

# IMPACTO DA MUDANÇA CLIMÁTICA NOS RECURSOS HÍDRICOS DO BRASIL



**República Federativa do Brasil**

*Luis Inácio Lula da Silva*  
Presidente da República

**Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional**

*Waldez Góes*  
Ministro

**Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**

**Diretoria Colegiada**

*Veronica Sánchez da Cruz Rios (Diretora-Presidente)*

*Maurício Abijaodi*

*Ana Carolina Argolo*

*Filipe de Mello Sampaio Cunha*

*Nazareno Araújo (Interino)*

**AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO**  
**MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

# **IMPACTO DA MUDANÇA CLIMÁTICA NOS RECURSOS HÍDRICOS DO BRASIL**



**BRASÍLIA - DF**  
**ANA**  
**2024**

© 2024, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA

Setor Policial Área 5, Quadra 3, Edifício Sede Bloco M

CEP 70.610-200 - Brasília/DF

Telefone: (61) 2109-5400 | (61) 2109-5252

Endereço eletrônico: [www.gov.br/ana/pt-br](http://www.gov.br/ana/pt-br)

**COMITÊ DE EDITORAÇÃO**

Joaquim Guedes Correa Gondim Filho **(Coordenador)**

Humberto Cardoso Gonçalves

Ana Paula Fioreze

Nazareno Marques de Araújo **(Secretário Executivo)**

**EQUIPE EDITORIAL**

**Supervisão editorial**

Ana Paula Fioreze

Cássio Guilherme Rampinelli

Marco Vinícius Castro Gonçalves

Saulo Aires de Souza

**Elaboração dos originais**

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

**Revisão dos originais**

Ana Paula Fioreze

Luciano Meneses Cardoso da Silva

Marco Vinícius Castro Gonçalves

Saulo Aires de Souza

**Produção**

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

**Diagramação e Capa**

*Phabrica de Produções e Serviços de Propaganda e Publicidade Ltda.*

Alecsander Coelho, Daniela Bissiguini, Érsio Ribeiro

Paulo Ciola

*Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico*

Adilio Lemos da Silva

As ilustrações, tabelas e gráficos sem indicação de fonte foram elaborados pela ANA. Todos os direitos reservados. É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.

Catologação na fonte: Divisão de Biblioteca/ CEDOC

**A265i** Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil).

Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. -- Brasília : ANA, 2024.

96 p. : il.

ISBN: XXX-XX-XXXXXX-XX-X

1. Mudança Climática. 2. Água. I. Título

**CDU 551.583:556**

Ficha catalográfica elaborada por: Fernanda Medeiros - CRB-1/1864

**Mapas temáticos**

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

**Fotografias**

Agência Brasil

Agência de Notícias do Acre

Banco De Imagens/ANA

[www.pixabay.com/pt](http://www.pixabay.com/pt)

**EQUIPE TÉCNICA E COORDENAÇÃO**

**Coordenação Geral**

Ana Paula Fioreze

**Coordenação Técnica**

Saulo Aires de Souza

Marco Vinícius Castro Gonçalves

**Colaboradores**

Alexandre Abdalla Araujo

Cássio Guilherme Rampinelli

Filipe Sampaio Casulari Pinhati

Marco Vinícius Castro Gonçalves

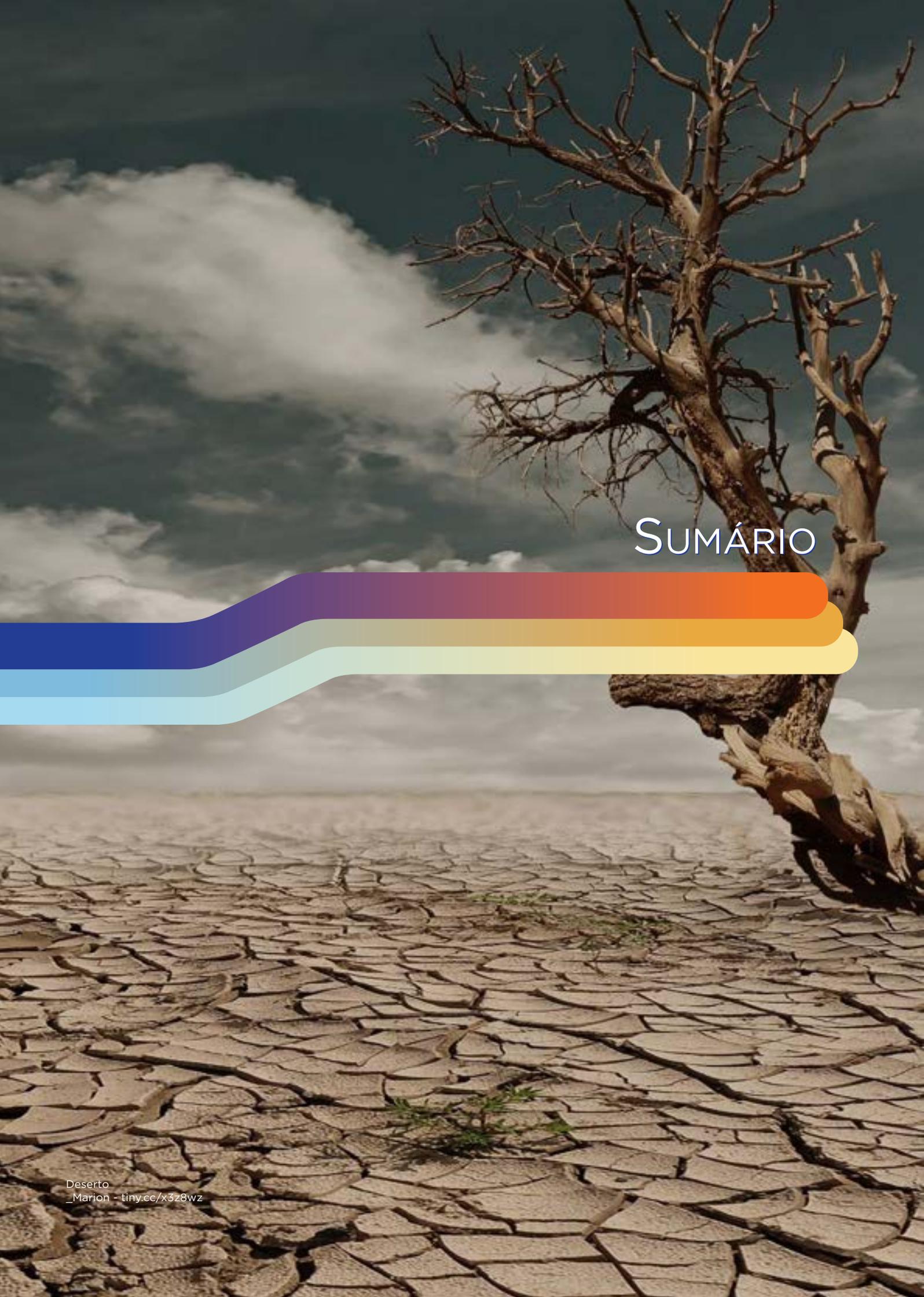
Marcos Irineu Pufal

Teresa Luisa Lima de Carvalho

**Consultores**

Prof. Dirceu Silveira Reis Junior



A photograph of a dead, gnarled tree in a cracked desert landscape under a cloudy sky. The ground is parched and cracked into irregular polygons. The sky is filled with heavy, grey clouds. The tree is the central focus, with its branches reaching out against the sky.

# SUMÁRIO

# SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	13
1. INTRODUÇÃO E CONTEXTO.....	15
2. IMPORTÂNCIA DOS ESTUDOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA NO SETOR DE RECURSOS HÍDRICOS...	19
3. DESAFIOS DOS ESTUDOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA NO SETOR DE RECURSOS HÍDRICOS .....	21
4. MUDANÇA CLIMÁTICA NA ANA .....	25
5. OBJETIVOS .....	31
6. METODOLOGIA .....	33
6.1. Estratégia de Ação da Avaliação do Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil	33
6.2. Base de Dados	36
6.2.1. Presente (Observado)	36
6.2.2. Futuro (Projeções)	37
6.2.3. Base Hidrográfica BHO	44
6.3. Modelagem Hidrológica	45
6.3.1. Budyko	45
6.4. Transferência dos Dados Hidroclimatológicos para a BHO	47
6.4.1. Estatísticas dos Dados do Presente e Futuro	47
6.4.2. Transferência das Estatísticas do Presente e Futuro para BHO	52
6.5. Disponibilidade Hídrica Futura na BHO	55
6.5.1. Variação das Estatísticas do Futuro em Relação ao Presente na BHO	55
6.5.2. Obtenção do Parâmetro da Modelagem Hidrológica Budyko	55
6.5.3. Aplicação da Modelagem Hidrológica Budyko	58
7. RESULTADOS DO IMPACTO DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA HIDROLOGIA (P, EO E Q) .....	61
7.1. Resultados das Estatísticas do Futuro da EO	61
7.2. Resultados das Estatísticas do Futuro da PLU	69
7.3. Resultados das Estatísticas do Futuro da Vazão	77
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

An aerial photograph of a wide, muddy river with a prominent sandy bar in the foreground. A long, narrow beach runs along the right bank, meeting the ocean under a cloudy sky. The water is a deep orange-brown color, and the sand is a light tan. The sky is filled with soft, white clouds.

# APRESENTAÇÃO

**N**as últimas décadas, a mudança climática tornou-se um tópico de grande visibilidade pública e passou a ocupar um espaço considerável nas agendas ambientais, políticas e sociais em todo o mundo. No contexto dos recursos hídricos, a mudança climática está alterando significativamente o ciclo hidrológico, adicionando uma incerteza significativa à disponibilidade hídrica em muitas regiões do planeta.

O Brasil já sofre os impactos da mudança climática nos seus recursos hídricos. Pesquisas e estudos já sinalizam uma maior frequência da ocorrência desses impactos negativos em diferentes setores usuários de água no Brasil e com perspectiva de piora desse cenário no futuro, alertando para a necessidade de adaptação. Mudanças no clima que alterem o regime de chuvas e evaporação no Brasil provocam o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como inundações e longos períodos de seca. Esses eventos afetam a oferta de água, ameaçando o suprimento de recursos hídricos para todos.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) é vanguarda na consideração da mudança climática no planejamento dos recursos hídricos no Brasil. Desde a sua criação, a ANA implementa medidas para aumentar a segurança hídrica e a capacidade do Brasil de se adaptar a novos cenários. Essas ações são fundamentais na garantia da oferta de água para atendimento às necessidades humanas e às atividades econômicas, bem como para redução dos riscos associados às secas e cheias.

Este estudo de Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil, realizado de forma inédita e inovadora, passa a ser um instrumento fundamental de tomada de decisões nesse tema. Ao apresentar um quadro de vulnerabilidade futura dos recursos hídricos à mudança climática em uma escala espaço-temporal compatível com a escala de planejamento e gerenciamento, este estudo inicia o caminho da adaptação no âmbito do setor de recursos hídricos no Brasil. Os cenários apresentados servem de referência para a definição de estratégias de adaptação para os mais diferentes setores da sociedade brasileira.

A ANA almeja que o caminho para a segurança hídrica no Brasil, resulte na consideração de cenários de mudança climática nas mais diferentes esferas de planejamento dos recursos hídricos no Brasil. Os resultados aqui apresentados podem ser um importante instrumento nesse processo. Para tanto, é necessário o engajamento das demais esferas de governo, setores usuários e da sociedade como um todo no direcionamento dos esforços requeridos para a efetiva adaptação à mudança climática no Brasil.

Diretoria Colegiada da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

# 1

## INTRODUÇÃO E CONTEXTO

# 1. INTRODUÇÃO E CONTEXTO

## CONTEXTO, IMPORTÂNCIA DO ESTUDO E OBJETIVOS DE ORDEM GERAL

Os recursos hídricos estão fortemente conectados com o desenvolvimento econômico, social e ambiental dos países. O planejamento e a gestão de recursos hídricos possibilitam aproveitar a hidrologia dessas nações, muitas vezes com alta variabilidade e de caráter destrutivo, em benefícios confiáveis e socialmente desejados. Com o avanço das sociedades modernas, houve um aumento das necessidades por recursos hídricos, tornando os sistemas hídricos cada vez mais complexos. Para lidar com essas complexidades, os procedimentos técnicos, analíticos e de governança para a gestão hídrica evoluíram para acompanhar as crescentes demandas da sociedade. Mais recentemente, há uma necessidade por uma gestão ainda mais complexa tendo em vista as incertezas associadas à mudança climática (Mendoza et al., 2018).

Nas últimas décadas, a mudança climática tornou-se um tópico de grande visibilidade pública e passou a ocupar um espaço considerável nas agendas ambientais, políticas e sociais em todo o mundo. A maior expressão desse crescimento e articulação foi a formação, em 1988, do Painel Intergovernamental de Mudança Climática (IPCC). Os sucessivos relatórios produzidos por esse painel têm reafirmado o aumento da temperatura global devido às emissões antropogênicas de carbono e alertado para os riscos dessa mudança. Também a partir dos resultados preocupantes constantes nesses relatórios, as nações têm buscado realizar negociações e acordos, como as da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), que orientam principalmente os gastos públicos e as tomadas de decisão nos mais diferentes setores da sociedade que poderão ser impactados.

De acordo com o IPCC (2013), mudança climática corresponde às variações significativas no estado médio do clima ou em sua variabilidade, persistindo por um período extenso. Essa mudança climática pode acontecer devido a processos naturais (internos ou externos) ou antropogênicos; isto é, mudanças causadas pelo ser humano, ou até mesmo pelo efeito somado de ambos os processos. Segundo o próprio IPCC, a mudança climática está alterando significativamente o ciclo hidrológico, adicionando uma incerteza significativa à disponibilidade hídrica em muitas regiões do planeta tanto no presente, mas principalmente no futuro.

A incerteza não é algo novo para os tomadores de decisão na área de recursos hídricos, efeitos tanto da variabilidade climática como de mudanças antrópicas no padrão de uso e ocupação do solo sempre impuseram aos gestores a necessidade de incorporar diferentes tipos de incerteza no planejamento de recursos hídricos. No entanto, a mudança climática adiciona uma incerteza ainda maior associada à incapacidade de prever a evolução futura tanto dos processos hidrometeorológicos, como da própria sociedade que é impactada nos seus padrões de preferências e consumo.

No planejamento de recursos hídricos, busca-se planejar e projetar para as incertezas do tipo “sabemos o que não sabemos” – ou seja, visões tradicionais de risco e incerteza – geralmente adicionando margens de segurança às variáveis utilizadas nos projetos e ações de recursos hídricos. Nesse caso, a compreensão do que seria o futuro desconhecido é informada pelo que aconteceu no passado (estacionariedade), incluindo eventos catastróficos e suas conhecidas consequências socioeconômicas e ambientais. Atualmente,

com as enormes incertezas oriundas da taxa sem precedentes do crescimento econômico global e com a perspectiva de mudança climática, emerge uma nova necessidade em planejar e projetar o futuro agora voltadas para o tipo “não sabemos o que não sabemos”. Assim, em contextos complexos e altamente incertos, tais como esses envolvidos em muitas decisões relacionadas a mudança climática, as condições necessárias para a aplicação da análise de risco e incerteza tradicional se tornam praticamente inviáveis (Salas et al., 2018; Mendoza et al., 2018).

Essa inviabilidade prática motivou o desenvolvimento de novas ferramentas e estudos por parte da comunidade de recursos hídricos (planejadores, gestores, acadêmicos etc.) voltados agora para um novo mundo de incertezas a serem enfrentadas no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. É nesse contexto que se insere esse estudo, o qual busca avaliar os impactos da mudança climática nos recursos hídricos a partir de futuros hidroclimatológicos incertos no Brasil. Para isso, incorporou-se neste estudo uma visão onde reconhece-se a incerteza advinda da impossibilidade estrutural de se prever de forma determinística o futuro e de controlá-lo, incerteza esta que pode ser traduzida em cenários que informam futuros potenciais (críveis-verossímeis com o conhecimento atual).

Essa impossibilidade de se controlar a realidade demandará estratégia de adaptação que proporcione ao sistema de recursos hídricos flexibilidade para operar de forma persistente (eficaz) nos diferentes futuros potenciais alternativos constituindo em uma estratégia robusta. Nesse sentido, esse estudo é uma importante ferramenta que pode ajudar ao tomador de decisão em recursos hídricos a navegar por um mundo incerto em direção a soluções provavelmente imperfeitas, mas robustas e socialmente aceitáveis.

Embora sujeitas a incertezas, as projeções de mudança climática oferecem um vislumbre de possíveis impactos e desafios futuros sobre os recursos hídricos no Brasil. Os impactos projetados variam de acordo com a região do Brasil, mas no geral concordam com aumentos na temperatura e evapotranspiração. A escassez hídrica, que atualmente resulta em perdas econômicas e sociais significativas, pode ser mais comum em muitas regiões no Brasil. Essas perdas econômicas, que ocorrem em vários setores, da agricultura ao turismo, têm efeitos profundos nas comunidades locais. Déficits mais frequentes, como os que esse estudo pretende apresentar, implicarão em aumento de custos para a sociedade, necessitando de estratégias de adaptação por parte dos usuários de água para mitigar parte desses custos.



Rua inundada  
Jsptoa - [tiny.cc/54z8wz](https://tiny.cc/54z8wz)

# 2

## IMPORTÂNCIA DOS ESTUDOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA NO SETOR DE RECURSOS HÍDRICOS

## 2. IMPORTÂNCIA DOS ESTUDOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA NO SETOR DE RECURSOS HÍDRICOS

O ciclo hidrológico está diretamente vinculado às mudanças de temperatura da atmosfera e ao balanço de radiação de energia terrestre. Com o aquecimento da atmosfera, de acordo com o que sinalizam os modelos de projeção climática, espera-se, entre outras consequências, mudanças nos padrões da precipitação (alterações na intensidade e na variabilidade), o que poderá afetar significativamente a disponibilidade e a distribuição temporal da oferta hídrica nos rios. Os estudos científicos mostram que os eventos hidrológicos críticos, como as secas e enchentes, poderão tornar-se mais frequentes e mais intensos. Somadas aos impactos esperados no regime hidrológico, estão as prováveis mudanças na demanda de diversos setores usuários, que possivelmente aumentará acima das previsões realizadas a partir da expectativa de crescimento populacional e desenvolvimento dos países. A elevação da temperatura e da evapotranspiração poderá acarretar, entre outros efeitos, maior necessidade de irrigação, refrigeração, consumo humano e dessedentação de animais em determinados períodos e regiões, além de afetar a capacidade de reserva e o balanço hídrico (ANA, 2019).

Assim, para o setor de recursos hídricos, as incertezas oriundas da mudança climática incidirão tanto do lado da oferta como também do lado da demanda hídrica. Deste modo, é importante que estudos dos impactos da mudança climática sejam desenvolvidos no sentido de considerar essas incertezas, pois ignorá-las pode nos levar a investirmos em ações que se mostrarão inadequadas no futuro e associadas a alto nível de arrependimento.

Outro grande benefício em considerar como os recursos hídricos serão impactados por mudança climática futura é que isso levanta questões de como o sistema hídrico atual é entendido e como ele pode ser melhor compreendido (Vanrolleghem, 2010). Isso pode levar a inovações que podem ajudar a melhorar as capacidades desse sistema

como um todo. Por exemplo, é possível que numa determinada análise do risco climático futuro sejam reveladas novas vulnerabilidades do sistema e descobrir maneiras de melhorar a sua resiliência. Além disso, entender maneiras de estar mais bem preparado para os impactos causados pelo clima considerando as incertezas inerentes ao risco futuro, pode melhorar a capacidade adaptativa do sistema para impactos não causados pelo clima (Olsen et al., 2015) e motivar melhorias na gestão contínua, incluindo monitoramento de secas e cheias, previsão hidrometeorológica, maior conservação da água etc. (Salas et al., 2012). A realização de análises com o intuito de avaliar o impacto das mudanças nos recursos hídricos também pode ressaltar a existência de lacunas de gestão e planejamento a serem preenchidas no presente.

As avaliações do impacto da mudança climática também desenvolvem a capacidade humana. Esses estudos geralmente exigem que os tomadores de decisão abordem questões difíceis, como por exemplo avaliar tipos diferentes de impactos sob uma gama extensa de cenários futuros (Willows e Connell, 2003). Esse tipo de abordagem também pode motivar pessoas com diferentes objetivos de gestão a trabalharem de forma coordenada e integrada, como por exemplo grupos interessados na irrigação e grupos ambientais (Malloch e Garrity, 2015). Essa integração, possibilita aumentar a resiliência do sistema de recursos hídricos, tendo em vista que a capacidade de uma comunidade de se recuperar rapidamente de um desastre aumenta quando um grupo diversificado de partes interessadas trabalham em conjunto para monitorar perigos potenciais e modificar planos e atividades para acomodar mudanças futuras (NRC, 2011).

Por todas as motivações expostas acima, pode-se afirmar que estudos de impactos de mudança climática no setor de recursos hídricos é por si só uma medida de adaptação de não arrependimento.

# 3

## DESAFIOS DOS ESTUDOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA NO SETOR DE RECURSOS HÍDRICOS

### 3. DESAFIOS DOS ESTUDOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA NO SETOR DE RECURSOS HÍDRICOS

**H**á uma série de desafios para estimar os impactos da mudança climática na disponibilidade futura de água. Embora tenha havido grandes avanços na área de climatologia, os modelos climáticos globais (MCGs) são, por natureza, uma simplificação de processos altamente não-lineares, e mesmo os MCGs de última geração não modelam adequadamente as teleconexões de larga escala que afetam significativamente os extremos hidrológicos (AghaKouchak et al., 2013; ASCE, 2018). O desempenho dos MCGs é avaliado com base no quão bem eles são capazes de replicar as condições climáticas atuais. No entanto, mesmo que esse desempenho seja considerado uma condição necessária, não implica em confiabilidade das projeções climáticas. Há pouco consenso na comunidade científica sobre como se deve escolher modelos adequados (Kundzewicz et al., 2010; Borgomeo et al., 2018). Geralmente as abordagens por conjunto tem maior preferência nos estudos (Steinschneider et al., 2015).

