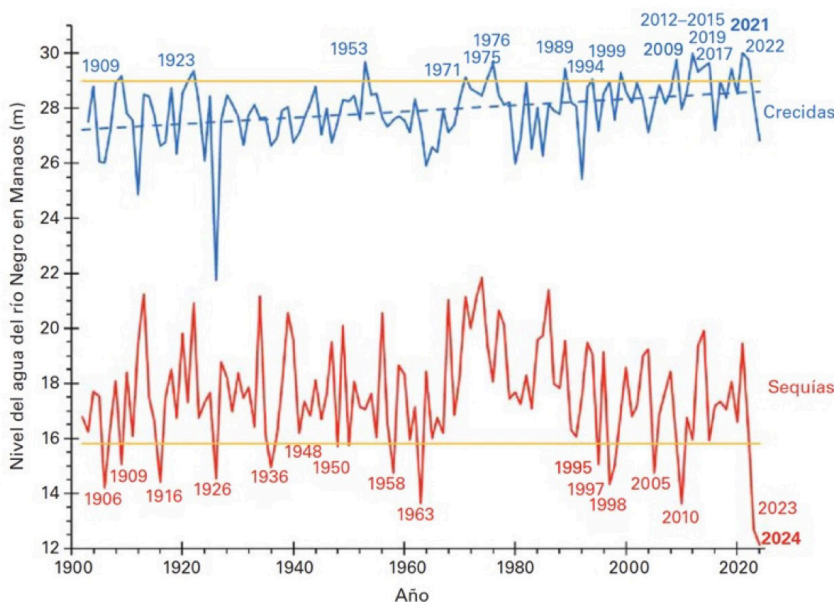


Figura 4: Níveis máximos (linhas azuis) e mínimos (linhas vermelhas) do rio Negro no Porto de Manaus, 1902 a novembro de 2024. Os números azuis e vermelhos indicam anos de enchentes e secas recordes, respectivamente. As linhas laranças representam os limiares mais alto (29,0 m) e mais baixo (15,8 m) para definir cheias e secas, respectivamente. Os valores estão em metros. Fonte: J. Schongart, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Brasil. (Marengo et al 2024).



Figura 5: a) Ribeirinhos carregam galões de água enquanto atravessam bancos de areia do rio Madeira, comunidade de Paraizinho, Humaitá/Amazonas. Foto: Bruno Kelly/Reuters; b) Além dos graves prejuízos ambientais, a seca também traz perdas significativas para a população e economia local. Foto: Jacqueline Lisboa/WWF-Brasil; c) Imagem da seca em Tabatinga, na região do Alto Solimões/AM. Foto: Defesa Civil; d) Bacia do rio Amazonas enfrenta cenário de grande seca em 2024. Foto: Divulgação/SGB.

O rio Paraguai, em Assunção (Paraguai) atingiu cotas mínimas recordes em setembro, com os níveis de água esgotados pela grave seca rio acima no Brasil, o que dificultou a navegação ao longo da hidrovia Paraná-Paraguai. Em situação crítica, o rio Paraguai atingiu, no dia 8 outubro, o menor nível histórico, com 62 cm, de acordo com o IMASUL. A situação recorde superou o ano de 1964, sendo o pior índice desde o início do monitoramento, em 1900. Em 2024, o rio Paraná, usado como via de transporte fluvial para escoar aproximadamente 80% dos grãos e oleaginosas da Argentina para exportação, esteve no segundo nível mais baixo para esse período do ano desde 1970, atrás apenas de um grande declínio observado em 2021, devido à grande seca a montante no Brasil. Como resultado, grandes navios de grãos que carregam soja e milho nos princi-

país portos fluviais da Argentina, ao redor de Rosário, transportaram menos carga devido à redução do calado. Ainda em 2024, foram registrados os menores níveis do rio Paraguai, desde 1981. Figura 6 mostra impactos da seca no Pantanal de 2024.

a)



b)



c)



d)



Figura 6: a) Margem do rio Paraguai, principal rio do Pantanal, que mostra seca histórica e apresentou nível baixo no MS. Foto: Marcia Foletto; b) Trecho seco do rio Miranda, no distrito de Águas de Miranda, em Bonito/MS, 30/3/2024. Foto: Gustavo Figueroa/SOS Pantanal; c) Brigadistas do Prevfogo combatem incêndio dentro de uma fazenda na região de Miranda/MS. Foto: Lalo de Almeida, 8/3/24 / Folhapress; d) Corpo de Bombeiros em ação no combate a incêndios na região de Abobral, em 2024. Foto: Divulgação/CBMMS.

MODELAGEM CLIMÁTICA

O clima da Terra está sempre mudando ao longo do tempo, desde horas até séculos. A modelagem numérica essencial para aprimorar o conhecimento a respeito dos componentes do sistema climático (atmosfera, superfície terrestre, oceano, gelo marinho etc.), bem como para elencar os possíveis impactos da mudança do clima em diversos setores importantes de um país (como, por exemplo, os de recursos hídricos, energético, agricultura etc.). O resultado dessa modelagem é um dos principais componentes nos estudos de vulnerabilidade climática e de elaboração de medidas e estratégias de adaptação às mudanças climáticas atuais e por vir, servindo como base para análises de risco e vulnerabilidade, e para, assim, propor políticas de estado para adaptação e mitigação. Os modelos climáticos são ferramentas essenciais para investigar a resposta do sistema climático a várias forçantes, como as concentrações de gelo marinho, mudança de uso do solo, temperatura da superfície do mar, entre outras. Nesse sentido, eles permitem que se façam projeções não apenas de como a temperatura global média pode aumentar no século XXI, mas também de como essas mudanças podem afetar o clima no mundo todo (Flato et al., 2013).

Para uma melhor compreensão de como as mudanças climáticas ocorrem em nível regional, é fundamental o acesso a informações mais detalhadas a respeito da região de estudo, como topografia, bacias hidrográficas e linhas costeiras. Com isso, torna-se importante o aumento da resolução espacial dos modelos climáticos globais (MCGs), que, em geral, têm baixa resolução espacial (da ordem de uma a duas centenas de quilômetros) devido ao alto custo computacional necessário para realizar simulações em escala global, e/ou utilizar técnicas de regionalização (conhecidas como *downscaling*) para traduzir as informações fornecidas pelos MCGs em uma escala espacial mais refinada (Ambrizzi et al., 2019; Chou et al., 2014; Flato et al., 2013; Marengo et al., 2012).

