

Eventos Climáticos Deflagrados no Brasil

Base de Extremos IRB(P&D)

IRB(P&D)

Sumário executivo

Objetivo

Quantificar riscos climáticos extremos deflagrados no Brasil com a finalidade de avaliar a concentração e exposição a eventos catastróficos.

Base de dados (1961-2024)

Elaborada com séries diárias de precipitação, temperatura, vento, evapotranspiração, radiação e umidade.

Produto analítico

Construção de uma base de **68 índices padronizados** de extremos (chuva, calor, frio, seca), adequada para uso atuarial e de resseguro.

Metodologia

- Clusterização por aprendizado de máquina para definir regiões de similaridade de extremos e reduzir complexidade espacial.
- Modelagem probabilística de valores extremos (estimativa de níveis/tempos de retorno)

Principais evidências climáticas

- Chuvas intensas nas regiões Sul e Sudeste.
- Secas prolongadas persistentes no Nordeste e Centro-Oeste.

Implicações para o mercado

- Avaliação detalhada em nível espacial para a predição da frequência e severidade de perdas catastróficas.
- Suporte na revisão de tarifas, franquias e limites, com taxas ajustadas por regiões/linhas de negócios.
- Apoio à alocação de capacidade e ao desenho de programas de resseguro (proporcional/XoL) e produtos paramétricos.

Aplicações práticas

- \\ *Underwriting* com mapas/heatmaps por região de risco.
- \\ Pricing com níveis de retorno (TR) e Average Annual Exceedance Probability (AEP) por perigo.
- \\ Capital e ORSA com cenários de estresse e agregação de risco climático.

Avaliação de Extremos Climáticos

A indústria de seguros tem exercido papel estratégico na observação, análise e modelagem de riscos associados a eventos climáticos extremos, acumulando décadas de experiência e bases de dados sobre perdas decorrentes de desastres naturais. Desde a década de 1980, as perdas seguradas por fenômenos como tempestades severas, inundações e secas apresentaram crescimento expressivo, impulsionadas por fatores como a intensificação das atividades econômicas, a maior concentração de valores segurados e a expansão urbana em áreas de alta exposição (UNEP FI, 2021). Esse acervo empírico tem sustentado o aprimoramento dos modelos quantitativos de previsão de catástrofes (NatCat), que traduzem a dinâmica dos riscos climáticos em estimativas robustas de frequência, severidade e vulnerabilidade, oferecendo subsídios técnicos essenciais para a precificação atuarial, o planejamento preventivo e o fortalecimento da resiliência setorial.

A definição de metodologias adequadas para o ajuste de distribuições de probabilidade é essencial na análise e mitigação de riscos associados a eventos climáticos extremos. Fenômenos como chuvas intensas, secas e ondas de calor, por sua natureza aleatória e dependente de múltiplos fatores atmosféricos, não permitem previsões determinísticas confiáveis de longo prazo (Hartmann et al., 2011). Nesse contexto, mesmo o uso de modelos estatísticos que representem o comportamento histórico dessas variáveis, deve ser feito com cautela, uma vez que alguns eventos extremos ainda não geraram uma base histórica suficiente para assegurar a devida robustez das estimativas futuras.

Este fato abre uma nova perspectiva para a modelagem da probabilidade de ocorrência de eventos climáticos extremos, baseada em correlações com determinadas variáveis que

possam ser utilizadas como preditores desses eventos. Para isso a análise dos possíveis preditores deverá ser espacial, em vez de temporal, requerendo-se um grande volume de informações correlacionáveis aos eventos extremos. A atual tecnologia de informação permite esse tipo de análise, sendo necessária, para isto, a utilização de técnicas refinadas de big data, machine learning e inteligência artificial. O atual estado da arte de previsão de eventos climáticos extremos concentra-se nos modelos de previsão de catástrofes, mencionados acima, e que são baseados na obtenção de distribuições de probabilidade de valores extremos.

Compreender esses parâmetros é essencial não apenas para fins meteorológicos, mas também para aplicações atuariais e financeiras, uma vez que a concentração espacial dos eventos climáticos tem provocado aumentos significativos nas perdas econômicas e seguradas em escala global. Em 2024, por exemplo, as perdas seguradas globais alcançaram US\$ 145 bilhões, configurando o sexto maior valor já registrado, conforme o relatório Climate and Catastrophe Insight 2025 da Aon (2025). O documento destaca que o agravamento da frequência e da severidade dos desastres naturais evidencia o papel das mudanças climáticas na ampliação da vulnerabilidade econômica e reforça a necessidade de modelos estatísticos robustos para subsidiar a precificação e a gestão de riscos no setor segurador.

Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV)

Utilizada para estimar eventos extremos e seus períodos de retorno.

Combina as distribuições *Gumbel*, *Weibull* e *Fréchet*, com base na seleção de máximos de cada período.

Os parâmetros localização, dispersão e cauda são ajustados pelo método de Máxima Verossimilhança (MLE), permitindo representar a probabilidade de eventos raros.

Desastres naturais, como as enchentes no Rio Grande do Sul (2024), os deslizamentos em Petrópolis (RJ), em 2022, e as chuvas intensas em Bertioga (SP), em 2023, ilustram a combinação entre ameaças climáticas crescentes e a vulnerabilidade socioespacial, marcada por infraestrutura precária, áreas de risco e baixa capacidade de resposta das autoridades locais. A **Figura 1** (a) apresenta dados históricos de desastres naturais deflagrados no Brasil delimitados por regiões de bacias hidrográficas.

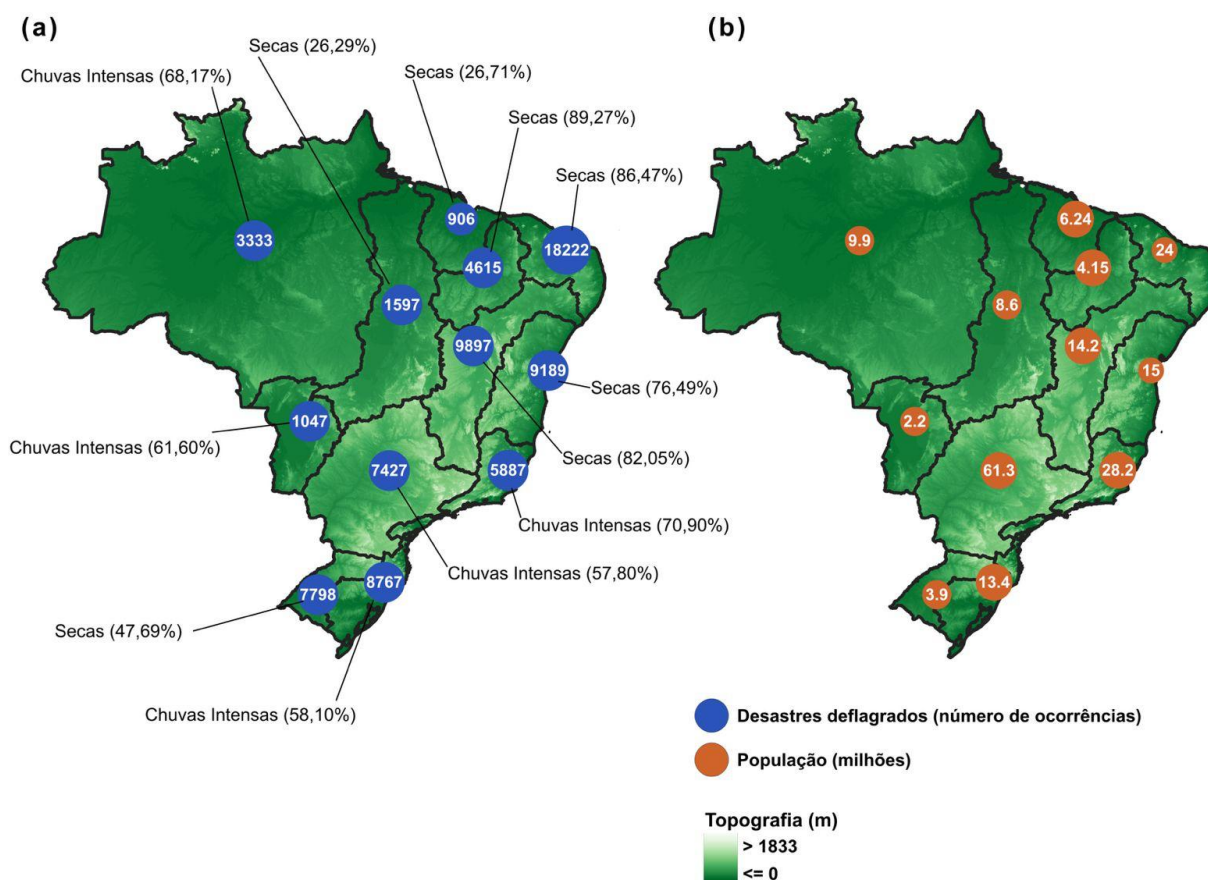


Figura 1 - Distribuição dos desastres naturais deflagrados (a) e concentração da população brasileira (b), delimitados por regiões de bacias hidrográficas. A topografia é plotada ao fundo.