A escolha dos modelos a serem incluídos nesses conjuntos é baseada em seu desempenho considerando um conjunto de métricas e variáveis de interesse que, de um modo geral, são escolhidos de forma subjetiva. Outro ponto importante é que as mudanças na precipitação e evapotranspiração não se correlacionam linearmente com as mudanças na disponibilidade hídrica, o que implica num grau de incerteza ainda maior resultante do processo de modelagem hidrológica (Steinschneider et al., 2015).

A gestão integrada dos recursos hídricos como constituinte de um quadro importante para alcançar as medidas de adaptação em sistemas socioeconômicos, ambientais e administrativos vem sendo aperfeiçoada. No entanto, para ser eficaz, a gestão deve promover abordagens integradas à escala apropriada ou escalas necessárias para facilitar ações efetivas para resultados específicos que no contexto de mudança climática ainda é um desafio.

Em contextos complexos e altamente incertos, tais como aqueles envolvidos em muitas decisões relacionadas à mudança climática, as condições necessárias para a aplicação da análise de decisão clássica se tornam praticamente inviáveis (Hallegatte et al., 2012). Essa inviabilidade prática desafia e impõe o desenvolvimento de novas ferramentas de decisão por parte do setor de recursos hídricos, trazendo novos componentes para análise. A introdução desses novos elementos no processo decisório, implicou na reclassificação da incerteza associada ao problema de decisão no contexto da mudança climática, denominando-a de incerteza “profunda” (do inglês “deep uncertainty”).

Assim tem-se também o desafio em desenvolver e investigar métodos de tomada de decisões para lidar com as incertezas “profundas” no planejamento do sistema de recursos hídricos (AghaKouchak et al., 2013; Hirsch, 2011). A comunidade hidrológica está começando a reconhecer que é necessária uma revisão no seu planejamento de longo prazo (AghaKouchak

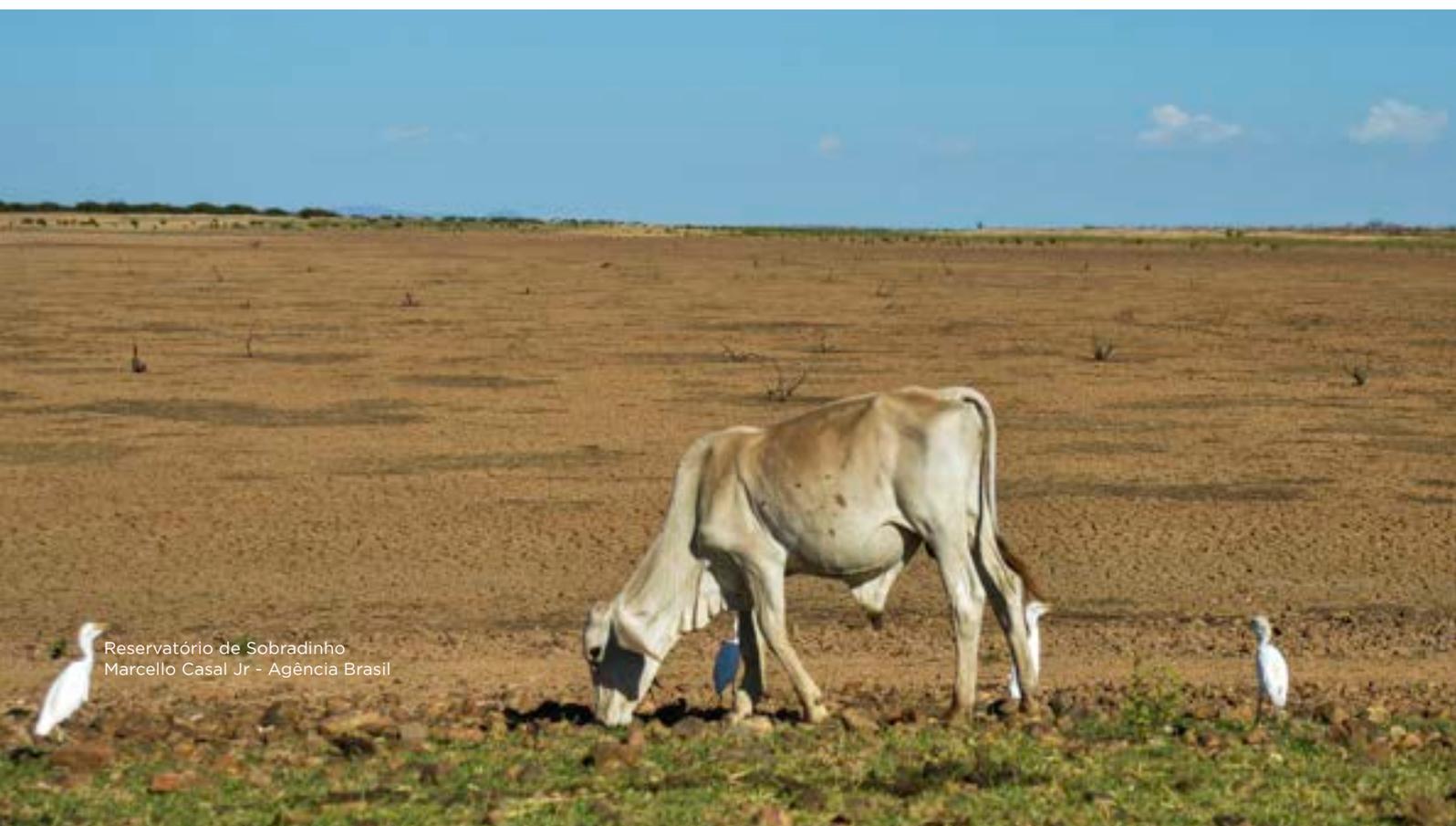
et al., 2013; ASCE, 2018; Galloway, 2011; Milly et al., 2008). A questão fundamental é se essas várias abordagens que estão sendo oferecidas pela academia podem ajudar a resolver os problemas em questão e a transformar o conhecimento teórico em aplicações práticas e apropriadas para o setor de recursos hídricos.

A incerteza científica em torno da pesquisa sobre mudança climática impõe um desafio adicional no processo de comunicação do risco para a sociedade. A palavra “incerteza” em si tem significados ligeiramente diferentes quando usada no discurso cotidiano versus um contexto científico. Assim deve-se ter cautela no uso do termo incerteza, pois em determinados contextos, expressar a incerteza usando uma gama concreta de possibilidades aumenta a confiança, no entanto, quando a incerteza é expressa em relação a impactos imprevisíveis pode corroer a confiança nos estudos e seus resultados.

Existe ainda uma lacuna significativa de conhecimento entre os impactos das projeções de clima sobre os recursos hídricos e estratégias governamentais que visam o controle da demanda e a sustentabilidade dos sistemas hídricos. Adicionalmente, os efeitos da mudança do clima atingem a sociedade de forma desigual.

A população mais pobre geralmente é mais vulnerável aos impactos da variabilidade e mudança climática sobre a água e normalmente tem menor capacidade de lidar com tais impactos (Fritzsche et al., 2014; Milly et al., 2008). Nesse sentido tem-se o desafio de incorporar nos estudos de mudança climática métricas que possibilitem melhor compreender as complexas dimensões humanas da água e considerá-las na análise dos sistemas de recursos hídricos. Essas interações operam em uma ampla gama de escalas, desde as escolhas feitas pelos indivíduos nos domicílios até a natureza dos conflitos políticos relacionados à água em regiões hidrográficas de larga escala.

Outro grande desafio no tipo de estudo aqui apresentado está relacionado ao problema denominado na literatura de lacuna de atribuição (Fritzsche et al., 2014). Essa lacuna corresponde a dificuldade em vincular diretamente as mudanças nas métricas de vulnerabilidade a mudança climática à implementação de ações de adaptação. A relação causal entre a métrica de vulnerabilidade (por exemplo, resultado do balanço hídrico) e ações de adaptação não é explícita sendo ainda desafiador a definição de indicadores que capturem o efeito das medidas de adaptação planejadas na estrutura de avaliação de vulnerabilidade das regiões de interesse.





Lago da Usina de Xingó - Rio SãoFrancisco/AL  
Zig Koch - Banco de Imagens/ANA

# 4

## MUDANÇA CLIMÁTICA NA ANA



## 4. MUDANÇA CLIMÁTICA NA ANA

Dentro do contexto de mudança climática, a ANA vem desde a sua criação atuando de forma estratégica nesse tema. A questão do risco climático está presente nos mais diferentes estudos e ações da agência. O objetivo central de considerar e gerir esse risco climático na ANA é identificar, avaliar e desenvolver estratégias de respostas a eventuais impactos no setor de recursos hídricos.

No âmbito da ANA, o risco climático parte do conceito clássico de risco, comumente representado como a probabilidade de ocorrência de um evento multiplicada pelos impactos por ele causados, se caracterizando a partir de fatores climáticos, ambientais e humanos. As condições desses fatores resultam em diferentes escalas de risco que, quando manifestados, geram impactos de magnitudes diversas. O risco climático emerge, então, de um sistema dinâmico no qual, inicialmente, interagem quatro conceitos fundamentais: perigo, vulnerabilidade, exposição e impacto (IPCC, 2014).

A gestão do risco climático na ANA em um determinado sistema hídrico consiste, portanto, em aumentar sua eficiência de ajuste frente aos perigos externos, reduzindo os impactos associados. Assim, a visão acerca dos impactos de eventos climáticos no planejamento e por consequência no gerenciamento de recursos hídricos no âmbito da ANA reside em 2 aspectos fundamentais que norteiam as ações da ANA nessa temática (**Figura 1**). Um dos aspectos é a questão do diagnóstico do estado climático, ou seja, como detectar, compreender e avaliar as mais diversas variações ou mudanças sistemáticas no clima. O segundo aspecto importante na visão da ANA é dado o diagnóstico de eventual estado climático seja no presente ou no futuro quais os impactos adversos decorrentes desse estado nos recursos hídricos considerando os diferentes setores usuários e quais as estratégias de ação ou adaptação (no caso de mudanças sistemáticas) deverão ser definidas para aumentar a segurança hídrica ou mantê-la em níveis desejáveis.



Figura 1 - Linhas de Atuação da ANA na gestão do risco climático.

A mudança climática global se constitui como um problema transversal que atinge diversas comunidades ao redor do planeta, de forma que todos os sistemas terrestres são afetados, mesmo que em diferentes níveis de intensidade. Nesse processo, os impactos se distribuem entre os diferentes setores da sociedade, não se limitando apenas a um problema de caráter ambiental, atingindo também diferentes esferas do meio social, como campos de debate socioeconômico e político (FGV e ANA, 2018). Dessa forma, na visão da ANA, a adaptação à mudança do clima deve ser promovida tanto por atores públicos quanto privados, uma vez que os esforços devem ser tão mais abrangentes quanto é o problema. Por outro lado, dada a complexidade da gestão do risco climático e o fato de seus impactos muitas vezes englobarem bens públicos, a adaptação por parte dos indivíduos pode se mostrar ineficaz ou insuficiente (NRC, 2011).

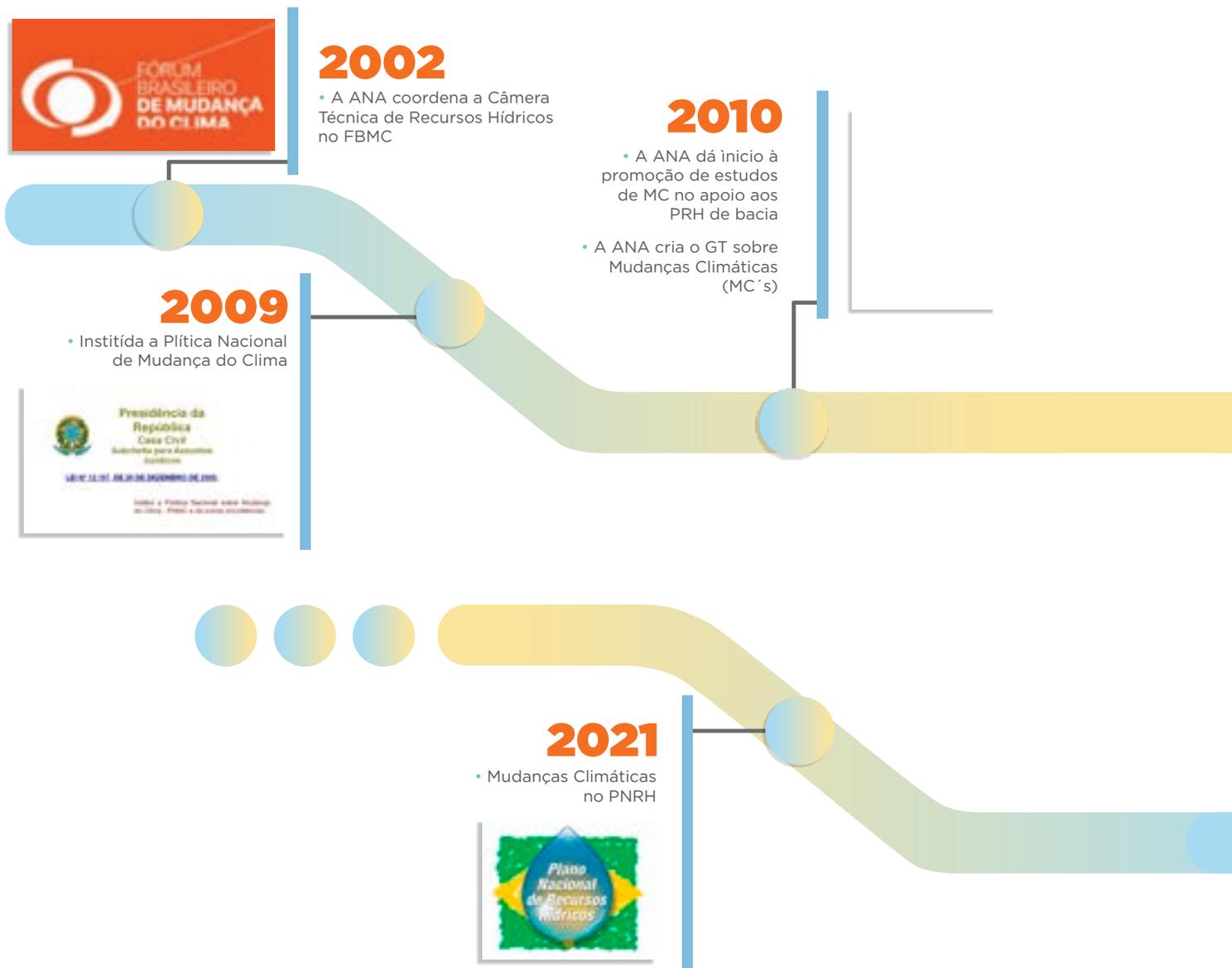
Algumas das justificativas para intervenção da ANA no tema da mudança climática reside na sua capacidade de coordenar e implementar a política nacional de recursos hídricos principalmente considerando a dificuldade de coordenação entre os agentes do setor de recursos hídricos. Adicionalmente, a ANA é uma das responsáveis pela elaboração de regras e regulamentos no setor de recursos hídricos que podem aumentar ou restringir a capacidade de adaptação de outros atores, bem como devem garantir o acesso à água potável, saneamento e ativos públicos. Além disso, outros serviços, como monitoramento do clima e eventos extremos, fornecimento de cenários hidrológicos, fomento à pesquisa e desenvolvimento no tema de adaptação, fazem da ANA um ator essencial para a adaptação. Nesse sentido, o planejamento e ação na questão da mudança climática por parte da ANA devem observar além da eficiência, a equidade entre os indivíduos, uma vez que restrições orçamentárias podem impedir a gestão do risco climático em algumas regiões do território brasileiro.

No sentido acima exposto, a ANA desde a sua criação vem implementando medidas para aumentar a segurança hídrica e a capacidade do Brasil de se adaptar a novos cenários de mudança climática. A ANA também promove reuniões técnicas, dá apoio ao desenvolvimento de grupos de estudos científicos e elabora documentos de diretrizes e planos de recursos hídricos. A seguir tem-se o histórico do papel da ANA no contexto da mudança climática:

- 2002 - A ANA exerce a coordenação da Câmara Técnica de Recursos Hídricos no Fórum Brasileiro de Mudança Climática. Reuniões foram registradas na publicação Clima e Recursos Hídricos;
- 2009 - Instituída a Política Nacional de Mudança do Clima, que oficializa o compromisso voluntário do Brasil junto à Convenção-Quadro da ONU sobre Mudança do Clima e redução de emissões de gases de efeito estufa até 2020;
- 2010 - A ANA cria o Grupo de Trabalho sobre Mudança Climática, responsável pela elaboração do documento de diretriz "Os efeitos da mudança climática sobre os recursos hídricos: desafios para a gestão". Com caminhos gerais de preparação para crises e ainda discute temas como a variabilidade climática, planejamento dos recursos hídricos, entre outros;
- 2010 - A ANA dá início à promoção de estudos de mudanças do clima para subsidiar a elaboração de planos de bacias de recursos hídricos;
- 2013 - A ANA em parceria com o Banco Mundial apresentou a Série Água Brasil nº 8 no qual apresentou uma abordagem inovadora que avalia as implicações da mudança climática para a gestão da água na região Nordeste do Brasil;
- 2013-2015 - Em conjunto com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), a ANA cria o documento "Mudanças climáticas e recursos hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação". Com o objetivo de apoiar a formulação do Plano Nacional de Adaptação às Mudanças do Clima;
- 2015 - A ANA, juntamente com o CNPq e a CAPES, lança editais de Mudança Climática e Recursos Hídricos para pesquisas e projetos sobre os impactos das mudanças nos recursos hídricos;
- 2015 - A ANA apresentou um relatório de consultoria intitulado "Outorga de direito de uso, tendo em vista as incertezas dos cenários futuros, em face às Mudanças Climáticas" no qual tem por objetivo o aperfeiçoamento dos processos de outorga e alocação de água tendo em vista as incertezas decorrentes de eventuais mudança climática e de regimes hidrológicos;
- 2016 - A ANA dá início a programas de capacitação em metodologias de análise de custo-benefício em mudanças do clima, com o apoio do Grupo de Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas;

- 2016 - A ANA em parceria com a FUNCEME apresenta o estudo “Adaptação do Planejamento e da Operação dos Recursos Hídricos à Variabilidade e Mudança Climática na Bacia Estendida do São Francisco”;
- 2017 - ANA integra a nova formação do Fórum Brasileiro de Mudança do Clima (FBMC), cujo objetivo é conscientizar a sociedade e contribuir para discussão de ações necessárias para o enfrentamento da mudança climática;
- 2016-2018 - A ANA incorpora nos planos de recursos hídricos das bacias do Piranhas-Açu, Grande e Paraguai cenários de mudança climática;
- 2017-2018 - A ANA em parceria com a FGV apresenta o primeiro estudo, ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO DE MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO À MUDANÇA DO CLIMA, que avalia estratégias de adaptação à mudança climática no Brasil;
- 2021-2022 - A ANA desenvolve o primeiro estudo em escala nacional referente ao impacto da mudança climática na disponibilidade hídrica no âmbito da atualização do Plano Nacional de Recursos Hídricos.

Essa linha do tempo, ilustrada na **Figura 2**, mostra um pouco a importância que é dada a temática na agência e é importante destacar o aprendizado adquirido pela ANA do ponto de vista técnico que possibilitou criar uma expertise nesse tema, e que de certa forma todo esse conhecimento adquirido acaba desaguando neste estudo aqui apresentado.



**Figura 2** - Linha do tempo da atuação da ANA na temática da mudança climática.



## 2013-2015

- ANA/CGEE apresentam diretrizes para adaptação as MC's no apoio ao PNAMC

## 2015

- ANA/CNPQ/CAPES lançam editais de apoio a pesquisa em Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos
- ANA apresentou estudo de outorga e mudanças climáticas



## 2013

- Estudo da ANA/Banco Mundial do impacto de MC's no NE



## 2016

- ANA/ FGV dá início a programas de capacitação em ACB e MC's
- ANA/ FUNCEME apresenta estudo de MC's na Bacia do Rio São Francisco



## 2017

- ANA integra a nova formatação do FBMC

## 2016-2018

- A ANA incorpora nos PRH das bacias de Piranhas-Açu, Grande e Paraguai cenários de MC's

## 2018

- ANA/FGV apresentam ACB de medidas de adaptação na bacia do Piranhas





5

OBJETIVOS

## 5. OBJETIVOS

**A**valiar os cenários representativos de mudança do clima e os impactos decorrentes dessa mudança sobre a disponibilidade hídrica no Brasil. Essa avaliação é apresentada em 3 horizontes temporais (2015

a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2100) e na menor escala territorial disponível considerando o recorte espacial dado pela base hidrográfica otocodificada (BHO) utilizada pela ANA no planejamento e gestão de recursos hídricos.