Uma previsão de tempo, que é para um prazo de alguns dias (até cerca de 10 dias), fornece-se informações como temperatura e chuva para uma determinada data e até horário do dia. Por outro lado, em uma previsão climática, que é para um prazo de meses a frente, não há mais aquele nível de precisão, fornece-se informações sobre anomalias de temperatura e de chuva para alguns meses a frente. Na previsão climática não se informa data, nem horário, mas se pode informar o regime cli-

mático, as estatísticas como médias, anomalias, extremos do período de meses a frente. A previsão climática é possível pela presença de forçantes (ou condicionantes) que podem conduzir o sistema climático a um estado específico. Anomalias da temperatura da superfície do mar nas regiões equatoriais são típicas forçantes climáticas que levam a anomalias em determinadas regiões do planeta (Shukla, 1983). As condições de umidade do solo, erupções vulcânicas de grande porte, anomalias na estratosfera são exemplos de forçantes na escala climática.

Modelos para previsão de tempo são mais simplificados que Modelos climáticos. Para iniciar uma previsão climática é necessário um modelo global, pois fenômenos meteorológicos podem dar a volta no planeta no prazo de meses. Este modelo global deve possuir oceano acoplado para prever as mudanças na circulação oceânica e, principalmente, mudanças nas anomalias de temperatura da superfície do mar. Para modelar o clima de décadas a frente, é necessário supor, por exemplo, mudanças nas concentrações dos gases de efeito estufa e mudanças no uso da terra, e o modelo passa a incluir processos de vegetação dinâmica, o ciclo de carbono e processos biogeoquímicos e passa da categoria de modelo acoplado para a categoria de modelo do sistema terrestre (Earth System Model).

Os modelos climáticos são ferramentas essenciais para investigar a resposta do sistema climático a várias mudanças, como mudanças nas concentrações dos gases de efeito estufa, mudanças nas concentrações de cobertura gelo, mudanças no uso da terra, ou mudanças nas circulações oceânicas (Flato et al., 2013). Nesse sentido, eles permitem que se façam projeções não apenas de como a temperatura do ar global média pode aumentar no século XXI, mas principalmente de como se modificará o padrão climático das diversas variáveis como chuva, umidade, ventos, radiação solar e terrestre, evaporação em diversas regiões da terra.

Uma outra categoria de modelo são os modelos regionais. Esses modelos têm o papel de fornecer um “zoom” sobre uma região específica do modelo global. Os modelos regionais, por operar em uma área menor, utilizam grades de tamanhos menores (cerca de dezenas de quilômetros) que as dos modelos globais (centenas de quilômetros), representando um custo computacional menor do que aumentar a resolução do modelo global. Essa é conhecida como técnica de redução de escala dinâmica, ou regionalização (“dynamical downscaling”). A menor grade do modelo regional permite detalhar melhor a topografia, capturando melhor os va-

les e os picos das montanhas, a linha costeira, a cobertura vegetal ou uso da terra etc. A menor grade do modelo regional permite capturar melhor gradientes horizontais intensos e, portanto, capturar melhor os eventos extremos. Esse detalhamento tornam os resultados do modelo regionais mais adequados para estudo de impacto a nível local das mudanças climáticas globais

Evolução da modelagem climática no Brasil

No Brasil, a modelagem numérica de clima teve início com as atividades operacionais do CPTEC/INPE, em 1995. Inicialmente, os modelos eram utilizados apenas para a realização de previsões numéricas de tempo (dias) e de clima sazonal (estações do ano) (Cavalcanti et al., 2002; Marengo et al., 2003, 2012). Porém, com o advento tecnológico e potentes supercomputadores, foi possível realizar projeções climáticas para a América do Sul. As primeiras projeções de mudanças climáticas sobre a América do Sul foram realizadas a partir de modelos climáticos regionais (Ambrizzi et al., 2007; Marengo; Ambrizzi, 2006; Marengo et al., 2009). Esses primeiros estudos foram baseados nos resultados dos modelos regionais RegCM3 (Giorgi; Mearns, 1999; PAL et al., 2007), HadRMP3 (Jones et al., 2004) e Eta-CCS para o período de 2070-2100, com uma alta resolução horizontal (50 km) e forçados pelo modelo global atmosférico HadAM3P, do Met Office Hadley Centre (UKMO) do Reino Unido, a partir dos cenários de emissões de GEE (A2 e B2).

Nas últimas décadas, tanto os MCGs quanto os modelos climáticos regionais (MCRs) têm tido grandes avanços na representação dos componentes do sistema climático, principalmente devido à melhor representação dos processos físicos e fenômenos a eles associados e as suas interações (Marengo et al., 2012). Os MCGs são executados usando resolução horizontal da ordem de uma a duas centenas de quilômetros. A melhoria na resolução e nas parametrizações físicas dos modelos tem permitido uma representação mais detalhada das características da paisagem, como cordilheiras, lagos, tipos de vegetação e características do solo, levando a uma melhor caracterização do ciclo hidrológico e dos eventos extremos associados, bem como a uma representação mais realista do clima regional/local em comparação aos modelos com resoluções mais baixas (100 km – 200 km) (Ambrizzi et al., 2019; Chou et al., 2014; Flato et al., 2013; Naumann et al., 2018).

Para obter maior detalhamento das previsões de tempo e clima sazonal, considerando a heterogeneidade da cobertura vegetal, a presença de cadeia topográficas complexas na América do Sul, foi instalado o modelo regional Eta (Mesinger et al. 1988) proveniente da versão operacional do NCEP (Black, 1994). O modelo entrou em operação no CPTEC/INPE em 1996 (Chou, 1996) gerando previsões inicialmente na resolução de 40 km e horizonte de 60 horas. Hoje este modelo, com modificações nos processos dinâmicos e físicos (Mesinger et al. 2012), produz previsões de tempo para até 11 dias, na resolução de 8 km sobre toda América do Sul, e até 3 dias na resolução de 1 km cobrindo região entre Rio de Janeiro e São Paulo. Outros dois modelos regionais entraram em operação no CPTEC/INPE, o modelo BRAMS e o WRF, o primeiro com foco na previsão da qualidade do ar, e o segundo por ser usado em várias instituições e universidades visto que possui uma interface amigável para uso. Outros centros também adquiriam modelos regionais como o MBAR e o COSMO no INMET e o COSMO na Marinha. Entretanto, modelo global operacional somente foi executado no INPE.

A extensão do prazo da previsão do modelo regional Eta para meses a frente teve início com os trabalhos de Chou et al., 2000 e Chou et al, 2002. A versão climática sazonal do Modelo Eta tornou-se operacional em 2001 (Chou et al. 2002), na resolução de 40 km, horizonte de 4 meses a frente, utilizando as previsões do MCGA CPTEC/INPE para alimentar o modelo regional nas bordas laterais. Pilotto et al. (2012), mostrou que o uso de CGCM do CPTEC/INPE como condições de contorno proporcionariam melhores previsões do que o uso de MCGA do CPTEC/INPE.

