



NOTA TÉCNICA SOBRE AS PROJEÇÕES CLIMÁTICAS PARA O ESTADO DE SÃO PAULO, ANO BASE 2040¹

agosto de 2022

¹ Elaboração: GT Clima/ZEE (Nádia Gilma Beserra de Lima - IG; Maria Fernanda Pelizzon Garcia - CETESB, Gustavo Armani - IG e Jussara de Lima Carvalho – AI/SIMA). A equipe do GT Clima agradece a atenção, disponibilidade e orientação da equipe do INPE/CPTEC, Dra. Sin Chan Chou e Dr. André Lyra, durante todo o processo de obtenção das projeções climáticas do estado de São Paulo.

INTRODUÇÃO

O clima possui significativa relevância para estudos e políticas ambientais e sociais, pois sua dinâmica é responsável pelos tipos e intensidade de processos geomorfológicos, formação dos solos, evolução da biodiversidade, distribuição dos recursos hídricos e impactos socioeconômicos. Assim, o conhecimento da dinâmica climática fornece informações preciosas sobre o ritmo habitual dos atributos climáticos, que inclui os eventos extremos, e traz elementos para a discussão sobre formas de uso e ocupação do território no passado, no presente e no futuro. Trata-se, portanto, de importante indicativo de planejamento para as atividades humanas.

A variabilidade é uma das principais características do clima, no entanto, estudos reunidos e publicados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) têm demonstrado um aumento da temperatura média do ar oriundo da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, proveniente da ação antrópica, cujo impacto acrescenta ainda mais variabilidade nesse cenário. A evidência da influência humana no sistema climático tem crescido desde a publicação do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (AR4) em 2007. Já o Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5), publicado em 2014, indica que é extremamente provável que mais da metade do aumento observado na temperatura média global da superfície nos últimos 70 anos tenha sido causada pelo aumento antropogênico na concentração de gases de efeito estufa.

Diante disso, a temática climática se impõe como fundamental neste trabalho, pois, se por um lado o clima influencia diretamente a sociedade em todas as suas manifestações, por outro, as ações antrópicas intensivas influenciam o clima, principalmente ao considerar escalas inferiores do clima.

O ZEE do estado de São Paulo inova ao empenhar esforços de internalização da temática da Mudança Climática na articulação entre as diferentes políticas que atuam no território estadual e ao considerar uma diretriz voltada exclusivamente a essa temática, definida como “Resiliência às Mudanças Climáticas”, na qual se busca identificar e reduzir as vulnerabilidades sociais e ambientais, bem como preparar o estado para situações de risco.

CENÁRIOS DE EMISSÃO RCPs - TRAJETÓRIAS DE CONCENTRAÇÃO REPRESENTATIVA

Os cenários socioeconômicos e de emissão são usados na pesquisa climática para fornecer descrições plausíveis de como o futuro pode ser definido com relação a um conjunto de variáveis, incluindo mudanças socioeconômicas, tecnológicas, uso de energia, emissões de gases de efeito estufa e poluentes do ar. Eles são usados como insumo para as execuções do modelo climático e como base para a avaliação de possíveis impactos climáticos e opções de mitigação e custos associados (VAN VUUREN *et al.*, 2011).

Os *Representative Concentration Pathways* (RCPs) ou Caminhos de Concentração Representativa são cenários que incluem séries temporais de emissões e concentrações de todo o conjunto de gases de efeito estufa (GEE), aerossóis e gases quimicamente ativos, bem como uso e cobertura do solo (MOSS *et al.*, 2008). As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, que servem como base aos RCPs, ocorrem principalmente devido ao tamanho da

população, à atividade econômica, ao estilo de vida, ao uso de energia, aos padrões de uso do solo, à tecnologia e às políticas climáticas (IPCC, 2014). Quatro RCPs são apresentados no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5) como bases para as previsões e projeções climáticas:

- RCP 2.6: Uma via em que a forçante radiativa atinge o pico de aproximadamente 3 W.m^{-2} antes de 2100 e depois diminui;
- RCP 4.5 e RCP 6.0: Duas vias intermediárias de estabilização, nas quais a forçante radiativa seria estabilizada em aproximadamente $4,5 \text{ W.m}^{-2}$ e $6,0 \text{ W.m}^{-2}$ após 2100.
- RCP 8.5: Um caminho alto para o qual a forçante radiativa atinge mais de $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ até 2100 e continua a aumentar por algum tempo.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibiliza projeções climáticas realizadas tendo os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 como referências.

Para a análise no âmbito do ZEE considerou-se o cenário RCP 8.5, por ser o cenário menos conservador e o mais plausível de ocorrer, como apontam publicações recentes (SCHWALMA; GLENDONA; DUFFYA, 2020). Sendo o cenário mais pessimista, sua escolha é suportada também pelo princípio da precaução. O RCP 8.5 pressupõe um futuro em que não houve mudanças das atuais políticas públicas para redução das emissões, com emissões de CO_2 em 2100 três vezes maior do que as atuais, incremento rápido das emissões de metano e expansão de áreas agrícolas e de pastagens para suprir a demanda devido ao crescimento da população mundial, projetada em 12 bilhões em 2100. Este cenário é também baseado em baixa taxa de crescimento tecnológico e alta dependência dos combustíveis fósseis (BJØRNÆS, 2013).

MODELOS CLIMÁTICOS

A avaliação dos impactos das mudanças climáticas em vários setores socioeconômicos é uma tarefa que deveria ser aplicada para planejamento em longo prazo. Os modelos globais de clima (GCMs) são a melhor ferramenta para fornecer informações futuras sobre mudanças climáticas em função de diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa. No entanto, a resolução espacial desses modelos varia entre 200 a 100 km. Assim, os modelos climáticos regionais (RCMs) desempenham um papel importante no aumento de escala e geração de dados cada vez mais detalhados (CHOU *et al.*, 2014a) para que seja possível diagnosticar e avaliar melhor os impactos climáticos em escala local.

Nos últimos anos, houve avanço significativo na tecnologia e na arquitetura computacional de integração numérica de modelos, bem como na representação matemática dos processos físicos, químicos e biológicos e suas complexas interações no sistema climático global. Apesar dos avanços científicos e tecnológicos, os resultados dos modelos devem ser usados com cautela em virtude de, pelo menos, três categorias de incertezas: i) aquelas relacionadas aos cenários de emissões; ii) as relacionadas à variabilidade natural do sistema climático; e iii) as inerentes ao próprio modelo em representar os processos físicos e

antrópicos (BRASIL, 2016). A despeito das incertezas citadas, as projeções climáticas são informações inovadoras e valiosas tanto para fins de mitigação de impactos junto à sociedade que habita os diferentes biomas brasileiros, quanto para aperfeiçoar o planejamento de ações de adaptação e minimização dos efeitos das mudanças climáticas.