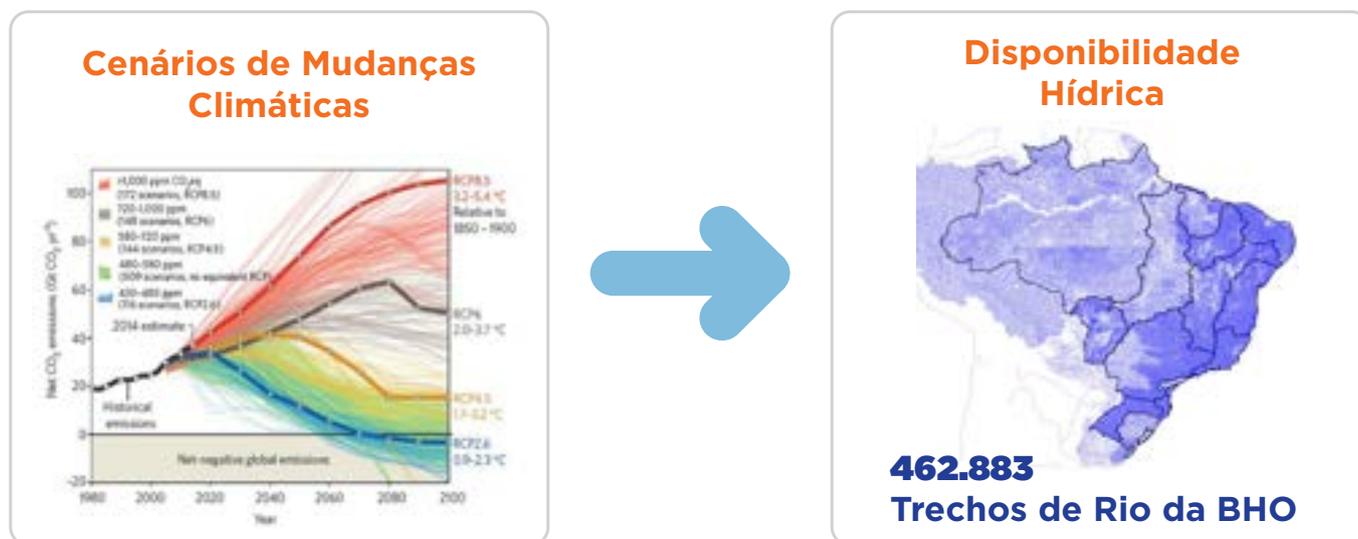


Figura 3 - Ilustração esquemática do objetivo geral do estudo.

# 6

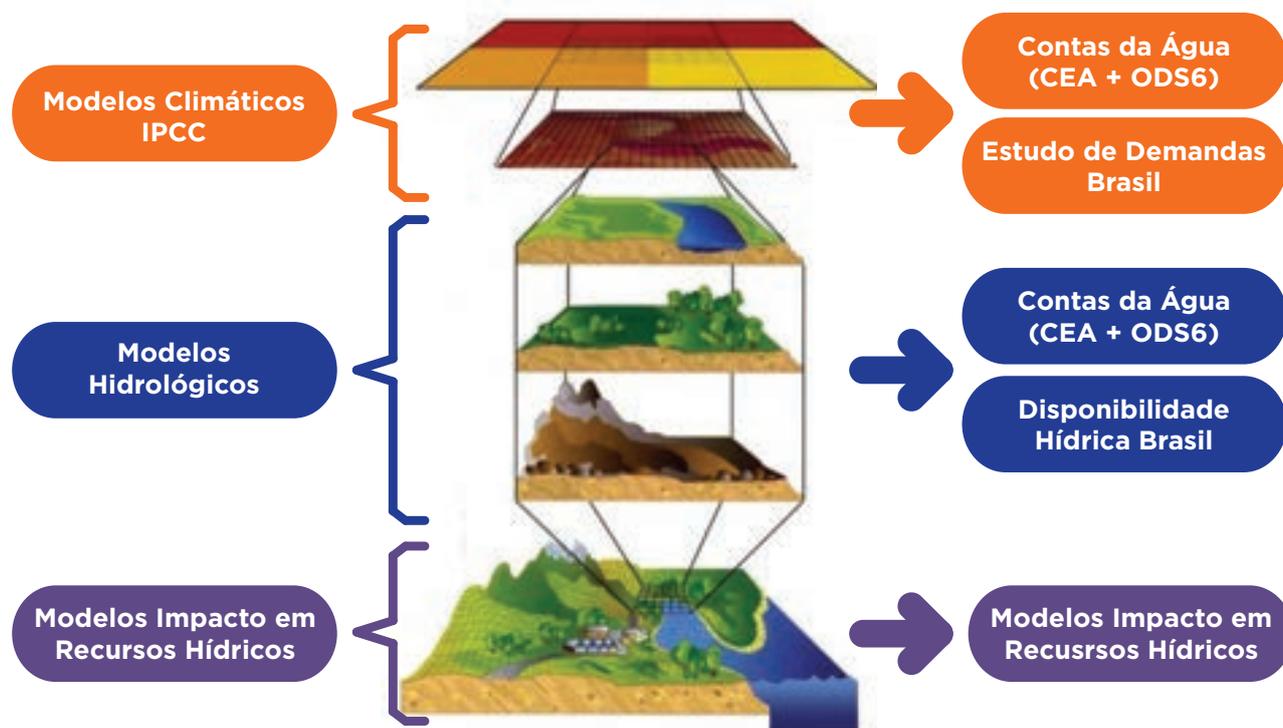
## METODOLOGIA

### 6.1. Estratégia de Ação da Avaliação do Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil

Duas abordagens principais são comumente implementadas na elaboração de estudo de mudança climática na área de recursos hídricos. A abordagem “bottom-up”, onde os limites de vulnerabilidade e as respostas locais são analisados empiricamente para definir estratégias de adaptação adequadas ao local estudado. Alguns autores referem-se a essa abordagem ao usar o conhecimento local por meio de abordagens participativas para projetar cenários futuros e definir estratégias de adaptação relevantes (García et al. 2014). Outros autores consideram a abordagem como um processo de planejamento baseado em robustez e cenários mais amplos. No entanto, em ambas as interpretações tal abordagem é mais voltada para análises locais ou regionais.

Em escala nacional, a abordagem “top-down” é mais adequada. Essa abordagem, utilizada nesse estudo, envolve uma melhoria na resolução espacial (“downscaling”) das projeções climáticas dos MCGs sob um conjunto de cenários de emissão para fornecer insumos para modelos hidrológicos e de gestão de recursos hídricos estimando impactos potenciais, fornecendo subsídios para definição de estratégias de adaptação (Figura 4).

No entanto, essa abordagem enfrenta o problema da “cascata de incertezas”, com a incerteza se expandindo a cada etapa do processo ao passar das projeções globais e regionais para o estudo dos impactos locais usados para definir as respostas de adaptação (Clark et al., 2016). Essa questão das incertezas é um ponto crucial nas avaliações de impacto de mudança climática.



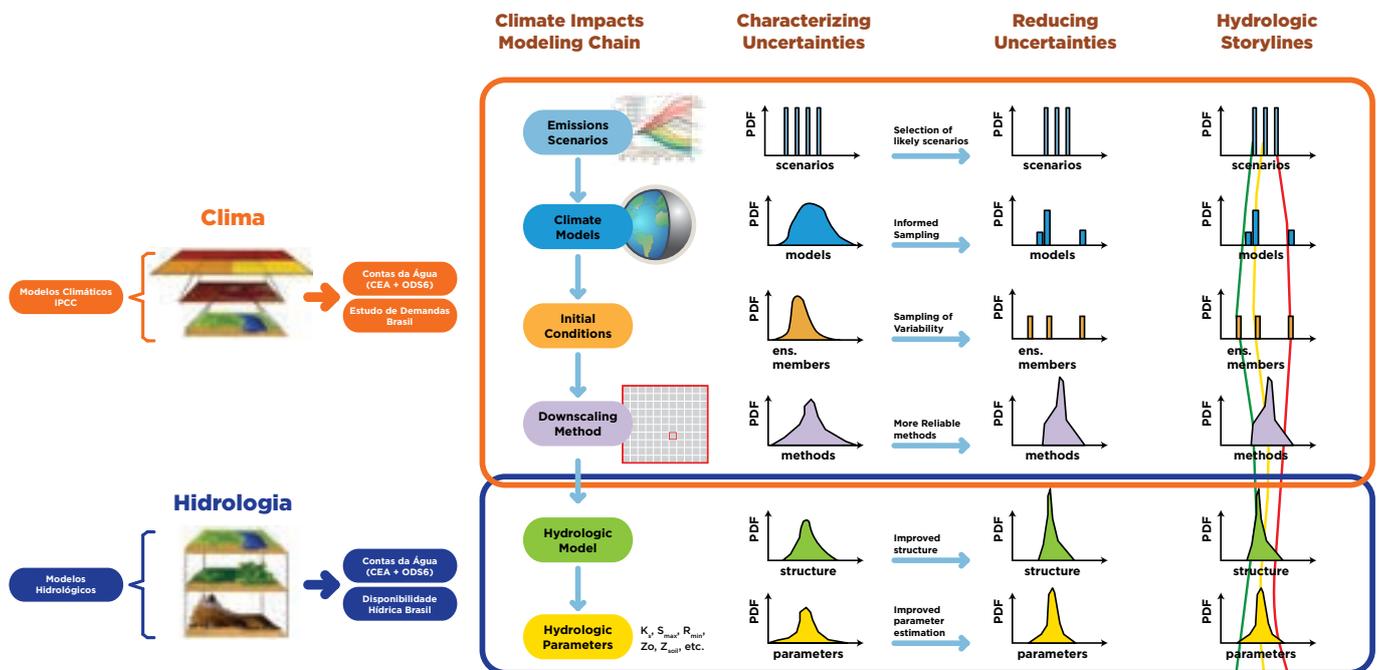
**Figura 4** - Abordagem “top-down” na avaliação do impacto da mudança climática nos recursos hídricos. (Adaptado de García et al. 2014)

A alta sensibilidade dos sistemas de recursos hídricos à variabilidade climática cria fortes motivações científicas e sociais para caracterizar e compreender as incertezas hidrometeorológicas. Conforme ilustrado na **Figura 5**, a cascata de incertezas que envolvem estudos de impacto da mudança climática nos recursos hídricos, podem ser subdivididas em uma componente climática e outra componente hidrológica. Na componente climática, inicialmente, observa-se um alto grau de incerteza em definir o cenário de emissão futura dos gases de efeito estufa, pois dependem de como o comportamento humano evoluirá no futuro, depois existem uma gama ampla de incertezas associados aos parâmetros e estrutura dos MCGs. Para cada combinação de cenário de emissão e modelo, as condições iniciais impõem uma nova camada de incerteza, na medida que a depender da sensibilidade do modelo as trajetórias de determinadas variáveis climáticas podem ser bem diferentes. Ainda na componente climática, as técnicas fundamentais de melhoria da escala espacial dos modelos, denominadas de “*downscaling*”,

adiciona mais uma camada de incerteza. Na componente hidrológica, tanto a estrutura do modelo como as incertezas na estimativa dos seus parâmetros, incluindo a forma como eles evoluirão no futuro, introduz novas e consideráveis camadas de incerteza.

Com o avanço da ciência e novas tecnologias é possível reduzir essas incertezas. No entanto, conforme ilustrado na **Figura 5**, mesmo com essa redução, uma parte importante da incerteza continuará a existir, sendo assim fundamental que os cenários climáticos futuros plausíveis sejam considerados de modo a incorporar essas incertezas nas avaliações de impacto.

A partir da abordagem “*top down*” adotada no estudo e as incertezas envolvidas, considerando a escala nacional de interesse e a importância em avaliar o impacto da mudança climática na escala espacial utilizada no planejamento e gestão de recursos hídricos da ANA, definiu-se a estratégia metodológica a ser empregada para avaliação do impacto da mudança climática nos recursos hídricos do Brasil.



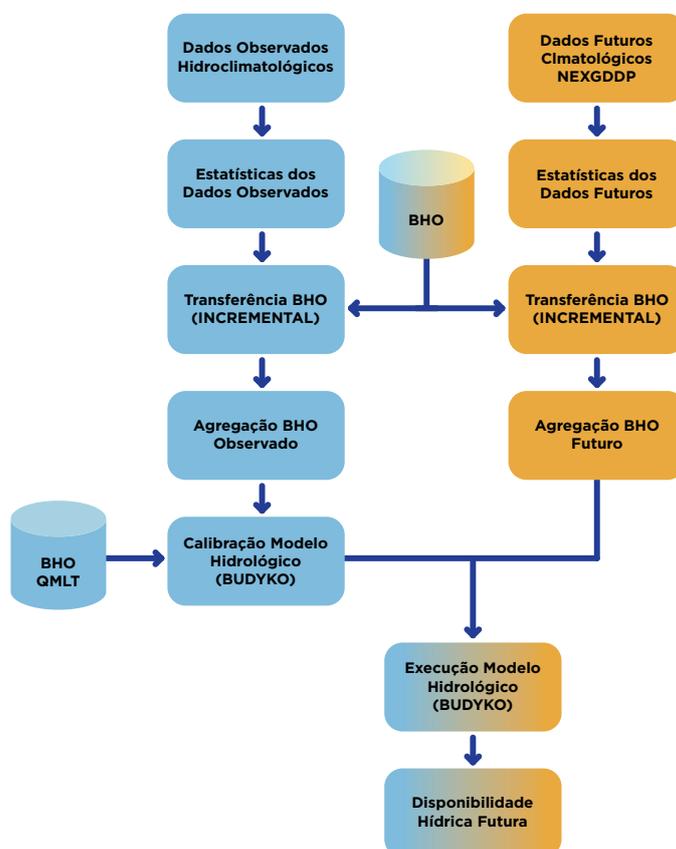
**Figura 5** - Esquema que explicita as inúmeras incertezas nas avaliações dos impactos hidrológicos da mudança climática e o desenvolvimento de histórias hidrológicas quantitativas representativas.

(Adaptado de Clark et al. 2016)

Uma etapa fundamental na definição metodológica foi a escolha do tipo de modelagem hidrológica que seria utilizado na transformação dos dados de clima em vazão. Nesse processo, foram considerados diferentes aspectos como: escala do problema, disponibilidade de dados, tempo de execução do estudo, conhecimento da modelagem hidrológica pela equipe e exigências computacionais. Nesse sentido, optou-se pela modelagem hidrológica menos complexa baseada na hipótese de Budyko.

Conforme veremos a frente, essa abordagem vem sendo empregada em diversos estudos de impacto da mudança climática nos recursos hídricos no mundo (Lv et al., 2019; Wu et al., 2017; Zhou et al., 2015). Inerente a qualquer modelo hidrológico, existem inúmeras incertezas nesse tipo de modelagem, principalmente quando empregada para estudos de mudança climática, no entanto, algumas vantagens como a parcimônia do modelo e a não necessidade de ter que corrigir o viés dos dados climáticos oriundos dos MCGs foram decisivas na escolha dessa abordagem.

Assim, conforme ilustrado na **Figura 6**, a etapa inicial da metodologia empregada envolveu a obtenção dos dados hidroclimáticos observados (dados do passado e presente) e futuros. Os dados futuros correspondem as projeções futuras do clima oriundos dos MCGs em toda América do Sul. De posse desses dados foram obtidas estatísticas de interesse da modelagem hidrológica. Essas estatísticas foram transferidas para a base hidrográfica otocodificada (BHO) de referência da ANA. Com base nas estatísticas observadas e a base de disponibilidade hídrica atual disponível na BHO, foi estimado o parâmetro do modelo hidrológico baseada na hipótese de Budyko. Por fim, esse modelo ajustado foi aplicado na variação relativa do clima futuro em relação ao presente para obtenção das vazões e disponibilidade hídrica futura. A avaliação do impacto deu-se a partir da análise comparativa com a disponibilidade hídrica presente. A seguir serão apresentados um maior detalhamento de cada uma das etapas ilustradas na **Figura 6**.



**Figura 6** - Esquema metodológico utilizado na avaliação do impacto da mudança climática nos recursos hídricos do Brasil.

## 6.2. Base de Dados

### 6.2.1. Presente (Observado)

Em estudos hidrológicos, como os voltados para mudança climática, é essencial a utilização da máxima informação disponível, de modo que possa ser explorado nas diferentes análises o conjunto de possibilidades que caracterizem o comportamento hidrológico e os recursos hídricos de determinada região. Sendo assim, foi realizado um amplo levantamento dos dados espaciais e hidrometeorológicos

disponíveis no Brasil que se apoia as diferentes análises de interesse do estudo. A **Figura 7** ilustra as diferentes bases de dados hidroclimatológicos consideradas. Embora todas as fontes de informação de dados hidroclimatológicos observados tenham sido utilizadas em alguma medida, as principais base de dados que foram aplicadas no estudo foi a base aqui denominada de HIDRO e a XAVIER.

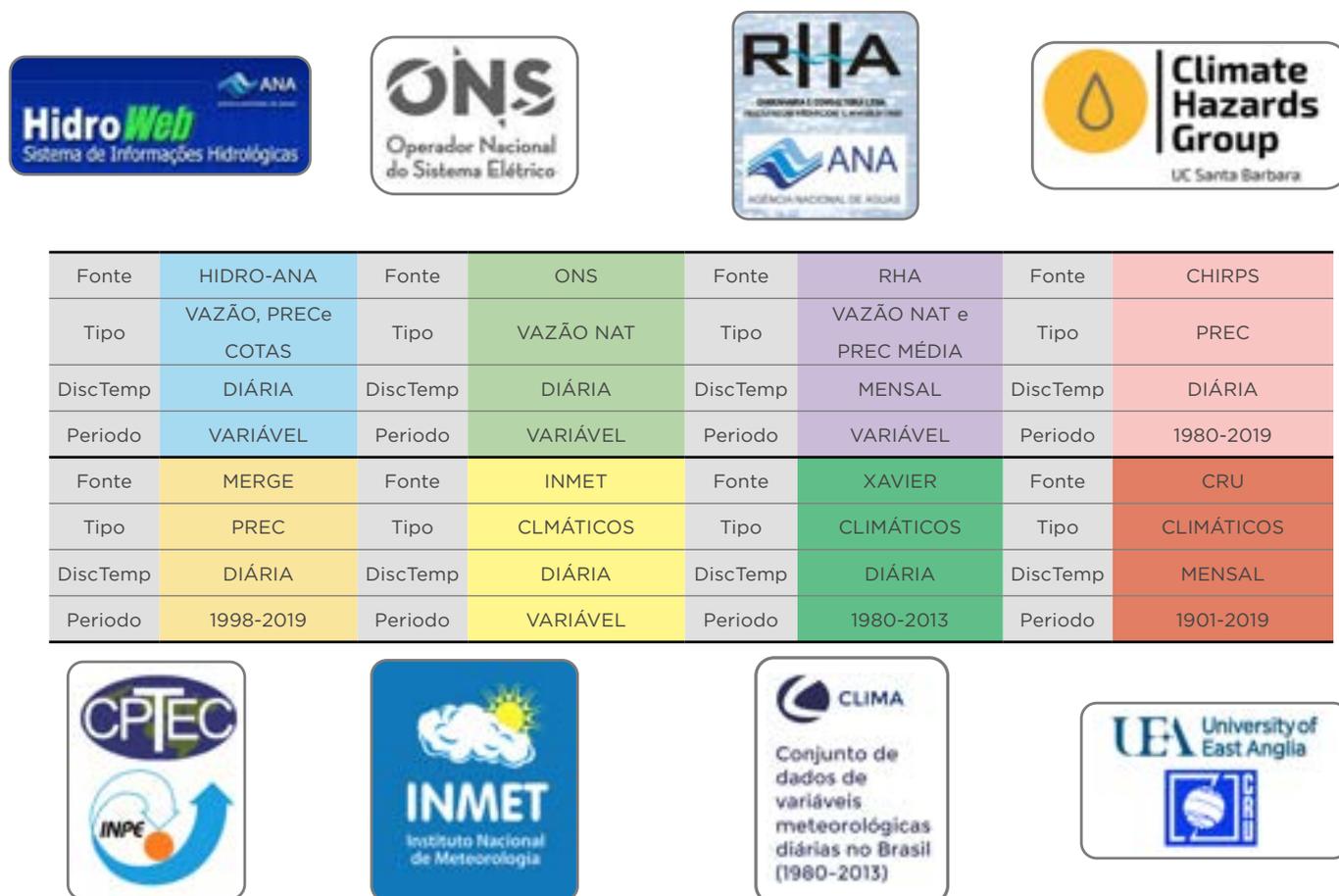


Figura 7 - Fontes dos dados observados utilizados no estudo.

A base aqui denominada HIDRO é uma base integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos. A ANA é responsável pela coordenação da RHN, um sistema que atualmente abriga 4.641 pontos de monitoramento no país divididos em estações que monitoram parâmetros relacionados aos rios (1.874), como níveis, vazões, qualidade da água e transporte de sedimentos, e outros que monitoram principalmente as chuvas (2.767).

A base HIDRO, é uma importante fonte de informação hidrológica para a sociedade e instituições públicas e privadas, pois os dados coletados pelas estações hidrometeorológicas são imprescindíveis para a gestão dos recursos hídricos e diversos setores econômicos, como geração de energia, irrigação, navegação e indústria, além do projeto, manutenção e operação de infraestrutura hidráulica de pequeno e grande porte, como barragens, drenagem pluvial urbana e mesmo bueiros e telhados. Uma vez que os dados em tempo real são disponibilizados, pode-se, ainda, acompanhar a ocorrência de eventos hidrológicos considerados críticos, inundações e secas, e se planejar medidas de mitigação dos impactos decorrente desses eventos. Essa base de dados pode ser acessada em: [www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf](http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf).

A base aqui denominada XAVIER corresponde a uma grade regular de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  de resolução espacial construída a partir de dados interpolados de 9259 estações pluviométricas e 735 estações meteorológicas cobrindo todo o território brasileiro durante o período de 1980-2015 (Xavier et al. 2015, 2017). Essa base foi utilizada como fonte principal das variáveis climáticas precipitação e evapotranspiração, fundamentais no ajuste e aplicação do modelo hidrológico utilizado. O conjunto de dados está disponível em: [utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA](http://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA).

A base HIDRO é a principal fonte das estimativas de disponibilidade hídrica utilizadas no estudo, além do mais, os dados de precipitação são utilizados na composição dos dados em grade da base de dados XAVIER. A base de dados XAVIER foi a principal informação climatológica observada utilizada no estudo, servido tanto na utilização do modelo hidrológico como na avaliação de impacto da mudança climática das variáveis climatológicas.