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: IBGE, 2022; Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, 2023.

A distribuição dos desastres deflagrados por bacia hidrográfica revela padrões distintos de ameaça climática no território brasileiro. Dados da Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica (2024) indicam que o país registrou 64 mil desastres climáticos entre 1991 e 2023, afetando 5117 municípios, o que corresponde a cerca de 50% do território nacional. As secas representam aproximadamente 92% desses eventos, predominando nas bacias na região do Nordeste brasileiro e do São Francisco, em que as condições semiáridas favorecem longos períodos de estiagem. Já nas bacias do Paraná, Atlântico Sudeste e Atlântico Sul, destacam-se as chuvas intensas e as inundações, associadas à elevada densidade populacional, à urbanização acelerada e à topografia acidentada dessas regiões.

De acordo com os dados do Banco Internacional de Dados de Desastres (EM-DAT), o Brasil ocupou a quarta posição mundial em número de ocorrências de desastres em 2023,

superando a média anual observada entre 2003 e 2022 (EM-DAT, 2024). Informações do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) reforçam essa tendência: o ano de 2024 apresentou o maior número de alertas emitidos de desastres no país, com 75% dos registros sendo relacionados a eventos de chuvas intensas. Esses indicadores evidenciam o agravamento da vulnerabilidade climática do país e a necessidade de fortalecer os sistemas de monitoramento, alerta e resposta a desastres (CEMADEN, 2024).

O IRB(P&D) estruturou uma base de índices climáticos, desenvolvida para identificar e quantificar eventos extremos, como chuvas intensas, secas, ondas de frio, ondas de calor e vendavais. Essa base foi construída a partir dos dados brutos do BR-DWGD (Brazilian Daily Weather Gridded Data), que fornecem diversas variáveis meteorológicas diárias para o território brasileiro:

- \\ Precipitação;
- \\ Temperaturas máximas e mínimas;
- \\ Radiação solar;
- \\ Umidade relativa;
- \\ Velocidade do vento;
- \\ Evapotranspiração.

Com a consolidação da base de índices, foi conduzida a Análise dos Extremos Climáticos no Brasil ao longo dos últimos 60 anos, com o propósito de compreender a intensidade e a evolução dos eventos extremos entre 1961 e 2024. A partir dessa estrutura, foi também desenvolvida uma análise de tempo de retorno, voltada a estimar a frequência e a recorrência dos principais eventos extremos nas diferentes regiões do país. Para esse objetivo, foi aplicado a GEV, que permite estimar a probabilidade de ocorrência de eventos raros e identificar áreas mais suscetíveis e períodos de repetição ao longo das décadas.

Base Climática de Índices Extremos

A base climática de índices extremos foi desenvolvida com o propósito de identificar e quantificar eventos extremos relevantes, como excesso de chuva, períodos prolongados de seca, variações extremas de temperatura e velocidade do vento—responsáveis pela

modulação do clima no Brasil e geração de impactos socioeconômicos em escala nacional. Essa estrutura é composta por uma série histórica de dados diários provenientes de pluviômetros e estações meteorológicas, disponibilizados pelo conjunto BR-DWGD.

A **Figura 2** descreve a metodologia adotada na construção da base climática de índices extremos. O painel (a), destaca a grade climática (grid) com resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, cobrindo todo o território brasileiro com mais de 70 mil pontos, realizando a organização espacial dos dados meteorológicos. Já o painel (b) está representando as variáveis utilizadas provenientes do conjunto BR-DWGD, que incluem precipitação, temperaturas máxima e mínima, evapotranspiração, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar.

A partir destas variáveis, foram calculados 68 índices climáticos amplamente utilizados na literatura internacional, baseados nas metodologias consolidadas pela Equipe de Especialistas em Detecção e Índices de Mudanças Climáticas (ETCCDI; Expert Team on Climate Change Detection and Indices), promovida pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) (Zhang et al., 2011). Todos os índices foram agregados em escala mensal, possibilitando a identificação dos mais diversos tipos de eventos extremos. Neste relatório foram destacados os eventos de chuvas intensas, secas, ondas de calor e ondas de frio, representados pelos índices Rx1D e Rx5D, CDD, WSDI e CSDI, respectivamente (descrição dos índices são apresentados na Tabela 1) (Frich et al., 2002).

Tabela 1 - Índices climáticos utilizados na análise de eventos extremos.

Índice*	Definição	Descrição	Eventos	Unidades de Medida	
Rx1D	Precipitação Máxima em 1 Dia	Precipitação diária máxima registrada em 1 dia, no mês	Chuvas Intensas	mm	
Rx5D	Precipitação Máxima em 5 Dias	Precipitação máxima acumulada em 5 dias consecutivos, no mês	Chuvas Intensas	mm	
CDD	Dias Secos Consecutivos	Duração máxima de dias secos consecutivos (com precipitação inferior a 1 mm), no mês	Secas	dias	
WSDI	Duração de Períodos Quentes	Quantidade de dias em que a temperatura máxima diária é superior ao percentil 90, por pelo menos 6 dias consecutivos ou mais, no mês	Ondas de Calor	dias	
CSDI	Duração de Períodos Frios	Quantidade de dias em que a temperatura mínima diária é inferior ao percentil 10, por pelo menos 6 dias consecutivos ou mais, no mês	Ondas de Frio	dias	

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Com base nas definições do *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI) e da Organização Meteorológica Mundial (OMM) (ZHANG et al., 2011). *Nomenclatura padrão internacional.

A Tabela 1 descreve os 5 índices climáticos utilizados neste relatório que representam o comportamento dos eventos extremos. Eles permitem quantificar as diferentes manifestações dos extremos climáticos, como chuvas intensas, secas, ondas de calor e de frio, identificando padrões regionais de ocorrência e magnitude ao longo das últimas décadas. As mudanças climáticas afetam não apenas a frequência e a intensidade desses eventos, mas também seus impactos sociais, econômicos e ambientais.

Após a estruturação da base climática, composta por 68 índices extremos, os dados foram delimitados de acordo com as áreas das bacias hidrográficas, permitindo uma análise regionalizada e coerente com as principais unidades de drenagem do país. Entre esses índices, destacam-se aqueles apresentados na Tabela 2 (Apêndice) que incluem medidas de intensidade, frequência e duração de diferentes tipos de eventos extremos. Em seguida, dentro de cada bacia, foi aplicada via algoritmo de machine learning uma clusterização

espacial (método k-means, Figura 2 - painel (d)), agrupando regiões com comportamentos climáticos semelhantes, com base em 45 índices mais representativos dentre os 68 calculados.

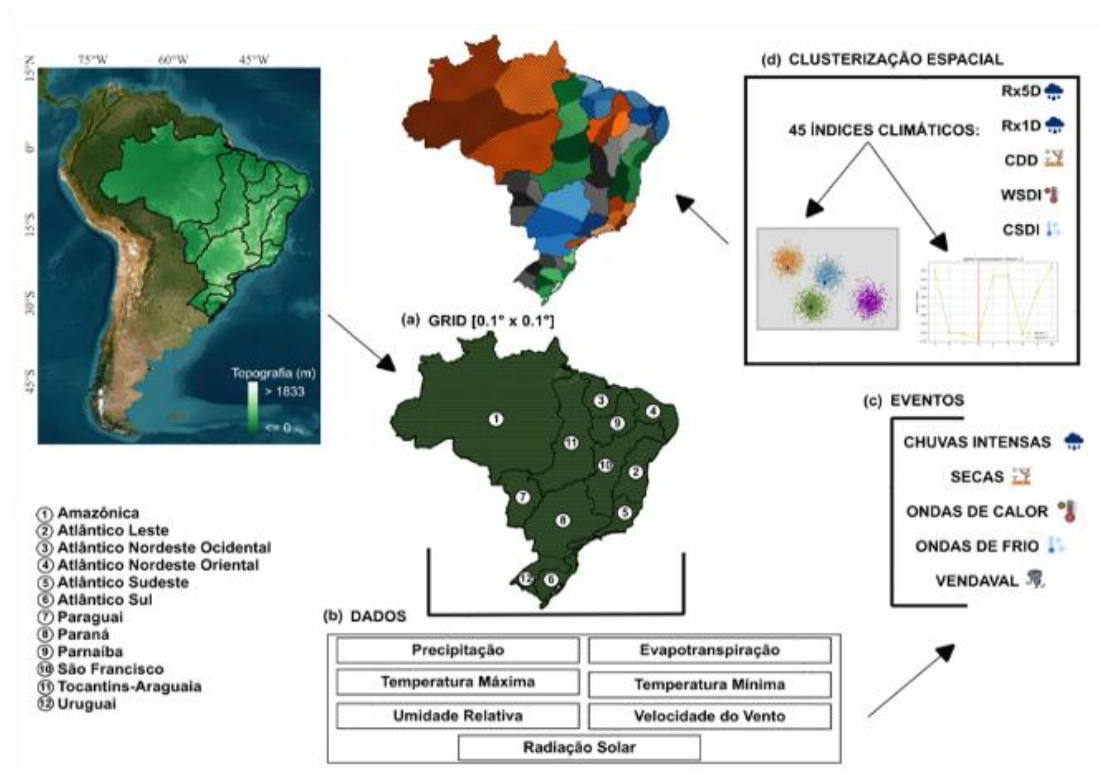


Figura 2 - Etapas da elaboração da base climática de índices extremos (painéis a, b, c) e processo de formação dos clusters climáticos (painel d), no Brasil.