Porém, com a demanda governamental em dispor de projeções de mais alta resolução espacial para América do Sul, as primeiras projeções de mudanças climáticas sobre a América do Sul foram realizadas a partir de modelos climáticos regionais (Ambrizzi et al., 2007; Marengo; Ambrizzi, 2006; Marengo et al., 2009). Esses primeiros estudos foram baseados nos resultados dos modelos regionais RegCM3 (Giorgi; Mearns, 1999; PAL et al., 2007), HadRMP3 (JONES et al., 2004) e Eta-CCS para o período de 2070-2100, na resolução horizontal de 50 km e forçados pelo modelo global atmosférico HadAM3P, do Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido. Estes modelos regionais geraram projeções de mudanças climáticas a partir dos cenários de emissões de Gas Efeito Estufa (GEE), A2 e B2, utilizados pelo CMIP3 e apoiaram o AR4 do IPCC.

Modelagem para projeções de clima futuro

Na temática das mudanças climáticas na política internacional, está em debate desde meados da década de 1990 a discussão sobre o estabelecimento de metas para limitar o aquecimento global em um limiar de temperatura predefinido em relação aos níveis pré-industriais (WBGU, 1995). Em 2015, o Acordo de Paris resultou num acordo formalização de uma série de acordos, como o de limitar a um máximo de 1.5 °C e assim fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima e de reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças tais como inundações caso as mudanças de temperatura sejam maiores a 2°C, quando comparado ao aquecimento global de 1,5°C.

A exemplo dos referidos estudos, no Brasil as projeções climáticas produzidas pelo modelo regional Eta-Cptec (Chou et al., 2014a; Chou et al., 2014b), alinhado aos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 (CMIP5), foram adequadas aos GWLs 1,5°C, 2°C e 4°C a fim de subsidiar os estudos de medidas de vulnerabilidade climática e adaptação relacionados às seguranças hídrica, energética, alimentar e socioambiental do País no âmbito da Quarta Comunicação Nacional do Brasil (4CN) à UNFCCC (Brasil 2020).

Para estudos das mudanças climáticas, em maioria, os modelos globais iniciam a execução no período pré-industrial, cerca de 1850, e terminam a execução no final do século XXI, 2099. Para cobrir este horizonte longo, é necessário o uso de supercomputadores e utilizar caixas de grades em torno de poucas centenas de quilômetros. Diferente do horizonte climático sazonal, para estudos de mudanças climáticas, o modelo climático é executado para os horizontes de décadas e séculos a frente, seguindo os cenários de mudanças nas concentrações dos gases de efeito estufa, e simulando as mudanças das anomalias de temperatura da superfície do mar. Portanto, modelos para estudos de mudanças climáticas possuem complexidade adicional, são necessários refinar processos físicos como aqueles de um modelo de gelo marinho, um modelo de crescimento e morte de florestas, modelos de ciclos de carbono, nitrogênio e enxofre pelo menos etc. Os processos físicos como formação de nuvens e chuva, transferência radiativa, interações oceano-atmosfera, turbulência atmosférica etc. são processos comuns em modelos para previsão de tempo ou para simular mudanças climáticas.

O esforço da modelagem das mudanças climáticas devido às mudanças nas concentrações dos GEE iniciou no Brasil com os cenários de

emissão da família do SRES: A2, A1, A1B, B2 que foram utilizados produzidos pelo CMIP3 e utilizados no AR4. Isso foi parte do projeto PRIOBIO do GEF/MMA que gerou os primeiros cenários de mudanças climáticas do Brasil em 2007. Foi utilizado as saídas do modelo HadAM3 organizados no projeto CREAS (Marengo et al 2009). Os cenários do SRES, se baseiam em histórias construídas na linha do tempo, em que há diferentes desenvolvimentos socioeconômicos, em mundos mais globalizados ou regionalizados. O A2 é o cenário mais pessimista em termos de emissão, tratado como “business-as-usual” (BAU). Em seguida, foram construídos os cenários RCP (Representative Concentration Pathways) e utilizados pelos modelos do CMIP5 que geraram resultados para o AR5. Os cenários RCP é inverso, são fornecidos níveis de forçante radiativo no final do século, isto é, são fornecidos níveis de mudança no balanço radiativo devido à inserção de mais GEE na atmosfera. Modelos do tipo socioeconômicos (Integrated Assessment Model) constroem a trajetória do aumento dos gases de forma a atingir um nível de emissão dos GEE que corresponda a forçante radiativa prescrita para o final do século 21. As forçantes radiativas adotadas foram: 2.6, 4.5, 6.0, e 8.5 Wm⁻², que geraram cenários denominados RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 (Nakicenovic et al., 2000).

Os cenários utilizados pelos modelos do CMIP6 combinaram o conceito das forçantes radiativas com a construção da narrativa de mundos em que a mitigação é mais, ou menos, desafiadora, e de mundos em que a adaptação é mais, ou menos, desafiadora. São 5 cenários denominados SSP (Shared Socio-economic Pathways) (O’Neil et al., 2014). Destes cenários, o SSP1 é o cenário em que o mundo cresce com igualdade e com foco na sustentabilidade e utiliza como forçantes radiativas e 1.9 e 2.6Wm⁻². O SSP2 é o cenário moderado para os desafios de adaptação e de mitigação e vem acompanhado da forçante 4.5 Wm⁻². O SSP3 representa um mundo fragmentado com rivalidades regionais. O SSP4 representa mundo ainda com mais desigualdes. O SSP5 é o cenário do mundo do combustível fóssil e de crescimento econômico a todo custo e, portanto, de forçante radiativa 8.5Wm⁻². Esses cenários se denominam, portanto, SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-6.0, SSP4-7.0 e SSP5-8.5 (O’Neil et al., 2014).

As mudanças climáticas configuram um fenômeno global de origem predominantemente antrópica, cujos efeitos já são observados em diferentes sistemas físicos e socioeconômicos. A compreensão dessa dinâmica tem sido consolidada por meio dos Relatórios de Avaliação do

Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima do IPCC, que sintetizam o estado da arte da ciência climática e orientam a formulação de políticas públicas em escala global, regional e nacional. A seguir abordaremos os avanços científicos dos seus relatórios de avaliação com ênfase nos resultados relevantes para o Brasil.

O Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do (IPCC 2013) representou uma consolidação da evidência observacional do aquecimento global, afirmando com confiança extremamente alta que “o aquecimento do sistema climático é inequívoco” e atribuindo com alta confiança mais da metade do aumento da temperatura global média à influência humana, especialmente pela emissão de gases de efeito estufa (GHGs). O AR5 também avançou na quantificação do forçamento radiativo dos diferentes agentes climáticos, com especial atenção ao CO₂, CH₄ e aos aerossóis.

Com relação à projeção climática, o AR5 utilizou os Cenários Representativos de Concentração (RCPs), que indicavam aumentos médios de temperatura de até 4,8 °C até 2100 no pior cenário (RCP8.5). Os modelos climáticos globais (GCMs) do CMIP5, ainda que robustos para escalas continentais, apresentavam limitações para capturar características regionais, especialmente em regiões tropicais como a América do Sul.