### 6.2.2. Futuro (Projeções)

Os MCGs são ferramentas fundamentais na geração de cenários representativos de mudança climática futuras. Esses modelos consideram de forma quantitativa o comportamento climático dos principais elementos do sistema terrestre e suas interações, tais como: atmosfera, oceanos, criosfera (áreas com gelo e neve), vegetação, ciclos biogeoquímicos, etc. Esses modelos possibilitam que sejam simulados prováveis cenários de evolução do clima considerando cenários de emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE).

Nesse sentido, pode-se representar explicitamente algumas incertezas ao utilizar estes modelos. Uma dessas incertezas está associada a trajetória futura das emissões dos GEE e de aerossóis atmosféricos, que depende de decisões humanas sobre o caminho socioeconômico-ambiental desejado e que venha a ser efetivamente implementado. Outra fonte importante de incerteza advém do fato que os modelos matemáticos são representações imperfeitas da natureza e diferentes modelos climáticos diferem substancialmente em suas projeções para o clima do futuro, dado o mesmo cenário de evolução das concentrações de GEE e de aerossóis na atmosfera. Com o avanço do conhecimento científico sobre o funcionamento do complexo sistema climático, espera-se cada vez mais à diminuição dessas incertezas nas projeções da mudança climática em escala regional. No entanto até que isso se concretize uma das principais estratégias atualmente adotada é utilizar vários cenários de emissões de GEE e diferentes modelos climáticos. Essa combi-

nação é aqui denominada de forma genérica de cenário climático.

Os dados provenientes do IPCC são resultados de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa que contribuem para a confecção do relatório do IPCC-AR6, forçadas pelas concentrações observadas de gases de efeito estufa durante o século XX e forçadas por uma concentração estimada para o século XXI.

Os modelos climáticos estão em constante atualização, pois diferentes grupos de modelagem ao redor do mundo melhoram a resolução espacial, incorporam novos processos físicos e ciclos biogeoquímicos. Esses grupos de modelagem coordenam suas atualizações de acordo com o cronograma dos relatórios de avaliação do IPCC, divulgando um conjunto de resultados de modelos – conhecidos como “rodadas”.

Esses esforços coordenados fazem parte dos Projetos de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP). O objetivo do CMIP é gerar um conjunto de simulações padrão que cada modelo irá executar. Isso permite que os resultados sejam diretamente comparáveis em diferentes modelos, para ver onde eles concordam e discordam sobre mudanças futuras. Um dos principais conjuntos de simulações executadas pelos modelos são os cenários climáticos futuros, onde os modelos recebem um conjunto comum de concentrações futuras de gases de efeito estufa, aerossóis e outras forças climáticas para projetar o que pode acontecer no futuro.

O quinto relatório de avaliação do IPCC de 2013 (AR5) apresentou modelos climáticos do CMIP5, enquanto o mais recente relatório de avaliação do IPCC de 2021 (AR6) apresentou novos modelos CMIP6 de última geração.

Como parte da fase preparatória para o desenvolvimento dos novos cenários para o AR5, foram criados os chamados RCPs (Representative Concentration Pathways), que servem como entrada para modelagem climática e química atmosférica nos experimentos numéricos do CMIP5. Os RCPs recebem

seus nomes a partir dos níveis das forçantes radiativas, conforme relatado por cada equipe de modelagem elaboradora de cada RCP. Assim, RCP-X implica em um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização ou de pico ou ao final do século XXI corresponde a X W.m<sup>-2</sup>. O cenário RCP4.5, por exemplo, pressupõe que a forçante radiativa estabiliza pouco depois de 2100, sem ultrapassar o nível de radiação a longo prazo de 4,5 W/m<sup>2</sup>. Essa projeção é consistente com a estabilização da demanda energética mundial, programas de reflorestamento fortes e políticas climáticas rigorosas. Além disso, sugere uma estabilização das emissões de metano associadas um leve aumento das emissões de CO<sub>2</sub> até 2040 até atingir o valor alvo de 650 ppm de CO<sub>2</sub> equivalente na segunda metade do século XXI. Já o cenário RCP8.5 sugere um crescimento contínuo da população associada a um desenvolvimento tecnológico lento, resultando em acentuadas emissões de dióxido de carbono. Este cenário é considerado o mais pessimista para o século XXI em termos de emissões de gases do efeito de estufa, sendo consistente com nenhuma mudança política para reduzir as emissões e forte dependência de combustíveis fósseis.

O CMIP6 representa uma expansão substancial em relação ao CMIP5, em termos do número de grupos de modelagem participantes, do número de cenários futuros examinados e do número de diferentes experimentos realizados. O CMIP6 consiste nas “rodadas” de cerca de 100 modelos climáticos diferentes sendo produzidos por cerca de 50 grupos de modelagem espalhados pelo mundo.

Na preparação para o IPCC AR6, a comunidade de modelagem de energia desenvolveu um novo conjunto de cenários de emissões impulsionados por diferentes pressupostos socioeconômicos, denominados de “**Caminhos Socioeconômicos Compartilhados**” (SSPs). Vários desses cenários SSPs foram selecionados para forçar modelos climáticos para o CMIP6.

Especificamente, um conjunto de cenários foi escolhido para fornecer uma série de resultados diferentes da mudança climática no

final do século. Como visto anteriormente, o IPCC AR5 apresentou quatro caminhos RCPs que examinaram diferentes possíveis emissões futuras de gases de efeito estufa. Esses cenários – RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 – têm novas versões no CMIP6. Esses cenários atualizados são chamados de SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 e SSP5-8.5, cada um dos quais resulta em níveis de forçante radiativa semelhantes em 2100 como seu predecessor no AR5. Vários novos cenários também foram considerados para o CMIP6, a fim de fornecer uma seleção mais ampla de futuros para os cientistas simularem. O CMIP6 adicionou um novo cenário – SSP3-7.0 – que fica bem no meio da faixa de resultados da linha de base produzidos pelos modelos de energia. Agora, os pesquisadores podem examinar os resultados do pior caso (SSP5-8.5), do meio do caminho (SSP3-7.0) e os mais otimistas (SSP4-6.0) ao modelar como o mundo pode aquecer caso não seja adotado nenhuma política climática.

Uma grande melhoria nos cenários do CMIP6 é uma melhor exploração dos possíveis resultados da linha de base “sem nenhuma política climática”. A geração anterior de modelos climáticos apresentados no CMIP5 incluía apenas um cenário de linha de base muito alto (RCP8.5) e um cenário de mitigação relativamente pequeno consistente com os resultados de linha de base (RCP6.0). Grande parte da literatura subsequente baseou-se no RCP8.5 como a única linha de base sem políticas, muitas vezes se referindo a ele como “linha de tendência ou *business as usual*”, apesar de ser um dos piores casos entre os possíveis resultados sem políticas.

Embora no CMIP6 tenha havido uma melhoria dos modelos em relação ao CMIP5, os MCGs, de um modo geral, ainda fornecem projeções de clima em escalas espaciais mundiais ou continentais com uma resolução não muito adequada às necessidades exigidas, por exemplo, no âmbito de planos de adaptação de recursos hídricos regional ou setorial (agricultura por exemplo). Devido às limitações computacionais e de dados, a resolução desses MCGs é normalmente maior que 100 km, o que limita consideravelmente

a sua capacidade de capturar detalhes espaciais nos padrões climáticos necessários ou desejados nas análises regionais ou locais.

Em resposta a essa necessidade, são utilizadas técnicas de melhoria na resolução espacial denominadas de “**downscaling**”, aplicadas no sentido de preencher as lacunas entre o que os MCGs podem oferecer e a qualidade da informação que normalmente é exigida na tomada de decisão. As técnicas de downscaling consistem em transferir determinada informação climática obtida em uma escala espacial e/ou temporal menos refinada para uma escala mais refinada. A hipótese principal no qual os métodos de downscaling se baseiam consiste na ideia de que o clima local é condicionado a partir de interação entre comportamentos atmosféricos de larga escala (padrões de circulação, temperatura, umidade etc.) e características locais (topografia, vegetação, corpos d’água, uso do solo etc.). Deste modo, são incorporadas informações locais aos resultados dos MCGs que possibilitam capturar de forma mais realista o comportamento da informação climática no local.

Tradicionalmente a literatura classifica as técnicas de downscaling em dois tipos: downscaling dinâmico e downscaling estatístico. O downscaling dinâmico consiste em utilizar modelos climáticos regionais (MCR), similares aos MCGs em seus princípios, mas com uma alta resolução. O MCR considera, como condição de contorno, a informação atmosférica de larga escala fornecida pelo MCG e incorpora informações locais considerando uma resolução espacial mais refinada, como por exemplo: uma topografia mais complexa, contrastes terra-oceano, heterogeneidades da superfície terrestre, melhorias no detalhamento da representação dos processos físicos etc.

O downscaling estatístico envolve o estabelecimento de relações empíricas entre as observações das variáveis atmosféricas de larga escala e variáveis climáticas locais. Uma vez que esse relacionamento foi determinado e validado, as variáveis atmosféricas projetadas para o futuro dos MCGs são usadas

para estimar as variáveis climáticas locais. Uma importante vantagem do downscaling estatístico em relação ao dinâmico, além do menor custo computacional, está no fato de poder se produzir uma estimativa para um local específico, o que no downscaling dinâmico não é possível, tendo em vista que o uso do MCR depende ainda da consideração de uma determinada resolução espacial, embora essa escala seja mais refinada que a oriunda do MCG. É importante destacar que a abordagem estatística depende fundamentalmente da hipótese de que a relação entre as variáveis climáticas de larga escala e as variáveis locais no presente permanecerão válidas sob as diferentes condições do clima futuro. Esta hipótese atualmente permanece sem evidência que a valide.

Em junho de 2015, a agência espacial americana (NASA) publicou por meio do projeto “NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections” (NEXGDDP) um conjunto de dados resultantes de um amplo downscaling estatístico dos cenários climáticos derivados das rodadas dos MCGs utilizados no âmbito da quinta fase do IPCC (CMIP5). Em 2022, houve uma ampla atualização do projeto, denominado de NEX-GDDP-CMIP6, considerando agora os dados oriundos do CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) que foram desenvolvidas em apoio ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC AR6) (Thrasher et al., 2022; Thrasher et al., 2021; Thrasher et al., 2012).

De acordo com NEXGDDP (2015) o objetivo da geração desses dados é fornecer um conjunto de dados globais, de alta resolução, de projeções de mudança climática com correção de viés que podem ser usados para avaliar impactos da mudança climática sobre os processos que são sensíveis a gradientes de clima em uma escala mais refinada e os efeitos da topografia local sobre as condicionantes climáticas.

A geração de dados do projeto NEX-GDDP-CMIP6 através do downscaling estatístico englobou, além do experimento histórico (experimento controle retrospectivo), as projeções de quatro cenários denominados de “Caminhos Socioeconômicos Compartilhados ou SSPs” (SSP2-4.5, SSP5-8.5, SSP1-2.6 e SSP3-7.0) (O’Neill et al. 2016) de 35 modelos climáticos utilizados no CMIP6 com discretização temporal diária. A resolução espacial adotada no NEXGDDP foi de 0.25° graus (aprox. 25 km x 25 km) de modo que os dados produzidos apresentam sempre a mesma grade, independentemente do modelo climático. A Figura 7 ilustra a grade do projeto NEXGDDP recortada para o Brasil. O período de dados do experimento controle denominado histórico é de 1950 a 2014 (período adotado pelo NEXGDDP). O período de dados disponíveis para as quatro projeções SSPs é de 2015 a 2100. O experimento histórico é essencial no estudo para seleção dos modelos que melhor representam o comportamento climático observado no presente.

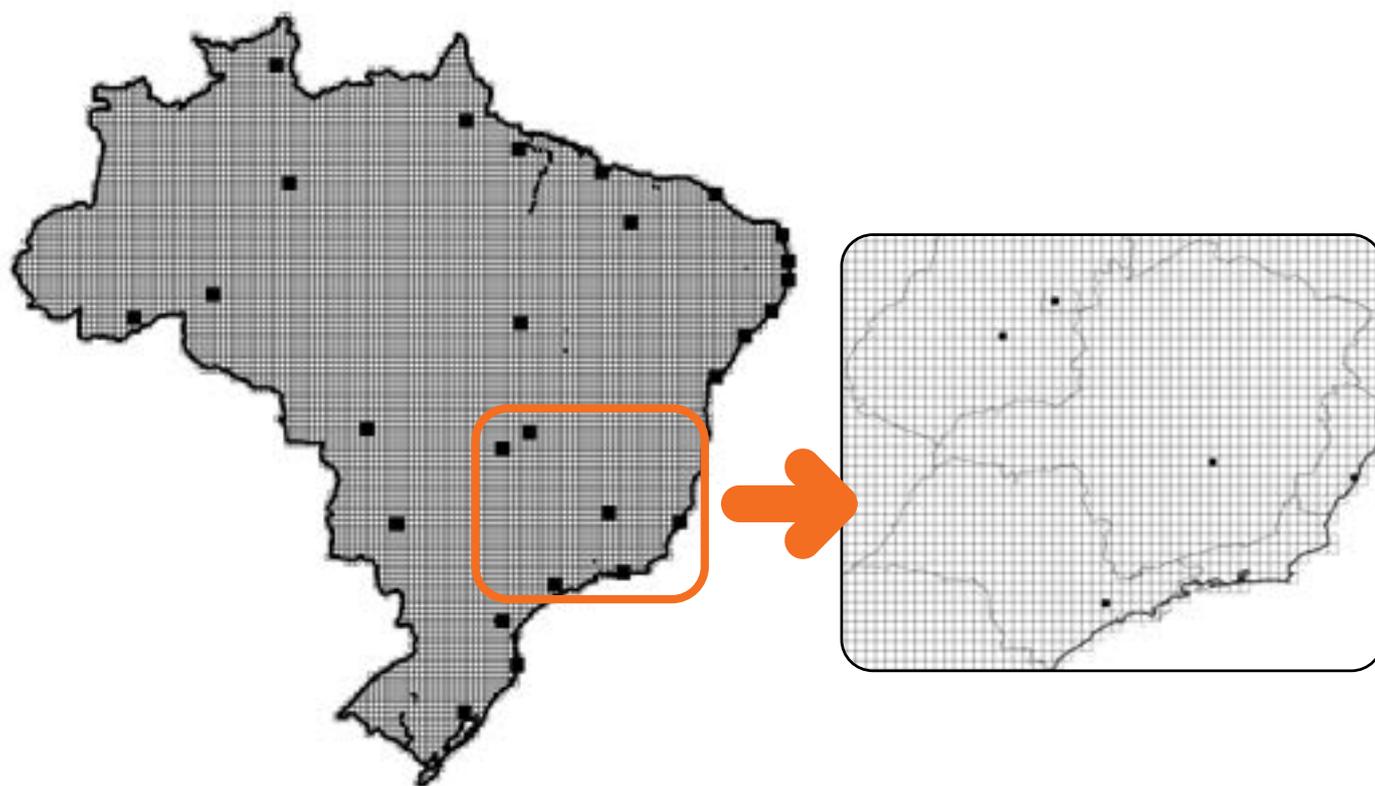
O procedimento de downscaling estatístico empregado no NEX-GDDP-CMIP6 foi realizado a partir do método de correção de viés por desagregação espacial BCSD (que em inglês significa Bias-Correction Spatial Disaggregation), o qual foi desenvolvido especificamente para tratar das limitações atuais das saídas dos MCGs. O método BCSD envolve basicamente duas etapas: a etapa de correção de viés (BC) e a etapa de desagregação espacial. Na etapa de correção de viés (BC) é utilizada a técnica de mapeamento quantil-quantil (Bárdossy e Pegram, 2011). Esse procedimento se baseia na comparação das funções cumulativas de probabilidade (curvas que mostram a probabilidade de a variável ser menor ou igual a um determinado valor) da variável observada e da variável estimada por um modelo climático para o período atual e para o futuro. Os dados observados utilizados no projeto NEXGDDP foram a base de dados em grade de dados observados do GFMD (Global Meteorological Forcing Dataset) gerado pela universidade de Princeton (Sheffield et al. 2006).

Na etapa de desagregação espacial (SD) do projeto foi realizado um procedimento de interpolação espacial linear nos dados com viés corrigido oriundos da etapa BC para a grade de 0,25° dos dados observados GFMD. Nessa etapa de desagregação é considerado um fator de escala que objetiva preservar as principais características dos dados espaciais. Esse fator de escala é definido a partir da climatologia observada e é aplicado nos dados dos MCGs já interpolados. Maiores detalhes referentes à metodologia BCSD podem ser encontrados em Thrasher et al. (2012). Maiores detalhes do projeto e de como efetuar o download dos dados podem ser obtidos em: [www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6](http://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6).

Embora o projeto do NEX-GDDP-CMIP6 contemple 35 modelos, no presente estudo foram utilizados 33 modelos, tendo em vista que dois dos modelos apresentaram fortes inconsistências nos resultados. Assim ao todo, foram utilizados 132 cenários de clima futuro, considerando 33 MCGs e 4 cenários SSPs (SSP2-4.5, SSP5-8.5, SSP1-2.6 e SSP3-7.0). A Tabela 1 apresenta os nomes dos modelos

climáticos do projeto NEX-GDDP-CMIP6, a variante da condição inicial utilizada e as variáveis climáticas disponibilizadas para cada modelo. As variáveis climáticas existentes no atual projeto são: umidade relativa próximo à superfície (hurs), umidade específica próximo à Superfície (huss), precipitação (pr), radiação de ondas longas descendente de superfície (rllds), radiação de ondas curtas descendentes de superfície (rsds), velocidade média diária do vento próximo à superfície (sfcWind), temperatura diária do ar próximo à superfície (tas), temperatura máxima diária do ar próximo à superfície (tasmax), temperatura mínima diária do ar próximo à superfície (tasmin).

O projeto NEX-GDDP-CMIP6 não engloba estimativas de evapotranspiração potencial, nesse sentido, para essa estimativa, foi utilizado o modelo de Hargreaves que emprega um menor número de variáveis, tendo por base os valores da temperatura do ar. Hargreaves e Samani (1985) propuseram a seguinte equação para estimativa da ETo utilizando apenas os valores das Temperaturas máxima, mínima e média do ar e da radiação no topo da atmosfera:



**Figura 8** - Grade do projeto NEX-GDDP-CMIP6 recortada para o Brasil. A direita um zoom da grade na região sudeste do Brasil.

$$Et0 = 0,023 \times (tasmax - tasmin)^{0,5} (tas + 17,8) R_a \quad (1)$$

em que a *tasmax* é temperatura máxima, *tasmin* é temperatura mínima, *tas* é temperatura média em °C e o *R<sub>a</sub>* é a radiação extraterrestre do dia em mm d-1.

**Tabela 1** - Modelos Climáticos utilizados no projeto NEXGDDP.

Modelo	Variante	hurs	huss	pr	rlds	rsds	sfcWind	tas	tasmax	tasmin
ACCESS-CM2	r1i1p1f1									
ACCESS-ESM1-5	r1i1p1f1									
BCC-CSM2-MR	r1i1p1f1									
CanESM5	r1i1p1f1									
CESM2	r4i1p1f1									
CESM2-WACCM	r3i1p1f1									
CMCC-CM2-SR5	r1i1p1f1									
CMCC-ESM2	r1i1p1f1									
CNRM-CM6-1	r1i1p1f2									
CNRM-ESM2-1	r1i1p1f2									
EC-Earth3	r1i1p1f1									
EC-Earth3-Veg-LR	r1i1p1f1									
FGOALS-g3	r3i1p1f1									
GFDL-CM4 (gr1)	r1i1p1f1									
GFDL-CM4 (gr2)	r1i1p1f1									
GFDL-ESM4	r1i1p1f1									
GISS-E2-1-G	r1i1p1f2									
HadGEM3-GC31-LL	r1i1p1f3									
HadGEM3-GC31-MM	r1i1p1f3									
IITM-ESM**	r1i1p1f1									
INM-CM4-8	r1i1p1f1									
INM-CM5-0	r1i1p1f1									
IPSL-CM6A-LR	r1i1p1f1									
KACE-1-0-G	r1i1p1f1									
KIOST-ESM	r1i1p1f1									
MIROC-ES2L	r1i1p1f2									
MIROC6	r1i1p1f1									
MPI-ESM1-2-HR	r1i1p1f1									
MPI-ESM1-2-LR	r1i1p1f1									

**Verde** = histórico e todos os SSPs disponíveis; **amarelo** = histórico e alguns SSPs disponíveis; **vermelho** = sem dados disponíveis

Os dados do NEXGDDP da fase 5 já foram empregados em alguns estudos de impactos de mudança climática no Brasil tanto na escala regional como também numa escala nacional. Em estudos regionais por exemplo, esses dados já foram empregados na avaliação do impacto da mudança climática no Distrito Federal e região integrada de desenvolvimento do DF (Menezes et al., 2016) e na disponibilidade hídrica na Bacia do Rio Grande no âmbito do plano dessa bacia (ANA, 2018). Esses dados foram também utilizados na análise do impacto da mudança climática no zoneamento de aptidão climática das principais frutíferas de clima temperado nas regiões sul e sudeste do Brasil (Santos, 2018). Já na escala nacional os estudos focaram na análise do impacto das mudanças climáticas nos extremos de precipitação (Souza e Reis, 2017; Cortez, 2020) e de temperatura (Avila-Diaz et al., 2020b).

Recentemente, Avila-Diaz et al. (2020a) realizaram uma importante avaliação do desempenho de 25 MCGs em representar características importantes do clima presente no Brasil, sendo 21 desses modelos oriundos do NEXGDDP e 4 modelos regionais desenvolvidos por meio de um downscaling dinâmico obtidos

do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram utilizados índices climáticos de extremos de temperatura e precipitação no período de 1980 a 2005. Como dados observados foram utilizadas estações meteorológicas e a grade de dados do GFMD ambas empregadas no âmbito do projeto NEXGDDP. A partir de diferentes métricas de desempenho foi desenvolvido um ranqueamento dos modelos no qual obteve-se aqueles modelos que melhor representavam o clima observado no presente. Os resultados mostraram que os dados dos MCGs oriundos do downscaling estatístico do NEXGDDP foram capazes de reproduzir os índices climáticos observados, apresentando um desempenho superior aos modelos oriundos do INPE. A classificação geral mostrou que três modelos do NEXGDDP apresentaram um desempenho superior em detrimento de todos os outros: CNRM-CM5, CCSM4 e MRI-CGCM3.