A reduzida resolução espacial dos modelos globais implica a necessidade de métodos de *downscaling* (aumento da resolução espacial, com maior detalhamento da informação) que possam ser aplicados aos cenários da mudança do clima a partir dos modelos globais, a fim de que se obtenham projeções mais detalhadas para determinadas regiões, com uma resolução espacial mais alta do que a fornecida por um modelo global. Isso é de grande utilidade, particularmente para os estudos dos impactos da mudança do clima, na gestão e na operação dos recursos hídricos, nos ecossistemas naturais, nas atividades agrícolas e até mesmo na saúde (BRASIL, 2016).

O INPE avaliou os diferentes cenários de mudança do clima propostos pelos modelos globais do AR5 do IPCC, os RCPs, e aplicou o método de *downscaling* dinâmico para o Brasil. Esse método consiste em um melhor detalhamento das projeções de mudanças climáticas provenientes de modelos climáticos globais para se obter projeções climáticas mais detalhadas, isto é, com maior resolução espacial, e adequada para regiões específicas, como litoral, bacias hidrográficas ou vales, ou estados. O melhor detalhamento é obtido alimentando modelos regionais atmosféricos com as projeções dos modelos globais climáticos (BRASIL, 2016).

As simulações do modelo Eta, com resolução de 20 km, realizadas pelo INPE, foram avaliadas para o período histórico de 1961 a 1990, usando diferentes modelos globais. As simulações reproduziram o clima do período histórico na América do Sul razoavelmente bem. A avaliação das mudanças climáticas futuras indicou uma forte redução da precipitação durante a estação chuvosa na parte central do continente e um aumento da precipitação na parte sul do Brasil até o final do século, com tendências para aumentar os extremos de precipitação no sul e no sudeste do Brasil no futuro (CHOU *et al.*, 2014b). Mudanças nos extremos climáticos são a principais questões a serem analisadas nos setores vulneráveis e para propor medidas de adaptação (LYRA *et al.*, 2018).

PROCEDIMENTO METODOLÓGICOS

As projeções climáticas para o estado de São Paulo foram elaboradas a partir da orientação da Dra. Chou Chin Chan (CPTEC/INPE) com a utilização de dados gerados pelo CPTEC/INPE e disponibilizados na Plataforma PROJETA (Projeções de mudança do clima para a América do Sul, regionalizadas pelo modelo Eta), que tem como objetivo disponibilizar dados de cenários climáticos com ampliação de escala (*downscaling*) para melhor estudo de regiões ou áreas de menores dimensões.

Os cenários foram gerados a partir do modelo climático regional Eta, configurado para saída na resolução espacial de 20 km para América do Sul. Essa ampliação de escala foi produzida a partir dos modelos climáticos globais HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 e BESM. A presente simulação teve como base o cenário RCP 8.5, proposto pelo IPCC, e os dados foram obtidos do PROJETA para os períodos de 1961-1990 e 2020-2050. Isso se fez necessário

porque, ao se trabalhar com modelos climáticos, não é recomendado analisar um dado estático obtido a partir de um único modelo, e sim, identificar um intervalo numérico possível de alterações (exemplo: uma faixa de variação de temperatura ou de intensidades de precipitação).

O PROJETA disponibiliza 33 elementos climáticos e 26 índices climáticos. Foram selecionados dois elementos climáticos e oito índices de extremos climáticos para serem analisados com foco no estado de São Paulo, conforme Tabela 01, considerando os parâmetros mais abrangentes para o planejamento territorial do ZEE.

Tabela 01: Elementos e índices de extremos climáticos selecionados para as projeções climáticas do estado de São Paulo, ano base 2040.

Elementos e Índices de extremos climáticos	
PrecTot	Precipitação Total anual
CDD	Número máximo de dias consecutivos sem chuva no ano (dias)
RX5day	Máxima precipitação anual em 5 dias consecutivos (mm)
R95p	Precipitação anual total dos dias em que P > percentil 95 (mm). Indica precipitação de intensidade extrema
TP2M	Temperatura média do ar a 2 m
TNn	Menor temperatura mínima anual (°C)
TXn	Menor temperatura máxima anual (°C)
TXx	Maior temperatura máxima anual (°C)
CSDI	Número máximo de dias consecutivos no ano com Tmin diária menor que percentil 10 (dias)
WSDI	Número máximo de dias consecutivos no ano com Tmáx > percentil 90 (dias)

Fonte: PROJETA/INPE

Após a obtenção dos dados, calculou-se o desvio entre o período observado (1961-1990) e o projetado (2020-2050) para o cenário RCP 8.5, para cada modelo e cada variável selecionada. Em seguida foram selecionados, entre os desvios, os que representavam o máximo e o mínimo desvio, visando com isso obter um intervalo de tendências possíveis para cada variável analisada no estado de São Paulo. Os mapas deverão ser analisados considerando sempre o intervalo entre o máximo e o mínimo desvio obtido, visando abranger todos os intervalos de variação projetados pelos modelos e com isso analisar a tendência definida para cada atributo selecionado.

RESULTADOS PRELIMINARES

A seguir são apresentadas algumas constatações obtidas a partir das análises dos mapas gerados no cenário RCP 8.5, projetadas para o período de 2020 a 2050, apresentados no Anexo I.

- As mudanças projetadas para a temperatura média anual apresentam sinal positivo (aquecimento) em todas as análises.
- As projeções mais severas foram obtidas no cenário RCP 8.5, do máximo desvio obtido entre os modelos, com aumento de 1°C a 4°C, principalmente no centro e norte do estado de São Paulo.
- As menores temperaturas mínimas anuais também apresentam tendência de aumento, de até 4°C. As máximas temperaturas também tendem a aumentar, em até 6°C.
- Diminuição na duração das ondas de frio e aumento na duração das ondas de calor em todas as análises projetadas.
- Precipitação apresenta maior variabilidade ao longo do estado a depender do modelo e da região analisada.
- Aumento do período de estiagem em todo o estado.
- Precipitação extrema com destaque para a Serra da Mantiqueira, com aumento de 200 a 270 mm no total anual.
- Precipitação em 5 dias consecutivos apresentou cenários de aumento de intensidade, principalmente na Serra da Mantiqueira e no Alto Vale do Ribeira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse foi um primeiro olhar sobre as projeções climáticas voltadas para o estado de São Paulo, visando sua incorporação no planejamento ambiental territorial com foco em variáveis específicas e índices de extremos climáticos para análise de suas tendências.