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) ampliou e refinou significativamente essa base. No volume do Grupo de Trabalho I (WGI-IPCC 2021) a estimativa do aumento da temperatura global desde o período pré-industrial foi atualizada para 1,2 °C, e a atribuição do aquecimento às atividades humanas passou a ser considerada como inequívoca. Um grau de certeza ainda maior do que no AR5. O AR6 incorporou os novos Cenários de Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs), que oferecem uma estrutura integrada entre evolução socioeconômica, emissões e políticas climáticas.

A utilização do conjunto de modelos CMIP6, com melhor representação de processos atmosféricos, oceânicos e terrestres, permitiu avanços na regionalização das projeções e no entendimento de eventos extremos. Além disso, o AR6 introduziu uma abordagem mais sofisticada de avaliação, com três linhas complementares de evidência: simulações de modelos, dados observacionais e compreensão física dos processos.

Um dos avanços mais relevantes do AR6 foi a consolidação de diagnósticos regionais mais detalhados, sistematizados no Atlas Interativo (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>) e nos capítulos regionais. Para o Brasil, o relatório apontou com alta confiança o aumento da frequência e intensi-

dade de extremos de temperatura, a tendência de redução de precipitação no Nordeste e centro-sul do Brasil e o aumento do risco de seca agrícola e ecológica, particularmente na transição entre a Amazônia e o Cerrado.

Impactos da mudança climática no Brasil

O Brasil tem demonstrado que é especialmente vulnerável às mudanças climáticas por suas características físicas (extensa área tropical, alta variabilidade climática natural), ecológicas (grande biodiversidade e biomas como a Amazônia, o Cerrado e o Semiárido) e sociais (grandes desigualdades regionais e populacionais). Com base nos cenários SSPs do AR6, estima-se que, até 2100 (Figura 7):

- A temperatura média anual pode aumentar entre 2,5 e 4,5 °C na maior parte do território nacional sob o cenário SSP5-8.5.
- Áreas como o Semiárido nordestino e o sul da Amazônia podem sofrer secas prolongadas e severas, com impactos na produção agrícola, recursos hídricos e saúde pública.
- Eventos extremos compostos, como ondas de calor simultâneas à seca, tendem a se intensificar, exigindo estratégias integradas de adaptação.
- Além disso, observações recentes apontam para o enfraquecimento do regime de monções na América do Sul, atrasos no início da estação chuvosa no Cerrado e intensificação de extremos secos na bacia do rio Paraná.

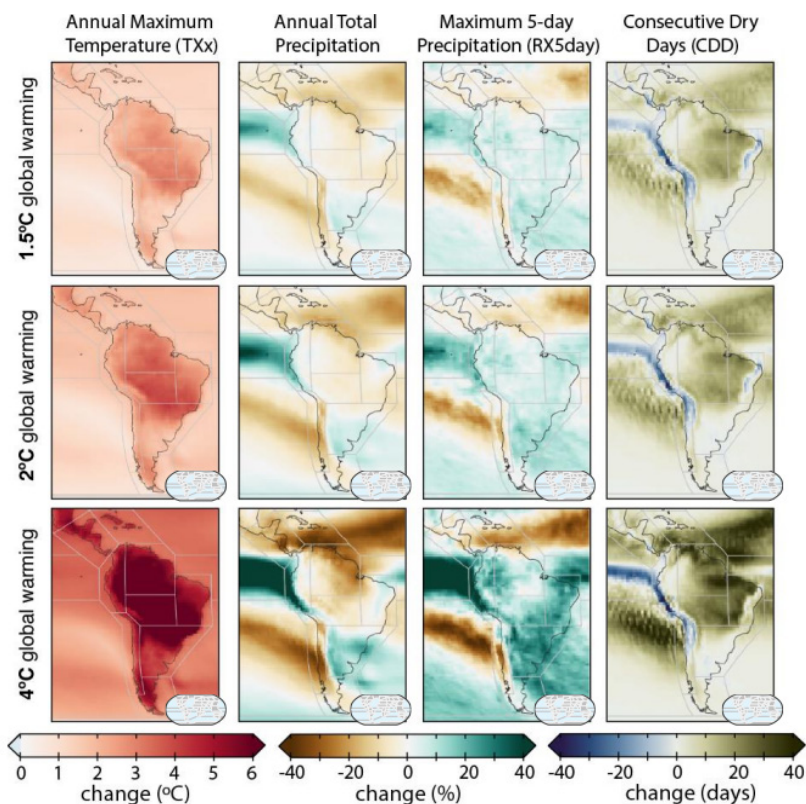


Figura 7: Mudanças projetadas na temperatura máxima anual (TXx), precipitação total anual, precipitação máxima em 5 dias (RX5day) e número anual de dias secos consecutivos (CDD) sob aquecimentos globais de 1,5 °C, 2 °C e 4 °C (nas linhas), em relação ao período de 1850–1900. Os resultados são baseados em simulações do conjunto multi-modelo CMIP6 (32 modelos climáticos globais), utilizando o cenário SSP5-8.5 para calcular os níveis de aquecimento. Fonte: Atlas Interativo do IPCC. Disponível em <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>.

PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DERIVADAS DE MODELOS REGIONAIS PARA O BRASIL

Os impactos das mudanças climáticas sobre os diversos setores socioeconômicos são geralmente de escala local que geralmente requer informações climáticas mais detalhadas. A redução de escala ('downscaling' ou regionalização) das projeções dos modelos globais para escala local, isto é, passar das grades dos modelos globais de cerca de 100 a

200km para o tamanho de 20km, 5km ou 1km é realizada a partir de um modelo dinâmico regional, ou a partir de modelos estatísticos ou modelos de aprendizado de máquinas. A combinação de *downscaling* dinâmico adicionado a correção de viés, podem gerar os melhores resultados (Tavares et al., 2022).

As projeções de mudanças climáticas a partir do modelo regional Eta foram geradas nas resoluções de 20 km, utilizando as saídas dos modelos globais BESM, CanESM2, HadGEM2-ES e MIROC5 (Chou et al. 2014b) e nas resoluções de 5km , utilizando as saídas dos modelos HadGEM2-ES (Lyra et al. 2017) e BESM (Sondermann et al., 2023), para o Sudeste e 5km Eta-HadGEM2-ES para o Sul do Brasil (Ferreira et al., 2023; Tavares e Chou, 2022). Para considerar a incerteza das emissões dos gases de efeito estufa, dois níveis de concentração foram utilizados em Chou et al. (2014b): RCP4.5 emissões moderada, e RCP8.5, emissão intensa. Dessa forma, conjunto resulta por 8 possibilidades de projeções futuras do clima.