Fonte: Elaboração IRB(P&D).

Chuvas intensas, representadas pelos índices Rx1D e Rx5D, provocam enchentes e alagamentos, ampliando riscos à saúde pública e danos em áreas urbanas. As secas prolongadas, representadas pelo índice CDD, reduzem a disponibilidade hídrica, comprometem a produção agrícola e aumentam a insegurança alimentar e energética. Já as ondas de calor e de frio, representadas pelos índices WSDI e CSDI, respectivamente, produzem efeitos relevantes sobre a saúde, a agropecuária e o setor elétrico. O calor extremo eleva a mortalidade e a demanda por energia, enquanto o frio intenso causa perdas agrícolas, danos a rebanhos e doenças respiratórias. Essas alterações no regime térmico e hidrológico evidenciam que o agravamento climático atua de forma sistêmica, ampliando a vulnerabilidade socioeconômica e ambiental das populações expostas.

Padrões de Extremos Climáticos

Ao analisar os dados climáticos das últimas seis décadas, é possível observar como os eventos extremos evoluíram ao longo do tempo. Essa análise histórica e decadal ajuda a compreender períodos de maior ocorrência e intensidade, bem como possíveis mudanças nos padrões regionais de variabilidade climática.

A **Figura 3** destaca a variação decadal dos índices climáticos revelando mudanças distintas entre as bacias hidrográficas brasileiras no período de 1961 a 2024. O índice de Dias Secos Consecutivos (CDD; Consecutive Dry Days) apresentou os maiores valores para o percentil 90 observados na bacia Atlântico Nordeste Oriental, sugerindo maior severidade e persistência de períodos de estiagem nessa região. Em contraste, o índice de Duração de Períodos Frios (CSDI; Cold Spell Duration Index) mostra redução progressiva em quase todas as bacias.

Os índices relacionados ao comportamento das chuvas intensas (Rx1D: Maximum 1-Day Precipitation; Rx5D: Maximum 5-Days Precipitation) apresentam elevada variabilidade das médias entre as bacias hidrográficas, enquanto, ao comparar uma mesma bacia ao longo das décadas, as médias não indicam variações expressivas. Já o índice de duração de períodos quentes (WSDI; Warm Spell Duration Index) evidencia tendência consistente de aumento. De forma geral, os resultados indicam acentuação da variabilidade climática espacial e um padrão de aquecimento regionalizado, com maior frequência de eventos extremos no país.

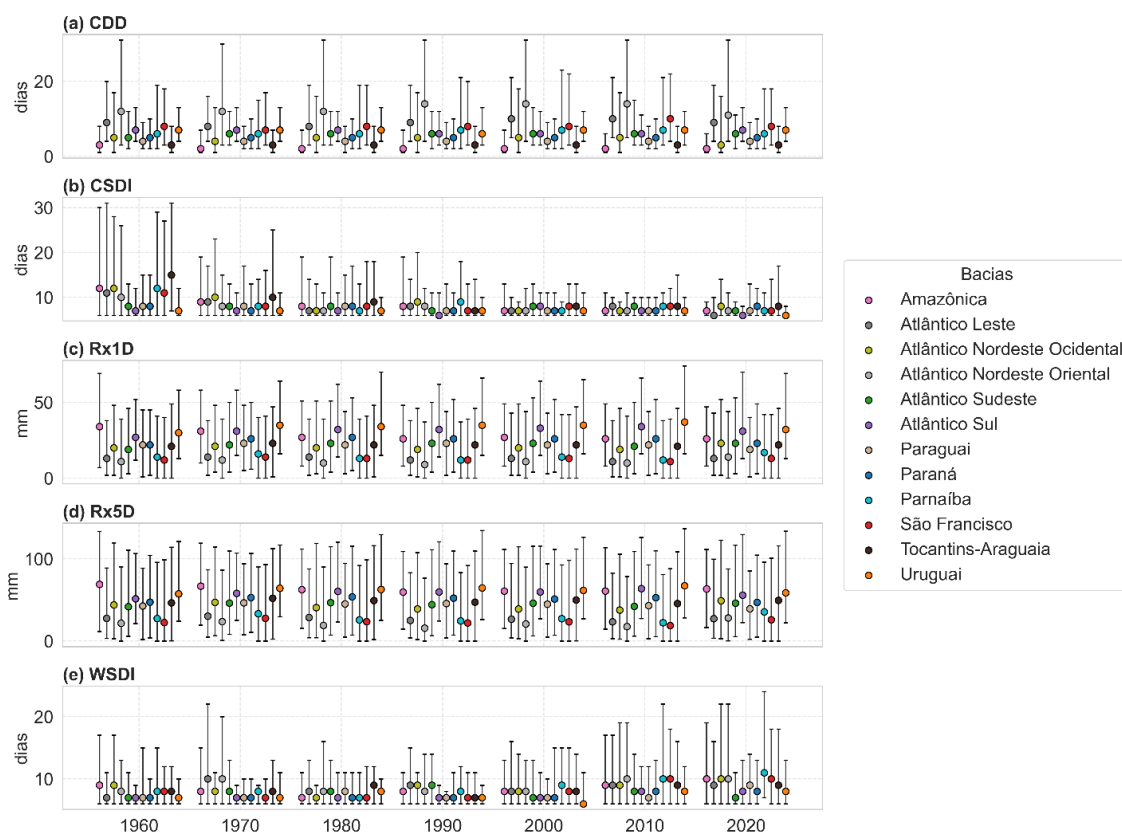


Figura 3 - Análise decadal dos índices climáticos de extremos no período de 1961 a 2024. Limites inferiores representam o percentil 10 dos dados e limites superiores, o percentil 90. O ponto central corresponde à mediana dos dados. Análise descritiva delimitada por regiões de bacias hidrográficas dentro do Brasil para os índices: CDD (a), CSDI (b), Rx1D (c), Rx5D (d) e WSDI (e).

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D).

As **Figuras 4 e 5** apresentam a distribuição espacial e a evolução temporal dos índices CSDI e WSDI no Brasil ao longo das seis décadas analisadas (1961–2020). Para cada ponto, foi calculado o valor máximo da série temporal dentro de cada década, permitindo identificar as ocorrências mais intensas de cada período. Juntas, essas figuras evidenciam uma mudança térmica marcante, caracterizada pela redução progressiva das ondas de frio e das ondas de calor refletindo o comportamento probabilístico da atividade climática.

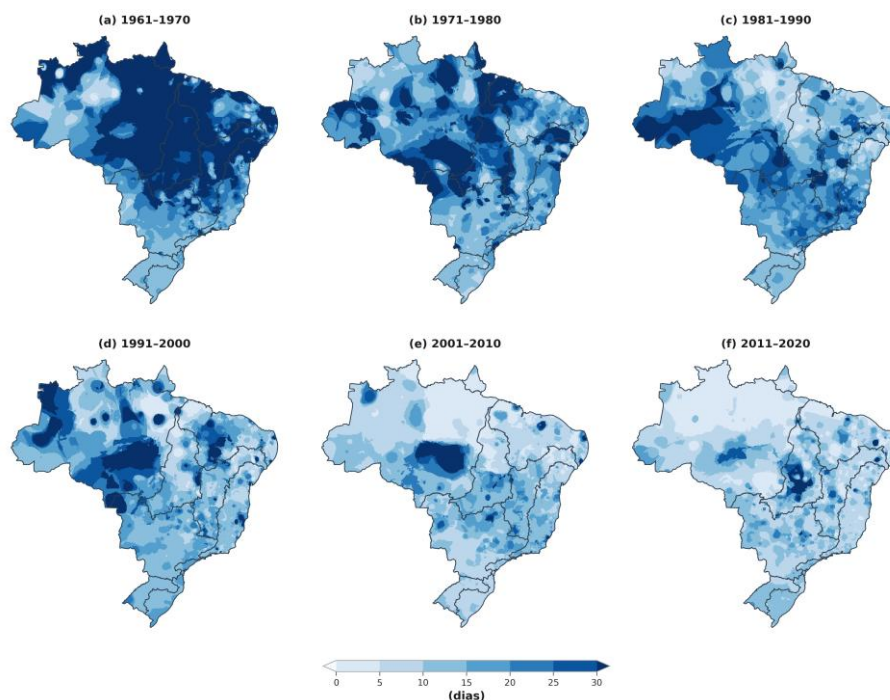


Figura 4 - Avaliação decadal dos eventos de ondas de frio (CSDI) no Brasil, para o período entre 1961 e 2020. Para cada ponto dentro do *grid* são plotados os valores máximos em cada década.