Ressalta-se que outras variáveis estão disponíveis na plataforma Projeta (CPTEC/INPE) e merecem uma melhor análise dependendo da temática em que as projeções climáticas possam ser utilizadas, como por exemplo: biodiversidade, recursos hídricos, geração de energia, entre outros.

Por fim, cabe destacar que esse trabalho definiu o processo metodológico que poderá ser replicado para futuras análises, tanto em outras temáticas como para atualização de novas projeções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BJØRNÆS, C. **A guide to Representative Concentration Pathways**. CICERO. Center for International Climate and Environmental Research, 2013.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil** / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

CHOU, S. C., *et al.* Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-527, 2017.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 438-454, 2014a. doi:10.4236/ajcc.2014.35039. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-527, 2014b. doi: 10.4236/ajcc.2014.35043. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.Vaklh_IVikp.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C. P.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. 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**, v. 132, p. 663-682, 2017. doi:10.1007/s00704-017-2067-z. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>

Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

Executive Summary: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3es.pdf>

Volume 1: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3v1.pdf>

Volume 2: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3v2.pdf>

Volume 3: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3v3.pdf>

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 5, 2011.

SCHWALMA, C. R.; GLENDONA, S.; DUFFYA, P. B. RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. **PNAS**, V. 117, n. 33, 2020.

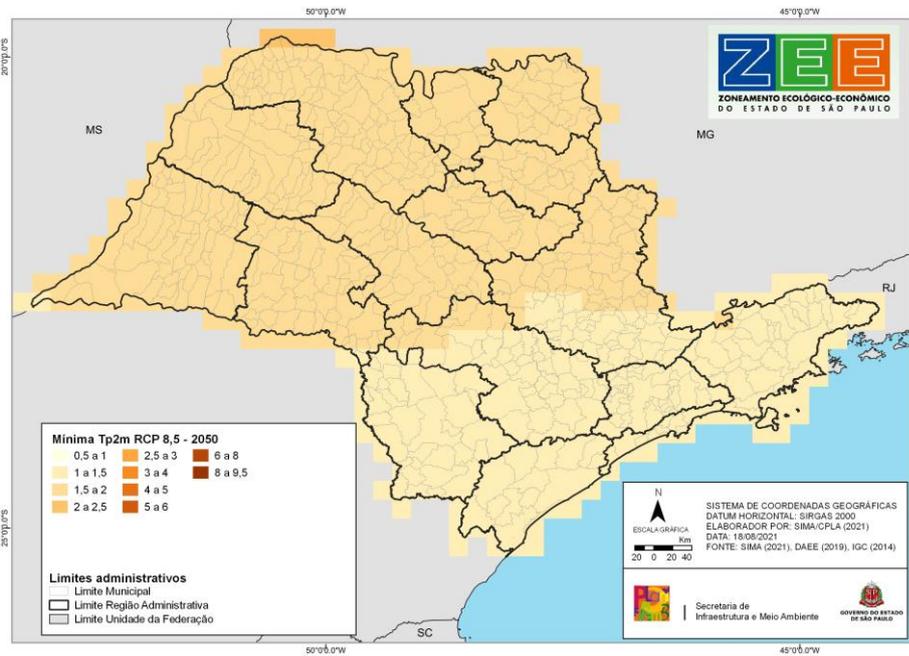
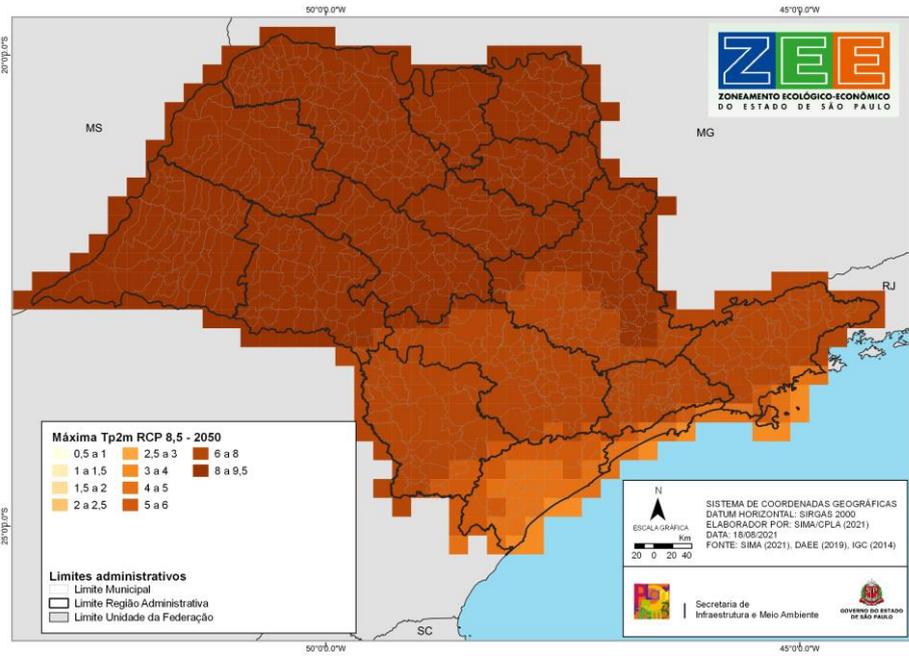
ANEXO I² - PROJEÇÕES CLIMÁTICAS PARA O ESTADO DE SÃO PAULO NO CENÁRIO RCP-8.5 PARA O PERÍODO DE 2020 – 2050.

Para cada elemento e índice climático são apresentados dois mapas: o primeiro apresenta o máximo desvio obtido entre os modelos e o segundo, o mínimo desvio obtido.

² A leitura dos mapas deve ser feita com cautela, pois as classes de legenda representam o universo potencial do fenômeno até o cenário de 2100 (e não as classes existentes do fenômeno em 2050, horizonte analisado no ZEE-SP).