Todos os dados do estudo, tanto os observados como as projeções climáticas futuras, foram organizados e armazenados no sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) PostgreSQL e sua extensão espacial PostGIS, conforme ilustrado na Figura 8 abaixo.

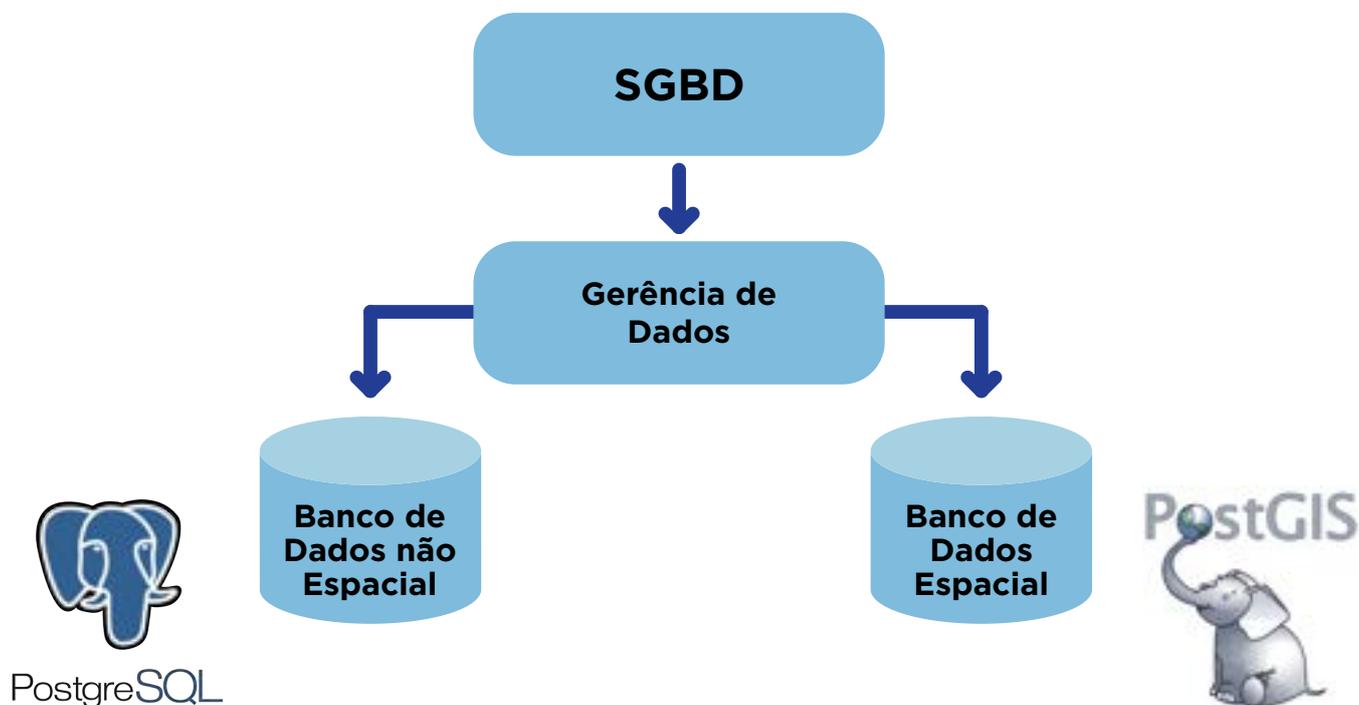


Figura 8 - Esquema de banco de dados utilizado no estudo.

### 6.2.3. Base Hidrográfica BHO

A Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) utilizada pela ANA na gestão de recursos hídricos é obtida a partir do mapeamento sistemático brasileiro. A BHO é gerada a partir da cartografia digital da hidrografia do país e organizada de modo a gerar informações hidrologicamente consistentes. Para tanto, a BHO representa a rede hidrográfica em trechos entre os pontos de confluência dos cursos d'água de forma unifilar (ANA,2019b).

Cada trecho é associado a uma superfície de drenagem denominada ottobacia, à qual é atribuída a codificação de bacias de Otto Pfafstetter (Pfafstetter,1989). Uma característica essencial dessa representação é ser topologicamente consistente, isto é, representar corretamente o fluxo hidrológico dos rios, por meio de trechos conectados e com sentido de fluxo. A base utilizada no estudo é derivada da BHO multiescalas 2017 e contém apenas os cursos de águas com área maior ou igual a 5km<sup>2</sup> e todos as drenagens de domínio federal. O elemento lógico curso de água compreende todas as linhas de drenagem que desde a foz até a sua nascente possui no seu traçado de acordo com a maior área a montante. Os vértices das áreas de drenagem foram simplificados para 100m a partir da base original.

A BHO é o núcleo dos dados de hidrografia do módulo de inteligência geográfica do sistema nacional de informações sobre recursos hídricos (SNIRH). Possibilita integrar os diversos planos de informação a respeito dos usos e da disponibilidade hídrica dos cursos d'água, associando dados tabulares aos elementos espaciais, preservando a consistência hidrológica das informações. Dessa forma, a localização espacial do dado é considerada, o que é essencial a um sistema de fluxos unidirecionais como a rede hidrográfica. Possibilita consultar trechos a montante e a jusante de um determinado ponto de interesse, por meio de consulta tabular, funciona como uma base de interoperabilidade entre as instituições responsáveis pela gestão dos recursos hídricos, possibilitando a integração a partir de um mesmo critério e referência geográfica (ANA, 2019b).

A BHO foi desenvolvida a partir da cartografia digital vetorial da hidrografia do país, na qual foram feitas edições de modo a conferir consistência topológica para uma correta representação da rede hidrográfica, por meio de trechos conectados e com sentido de fluxo, conforme o manual de construção da base hidrográfica ottocodificada da ANA (ANA,2007). Cada trecho da BHO foi codificado pelo sistema de Otto Pfafstetter (ottocodificação), para o que foi produzida a identificação do curso d'água principal de cada subsistema hidrográfico, obtido pela maior área de contribuição a montante de cada confluência, tendo como unidades elementares de drenagem as ottobacias geradas a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (SRTM).

A aquisição da BHO requer a construção de uma rede unifilar, topologicamente consistente quanto aos aspectos de conectividade, em formato de grafo (árvore) e sem confluências duplas. Esse requerimento também se aplica às tradicionais análises de rede em ambiente SIG (ANA, 2007).

As representações de cursos d'água por linhas duplas ou por polígonos são adequadas para a visualização e a produção cartográfica. Entretanto, para a análise de redes e para a construção da BHO, os cursos d'água devem ser representados por segmentos de linha ou arcos (que representam os trechos de curso d'água), conectados por nós (que representam a nascente, as confluências e a foz).

Uma característica importante da BHO é que podem ser incorporados níveis crescentes de detalhamento das bacias, preservando-se os códigos atribuídos às divisões anteriores, o que mantém a coerência da codificação qualquer que seja a escala de trabalho. Além disso, a lógica dessa codificação confere à BHO uma grande facilidade para implementação de consultas tabulares com a mesma consistência topológica das consultas espaciais, o que melhora muito o desempenho dos sistemas que a utilizam.

Outra possibilidade é poder ser utilizada para suportar diversos modelos e sistemas, tais como modelos de chuva-vazão e os subsistemas do SNIRH, permitindo que informações físicas, socioeconômicas e hidrológicas, entre as quais disponibilidade e demanda pelos recursos hídricos, sejam associadas às áreas de contribuição hidrográfica.

No caso do presente estudo, foi utilizado no processo ajuste do modelo hidrológico e avaliação da mudança climática os dados de disponibilidade hídrica e vazão média de longo termo (Q<sub>mlt</sub>) constantes na base hidrográfica BHO 5k, que é uma simplificação da base BHO 2017, na qual são considerados apenas os cursos d'água que drenam áreas acima de 5km<sup>2</sup>. Essa base é um esforço de compilação e validação de vários estudos desenvolvidos na ANA relacionados a estimativa de vazões de referência na base hidrográfica. As vazões de referência existentes em cada trecho de rio são utilizadas no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos da ANA e representa a oferta de água a ser considerada no Balanço Hídrico.

### 6.3. Modelagem Hidrológica

#### 6.3.1. Budyko

No geral, três abordagens principais de avaliação do impacto da mudança climática têm sido amplamente utilizadas: modelagem hidrológica, métodos estatísticos e métodos de elasticidade climática baseados na hipótese de Budyko. A modelagem hidrológica inclui mecanismos físicos complicados e é eficiente para estimar as contribuições da mudança climática e atividades humanas em diferentes escalas de tempo; no entanto, os modelos hidrológicos requerem uma grande quantidade de dados de entrada observados, são demorados e produzem incertezas na calibração e validação. Os métodos estatísticos são relativamente simples de calcular, no entanto, carecem de um mecanismo físico que forneça um maior embasamento teórico. Recentemente, os métodos de elasticidade climática baseados em Budyko têm

sido extensivamente empregados porque envolvem cálculos relativamente simples e incluem um mecanismo físico básico. Esses métodos provaram ser razoáveis e confiáveis (Jiang et al., 2015).

Para estudar os efeitos da mudança climática, abordagens que fazem uso da sensibilidade das vazões de determinado rio com mudanças nas variáveis climáticas de determinada bacia hidrográfica, vêm surgindo como uma alternativa mais parcimoniosa e efetiva em detrimento de métodos tradicionais que utilizam modelos hidrológicos mais complexos (Wu et al., 2017). O conceito de elasticidade, bastante empregado na área econômica, é utilizado neste estudo para descrever essa sensibilidade das vazões em relação a mudança climática. A elasticidade-clima das vazões é definido como sendo uma mudança percentual da vazão média de longo termo de uma determinada bacia hidrográfica devido a uma mudança percentual em variáveis climáticas, tais como precipitação (P) e evapotranspiração potencial (E<sub>0</sub>).

Essas abordagens são em sua maior parte baseadas em modelos teóricos que associam componentes do ciclo hidrológico com componentes do balanço energético terrestre. Essa associação pode ser facilmente compreendida na medida que a transformação da chuva em vazão é influenciada diretamente pela evapotranspiração que, por sua vez, consiste em um dos processos básicos de transformação da energia solar na terra (Otsuki, 2015).

Schaake (1990) foi o primeiro a propor o método da elasticidade climática para estimar o impacto da mudança climática no escoamento. Arora (2002) desenvolveu um método abrangente baseado na estrutura de Budyko para analisar o impacto de mudanças de longo prazo na evaporação potencial e precipitação nas mudanças no escoamento. Os métodos que usam a elasticidade climática com base na hipótese de Budyko possuem uma base fisicamente realista para calcular

o balanço hídrico e energético da bacia hidrográfica. Tais métodos provaram ser úteis para avaliar as respostas hidrológicas e têm sido usados extensivamente nos últimos anos (Collignan et al., 2022)

A equação baseada na hipótese de Budyko (Budyko, 1974) é um típico modelo utilizado para explorar essas relações entre energia e clima e vem recebendo maior atenção e aplicação nos últimos anos. Essa abordagem quando aplicada a mudança climática, utiliza os conceitos de elasticidade por meio de coeficientes para avaliar a sensibilidade da vazão aos fatores climáticos relevantes. A principal vantagem desse tipo de abordagem, além da parcimônia, é o fato de dispensar a custosa atividade de correção de viés dos dados climáticos dos MCGs, tendo em vista que a abordagem trabalha com valores relativos de mudança, como será mostrado adiante.

Budyko (1974) apresentou como a oferta hídrica (representada pela vazão ou precipitação) se relacionava com os componentes básicos do balanço de energia considerando escalas temporais longas. A partir dessas análises que exploravam a relação existente entre os princípios da conservação de massa e energia numa dada bacia hidrográfica, Budyko (1974) propôs que:

$$\frac{E}{P} = f\left(\frac{E_0}{P}\right) \quad (1)$$

onde E é a evapotranspiração real em determinada bacia (mm); P é precipitação (mm);  $E_0$  é a evapotranspiração potencial (mm).

Posteriormente, baseado nas hipóteses levantadas por Budyko e no trabalho de Fu (1981), Zhang et al. (2004) derivaram uma equação analítica no qual incorporaram de forma explícita um parâmetro que consideraria de forma sintética características da bacia que supostamente estariam associadas ao processo de formação das vazões. Essa equação, popularmente conhecida como equação de Fu, é expressa por:

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P}\right)^\omega\right]^{1/\omega} \quad (2)$$

onde  $\omega$  é o parâmetro que representa o conjunto das características da bacia, como a vegetação, propriedades do solo, características de relevo e outras características (Zhang et al., 2004). Esse parâmetro ajustável  $\omega$  nessa equação, altera a proporção de P entre E e Q representando o efeito da soma de todos os processos não englobados em P e  $E_0$ . Tradicionalmente,  $\omega$  é calculado usando o método dos mínimos quadrados.

Para extrair a elasticidade-clima das vazões com base nas hipóteses de Budyko é necessário inicialmente explicitar a informação da vazão na equação de Fu. Isso é feito a partir da equação do balanço hídrico de longo prazo ( $P = E + Q$ ) e manipulações algébricas na equação de Fu, obtendo-se assim a seguinte expressão:

$$Q = [P^\omega + E_0^\omega]^{1/\omega} - E_0 \quad (3)$$

Assumindo que as características da bacia que afetam o processo de geração das vazões não mudam ao longo do tempo, ou seja, parâmetro  $\omega$  é constante, a mudança relativa na vazão de longo termo devido a mudanças relativas na precipitação e evapotranspiração potencial é dado pela eq. (4),

$$\frac{dQ}{Q} = \varepsilon_1 \frac{dP}{P} - \varepsilon_2 \frac{dE_0}{E_0} \quad (4)$$

em que  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  são, respectivamente, os coeficientes de elasticidade-precipitação e elasticidade- evapotranspiração potencial da vazão.

Para obtenção dessas elasticidades, a abordagem utilizada aqui segue aquela apresentada em Reis et al. (2013), onde foram apresentadas equações analíticas a partir da aplicação de derivadas parciais para obtenção dos coeficientes de elasticidade-clima das vazões. Essas expressões são dadas por:

$$\varepsilon_1 = \left(1 - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P}\right)^\omega\right]^{-1} \cdot \left[1 + \left(\frac{E_0}{P}\right)^\omega\right]^{-\frac{1}{\omega}} \left(\frac{E_0}{P}\right)\right) \left(\frac{P}{P-E}\right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = \left(-\left(1 - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P}\right)^\omega\right]^{-1} \left(\frac{E_0}{P}\right)^{\omega-1}\right)\right) \left(\frac{E_0}{P-E}\right) \quad (6)$$

A interpretação dos valores de  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  pode ser mais bem compreendida a partir de um simples exemplo numérico. Imaginemos que os valores de  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  fossem iguais a 3 e -2, respectivamente. Este resultado indica que uma redução de 10% em P resulta em uma redução de 30% na vazão de longo prazo, enquanto um aumento de 10% em  $E_0$  resulta em uma diminuição de 20% em Q.

## 6.4. Transferência dos Dados Hidroclimáticos para a BHO

### 6.4.1. Estatísticas dos Dados do Presente e Futuro

Com base nos dados climáticos observados e projetados para o futuro, foi necessário definir as estatísticas de interesse em todo o Brasil que ajustam e alimentam a modelagem hidrológica. Essas estatísticas foram definidas na resolução original da fonte da informação. No caso

da base HIDRO por exemplo, foi definido para cada estação de interesse. Já no caso da base XAVIER foi definido para cada ponto de grade. Para os dados climáticos projetados para os futuros oriundos do NEXGDDP foram definidos para os três horizontes temporais selecionados.

As estatísticas de interesse para análise foram: tamanho da série (n), média (med), desvio padrão (dp), mínimo (min), máximo (max), mediana (q50), centil 25% (q25) e centil 75% (q75). As **Figuras 9 a 11** ilustram o processo de obtenção e o tipo de estatística de interesse. Observa-se na **Figura 11** que para dos dados do futuro essas estatísticas serão obtidas para cada modelo, cenário de emissão e em cada um dos horizontes temporais. Nessa figura, o termo RCP8.5 e RCP4.5 são apenas ilustrativos da utilização de cenários de emissão, uma vez que foram utilizados no estudo os novos tipo de cenários SSPs do AR6 do IPCC.



1980-2016 (Baseline)									
variável/ estatística	n	med	dp	cv	min	max	q50	q25	q75
Prec	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19
TempMin	x21	x22	x23	x24	x25	x26	x27	x28	x29
TempMax	x31	x32	x33	x34	x35	x36	x37	x38	x39
EtpHV	x41	x42	x43	x44	x45	x46	x47	x48	x49

variável/ estatística	n	med	dp	cv	min	max	q50	q25	q75
Prec	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19
TempMin	x21	x22	x23	x24	x25	x26	x27	x28	x29
TempMax	x31	x32	x33	x34	x35	x36	x37	x38	x39
EtpHV	x41	x42	x43	x44	x45	x46	x47	x48	x49

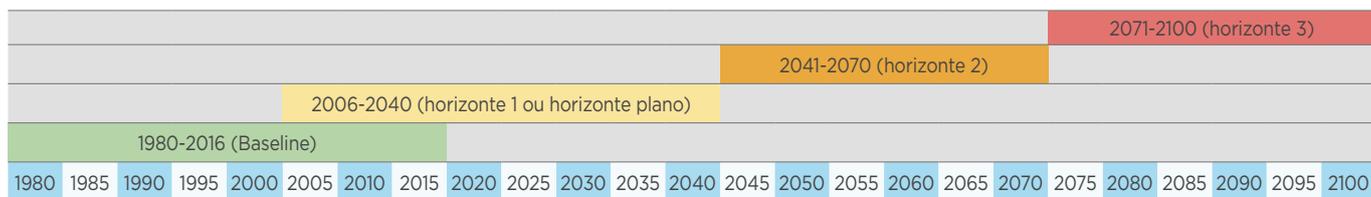
variável/ estatística	n	med	dp	cv	min	max	q50	q25	q75
Prec	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19
TempMin	x21	x22	x23	x24	x25	x26	x27	x28	x29
TempMax	x31	x32	x33	x34	x35	x36	x37	x38	x39
EtpHV	x41	x42	x43	x44	x45	x46	x47	x48	x49

variável/ estatística	n	med	dp	cv	min	max	q50	q25	q75
Prec	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19
TempMin	x21	x22	x23	x24	x25	x26	x27	x28	x29
TempMax	x31	x32	x33	x34	x35	x36	x37	x38	x39
EtpHV	x41	x42	x43	x44	x45	x46	x47	x48	x49

Figura 9 - Esquema da definição das estatísticas de interesse dos dados climáticos observados.

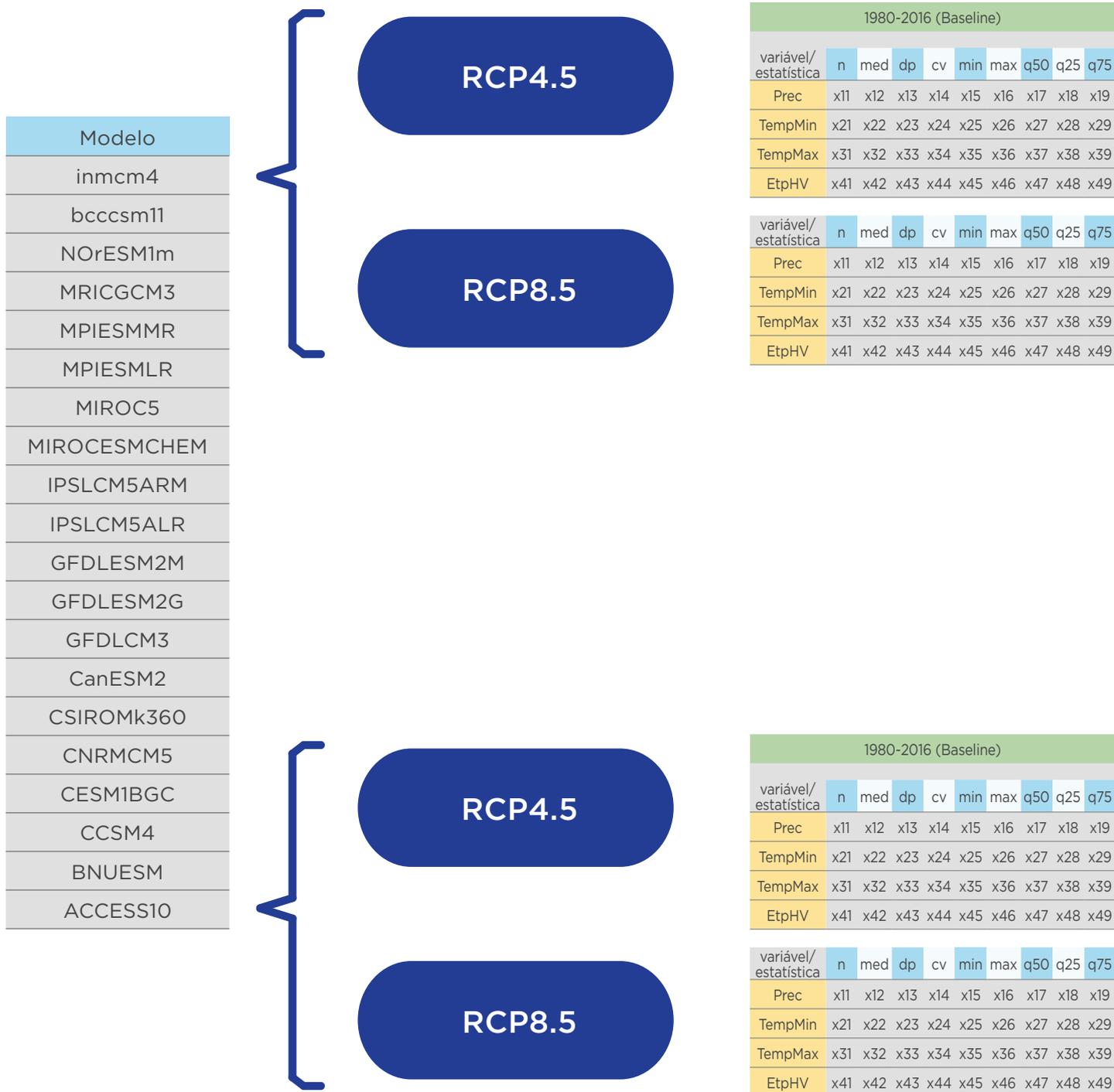




variável/ estatística	n	med	dp	cv	min	max	q50	q25	q75
Prec	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19
TempMin	x21	x22	x23	x24	x25	x26	x27	x28	x29
TempMax	x31	x32	x33	x34	x35	x36	x37	x38	x39
EtpHV	x41	x42	x43	x44	x45	x46	x47	x48	x49

**Figura 10** - Esquema genérico da definição das estatísticas de interesse dos dados climáticos Futuro considerando os três horizontes temporais.