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D).

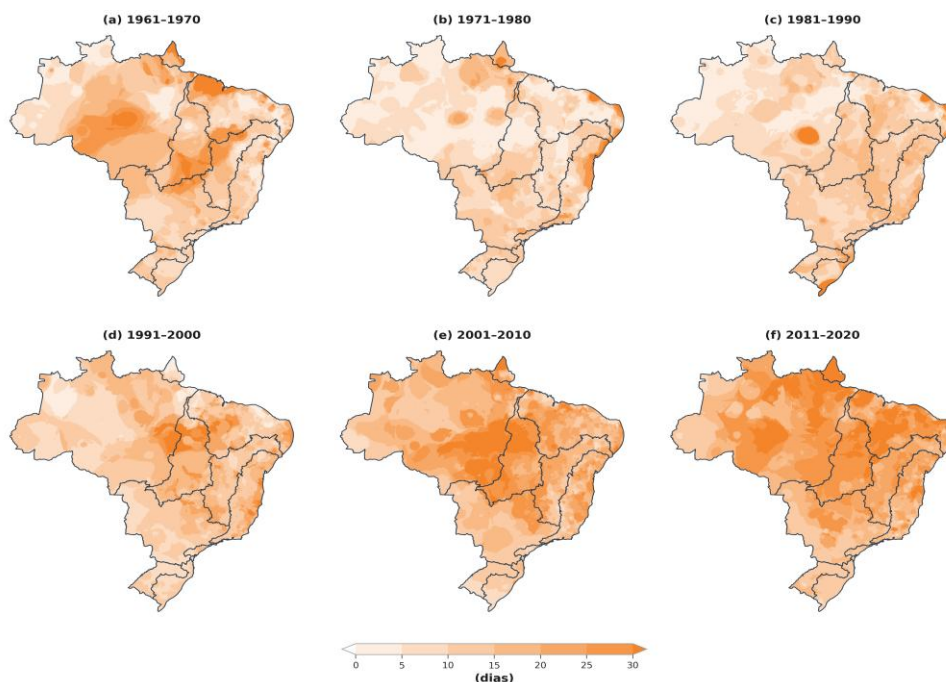


Figura 5 - Avaliação decadal dos eventos de ondas de calor (WSDI) no Brasil, para o período entre 1961 e 2020. Para cada ponto dentro do *grid* são plotados os valores máximos em cada década.

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D).

Período de Retorno dos Índices Climáticos

De acordo com Embrechts, Klüppelberg e Mikosch (1997), a modelagem de eventos extremos por meio da distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) é uma das abordagens mais eficazes para a quantificação dos riscos de cauda no mercado de seguros. O período de retorno, derivado diretamente da função de distribuição da GEV, representa o intervalo médio esperado entre ocorrências de determinado evento extremo, traduzindo probabilidades muito pequenas em uma escala temporal compreensível.

Essa relação é fundamental para a prática atuarial, pois viabiliza a aplicação do conceito de modelagem de valores extremos nos processos de precificação de seguros, na definição de limites de cobertura e na avaliação da solvência e exposição ao risco das seguradoras. A compreensão dos parâmetros da GEV, especialmente do comportamento da cauda da distribuição, permite identificar e quantificar o potencial de perdas associadas a eventos raros e severos, fortalecendo a gestão de risco e a formulação de políticas de resseguro.

Como destacam Embrechts, Klüppelberg e Mikosch (1997), "compreender e quantificar o comportamento da cauda das distribuições de perdas é fundamental para avaliar o risco de eventos raros, mas potencialmente severos, no mercado de seguros."

Parâmetros da GEV

Localização

Define o ponto central da distribuição, ou seja, o valor em torno do qual os extremos se concentram.

Dispersão

Representa a variação da distribuição, controlando o quanto os valores extremos se afastam do ponto central definido.

Cauda

Determina o comportamento da cauda da distribuição, sendo o elemento mais sensível na modelagem de eventos extremos.

Chuvas intensas

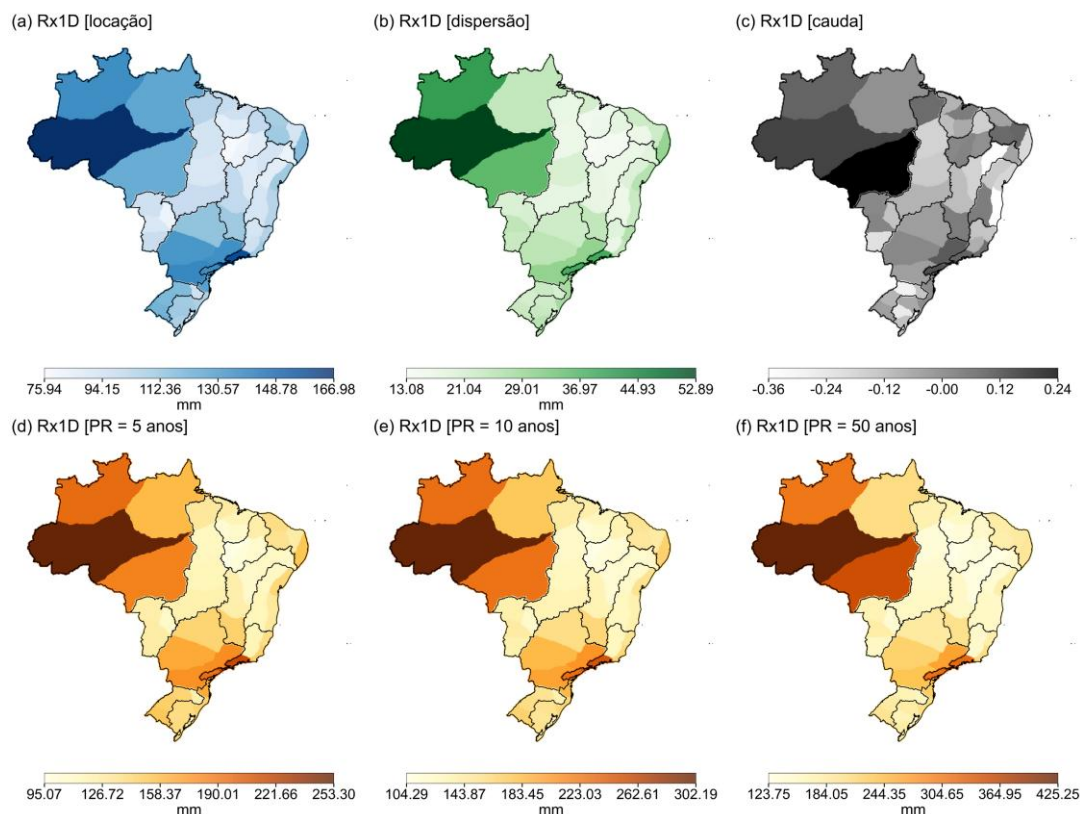


Figura 6 - Análise do índice climático extremo Rx1D. Parâmetros da Distribuição GEV delimitados por clusters calculados para as bacias hidrográficas do Brasil. Parâmetro da locação (a), parâmetro da dispersão (b) e parâmetro da cauda (c). Períodos de retorno são plotados para 5 anos (d), 10 anos (e) e 50 anos (f).

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D).

A bacia Amazônica se destaca por caudas positivas e forte aumento de intensidade com o tempo de retorno, refletindo alta suscetibilidade a extremos severos.

Já as bacias do Paraná e Atlântico Sudeste, concentram chuvas intensas e frequentes, e as bacias do Nordeste e São Francisco apresentam menor severidade e caudas negativas, indicando baixo risco de extremos raros.

Desastre: Petrópolis (2022)

Chuvas de 260 mm em 6h provocaram deslizamentos generalizados e inundações.

Óbitos

241 pessoas.

Perdas econômicas

Cerca de R\$ 665 milhões.

Fonte: INMET; Defesa Civil Nacional (2022).