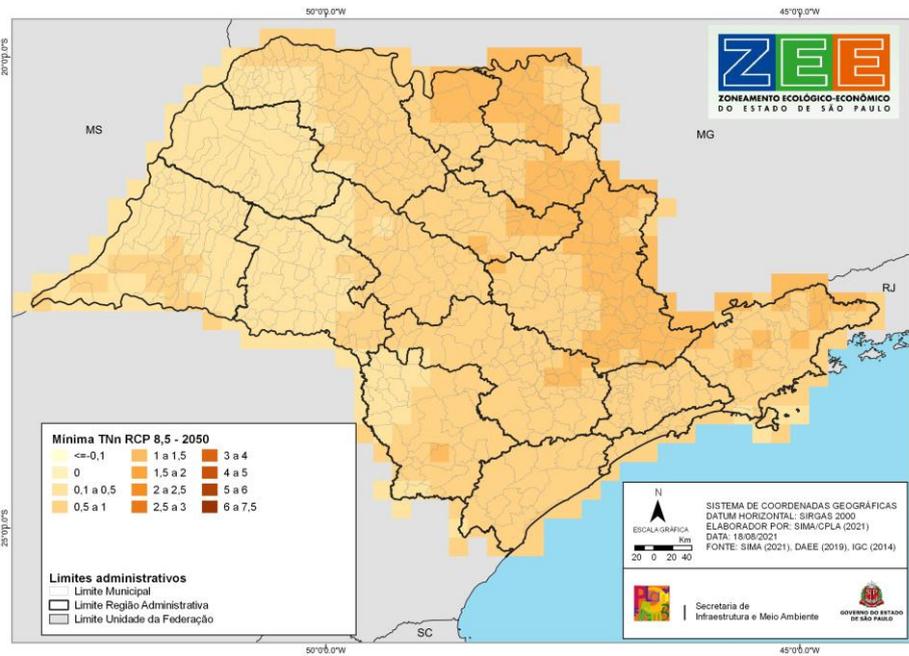
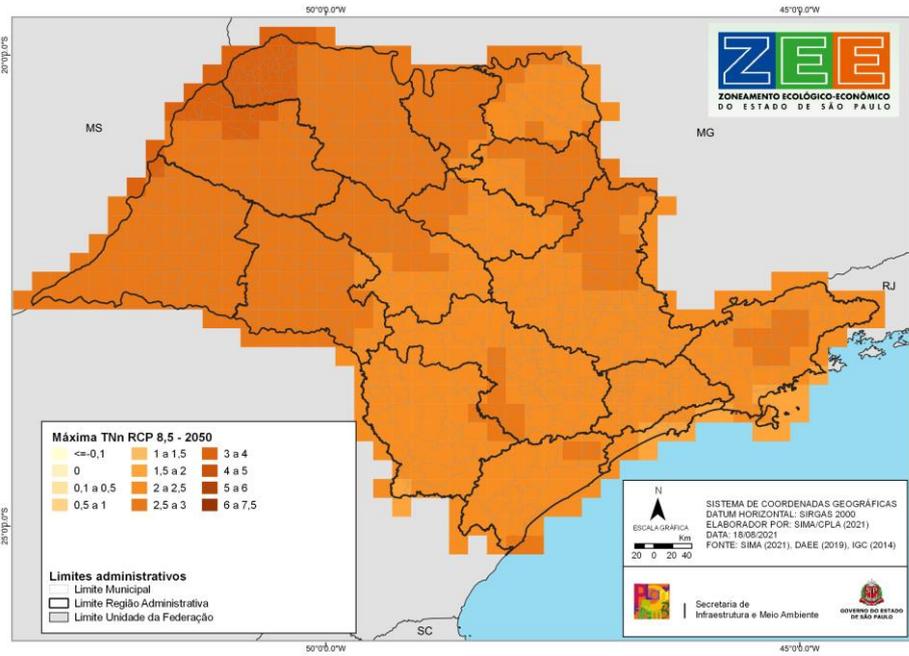
Temperatura do ar média anual (°C) – TP2M

Diferenças em relação ao período histórico



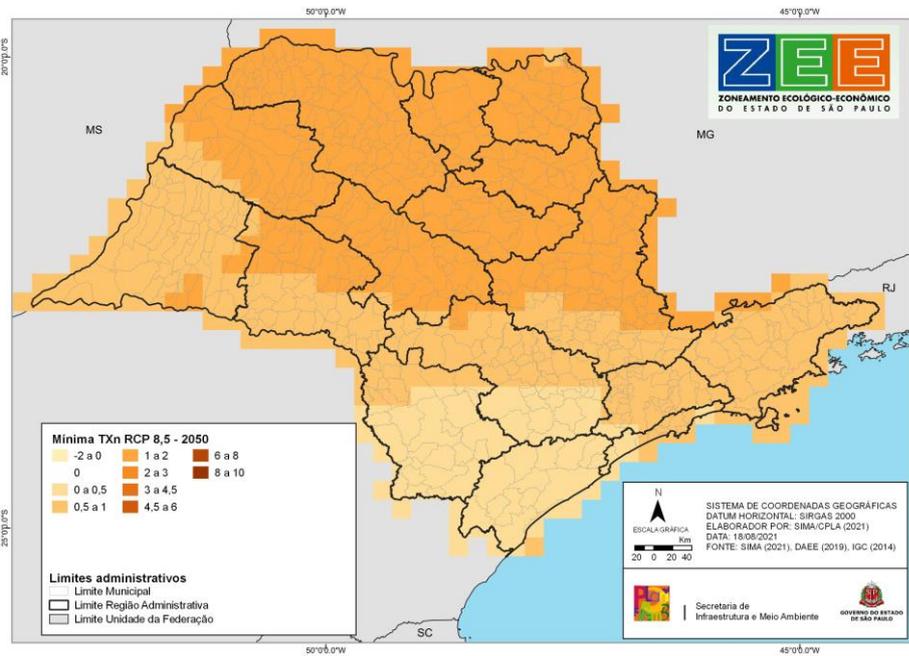
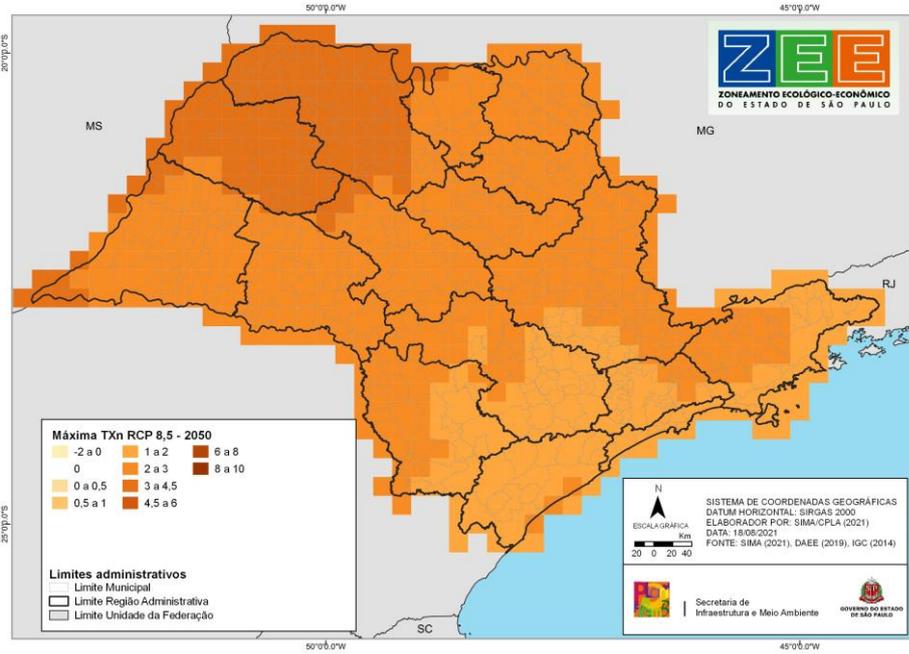
Menor temperatura mínima anual (°C) – TNn