**Figura 11** - Esquema da definição das estatísticas de interesse dos dados climáticos Futuro considerando os três horizontes temporais para cada modelo e cenário de emissão.

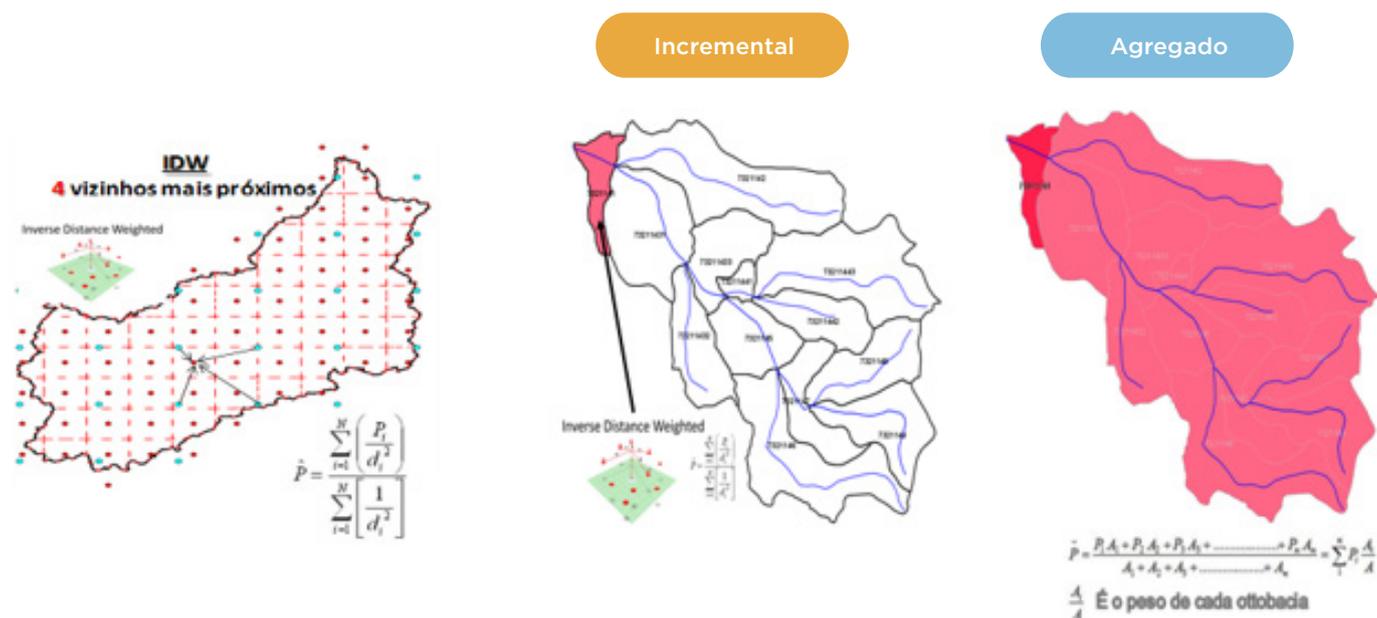


## 6.4.2. Transferência das Estatísticas do Presente e Futuro para BHO

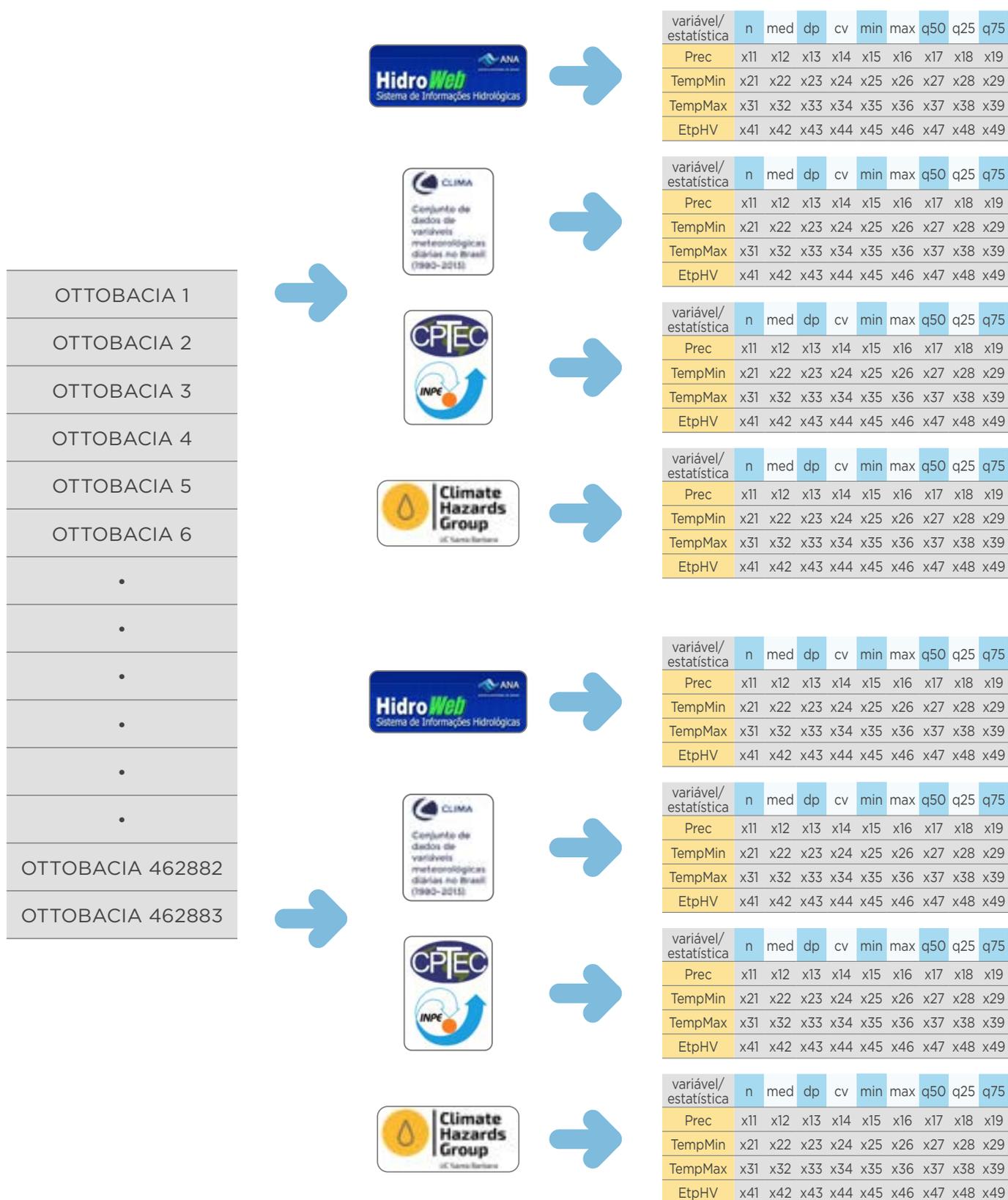
Com base nas estatísticas definidas no item anterior, é realizada a transferência dessas estatísticas para a BHO. O procedimento de transferência utilizado foi o inverso do quadrado da distância (IDW) considerando os 4 vizinhos mais próximos ao ponto de interesse, ou seja, os 4 pontos de grade ou estações mais próximas do centroide de cada ottobacia (que está associado a cada trecho da hidrografia).

Essa informação, denominada aqui de incremental, representa os valores médios das estatísticas das variáveis relevantes apenas na área de ottobacia. No entanto, para fins de modelagem hidrológica, é necessário fazer uma agregação da informação de cada estatística considerando toda a área de drenagem de cada ottobacia.

Esse procedimento de agregação é feito para determinada ottobacia fazendo a média ponderada de determinada estatística de todas as ottobacias à montante. A ponderação de cada uma dessas ottobacias é dada pela relação da área incremental pela área total da ottobacia em análise. A **Figura 12** ilustra o procedimento de transferências das estatísticas de interesse para a BHO, tanto na incremental como no agregado. As **Figuras 13 e 14** ilustram a quantidade de informações tanto dos dados observados como dos dados futuros transferidos para cada uma das 462883 ottobacias existentes na BHO.



**Figura 12** - Procedimento de transferências das estatísticas de interesse dos dados climáticos para a BHO na área incremental e agregada ou total.



**Figura 13** - Esquema da transferência das estatísticas de interesse dos dados climáticos observados para cada um dos 462883 trechos da BHO.

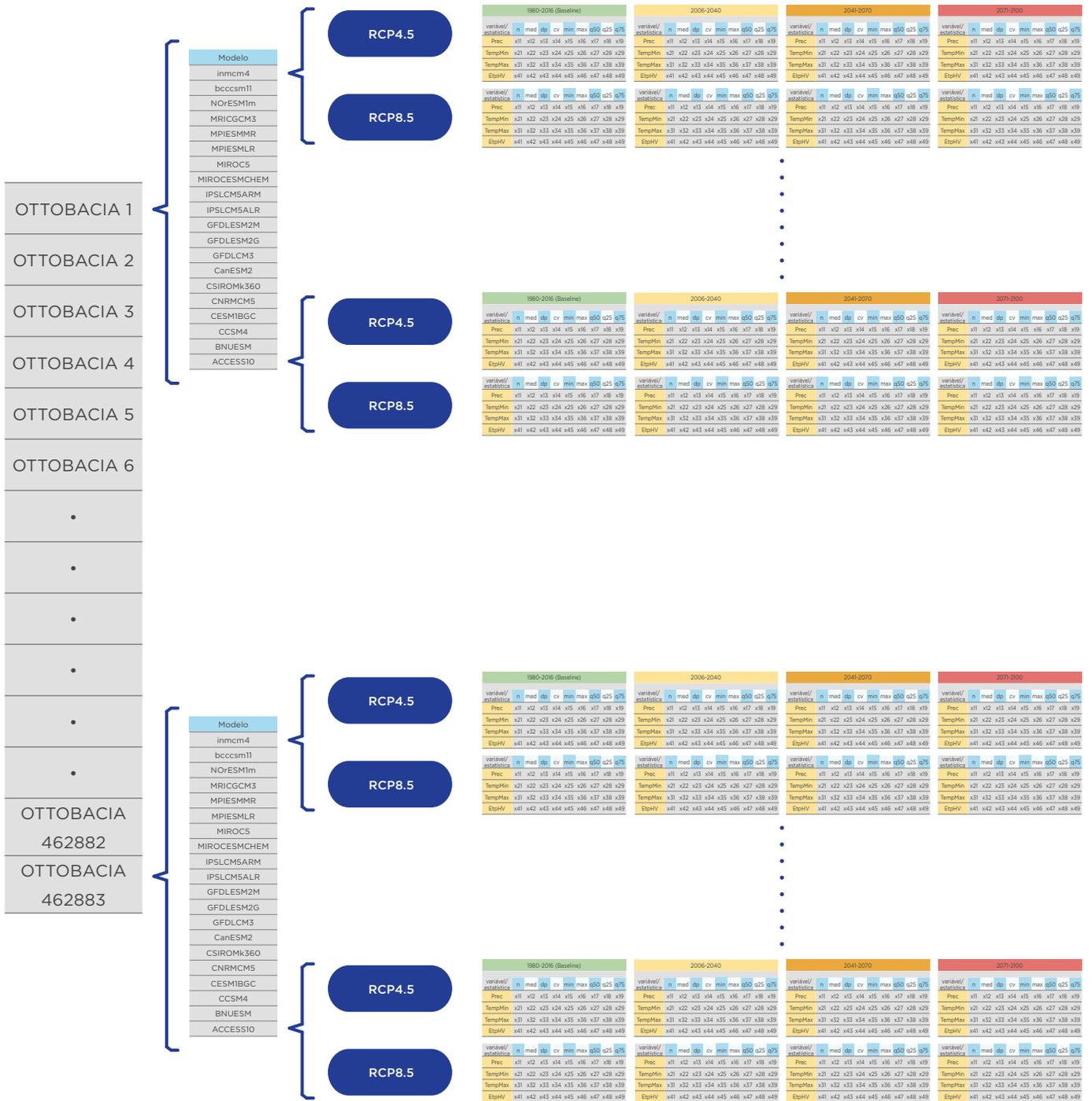


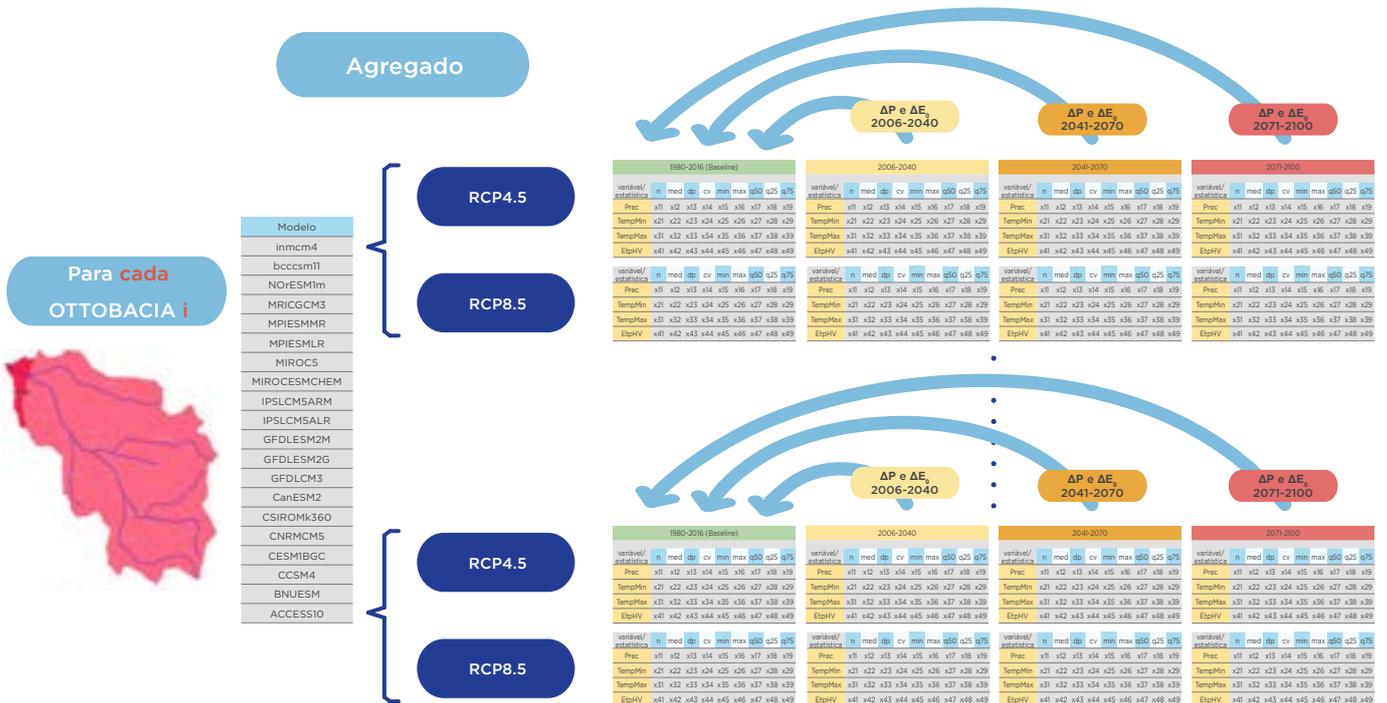
Figura 14 - Esquema da transferência das estatísticas de interesse dos dados climáticos Futuro de cada modelo e cenário de emissão para cada um dos 462883 trechos da BHO.

## 6.5. Disponibilidade Hídrica Futura na BHO

### 6.5.1. Variação das Estatísticas do Futuro em Relação ao Presente na BHO

Com base nas estatísticas nas estatísticas médias da precipitação e evapotranspiração, tanto do presente como do futuro em cada ottobacia, obtém-se as variações ou mudanças percentuais para os diferentes horizontes temporais considerando os diferentes cenários

e MCGs (Figura 15). Essas informações são os dados de entrada para avaliação da variação ou mudança na Qmlt segundo a modelagem hidrológica e com base na hipótese de Budyko, conforme Equação 4.



**Figura 15** - Esquema de obtenção das mudanças percentuais na P e E para os diferentes horizontes temporais considerando os diferentes cenários de emissão e MCGs.

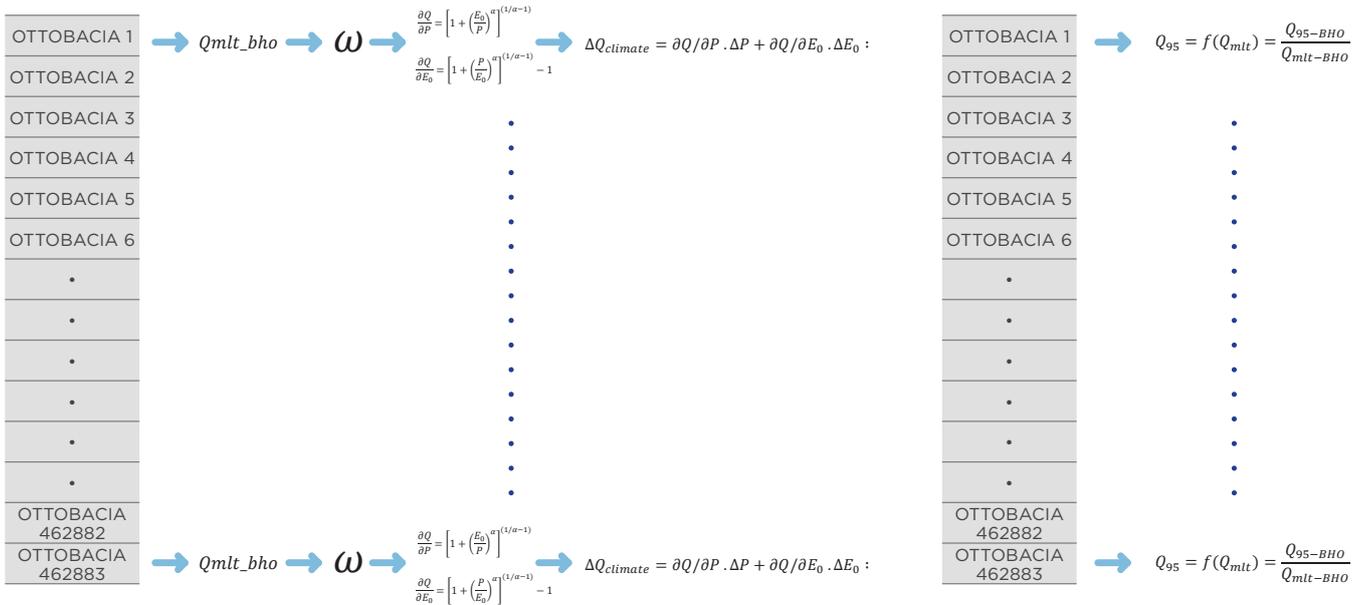
### 6.5.2. Obtenção do Parâmetro da Modelagem Hidrológica Budyko

O parâmetro  $\omega$  e os coeficientes de elasticidade-precipitação ( $\epsilon_1$ ) e elasticidade- evapotranspiração potencial ( $\epsilon_2$ ) com relação a vazão foram obtidos a partir da simples aplicação da equação de Fu (Equação 3) e equações das elasticidades (Equações 5 e 6), considerando as seguintes informações:

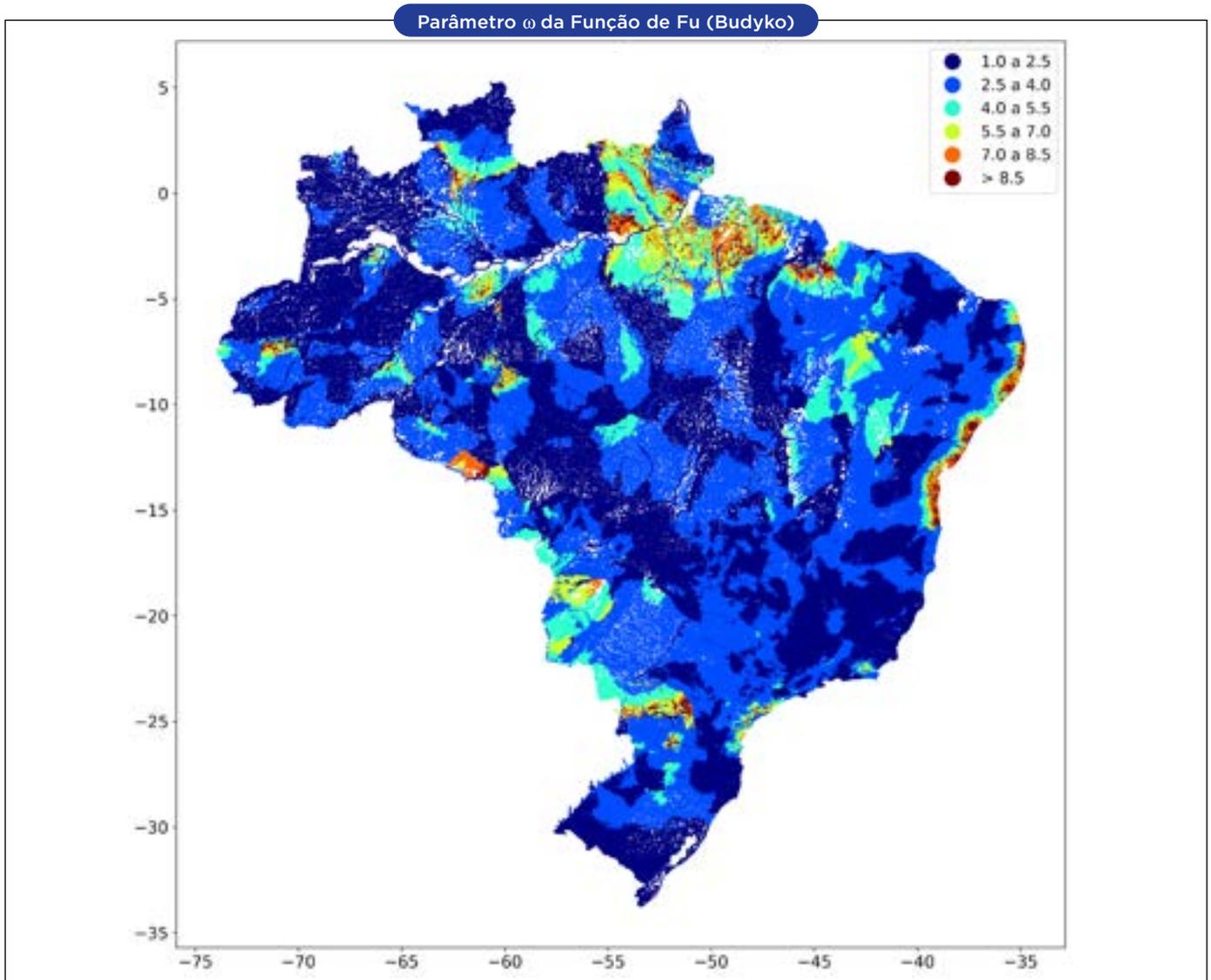
- valores de vazão média de longo termo (Qmlt) constantes na base hidrográfica BHO 5k que representa a base de disponibilidade hídrica oficial da ANA; e

- valores médios de precipitação e evapotranspiração potencial obtidos para a área de drenagem de cada uma das 462883 ottobacias existentes na BHO a partir dos procedimentos de agregação feito para cada uma das ottobacias, conforme procedimento apresentado no item 6.4.2.