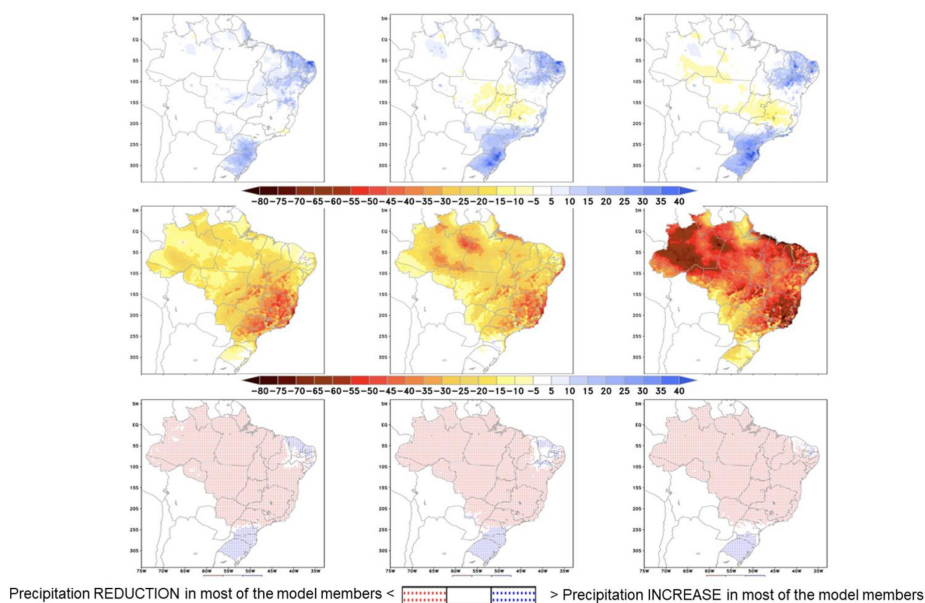


Figura 8: Projeções de mudanças de precipitação em 3 períodos futuros: 2011-2040 (esquerda), 2041-2070 (centro), e 2071-2100 (direita). Limites superior (1a fileira) e inferior (2a fileira) das mudanças. Sinal da mudança da maioria dos membros. Entre os 8 membros, o sinal da maioria é indicado, sendo vermelho indicando redução, azul, a maioria dos membros indica aumento.

A Figura 8 mostra as projeções das mudanças de precipitação para os 3 períodos climáticos futuros, gerado a partir de 8 membros das projeções (4 modelos globais e 2 cenários de emissão). A amplitude das mudanças resultantes a partir do 8 projeções climáticas, ou 8 membros, é indicada pelos limites superiores e inferiores das mudanças. Essa amplitude reflete em parte a incerteza das projeções. No Nordeste, por exemplo, as projeções indicam desde redução das chuvas até aumento das chuvas nos 3 períodos futuros, sendo que o sinal predominante é de aumento das chuvas, principalmente na parte norte do Nordeste brasileiro. Na parte central do país, as projeções indicam desde forte redução das chuvas, até pequena redução ou pequeno aumento das chuvas, sendo que o sinal predominante é de redução das chuvas em grande parte do Norte, Centro-Oeste e Sudeste do país. Por outro lado, no Sul, as projeções indicam desde pouca redução das chuvas até forte aumento das chuvas, sendo que o sinal predominante é de aumento das chuvas.

Uma outra forma de apresentar as projeções de mudanças climáticas é baseado nos limites de aquecimento adotados pelo Acordo de Paris. Tavares et al. (2023) mostraram que com 1.5°C de aquecimento médio global, o padrão de mudanças na precipitação no país é de redução das chuvas desde o Sudeste até o Norte, e aumento de chuvas na parte norte do Nordeste e forte aumento das chuvas no Sul.

Em relação aos extremos climáticos no país, as projeções em alta resolução indicam aumento das chuvas intensas no Sul (Chou et al. 2014b; Reboita et al. 2022), por outro lado aumento do período de estiagem na Amazonia (Brito et al. 2023; Reboita et al. 2022) e Nordeste (Chou et al. 2014b).

O uso de resoluções ainda mais altas, cerca de 4 a 5 km, permite capturar fenômenos com dependência da fisiografia local como montanhas, usos e/ou mudanças no uso da terra. As projeções para as regiões metropolitanas no Sudeste na resolução de 5km, mostram mudanças ainda mais intensas de redução da chuva anual e intensificação dos extremos (Lyra et al. 2018). A resolução espacial geralmente empregada pelos modelos globais não permite distinguir as manchas urbanas, áreas de cultivo, regiões serranas ou pequenas bacias hidrográficas. Além da fisiografia, o maior detalhamento permite que as equações dos modelos climáticos reproduzam eventos mais extremos. No trabalho de Tavares e Chou (2022), mostrou-se que as intensas chuvas combinadas aos ventos intensos provenientes de frentes frias que atingem o Vale do Itajaí podem

ter a frequência aumentada nos meses de inverno no futuro. No trabalho de Ferreira et al. (2023), mostrou-se a tendência do aumento das condições atmosféricas favoráveis a formação de tornado em especial sobre

Na construção das projeções de mudanças climáticas, os cenários em geral supõem o aumento global dos gases de efeito estufa. Por outro lado, além deste efeito global, ocorrem mudanças locais de uso da terra, que combinados aos efeitos globais podem resultar em impactos distintos. Esses cenários de mudanças no uso da terra são de caractere local e requerem uso de modelos de resoluções espaciais mais altas do que aquelas providas pelos modelos globais.

Brito et al. (2022) mostraram que as projeções de mudanças climáticas globais e em adição à substituição da floresta Amazônica por pastagem resultam em impactos ainda mais intensos quando comparados aos impactos das projeções sem a inclusão do desmatamento. Com os efeitos locais, os períodos de estiagem se prologam ainda mais e o total anual da chuva se reduz ainda mais. Impactos do crescimento do padrão de desmatamento na Amazônia no período de 1983 a 1988 foram capturados na resolução de 1 km por Pilotto et al (2023). O crescimento do desmatamento foi incluído ano a ano e a partir da inclusão de roteamento de rios, foram comparados os efeitos do El Nino e La Nina e do desmatamento sobre a vazão do rio Ji-Paraná. Percebeu-se que o desmatamento causou redução adicional na vazão do rio no período de estiagem.

Por outro lado, considerando ações positivas, Lopes (2023) incluiu áreas de reflorestamento da Mata Atlântica supondo mudanças no uso da terra, em seguida simulou o clima futuro no Sudeste em cenários RCP8.5 e avaliou os efeitos de longo prazo no planejamento dos recursos hídricos nas bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande e Doce. A inclusão das manchas de reflorestamento causou a redução das temperaturas em até 2°C. O aumento da área de Mata Atlântica também diminuiu a amplitude dos extremos de vazão, proporcionando melhores índices de sustentabilidade.

Estudos para abordar problemas locais apresentam demandas computacional maior, mas são mais adequados para questões específicas locais que se deseja responder.