Diferenças em relação ao período histórico



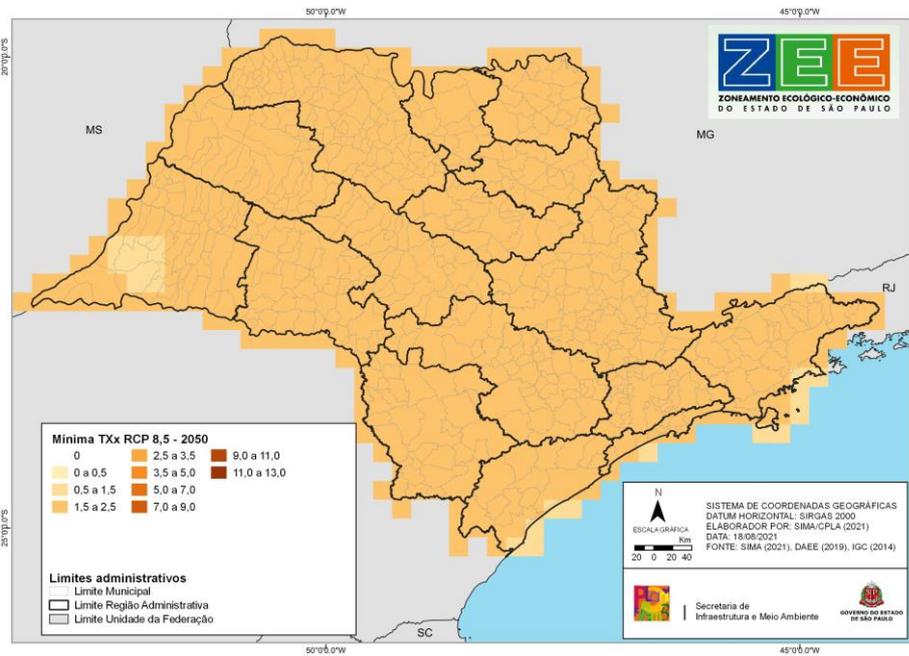
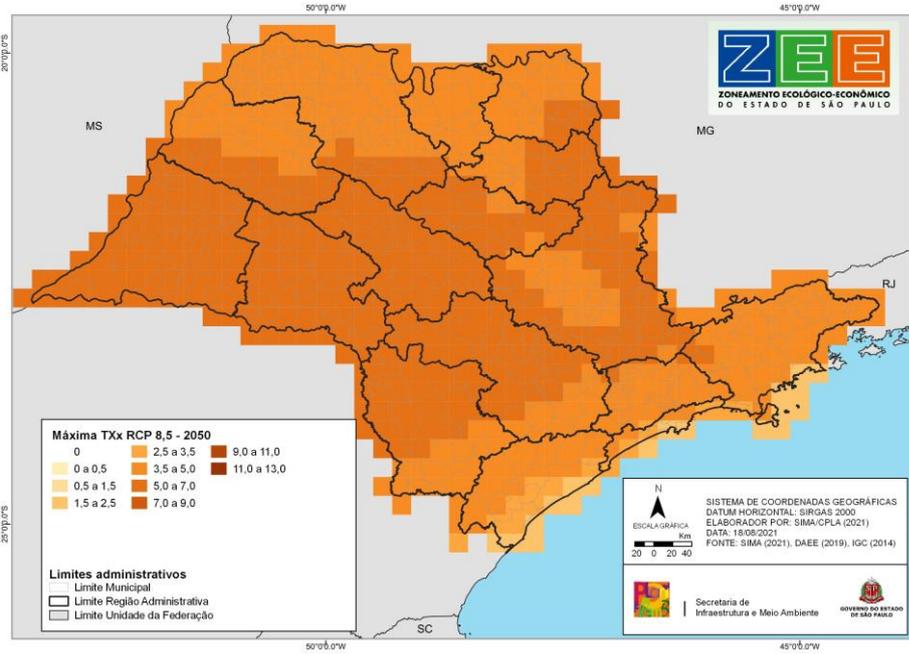
Menor temperatura máxima anual (°C) – TXn