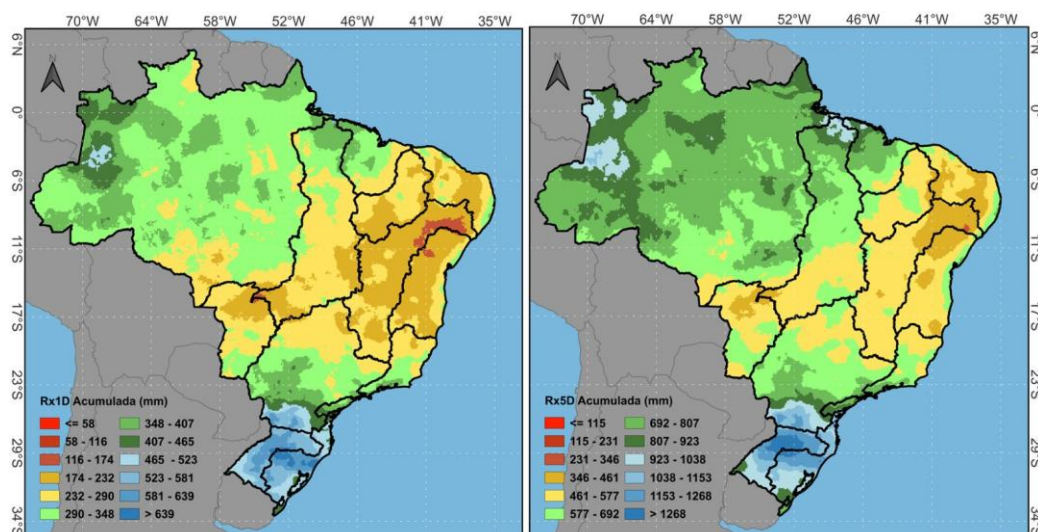


Figura 7 - Acumulado dos índices Rx1D e Rx5D no período entre março/2023 e março/2024.

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D)

Os índices Rx1D e Rx5D (Figura 7) evidenciam os maiores acumulados de chuva registrados no período recente, com destaque para o Sul do país, especialmente nas bacias Atlântico Sul, Paraná (porção sul) e Uruguai.

Nessas regiões, registros extremos acumulados de Rx5D ultrapassam 1000 mm, refletindo a persistência e o volume extremo das chuvas que culminaram no evento catastrófico ocorrido no Rio Grande do Sul (2024), caracterizado por desastres como inundações generalizadas, deslizamentos de terra e severas perdas socioeconômicas.

Esses resultados demonstram a relevância de analisar a chuva acumulada em períodos prolongados, uma vez que o Rx5D capta com maior precisão a continuidade dos eventos extremos, representando de forma mais realista o acúmulo que desencadeia os desastres. O Relatório N° 001 publicado pelo IRB(P&D) referente à catástrofe do Rio Grande do Sul descreve impactos e informações relacionados ao evento (IRB(P&D), 2025).

O Rx1D evidencia chuvas muito intensas em um único dia, enquanto o Rx5D mostra episódios persistentes de precipitação ao longo de cinco dias. Juntos, reforçam a compreensão da intensidade e da duração dos extremos pluviométricos. Esses padrões alinhados a estudos recentes (Souza Filho, Amorim e Reis, 2022; Marengo et al., 2023), indicam maior concentração e recorrência de eventos extremos nas bacias meridionais, ampliando os desafios para o planejamento territorial e a gestão de riscos hidrológicos.

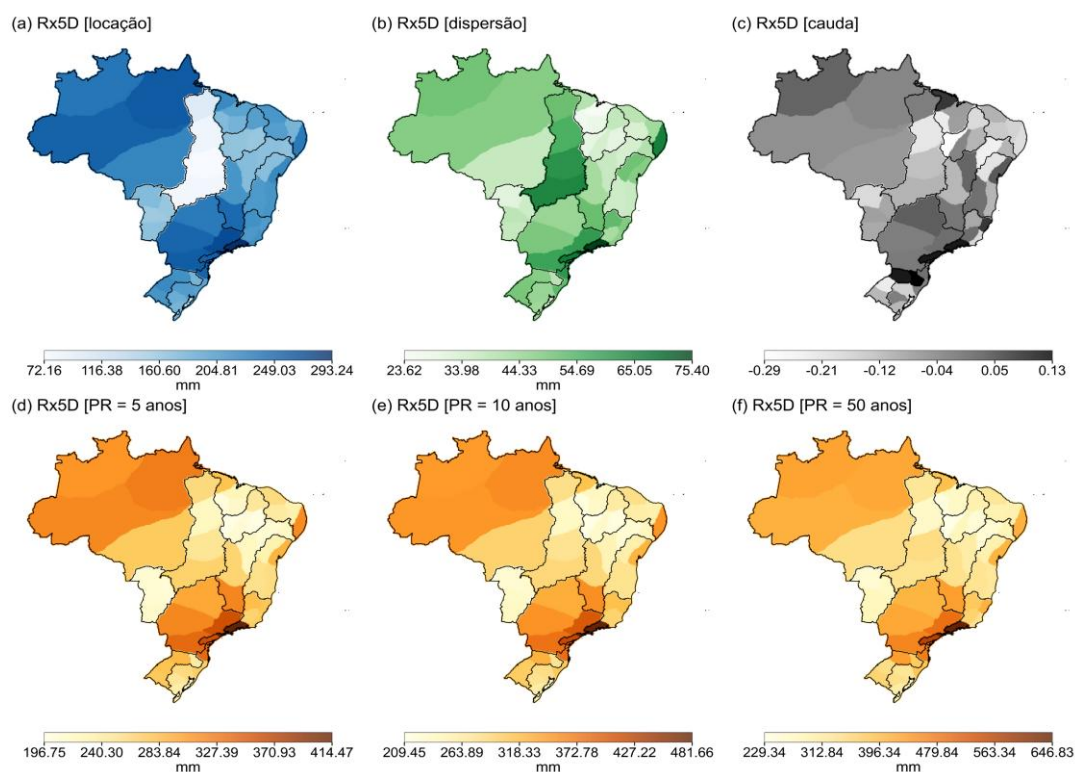


Figura 8 – Análise do índice climático extremo Rx5D. Parâmetros da Distribuição GEV delimitados por *clusters* calculados, para as bacias hidrográficas do Brasil. Parâmetro da locação (a), parâmetro da dispersão (b) e parâmetro da cauda (c). Períodos de retorno são plotados para 5 anos (d), 10 anos (e) e 50 anos (f).

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D).

No índice Rx5D, a cauda é mais acentuada nas bacias Amazônica e Atlântico Sudeste, indicando maior probabilidade de extremos severos.

Os retornos de 5, 10 e 50 anos mostram chuvas acima de 400 mm nas bacias Atlântico Sudeste, Paraná e Atlântico Sul.

Desastre: Rio Grande do Sul (2024)

Chuvas superiores a 300 mm em 48 h provocaram inundações e deslizamentos de terra em diversas regiões.

Óbitos: 182 pessoas.

Perdas econômicas: superiores a R\$ 12 bilhões.

Fonte: INMET; Defesa Civil. Nacional (2024); Governo do Estado do RS.

Secas

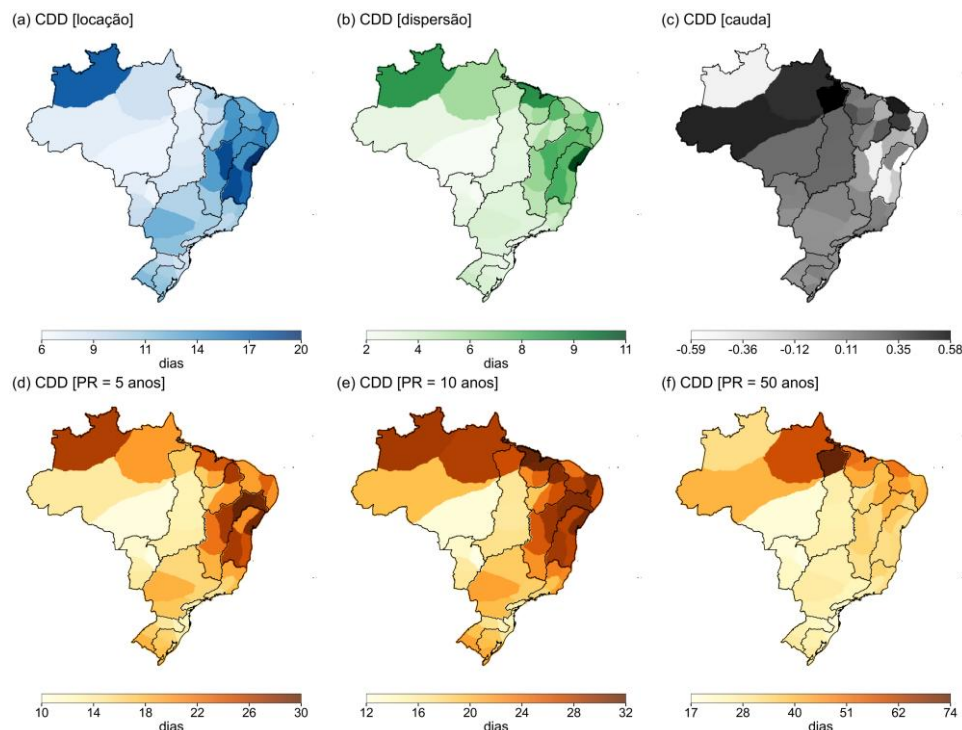


Figura 9 – Análise do índice climático extremo CDD. Parâmetros da Distribuição GEV delimitados por *clusters* calculados para as bacias hidrográficas do Brasil. Parâmetro da locação (a), parâmetro da dispersão (b) e parâmetro da cauda (c). Períodos de retorno são plotados para 5 anos (d), 10 anos (e) e 50 anos (f).