CONCLUSÕES

O Brasil tem regiões mais suscetíveis a catástrofes climáticas relacionadas a chuvas do que outras. As principais são a Serra do Mar, a Serra da Mantiqueira e a Serra Geral, na extensão que compreende o Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina. É uma área cujo terreno é bem conhecido, em que temos uma concentração de escorregamentos e fluxos de detritos e inundações. Com a crise climática e aumento dos índices pluviométricos, a tendência é que áreas suscetíveis a deslizamentos e inundações tenham eventos de magnitudes ainda maiores. Qualquer município dentro dessas serras vai continuar tendo movimentos como deslizamentos. Isso faz parte da natureza daquele compartimento geológico. Cenários futuros de extremos de chuva podem agravar ainda mais a ameaça e aumentar o risco de desastres em áreas vulneráveis e expostas.

A ciência do clima no Brasil tem evoluído significativamente, com o fortalecimento da capacidade institucional de modelagem, observação e análise de impactos. Iniciativas como o Portal de Projeções Climáticas (<http://pclima.inpe.br/>), a Plataforma AdaptaBrasil MCTI (<https://adapta-brasil.mcti.gov.br/>), o projeto CORDEX-CORE, a Rede Clima e o uso de modelos regionais de alta resolução têm contribuído para um diagnóstico mais refinado dos riscos climáticos. No entanto, persistem desafios científicos e técnicos, tais como:

- Redução de incertezas regionais: A variabilidade climática interanual e decadal no Atlântico Tropical e Pacífico influencia fortemente o regime de chuvas no Brasil, mas sua interação com o aquecimento global ainda não é plenamente compreendida.
- Integração de múltiplas fontes de dados: A combinação de modelos climáticos, reanálises, séries observadas e inteligência artificial é essencial para melhorar a previsibilidade e a regionalização.
- Análise de eventos compostos: A identificação e previsão de eventos simultâneos (como calor + seca) requerem abordagens estatísticas e físicas que estão em desenvolvimento.

Além disso, as capacidades de atribuição de eventos extremos ao aquecimento global antropico, metodologia científica que avalia em que medida um evento se tornou mais provável ou intenso devido à mudança

climática, têm ganhado espaço no Brasil, mas carecem de investimento contínuo em pesquisas relevantes.

As implicações científicas dos relatórios do IPCC e os trabalhos da Rede Clima, CEMADEN e INPE do MCTI e universidades estaduais e federais, têm motivado avanços institucionais no Brasil, incluindo a atualização da NDC (Contribuição Nacionalmente Determinada), a formulação de estratégias nacionais de adaptação e o compromisso com o federalismo climático e avaliação do risco de desastres no presente e futuro. No entanto, a aplicação da ciência climática na formulação de políticas públicas ainda encontra barreiras: Dificuldade na tradução de cenários climáticos para impactos setoriais; falta de integração entre escalas de decisão (federal, estadual, municipal); baixa capacidade técnica local para interpretar e usar a informação climática e de risco de desastres.

Importante destacar que a ciência apresentada deve ser considerada não apenas como alerta, mas como ferramenta estratégica de planejamento. A incorporação dos cenários climáticos nas políticas de ordenamento territorial, segurança hídrica, em frentamento a desastres e transição energética pode reduzir significativamente os riscos sociais e econômicos nas diversas regiões do Brasil.

REFERÊNCIAS

Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica (2025) 2024: O Ano Mais Quente da História, Brasil em Transformação: O IMPACTO DA CRISE CLIMÁTICA, Caderno Técnico 1, São Paulo, 21 pp.

Alcântara E., Marengo, J. Mantovani, J., Londe, L.R., San, L. Y., Park, E., Lin, Y. N. Wang, J., Mendes, T., Cunha, A. P., Pampuch, L., Seluchi, M. E., Simões, S., Cuartas, L. A., Gonçalves, D., Massi, K., Alvalá, R. C. S., Moraes, O. L., Souza Filho, C., Mendes, R., and Nobre, C.A. (2023) Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 1–19, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1-2023>.

Alvalá RCS, Ribeiro DF, Marengo JÁ, Seluchi ME, Gonçalves DM, da Silva LA, Cuartas Pineda LA, Saito S, (2024) Analysis of the hydrological disaster occurred in the state of Rio Grande do Sul, Brazil in September 2023: Vulnerabilities and risk management capabilities, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 110 (2024) 104645, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104645>

Alvalá RC *et al* (2017) Drought monitoring in the Brazilian semiarid region, in press, *Anais da Academia Brasileira de Ciências do Brasil*. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>

Bazzanella, A.C., Dereczynski, C., Luiz-Silva, W. *et al*. Performance of CMIP6 models over South America. *Clim Dyn* 62, 1501–1516 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06979-1>

Brasil 2016. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Sumário Executivo, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2016, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental, 16 pp.

Brasil 2020. Quarta Comunicação Nacional do Brasil a UNFCCC, Sumário Executivo, Brasil 20-20, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Brasília, 33 p.

Brêda, J.P.L. Filho; De Paiva, R.C.D.; Chou, S.C.; Collischonn, W. Assessing extreme precipitation from a regional climate model in different spatial-temporal scales: A hydrological perspective in South America. *International Journal of Climatology*, 42, 1 - 15, 2022.

Brito, A. L., Veiga, J. A. P., Correia, F. S., Michiles, A. A., Capistrano, V. B., Chou, S. C., Lyra, A., & Medeiros, G. (2023). Impacts of increasing greenhouse gas concentrations and deforestation on extreme rainfall events in the Amazon basin: A multi-model ensemble-based study. *International Journal of Climatology*, 1–24. <https://doi.org/10.1002/joc.8158>

Cavalcanti, I. F. A. ; Marengo, J. ; Satyamurty, P. ; Nobre, C. N. ; Trosnikov, I. ; Bonatti, J. P. ; Manzi, A. O. ; Tarasova, T. ; Pezzi, L. P. ; Dalmeida, C. . Global Climatological features in a Simulation Using the CPTEC/COLA AGCM. *Journal of Climate*, v. 15, n.21, p. 2965-2988, 2002. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2965:GCFIAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2965:GCFIAS>2.0.CO;2)

CEMADEN (2025) Estado do clima, extremos de clima e desastres no Brasil em 2024, CEMADEN, São Jose dos Campos, SP, 2025, 37 pp, disponível em <https://inctmc2.cemaden.gov.br/>

Chou, Sin Chan, Justi da Silva, M. G. A. Objective evaluation of Eta Model precipitation forecasts over South America. *Climanálise* (São José dos Campos), v.14, 1999 ISSN 0103-0019

Chou, Sin Chan. Modelo Regional Eta. *Climanálise* (São José dos Campos), Cachoeira Paulista, SP, v. 1, p. 27- 29,, 1996, <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcli-manl/boletim/cliesp10a/27.html>

Chou, S. C.; Nunes, A. M. B.; Cavalcanti, I. F. A., 2000. Extended range forecasts over South America using the regional Eta model. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, n. D8, p. 10147-10160