Diferenças em relação ao período histórico



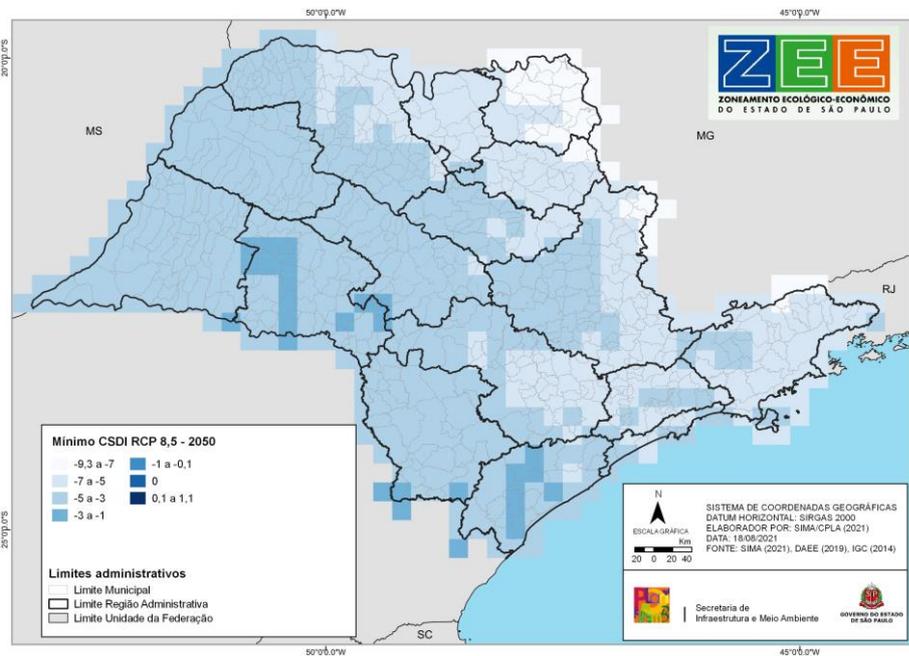
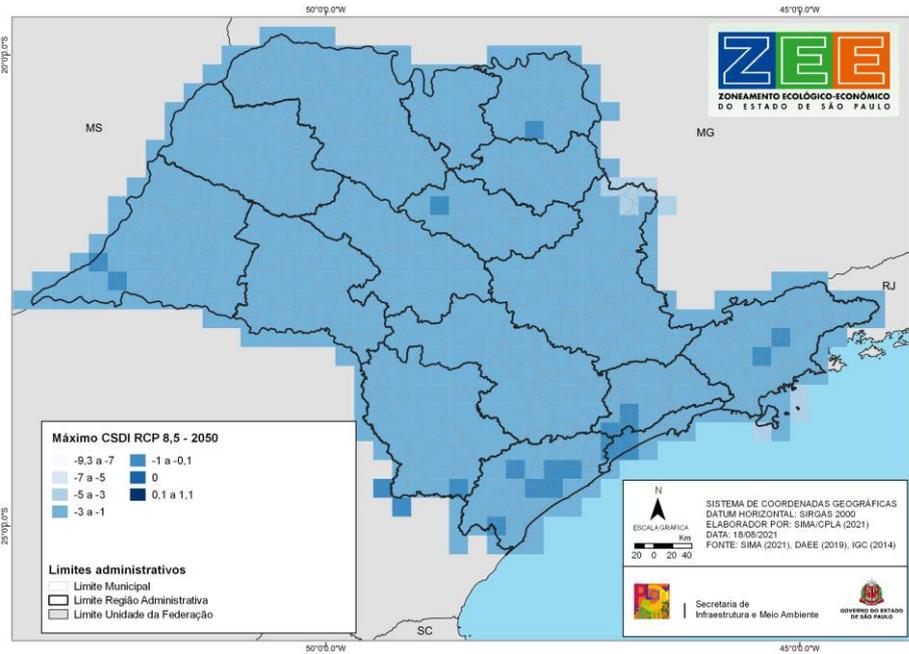
Maior temperatura máxima anual (°C) – TXx

Diferenças em relação ao período histórico



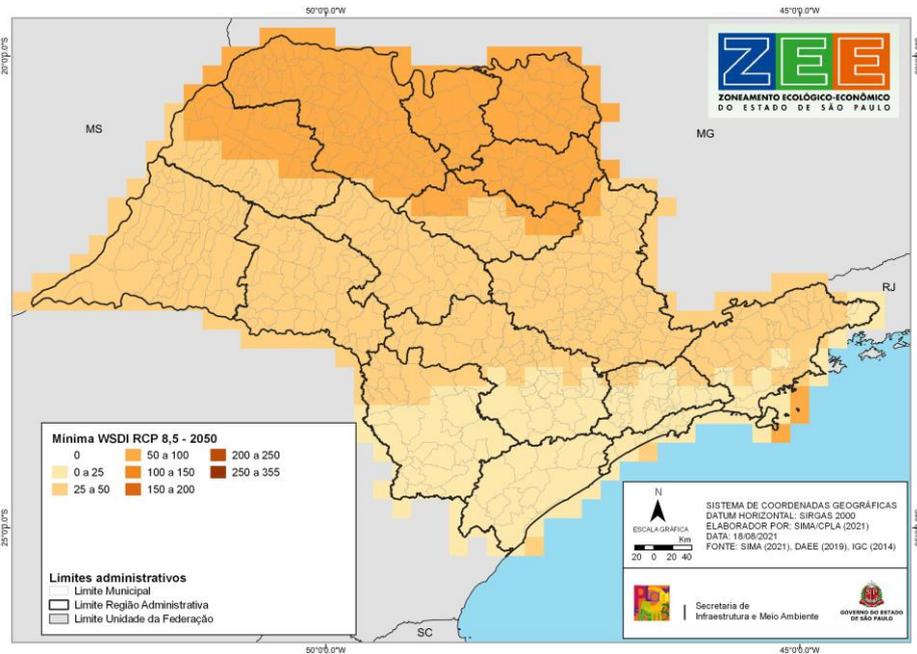
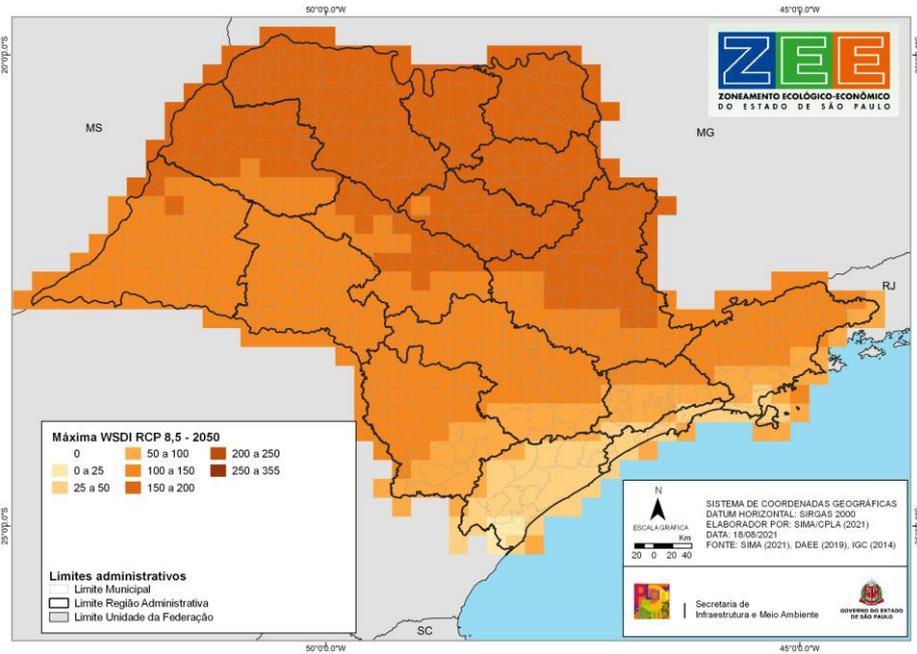
Número máximo de dias consecutivos no ano com temperatura mínima diária menor que percentil 10 (dias) - CSDI