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D).

As bacias do Parnaíba, Atlântico Nordeste Oriental e São Francisco concentram os maiores riscos de secas severas, com caudas positivas.

Já as bacias do Sul e Sudeste apresentam secas mais curtas e previsíveis, associadas a caudas negativas e menor severidade dos eventos de seca.

Desastre: Seca no Nordeste (2012–2017)

Uma das secas mais severas do último século no Nordeste do Brasil.

Provocou redução drástica nos reservatórios e impactos prolongados na agricultura.

Fonte: Marengo et al. (2017); Theoretical and Applied Climatology.

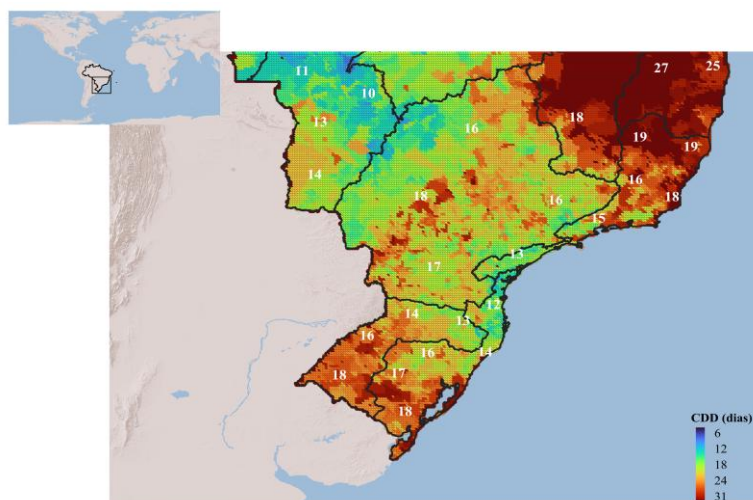


Figura 10 - Máximo histórico do índice CDD no período úmido (1961–2024) e períodos de retorno de 5 anos (em branco) estimados pela GEV nas principais bacias hidrográficas (por *cluster*) do Brasil.

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D).

As áreas destacadas em branco indicam os níveis para o período de retorno de 5 anos estimado pela GEV, revelando maior recorrência e severidade de estiagens mesmo em meses chuvosos. Observa-se que essas áreas abrangem a região Centro-Sul, responsável por cerca de 85% da produção nacional de grãos (MAPA, 2024).

A **Figura 10** evidencia uma variação espacial marcante entre as bacias hidrográficas, com tendência de aumento da duração dos períodos secos em direção ao Nordeste e Leste do país. Nas bacias Atlântico Sudeste, Atlântico Leste e São Francisco, atinge-se valores de até 24 dias sem chuvas, indicando estiagens prolongadas. Já nas bacias Uruguai, Atlântico Sul, Paraná e Paraguai, os períodos secos variam entre 10 e 18 dias, caracterizando estiagens curtas a moderadas.

De forma geral, o padrão do CDD indica interrupções significativas na regularidade das chuvas mesmo no período úmido, especialmente nas regiões Centro-Leste e Nordeste, onde a persistência das estiagens aumenta a vulnerabilidade hídrica e agrícola. Essa tendência está em consonância com o Relatório N° 002 do IRB (P&D), “Queimadas no Estado de São Paulo: agosto e setembro de 2024”, que descreve evidências do aumento da irregularidade pluviométrica e do prolongamento dos períodos secos nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, além de apontar perdas econômicas decorrentes dos desastres provocados por esses eventos extremos de seca (IRB(P&D), 2025).

Ondas de Calor

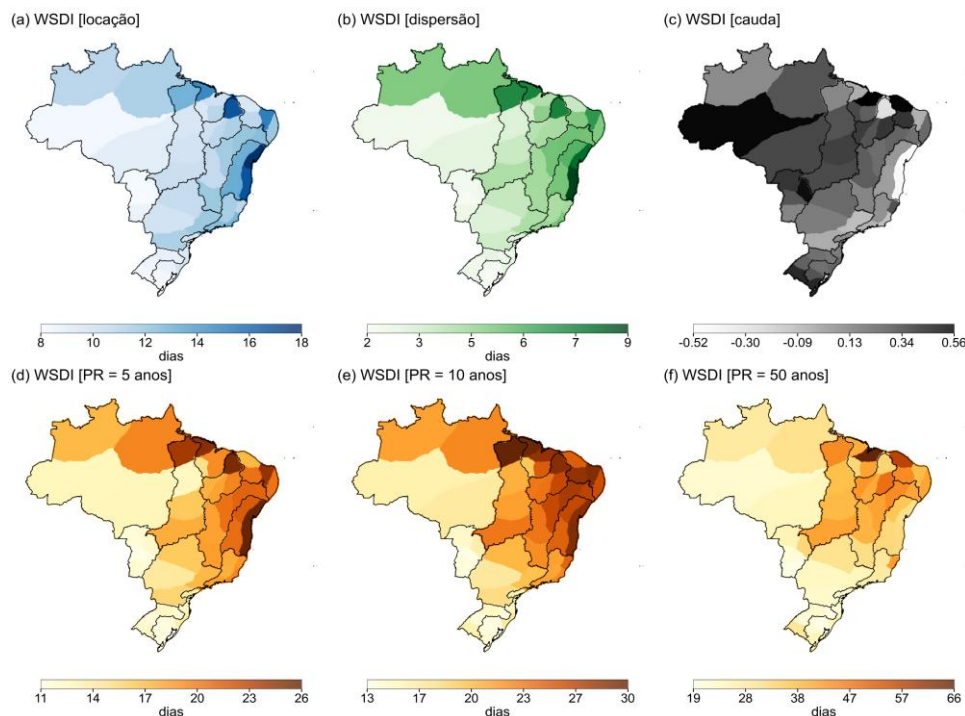


Figura 11 – Análise do índice climático extremo WSDI. Parâmetros da Distribuição GEV delimitados por *clusters* calculados para as bacias hidrográficas do Brasil. Parâmetro da locação (a), parâmetro da dispersão (b) e parâmetro da cauda (c). Períodos de retorno são plotados para 5 anos (d), 10 anos (e) e 50 anos (f).

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D).

O parâmetro de cauda do índice WSDI revela valores positivos expressivos nas bacias Amazônica, Atlântico Nordeste Ocidental e Oriental, Paraguai e Tocantins-Araguaia.

No retorno de 5 e 10 anos, as bacias Atlântico Nordeste Oriental, Parnaíba, São Francisco e Atlântico Sudeste registram maior número de dias com ondas de calor, como as mais afetadas, com eventos que ultrapassam 28 dias consecutivos.

Desastre: Onda de Calor no Brasil (2023)

Temperaturas até 46 °C em áreas do Centro-Oeste e Sudeste. Sete ondas de calor sucessivas entre agosto e dezembro de 2023.

Fonte: Marengo et al. (2025); Frontiers in Climate; INMET (2023).

Ondas de frio

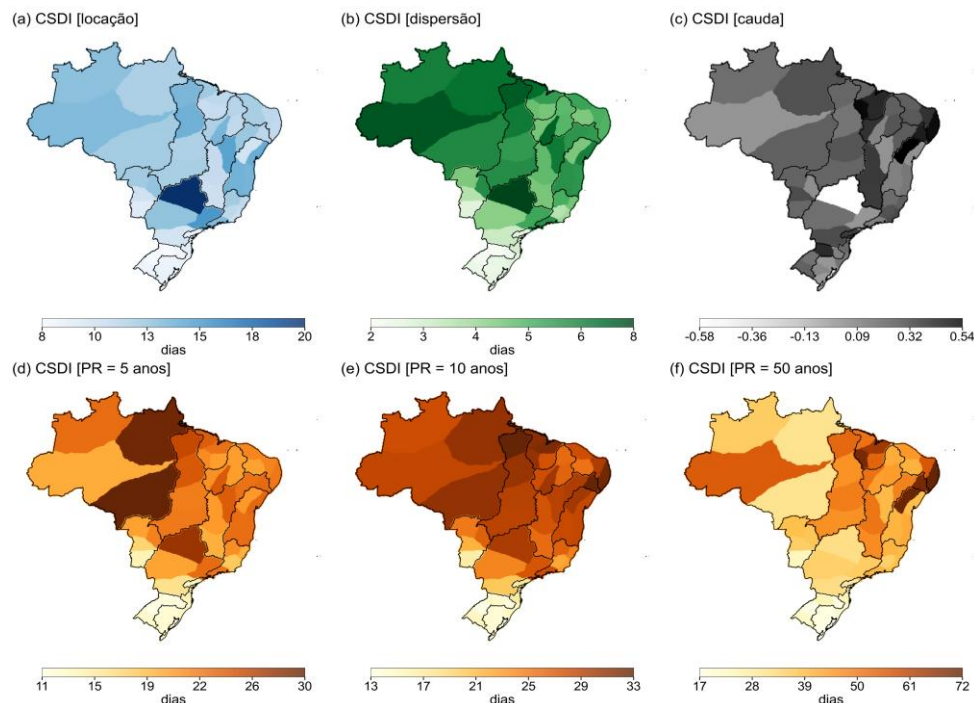


Figura 12– Análise do índice climático extremo CSDI. Parâmetros da Distribuição GEV delimitados por *clusters* calculados para as bacias hidrográficas do Brasil. Parâmetro da locação (a), parâmetro da dispersão (b) e parâmetro da cauda (c). Períodos de retorno são plotados para 5 anos (d), 10 anos (e) e 50 anos (f).