- Chou, S. C.; Tanajura, C. A. S.; Xue, Y.; Nobre, C. A., 2002. Validation of the Coupled Eta/SSiB Model over South America. *Journal of Geophysical Research*, Estados Unidos, v. 107, n. D20, pp. LBA 56-1, doi: 10.1029/2000JD000270
- Chou SC, Marengo JA, Lyra A, Sueiro G, Pesquero J, Alves LM, Kay G, Betts R, Chagas D, Gomes JL, Bustamante J, Tavares P (2012) Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*. Vol. 38 n. 3-4, 635-653. DOI 10.1007/s00382-011-1002-8
- 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., Nobre, P. and Marengo, J. (2014a) Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 3, 438-454. doi:10.4236/ajcc.2014.35039.
- 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. and Marengo, J. (2014b) Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3, 512-527. doi: 10.4236/ajcc.2014.35043
- Chou, S.C., de Arruda Lyra, A., Gomes, J.L., Rodriguez, D.A, Martins, M., Resende, N., Tavares, P., Dereczynski, C.P., Pilotto, I., Martins, A.M., Carvalho, L.F.A., Onofre, J.L.L., Major, I., Penhor, M., Santana, A.. 2020b. Downscaling projections of climate change in Sao Tome and Principe Islands, Africa. *Clim Dyn* (2020). 54:4021–4042 <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05212-7>
- Dereczynski, C., Chou, S.C., Lyra, A., Sondermann, M., Regoto, P., Tavares, P., Chagas, D., Gomes, J.L., Rodrigues, D.C., Skansi, M.M.. Downscaling of climate extremes over South America – Part I: Model evaluation in the reference climate. *Weather and Climate Extremes*. p. 100273, 2020. DOI: 10.1016/j.wace.2020.100273
- Debone, D.; Tavella, R. A.; Colombo, A. L.; Gales, A. C.; da Silva Júnior, F. M. R.; Miraglia, S. G. E. K. Is It Time to Build an Ark? The Reality of Climate Change in One of the Worst Climate Tragedies in Brazil. *Preprints* 2024, 2024061702. <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1702.v1>
- Dunn, R. J. H., Alexander, L. V., Donat, M. G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., et al. (2020). Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032263. <https://doi.org/10.1029/2019JD032263>
- Dunn, R. J. H., Herold, N., Alexander, L. V., Donat, M. G., Allan, R., Bador, M., et al. (2024). Observed global changes in sector-relevant climate extremes indices—An extension to HadEX3. *Earth and Space Science*, 11, e2023EA003279. <https://doi.org/10.1029/2023EA003279>

Espinoza, J., Marengo, J. A., Schongart, J., & Jimenez, J. C. (2022). The New Historical Flood of 2021 in the Amazon River Compared to Major Floods of the 21st Century: Atmospheric Features in the Context of the Intensification of Floods. *Weather and Climate Extremes*, 35, Article ID: 100406. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100406>

Espinoza, J., Jimenez, J. C., Marengo, J. A., Schongart, J., Ronchail, J., Lavado-Casimiro, W., et al. (2024). The New Record of Drought and Warmth in the Amazon in 2023 Related to Regional and Global Climatic Features. *Scientific Reports*, 14, Article No. 8107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>

Ferreira, N. C. R., Tavares, P. S., Medeiros, G. S., Ferreira, L. N., Borges, P., Chou, S. C., & Rodrigues, M. L. (2023). Projeções de tempo severo e impactos em torres de linhas de transmissão em Santa Catarina, Brasil, sob cenários futuros de mudanças climáticas globais. *Derbyana*, 44. <https://doi.org/10.14295/derb.v44.808>

Floodlist (2023) <https://floodlist.com/america/floods-tarija-bolivia-february-2022>

Floodlist (2024b) <https://floodlist.com/america/argentina-flood-buenos-aires-march-2024>

Floodlist (2024c) <https://floodlist.com/america/brazil-floods-rio-de-janeiro-february-2024>

Gorenstein, I.; Prado, L.F.; Bianchini, P.R.; Wainer, I.; Griffiths, M.L.; Pausata, F.S.R.; Yokoyama, E. 2022. A fully calibrated and updated mid-Holocene climate reconstruction for Eastern South America. *Quaternary Science Reviews*, 292: 107646. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107646>

Grimm A, Tedeschi R, (2009) ENSO and Extreme Rainfall Events in South America, *J of Climate*, 22, 1589–1609, <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2429.1>

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Climate Change (2021) The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Reitzel, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.

IPCC (2022) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Zhai, P., J. Martin, M. Tignor, M. Albalo, C. Mach, G.-K. Plattner, S. Pion, A. Riosmena, A. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

vernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3056. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>, 2022

IPCC 2012: Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 3-21.

Lopes, L.G. Sustentabilidade hídrica sob cenários de mudanças climáticas, restauração florestal e de demanda de água em sistemas hídricos no Sudeste brasileiro. Tese de Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Lyra, A., Tavares, P., Chou, S.C., Sueiro, G., Dereczynski, C.P., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., Giarolla, A. 2018. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theor Appl Climatol* 132, 663–682 (2018). <https://doi.org/10.1007/S00704-017-2110-0>

Marchi, A. C. de, Melo, M. L. D. de, Lyra, A. de A., Kubota, P. Y. ., Chou, S. C., & Rosas, P. (2022). Simulações climáticas do Holoceno Médio para o Brasil utilizando o modelo regional paleoclimático Eta. *Derbyana*, 43, e775. <https://doi.org/10.14295/derb.v43.775>

Marengo, J. A.; Alves, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. *Ge USP – Espaço e Tempo* (Online), v. 19, n. 3, p. 485-494, mês. 2016. ISSN 2179-0892.

Marengo JA, Torres RR, Alves LM (2017) Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theor Appl Climatol* 20:1–12. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

Marengo JA, Alves LM, Alvalá RCS *et al* (2018) Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. *An Acad Bras Cienc*. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>

Marengo JA, Cunha AP, Nobre CA, Ribeiro Neto G, Magalhaes AR, Torres RR, Sampaio G, Alexandre F., Alves LM, Cuartas LA, Leal K, Alvalá RCS, (2020) Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C, *Natural Hazards* (2020) 103:2589–2611, <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>

Marengo JA, Cunha AP, Cuartas LA, Deusdará Leal KR, Broedel E, Seluchi ME, Michelin CM, De Praga, Baião CF, Chuchón Ângulo E, Almeida EK, Kazmierczak ML, Mateus NPA, Silva RC and Bender F (2021) Extreme Drought in the Brazilian

Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Front. Water* 3:639204. doi: 10.3389/frwa.2021.639204

Marengo, J. A., Alcantara, E., Cunha, A. P., Seluchi, M. E., Nobre, C.A., Dolif, G., Goncalves, D., Assis Dias, M., Cuartas, L. A., Bender, F., Ramos, A. M., Mantovani, J. R., Alvalá, R.C.S., and Moraes, O.L. (2023) Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness, *Weather and Climate Extremes*, 39, 100545, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100545>

Marengo, J., Dolif, G., Cuartas, A., Camarinha, P., Gonçalves, D., Luiz, R., Silva, L., Alvala, R., Seluchi, M., Moraes, O., Soares, W., Nobre, C. (2024 a) O Maior Desastre Climático do Brasil: Chuvas e Inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Estudos Avançados* (online). v.38, p.203 - 228, 2024.