Diferenças em relação ao período histórico



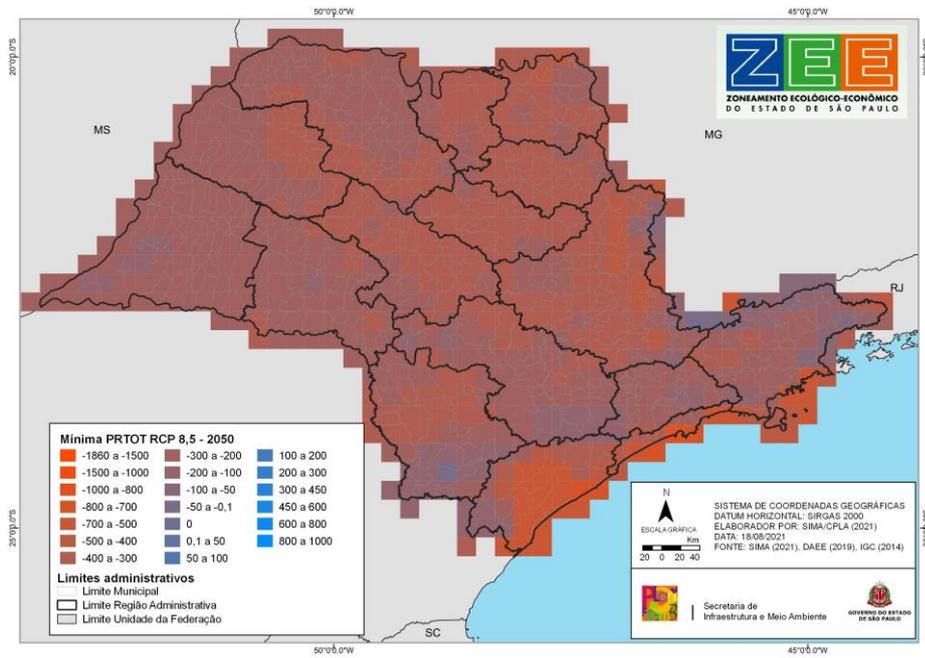
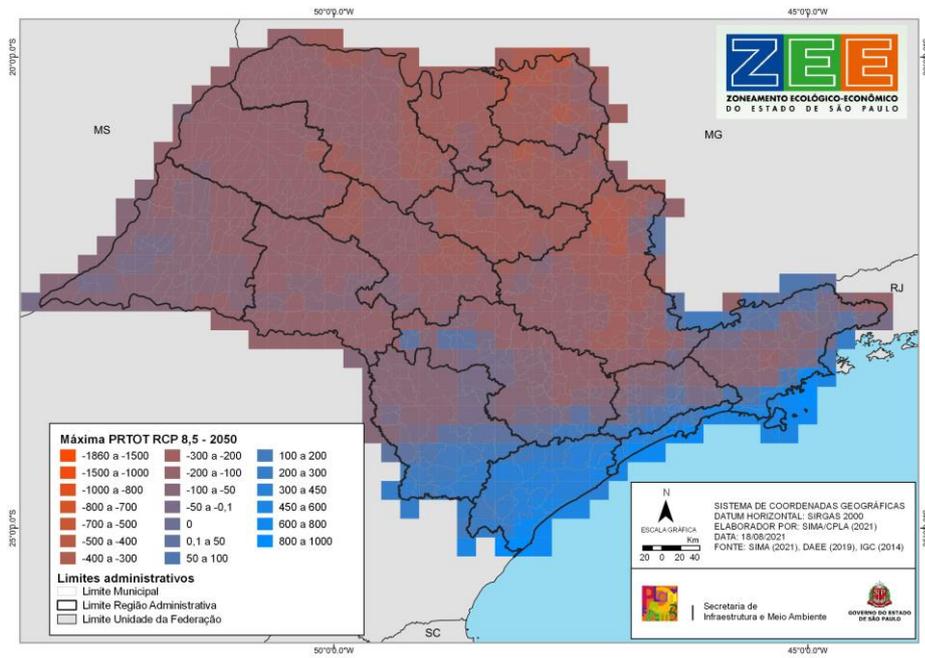
Número máximo de dias consecutivos no ano com temperatura máxima diária maior que percentil 90 (dias) - WSDI