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D).

O índice CSDI mostra maior intensidade das ondas de frio nas bacias Paraná, Paraguai, Atlântico Sudeste e Uruguai, e maior duração nas bacias Parnaíba, São Francisco e Atlântico Nordeste.

O retorno de 10 anos indica expansão dos eventos frios para o Centro-Oeste e Sudeste, com duração média entre 21 e 27 dias.

Desastre: Ondas de Frio no Brasil (2024)

Massa polar intensa atingiu o Centro-Sul em julho de 2024.

Safra de café 2024 teve queda de 1,6%, totalizando 54,2 milhões de sacas, afetada por geadas.

Fonte: INMET (2024); (CONAB) (2025).

Considerações Finais

A base climática desenvolvida pelo IRB(P&D) foi construída a partir de um conjunto robusto de 68 índices climáticos padronizados, derivados de variáveis meteorológicas fundamentais, como precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, evapotranspiração, velocidade do vento e radiação solar.

Esses índices seguem a metodologia proposta pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e foram calculados para todo o território brasileiro em grids de alta resolução que permitem análises detalhadas, em pesquisas e desenvolvimento de produtos regionalizados. Os dados cobrem o período histórico de 1961 a 2024 (63 anos), com foco na identificação e caracterização de eventos climáticos extremos, e não de desastres registrados. O longo período permite compreender o comportamento do clima e validar estudos futuros com base no conhecimento da variabilidade histórica.

Para aprimorar a interpretação espacial dos resultados, foram realizadas clusterizações nas regiões das bacias hidrográficas brasileiras, com o objetivo de agrupar áreas que compartilham características climáticas semelhantes. Essa etapa permitiu reduzir a variabilidade local e aumentar a robustez estatística das análises, possibilitando a aplicação mais precisa da distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) aos índices selecionados.

A GEV foi utilizada para modelar o comportamento dos valores máximos observados nas séries históricas, ajustando parâmetros que representam a intensidade [locação], a variabilidade [dispersão] e a assimetria dos extremos [cauda]. Essa modelagem permite estimar períodos de retorno para cada tipo de evento climático, ou seja, a frequência média com que eventos de determinada magnitude tendem a ocorrer.

A **Figura 13** apresenta a localização dos cinco maiores eventos de cada índice climático extremo (Rx1D, Rx5D, CDD, WSDI e CSDI) acumulados entre março/2023 e março/2024, sobrepostos ao mapa do Produto Interno Bruto (PIB) per capita municipal. Essa integração espacial permite identificar os pontos de maior severidade climática e relacioná-los à

distribuição da riqueza no território brasileiro no último ano, destacando áreas com alta recorrência de extremos e elevado valor econômico agregado.

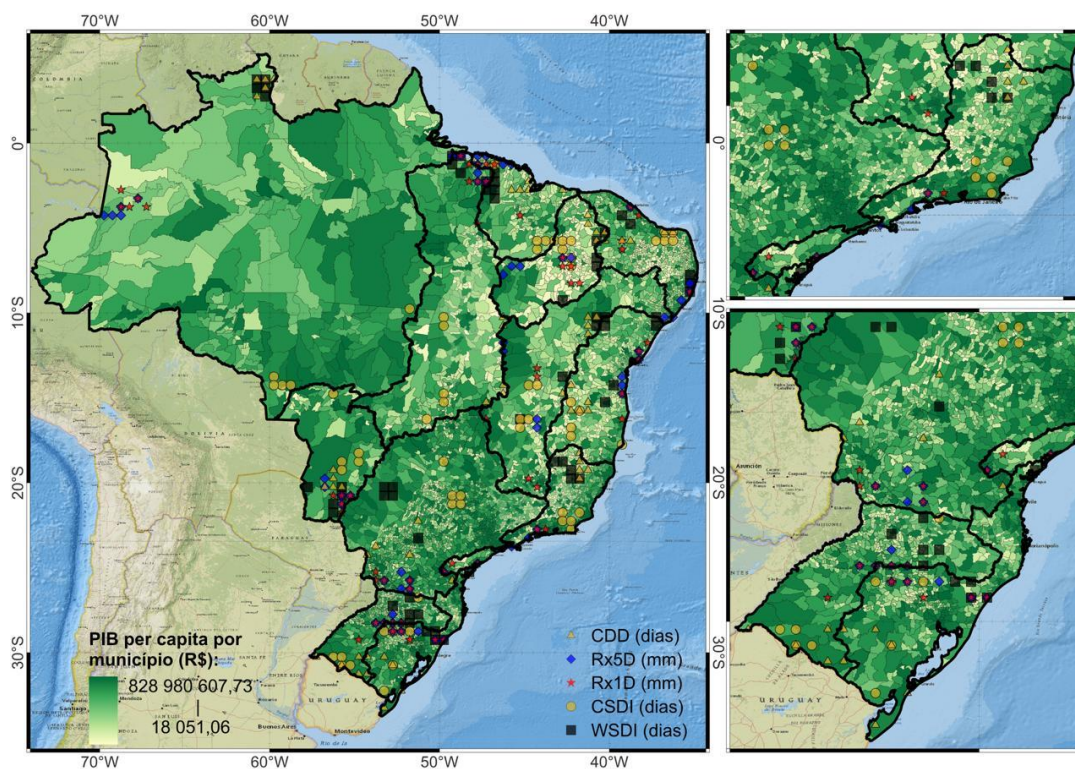


Figura 13- Localização dos cinco maiores eventos climáticos extremos, por bacia hidrográfica, sobre o Produto Interno Bruto (PIB) per capita municipal no Brasil (sombreado). Dados referentes ao acumulado entre março/2023 e março/2024 de cada índice climático extremo.

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Os eventos de chuvas intensas (Rx1D e Rx5D) concentraram-se predominantemente nas regiões Sul e Sudeste, notadamente nas bacias do Paraná, Atlântico Sudeste e Uruguai, áreas de PIB per capita elevado e alta densidade populacional. Esses eventos correspondem a episódios de chuvas intensas e acumuladas, que impactam fortemente a infraestrutura urbana, o transporte e o setor produtivo, gerando prejuízos econômicos significativos. A recorrência de extremos em locais de maior concentração de ativos reforça a importância de instrumentos de resseguro e modelagem atuarial regionalizada para absorção das perdas.

Na região Nordeste, observa-se o predomínio de eventos secos (CDD), representando longos períodos de estiagem, especialmente nas bacias do São Francisco e do Atlântico Leste. Nessas áreas, onde o PIB per capita é mais baixo e a economia é fortemente dependente da agropecuária, os impactos dos eventos extremos são amplificados pela baixa

capacidade de adaptação e recuperação econômica. O avanço da aridez e das ondas de calor (WSDI) reforça a vulnerabilidade social e produtiva, evidenciando a necessidade de mecanismos de subvenção.

A região Norte, abrangendo a Bacia Amazônica, apresenta ocorrência de eventos de chuvas intensas em áreas de PIB reduzido. Apesar da alta pluviosidade natural, as chuvas intensas identificadas pelos índices Rx1D e Rx5D tendem a provocar impactos localizados sobre comunidades ribeirinhas e áreas urbanas com infraestrutura precária. Nessa região, o desafio é socioambiental, e não apenas econômico, exigindo estratégias integradas de prevenção e adaptação climática.

Em síntese, a distribuição dos maiores eventos climáticos mostra que as áreas de maior PIB per capita concentram a maior frequência e intensidade de extremos de chuva, enquanto as regiões de menor renda enfrentam principalmente secas e ondas de calor prolongadas. Essa correlação evidencia o paradoxo climático brasileiro: os territórios mais ricos sofrem maiores prejuízos econômicos absolutos, enquanto os mais pobres enfrentam maior vulnerabilidade social e estrutural.

Com base nessa abordagem, o IRB(P&D) obteve uma caracterização detalhada dos índices de extremos em diferentes regiões do país, consolidando uma base técnica robusta para estimar períodos de retorno e compreender a variabilidade climática brasileira. O conhecimento gerado representa um avanço essencial para o setor segurador e ressegurador, ao fornecer subsídios para avaliar a recorrência e a probabilidade de eventos extremos, aprimorando a precificação atuarial, o dimensionamento de reservas e o planejamento de instrumentos de proteção financeira. Essa diferenciação regional evidencia a importância da Base Climática IRB(P&D) como ferramenta estratégica para o desenvolvimento de modelos de precificação sensíveis às condições locais e para o fortalecimento da resiliência financeira do país diante da intensificação dos riscos climáticos e da necessidade de políticas eficazes de adaptação.