A **Figura 16** ilustra a sequência de obtenção do parâmetro e elasticidades para cada uma das ottobacias. As **Figuras 17 a 20** ilustram os resultados do parâmetro  $\omega$  e os coeficientes de elasticidade-precipitação ( $\epsilon_1$ ) e elasticidade - evapotranspiração potencial ( $\epsilon_2$ ) respectivamente.

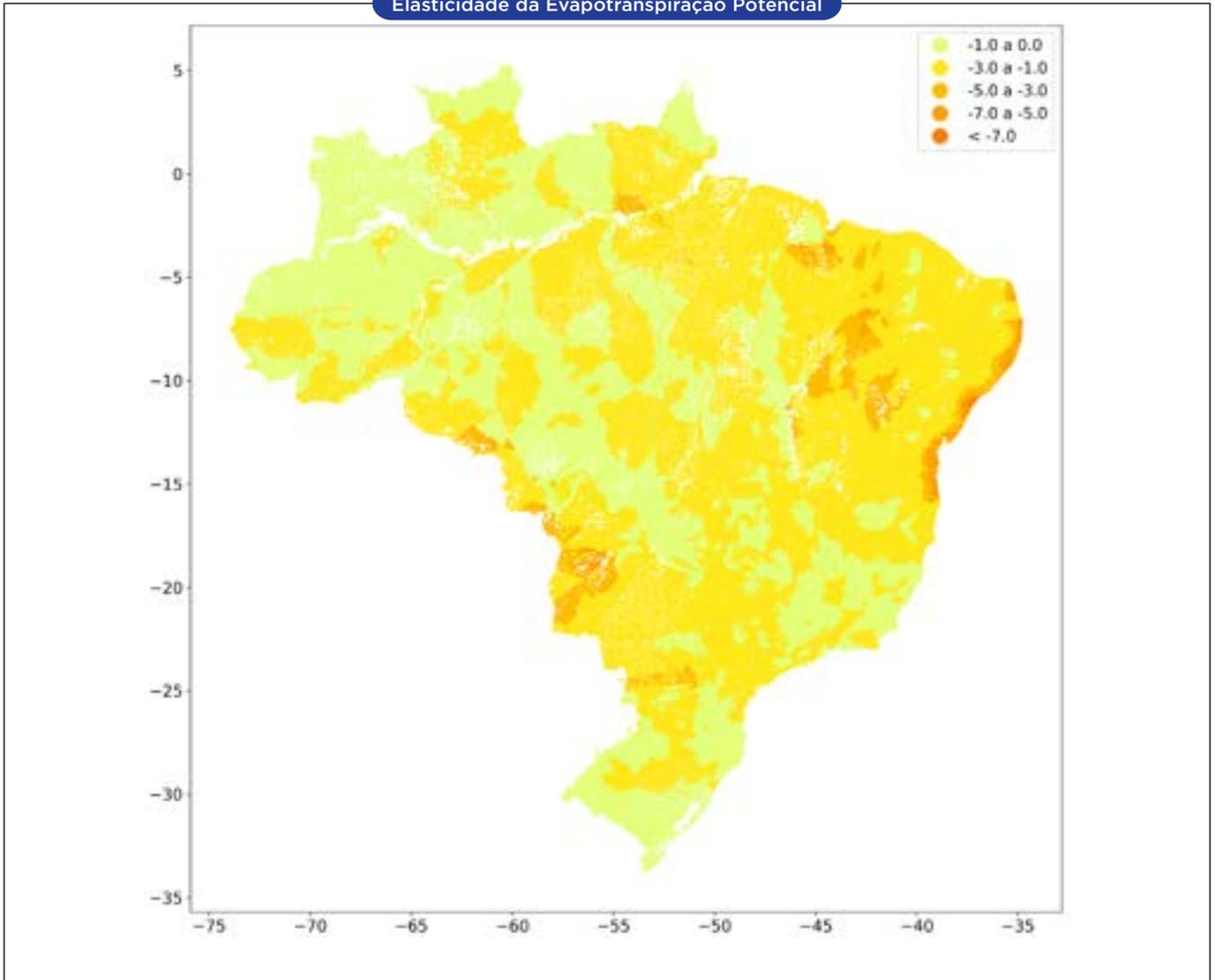


**Figura 16** - Esquema de obtenção do parâmetro  $\omega$  e os coeficientes de elasticidade-precipitação ( $\epsilon_1$ ) e elasticidade- evapotranspiração potencial ( $\epsilon_2$ ) com relação a vazão.

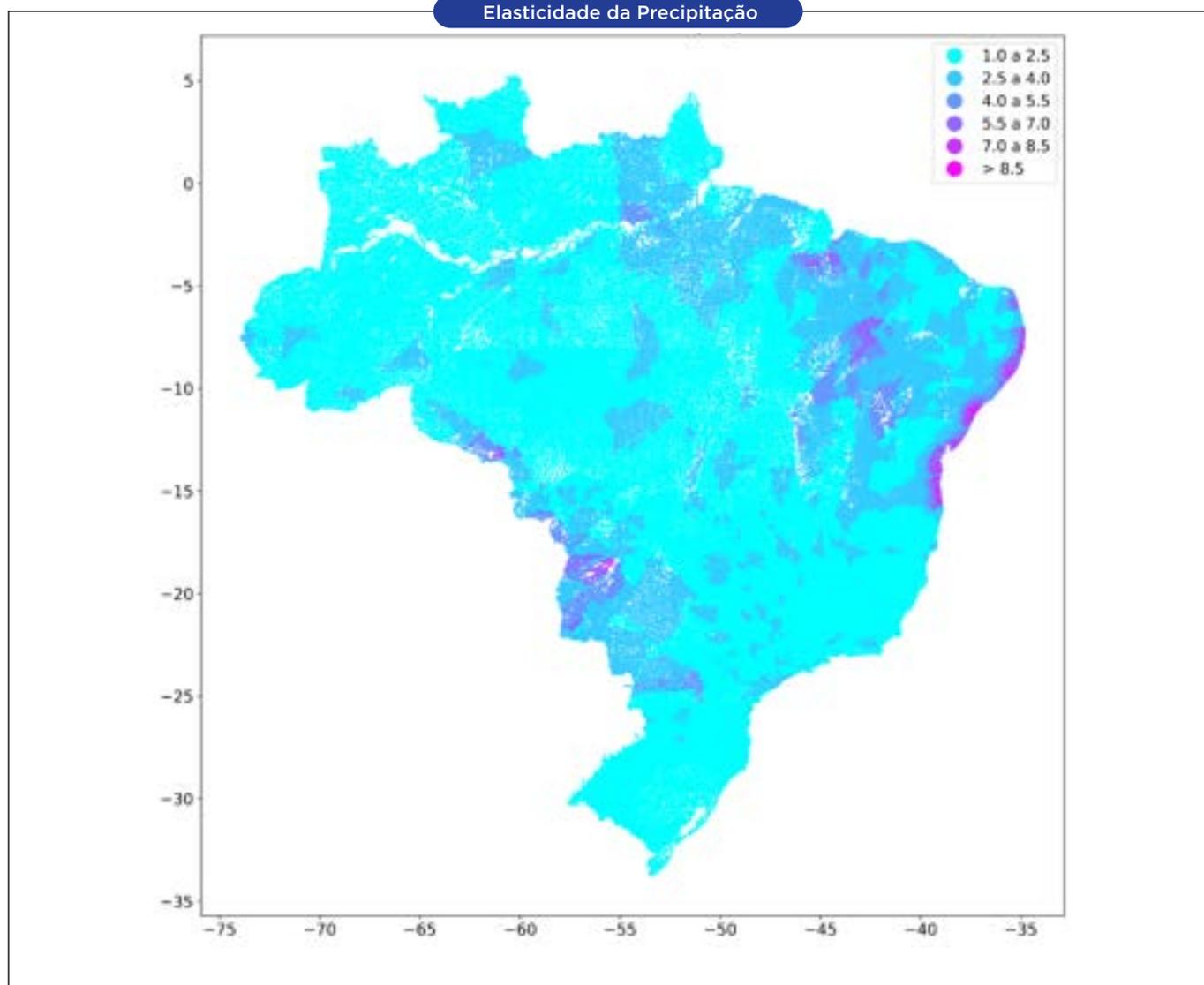


**Figura 17** - Valores de  $\omega$  definidos para cada trecho ou ottobacia da BHO.

### Elasticidade da Evapotranspiração Potencial



**Figura 18** - Valores da elasticidade- evapotranspiração potencial ( $\epsilon_2$ ) com relação a vazão definidos para cada trecho ou ottobacia da BHO.



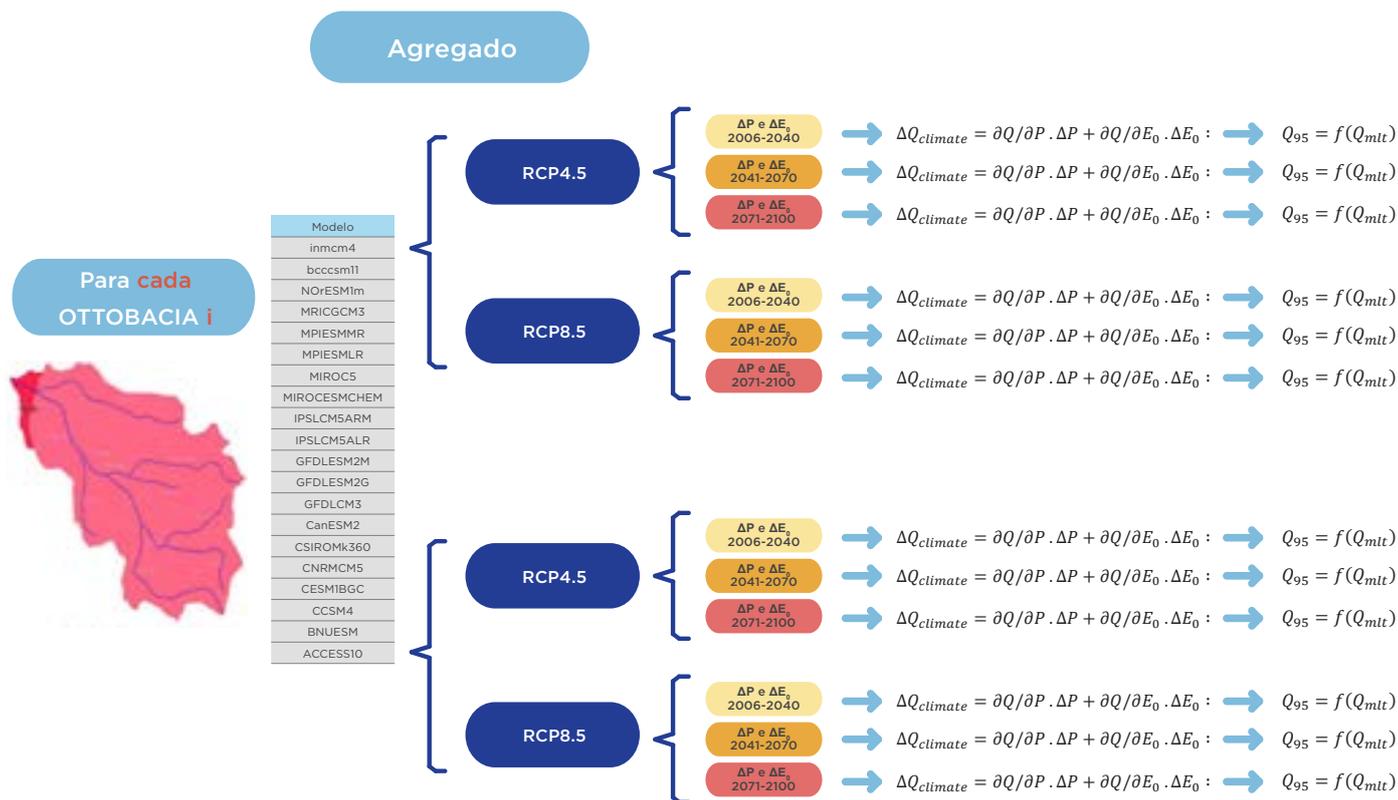
**Figura 19** - Valores da elasticidade-precipitação ( $\epsilon_1$ ) com relação a vazão definidos para cada trecho ou subárea da BHO. tobacia da BHO.

### 6.5.3. Aplicação da Modelagem Hidrológica Budyko

A etapa final da definição do impacto da mudança climática na vazão se deu com a aplicação da Equação 4 que define a mudança relativa da vazão em relação as mudanças relativas da precipitação e evapotranspiração potencial considerando os valores das elasticidade-precipitação ( $\epsilon_1$ ) e elasticidade-evapotranspiração potencial ( $\epsilon_2$ ) com relação a vazão definidos conforme explicitado no item 6.5.2.

A Figura 20 ilustra essa aplicação, para cada subárea e cada cenário climático (MCG + cenários de emissão), obtém-se a variação

da  $Q_{mlt}$  para determinado horizonte temporal com base nas variações da precipitação e evapotranspiração potencial (conforme explicitado no item 6.5.1) e valores de elasticidade (conforme explicitado no item 6.5.2). É possível também estimar determinada vazão de referência, a partir de uma estimativa da elasticidade da  $Q_{mlt}$  em relação a essa vazão de referência, conforme também ilustrado na Figura 20. Os resultados dessa aplicação, além dos resultados intermediários oriundas da análise das mudanças nas variáveis climáticas, são apresentados a seguir.



**Figura 20** - Esquema de obtenção da mudança na Qmit para cada ottobacia e cada cenário climático (MCG + cenários de emissão).

# 7

## RESULTADOS DO IMPACTO DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA HIDROLOGIA (P, EO E Q)

## 7. RESULTADOS DO IMPACTO DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA HIDROLOGIA (P, EO E Q)

A seguir são apresentados uma seleção de resultados que ilustram de forma clara os impactos da mudança climática nas variáveis climáticas de interesse e por consequência nos recursos hídricos. Esses resultados correspondem apenas um extrato da gama total de resultados produzidos no estudo. O conjunto total desses resultados, incluindo novos recortes espaciais e formas diferentes de visualização está disponível no portal do SNIRH ([www.snirh.gov.br/](http://www.snirh.gov.br/)).

### 7.1. Resultados das Estatísticas do Futuro da EO

As Figuras 21 a 23 apresentam gráficos box-plot com os resultados da variação relativa da evapotranspiração potencial ( $\Delta E_o/E_o$ ) para todos os MCGs (eixo x) e os 4 cenários de emissão considerando as três janelas temporais, respectivamente. A linha vermelha tracejada corresponde ao valor zero, situação em que não há mudança. Observa-se nas figuras que de um modo geral a variação é positiva, ou seja, EO do futuro é maior que a do presente. Esse resultado é esperado tendo em vista que é inequívoco o aumento da temperatura para qualquer cenário climático futuro, o que leva a evapotranspiração potencial a aumentar.

Observa-se também nas figuras que a magnitude de aumento se situa na maior parte

dos casos abaixo dos 25% e com baixa dispersão dentro do Brasil, independentemente do cenário climático e horizonte temporal. No entanto, conforme esperado, na medida que o cenário de emissão aumenta, a EO do futuro também tende a aumentar. Para os cenários SSP5-8.5 e o horizonte temporal 2071-2100 observa-se alguns MCGs com valores da ordem de 50% de aumento na EO do futuro.

A Figura 24 apresenta 12 gráficos de linhas correspondente a cada uma das regiões hidrográficas brasileiras. Esses gráficos representam o range dos valores médios da EO em cada região hidrográfica formado pelas projeções futuras dos diferentes MCGs e cenários de emissão. As curvas coloridas correspondem aos limites inferior e superior de cada cenário de emissão. Observa-se nesses gráficos um aumento geral da EO independentemente da região hidrográfica, com aumentos mais pronunciados na região Amazônica, Paraguai e São Francisco e menos pronunciados nas regiões hidrográficas Uruguai e Atlântico Sul localizadas na região Sul do Brasil.

Os mapas das Figuras 25 a 27 ilustram os resultados da variação relativa da evapotranspiração potencial ( $\Delta E_o/E_o$ ) para três MCGs diferentes considerando os 4 cenários de emissão e os 3 horizontes temporais. Observa-se nesses mapas um aumento EO para os três modelos, mas com diferenças no padrão espacial da mudança, principalmente na magnitude.