Marengo, J., Cunha, A., P., Espinoza, J. C., Fu, R., Schöngart, J., Jimenez, J.C., Costa, M. C., Ribeiro, J. M., Wongchuig, S., Zhao, S., (2024b) The Drought of Amazonia in 2023-2024. *American Journal of Climate Change*. v.13, p.567 - 597, 2024.

Marengo, J.A., Alcantara, E., Moraes, O. L., Martinez, R., Seluchi, M., Alvala, R., Dolif, G., Goncalves D (2025 a) Early warning services for disaster risk reduction in Brazil: The experience of CEMADEN during the floods of Rio Grande do Sul of May 2024, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 126, August 2025, 105645, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105645>

Marengo JA, Costa MC, Cunha AP, Espinoza J-C, Jimenez JC, Libonati R, Miranda V, Trigo IF, Sierra JP, Geirinhas JL, Ramos AM, Skansi M, Molina-Carpio J and Salinas R (2025b) Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in central South America. *Front. Clim.* 7:1529082. doi: 10.3389/fclim.2025.1529082

Marques, V.S.; Dereczynski, C.P. Weather Forecasting in Brazil: A Concise Historical Review. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 44, p. 1-14, 2021. doi:10.11137/1982-3908_2021_44_45358

Melo, M.L.D.; Marengo, J.A. 2007. The influence of changes in orbital parameters over South American climate using the CPTEC AGCM: simulation of climate during the mid-Holocene. *The Holocene*, 18(4): 501-516. <https://doi.org/10.1177/0959683608089205>

Mesinger F, Chou SC, Gomes JL, Jovic D, Bastos P, Bustamante JF, Lazic L, Lyra AA, Morelli S, Ristic I, Veljovic K. (2012) An upgraded version of the Eta model. *Meteorology and Atmospheric Physics*. Vol 116 (3), 63-79. DOI: 10.1007/s00703-012-0182-z

Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Vries B, Fenham J, Gaffin S, Gregory K, Gruebler A, Jung TY, Kram T, La Rovere EL, Michaelis L, Mori S, Morita T, Pepper W, Pitcher H, Price L, Riahi K, Roehrl A, Rogner H-H, Sankovski A, Schlesinger M,

Shukla P, Smith S, Swart R, van Rooijen S, Victor N, Dadi Z (2000) Special report on emissions scenarios. Cambridge University Press, New York.

Nobre, P., and Coauthors, 2013: Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. *J. Climate*, 26, 6716–6732, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00580.1>.

O'Neill BC, Kriegler E, Riahi K, Ebi KL, Hallegatte S, Carter TR, *et al.* A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Clim. Change* (2014) 122(3):387–400. doi: 10.1007/s10584-013-0905-2

Pesquero, J.F., Chou, S.C., Nobre, C.A., Marengo, J.A., 2010: Climate downs-caling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. *Theoretical and Applied Climatology*. Vol 99, 1-2, p.75-93. DOI: 10.1007/s00704-009-0123-z

Pilotto ID, Chou SC, Nobre P. Seasonal climate hindcasts with Eta model nested in CPTEC coupled ocean-atmosphere general circulation model. *Theoretical and Applied Climatology*. Vol.110, no. 3, pp. 437-456. 2012. DOI:10.1007/s00704-012-0633-y.

Pilotto, I.L., Rodriguez, D.A., Chou, S.C., Garofolo, L., Gomes, J.L. Impacts of the land use and land-cover changes on local hydroclimate in southwestern Amazon. *Clim Dyn* 61, 5597–5612 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06872-x>

Reboita, M.S., Kuki, C.A.C., Marrafon, V.H. *et al.* South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Clim Dyn* 58, 459–485 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05918-2>

Reboita, M.S.; Mattos, E.V.; Capucin, B.C.; Souza, D.O.d.; Ferreira, G.W.d.S. A Multi-Scale Analysis of the Extreme Precipitation in Southern Brazil in April/May 2024. *Atmosphere* 2024, 15, 1123. <https://doi.org/10.3390/atmos15091123>

Seluchi, M. E., Chou, S. C. Evaluation of two eta Model versions for weather forecast over South America. *Geofísica Internacional*. Mexico, v.40, p.219 - 237, 2001

Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskander, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S.M., Wehner, M., & Zhou, B. (2021). *Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate (Chapter 11)*. In: IPCC 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., *et al.*, pp. 1513-1766 Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 10.1017/9781009157896.013.

Sondermann, M.; Chou, S.C.; Tavares, P.; Lyra, A.; Marengo, J.A.; Souza, C.R. d.G. Projections of Changes in Atmospheric Conditions Leading to Storm

Surges along the Coast of Santos, Brazil. *Climate* 2023, 11, 176. <https://doi.org/10.3390/cli11090176>

Tavares, P.S., Chou, S.C. Passagens de frentes frias extremas no Vale do Itajaí no clima futuro. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. 2022. Rio de Janeiro, RJ.

Tavares, P.S., Acosta, R., Nobre, P., Resende, N.C., Chou, S.C., Lyra, A.A. Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5 °C and 2.0 °C of global warming scenarios. *Reg Environ Change* 23(1), 40 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02042-1>

Toreti, A., Bavera, D., Acosta Navarro, J., Acquafresca, L., Barbosa, P., de Jager, A., Ficchi, A., Fioravanti, G., Grimaldi, S., Hraast Essenfelder, A., Magni, D., Mazzeschi, M., McCormick, N., Salamon, P., Santos Nunes, S., Volpi, D. (2024) Drought in the Amazon and the La Plata basins - December 2024, *GDO Analytical Report*, JRC140741, doi:10.2760/9524487, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024 European Union, 2024,. 30 pp.

Veiga SF, Nobre P, Giarolla E, Capistrano V, Baptista J *et al* (2019) The Brazilian Earth System Model ocean–atmosphere (BESM-OA) version 2.5: evaluation of its CMIP5 historical simulation. *Geosci Model Dev* 12:1613–1642. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1613-2019>

World Meteorological Organization (WMO) (2020) State of Climate for Latin America and Caribbean 2019. WMO, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2021) State of Climate for Latin America and Caribbean 2020. WMO, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2022) State of Climate for Latin America and Caribbean 2021. WMO, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2023) State of Climate for Latin America and Caribbean 2022. WMO, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2024) State of Climate for Latin America and Caribbean 2023. WMO, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2025) State of Climate for Latin America and Caribbean 2024. WMO, Geneva, Switzerland.