Referências

AON. **Climate and Catastrophe Insight 2025**. Chicago: Aon, 2025. Disponível em: <https://assets.aon.com/-/media/files/aon/reports/2025/2025-climate-catastrophe-insight.pdf>. Acesso em: 21 out. 2025.

ALIANÇA BRASILEIRA PELA CULTURA OCEÂNICA. **Brasil em transformação: 2024, o ano mais quente da história**. Rio de Janeiro: Maré de Ciência, 2024. Disponível em: <https://maredeciencia.eco.br/wp-content/uploads/2024/12/Brasil-em-transformacao-1-2024-o-ano-mais-quente-da-historia.pdf>. Acesso em: 21 out. 2025.

BRASIL. **Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA)**. Agropecuária Brasileira em Números – Edição 2024. Brasília: MAPA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/agropecuaria-brasileira-em-numeros/abn-2024-05.pdf>. Acesso em: 27 out. 2025.

CEMADEN – CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. **Relatório anual de alertas de desastres naturais no Brasil: 2024**. São José dos Campos: CEMADEN, 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safra de café encerra em 54,2 milhões de sacas em 2024, impactada por clima adverso**. Brasília: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-de-cafe-encerra-em-54-2-milhoes-de-sacas-em-2024-impactada-por-clima-adverso>. Acesso em: 22 out. 2025.

EM-DAT – THE INTERNATIONAL DISASTER DATABASE. **EM-DAT Annual Report 2024**. Brussels: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Université Catholique de Louvain, 2024. Disponível em: https://files.emdat.be/reports/2024_EMDAT_report.pdf. Acesso em: 21 out. 2025.

EMBRECHTS, Paul; KLÜPPELBERG, Claudia; MIKOSCH, Thomas. **Modelling Extremal Events for Insurance and Finance**. Berlin: Springer-Verlag, 1997. 648 p. (Applications of Mathematics: Stochastic Modelling and Applied Probability, v. 33). ISBN 978-3-540-60931-5.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Adverse climatic conditions drive coffee prices to highest level in years**. Rome: FAO, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/newsroom/detail/adverse-climatic-conditions-drive-coffee-prices-to-highest-level-in-years/en>. Acesso em: 17 set. 2025.

FISHER, R. A.; TIPPETT, L. H. C. **Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample**. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, v. 24, n. 2, p. 180–190, 1928.

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; TANK, A. K.; PETERSON, T. **Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century**. Climate Research, v. 19, n. 3, p. 193–212, 2002.

ICO – INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. **Coffee Market Report: Statistics Section.** London: International Coffee Organization, 2025. Disponível em: <https://ico.org/pt/resources/coffee-market-report-statistics>. Acesso em: 17 set. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acesso em: 21 out. 2025.

IRB BRASIL RE. **Relatório N° 001 – Catástrofe do Rio Grande do Sul.** Rio de Janeiro: IRB Brasil RE – Pesquisa & Desenvolvimento (P&D), 2025.

IRB BRASIL RE. **Relatório N° 002 – Queimadas em São Paulo.** Rio de Janeiro: IRB Brasil RE – Pesquisa & Desenvolvimento (P&D), 2025.

JENKINSON, A. F. **The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) of meteorological elements.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 81, p. 158–171, 1955. DOI: 10.1002/qj.4970813480.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. **Drought in Northeast Brazil—past, present, and future.** Theoretical and Applied Climatology, v. 129, n. 1-2, p. 1189–1210, 2017. DOI: 10.1007/s00704-016-1840-8.

MAKKONEN, Lasse; TIKKANMÄKI, Maria. An improved method of extreme value analysis. **Journal of Hydrology X**, v. 2, p. 100012, 2019. Elsevier. DOI: 10.1016/j.hydroa.2018.100012.

MARENGO, J. A. et al. **Tendências e extremos de precipitação no Brasil em um clima em aquecimento.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 38, n. 2, 2023. DOI: 10.1590/0102-778638201202.

MARENGO, J. A. et al. **Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in Central South America.** *Frontiers in Climate*, v. 7, p. 1529082, 2025. DOI: 10.3389/fclim.2025.1529082.

MURPHY, Kevin P. Probabilistic Machine Learning: An Introduction. Cambridge: MIT Press, 2022. 1.056 p. ISBN 978-0-262-04699-4.

REISS, Rolf-Dieter; THOMAS, Michael. Statistical Analysis of Extreme Values: with Applications to Insurance, Finance, Hydrology and Other Fields. 3. ed. Basel: Birkhäuser, 2007. 511 p. ISBN 978-3-7643-7294-4.

SOUZA FILHO, S.; AMORIM, R. S.; REIS, D. S. **Análise de extremos de precipitação nas regiões hidrográficas brasileiras.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 37, n. 4, 2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME FINANCE INITIATIVE – UNEP FI. **Insuring the climate transition: Enhancing the insurance industry's assessment of climate change futures.** Geneva: UNEP FI, 2021.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. **Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013).** International Journal of Climatology, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016. DOI: 10.1002/joc.4518.

ZHANG, X. et al. Indices **for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data.**

Apêndice

Tabela 2 - Índices climáticos extremos provenientes da Base Climática IRB(P&D).

Sigla	Índice	Definição	Unidade
R95P	Precipitações Extremas > 95th	Precipitação total mensal, quando a precipitação é > percentil 95, no período de referência	mm
R99P	Precipitações Extremas > 99th	Precipitação total mensal, quando a precipitação é > percentil 99, no período de referência	mm
R80	Dias Úmidos	Número de dias com precipitação > 80 mm, no mês	dias
R100	Dias Úmidos	Número de dias com precipitação > 100 mm, no mês	dias
Rx5D	Precipitação Máxima em 5 Dias	Precipitação máxima agregada em 5 dias consecutivos, no mês	mm
CWD	Dias Úmidos Consecutivos	Número máximo de dias consecutivos no mês quando a precipitação diária foi ≥ 1 mm	dias
CDD	Dias Secos Consecutivos	Número máximo de dias consecutivos no mês quando a precipitação diária foi < 1 mm	dias
Rx1D	Precipitação Máxima em 1 Dia	Precipitação máxima em 1 dia, no mês	mm
PRCPTOT	Precipitação Total Acumulada	Precipitação total acumulada em dias com precipitação > 1 mm, no mês	mm
TX35	Máximo de Dias Consecutivos com Temperatura Máxima acima de 35 °C	Número máximo de dias consecutivos no mês quando a Temperatura Máxima foi > 35 °C	dias
TX10p	Dias Muito Frios	Porcentagem de dias no mês com Temperatura Máxima < percentil 10, no período de referência	%
TX90p	Dias Muito Quentes	Porcentagem de dias no mês com Temperatura Máxima > percentil 90, no período de referência	%
WSDI	Ondas de Calor	Número total de dias com pelo menos 6 dias consecutivos de Temperatura Máxima > percentil 90 (ondas de calor) observado no período de referência	dias
TXX	Maior Temperatura Máxima Diária	Maior temperatura máxima diária, no mês	°C
TN0	Máximo de dias com Temperatura Mínima Consecutiva abaixo de 0 °C	Número máximo de dias consecutivos no mês quando a Temperatura Mínima foi < 0 °C	dias

TN5	Máximo de dias com Temperatura Mínima Consecutiva abaixo de 5 °C	Número máximo de dias consecutivos no mês quando a Temperatura Mínima foi < 5 °C	dias
CSDI	Ondas de Frio	Número total de dias com pelo menos 6 dias consecutivos de Temperatura Mínima < percentil 10 (ondas de frio) observado no período de referência	dias
TNN	Menor Temperatura Mínima Diária	Menor Temperatura Mínima diária, no mês	°C
E10p	Dias com Evapotranspiração reduzida	Porcentagem de dias no mês com evapotranspiração < percentil 10 observado no período de referência	%
U30	Dias com Umidade Relativa Consecutiva abaixo de 30%	Número máximo de dias consecutivos no mês quando a Umidade Relativa foi < 30 %	dias
U70	Dias com Umidade Relativa Consecutiva acima de 70%	Número máximo de dias consecutivos no mês quando a Umidade Relativa foi > 70 %	dias
MIN_RH	Menor Umidade Relativa Diária	Menor Umidade Relativa diária, no mês	%
MAX_Rs	Maior Radiação Solar Diária	Maior Radiação Solar diária, no mês	MJ*m ⁻¹
MAX_U2	Maior Velocidade do Vento Diária	Maior velocidade do vento diária, no mês	m/s

***Período de Referência: 1961-2024.**

Fonte: Elaboração IRB(P&D). Dados: Base de índices climáticos IRB(P&D).

IRB(P&D)