Diferenças em relação ao período histórico



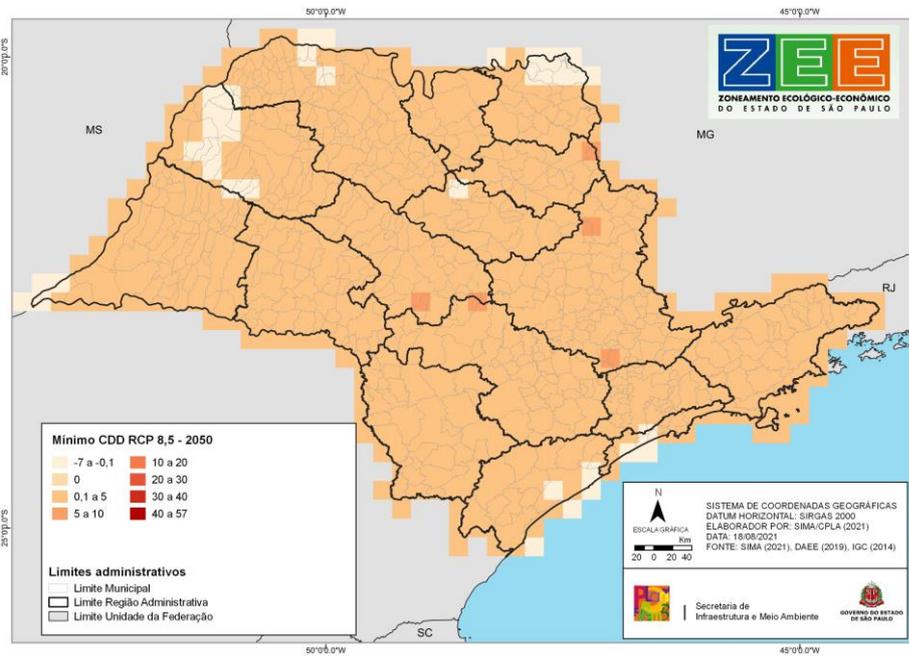
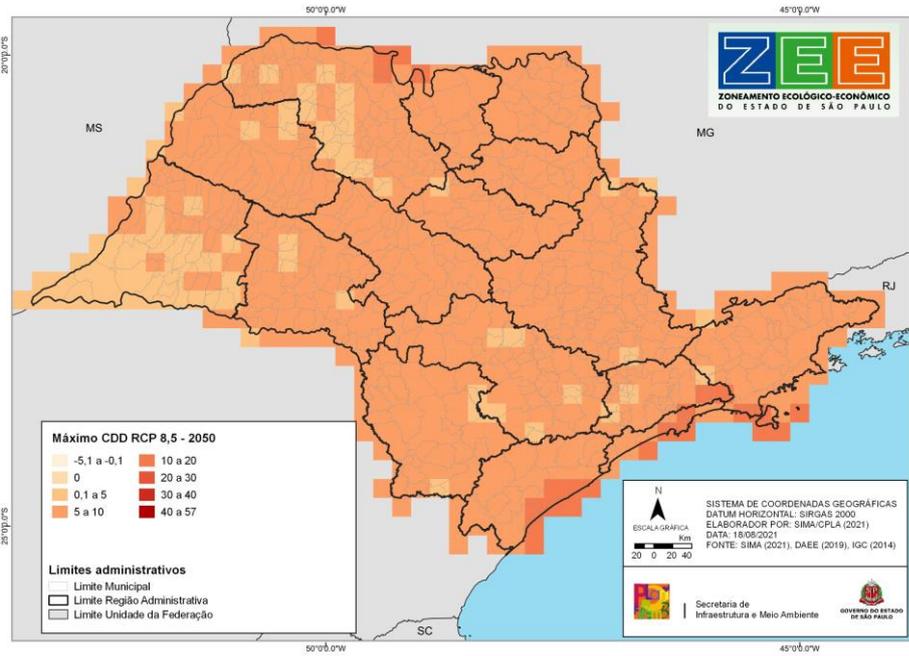
Precipitação total (mm) - PRTOT

Diferenças em relação ao período histórico



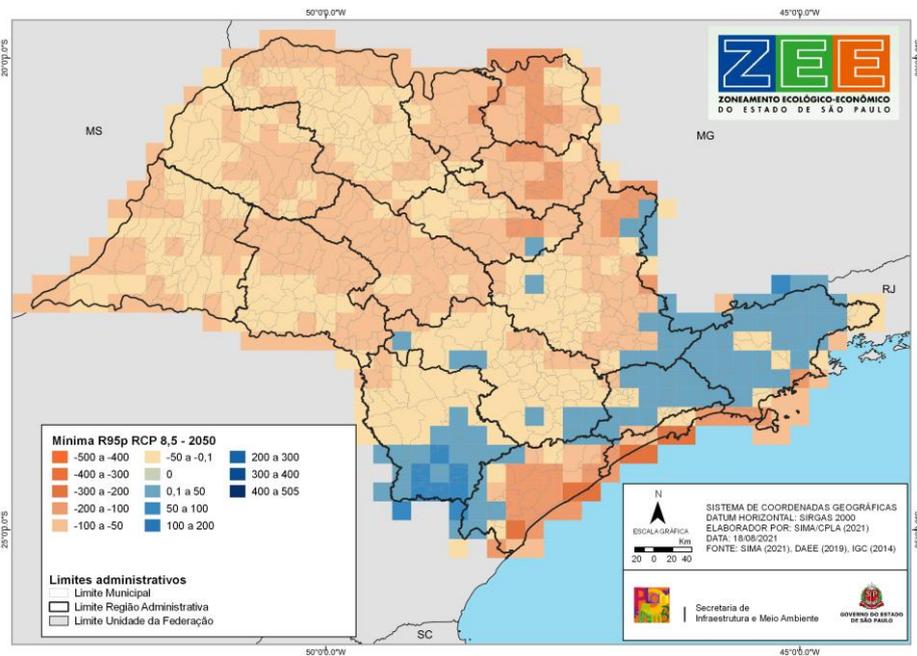
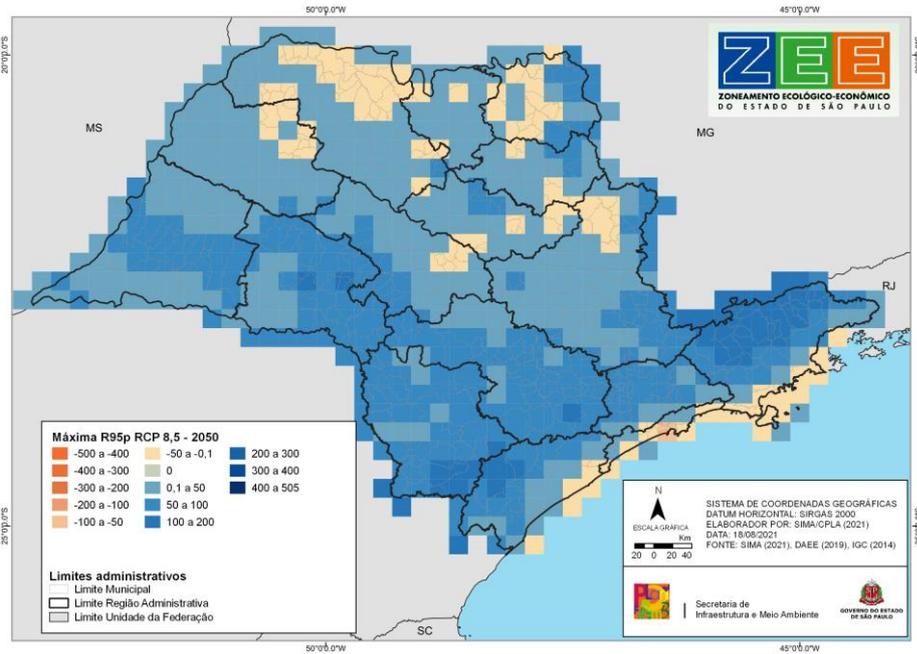
Número máximo de dias consecutivos sem chuva no ano (dias) - CDD

Diferenças em relação ao período histórico



Precipitação anual total dos dias em que a precipitação é maior que o percentil 95 (mm) – R95p

Diferenças em relação ao período histórico



Máxima precipitação anual em 5 dias consecutivos (mm) – RX5day

Diferenças em relação ao período histórico