Relação  $\Delta E_0/E_0$  para as otobacias da BHO2017 - 5k - Período: 2015 a 2040

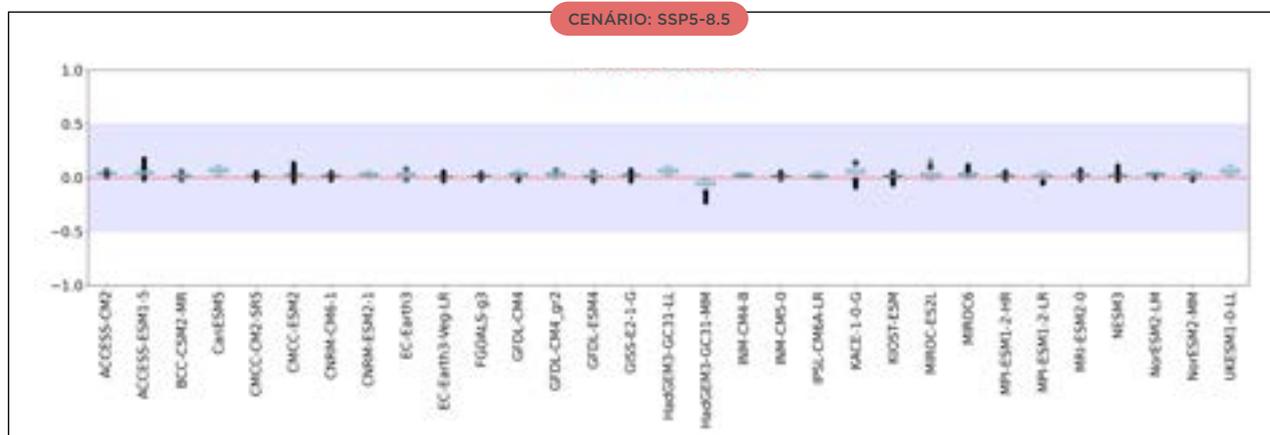
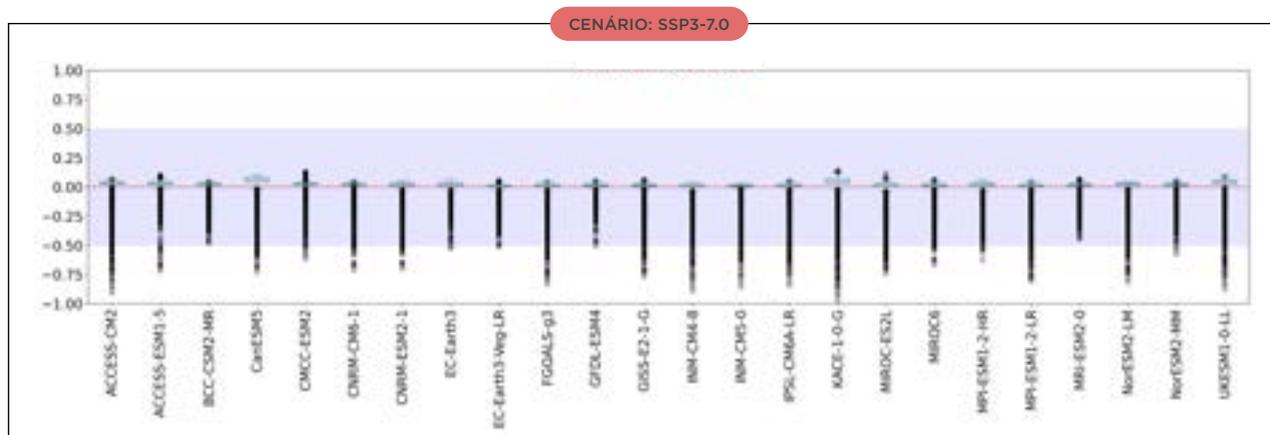
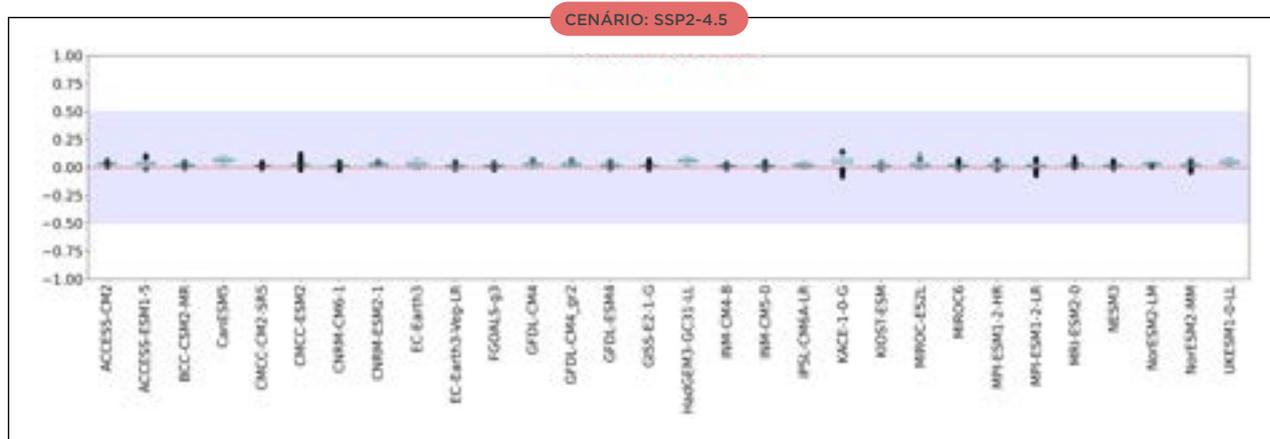
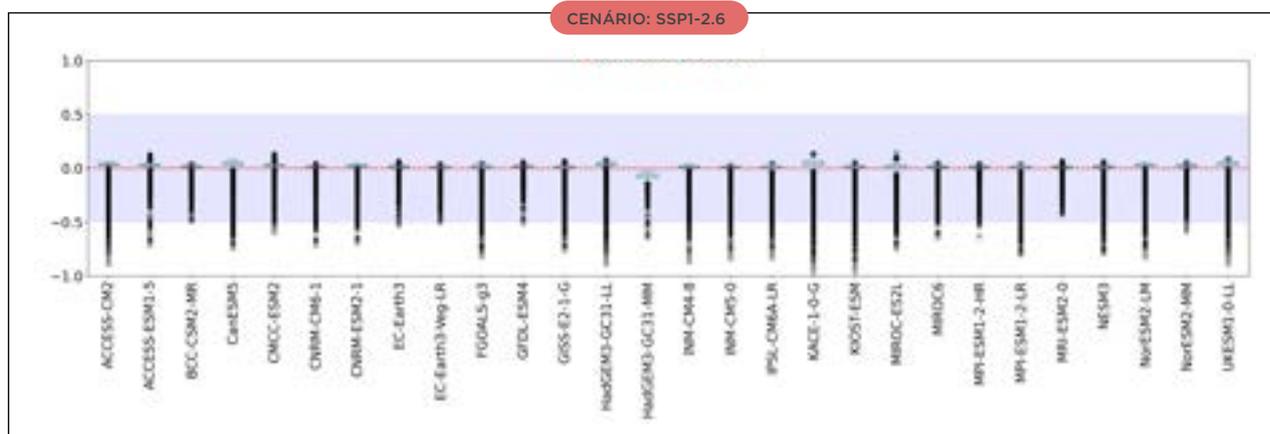


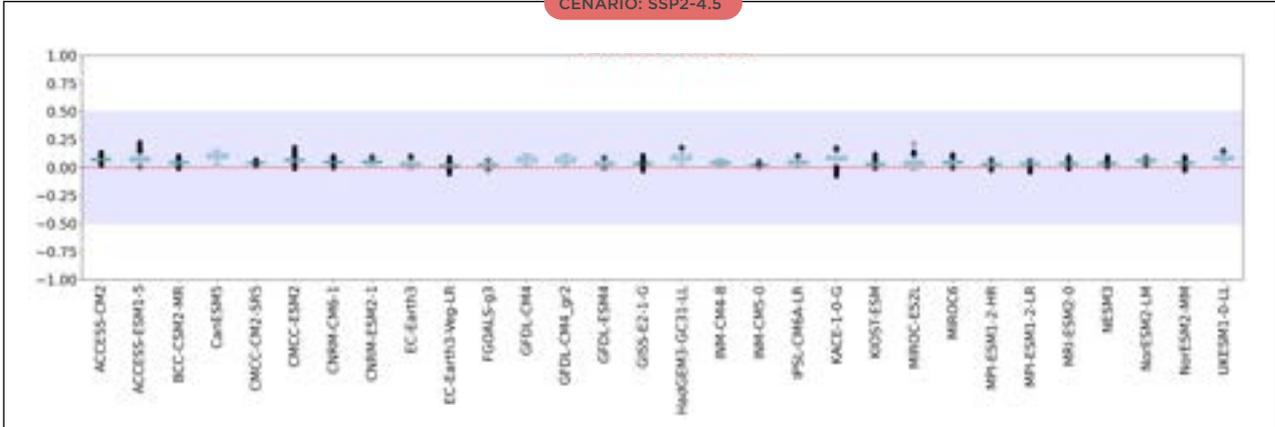
Figura 21 - Box Plot com todos os valores de  $E_0$  em todo o Brasil no período 2015-2040 considerando todos os MCGs e cenários de emissão.

Relação  $\Delta E_0/E_0$  para as otobacias da BHO2017 - 5k - Período: 2041 a 2071

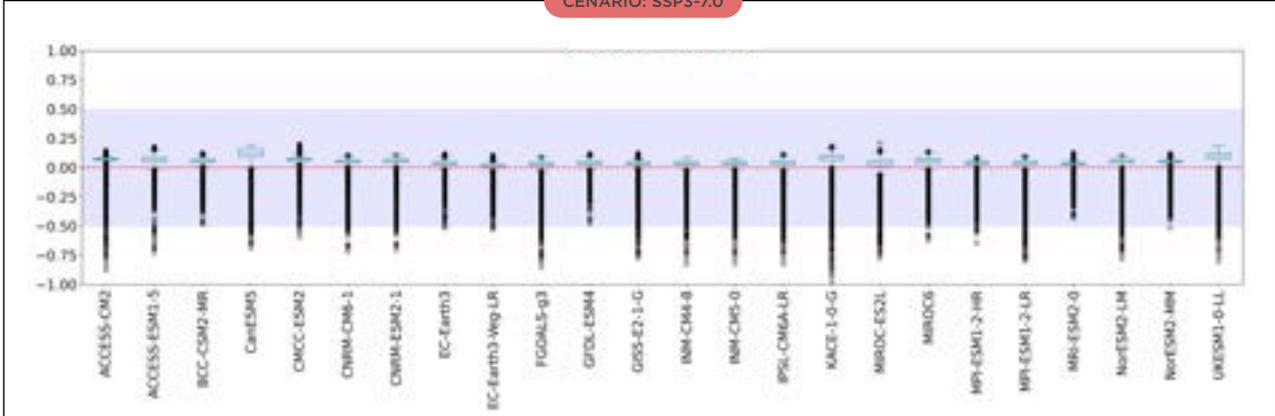
CENÁRIO: SSP1-2.6



CENÁRIO: SSP2-4.5



CENÁRIO: SSP3-7.0



CENÁRIO: SSP5-8.5

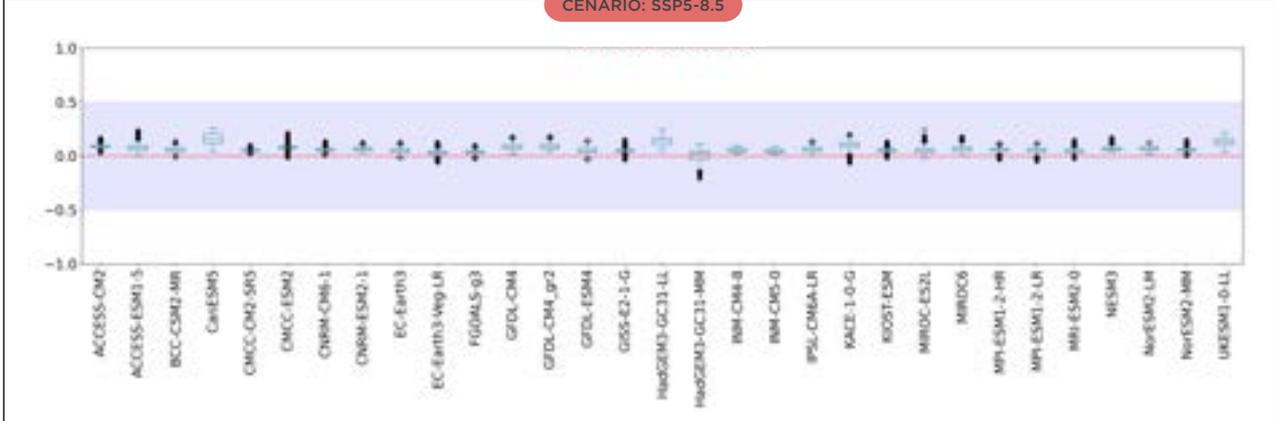


Figura 22 - Box Plot com todos os valores de  $E_0$  em todo o Brasil no período 2041-2070 considerando todos os MCGs e cenários de emissão.

Relação  $\Delta E_0/E_0$  para as otobacias da BHO2017 - 5k - Período: 2071 a 2100

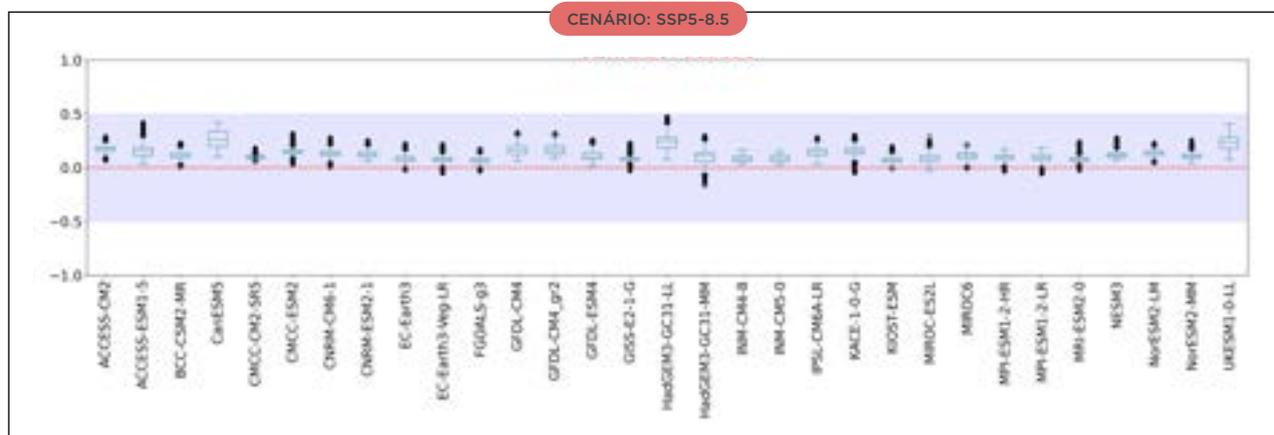
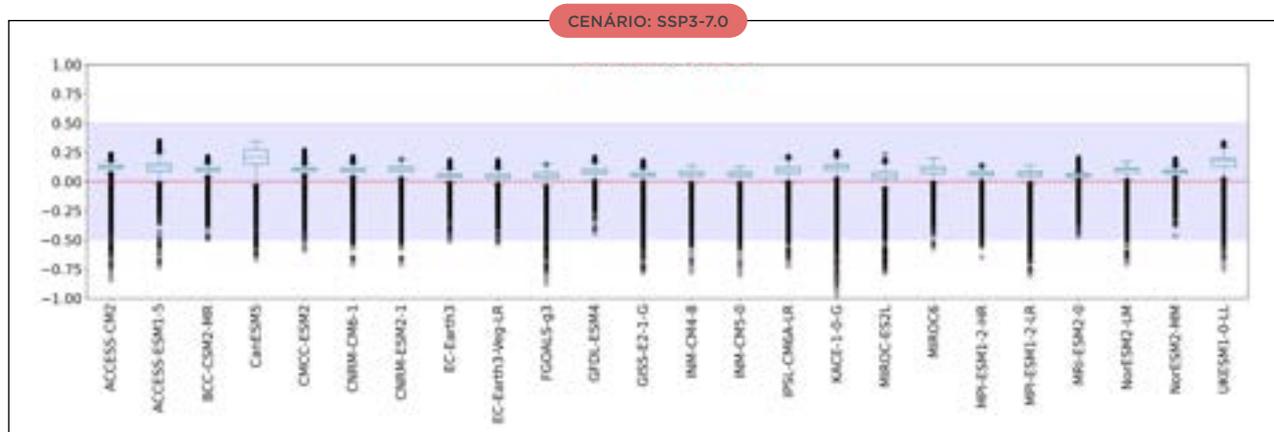
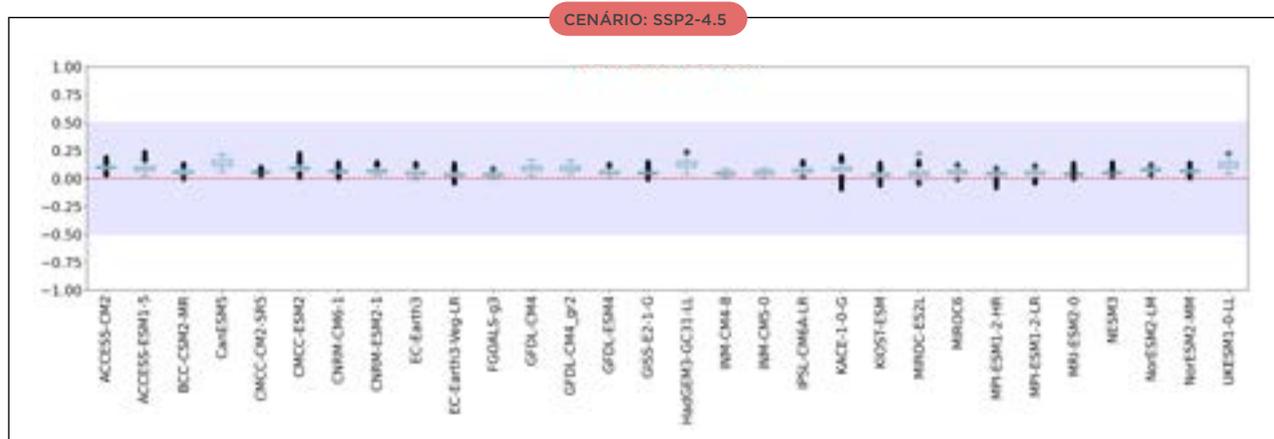
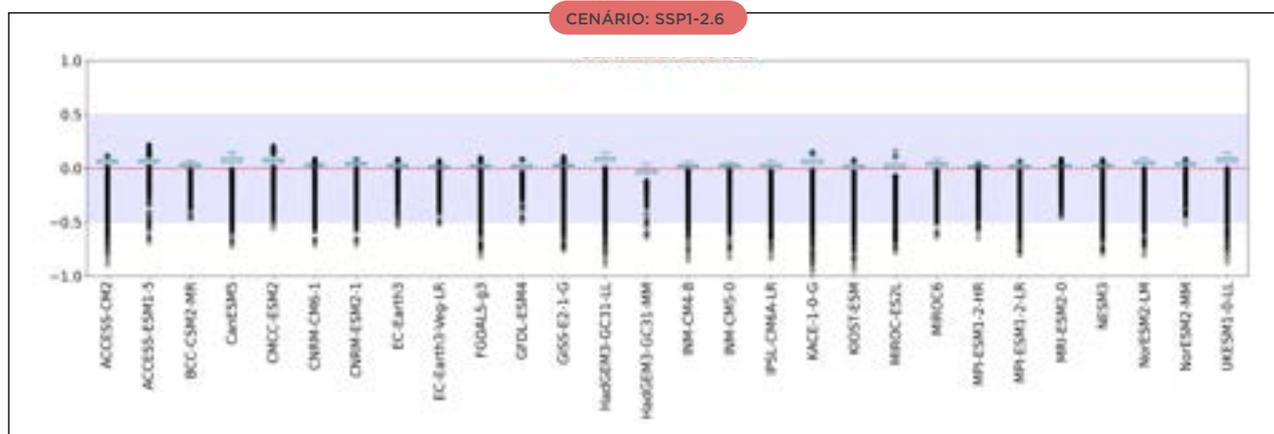
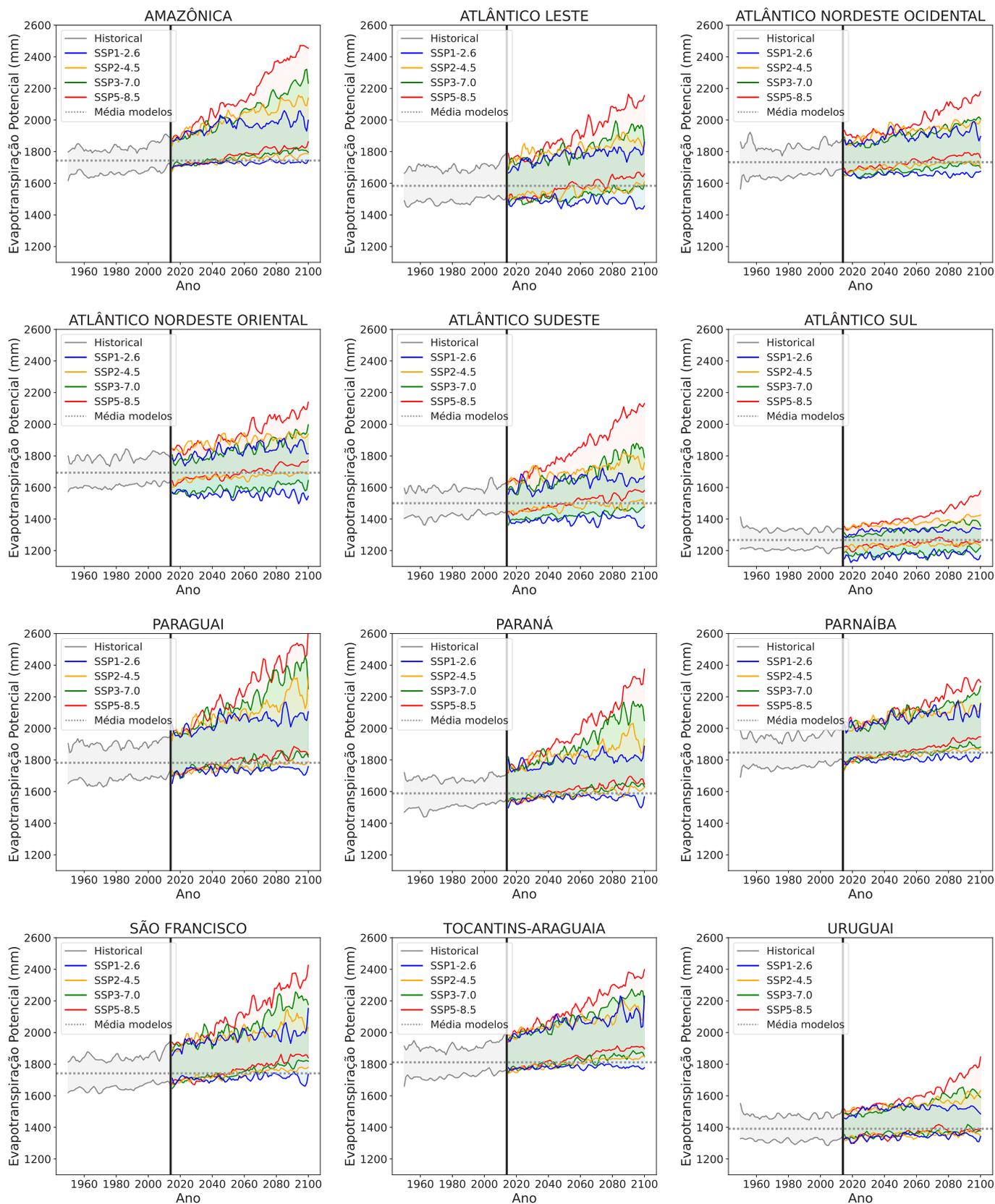


Figura 23 - Box Plot com todos os valores de  $E_0$  em todo o Brasil no período 2071-2100 considerando todos os MCGs e cenários de emissão.

## Evapotranspiração Potencial média total anual dos MCGs nas Regiões Hidrográficas



**Figura 24** - Evolução das projeções futuras de E0 média de todos os MCGs e cenários de emissão para as 12 regiões hidrográficas brasileiras. As curvas coloridas são os limites de cada cenário.

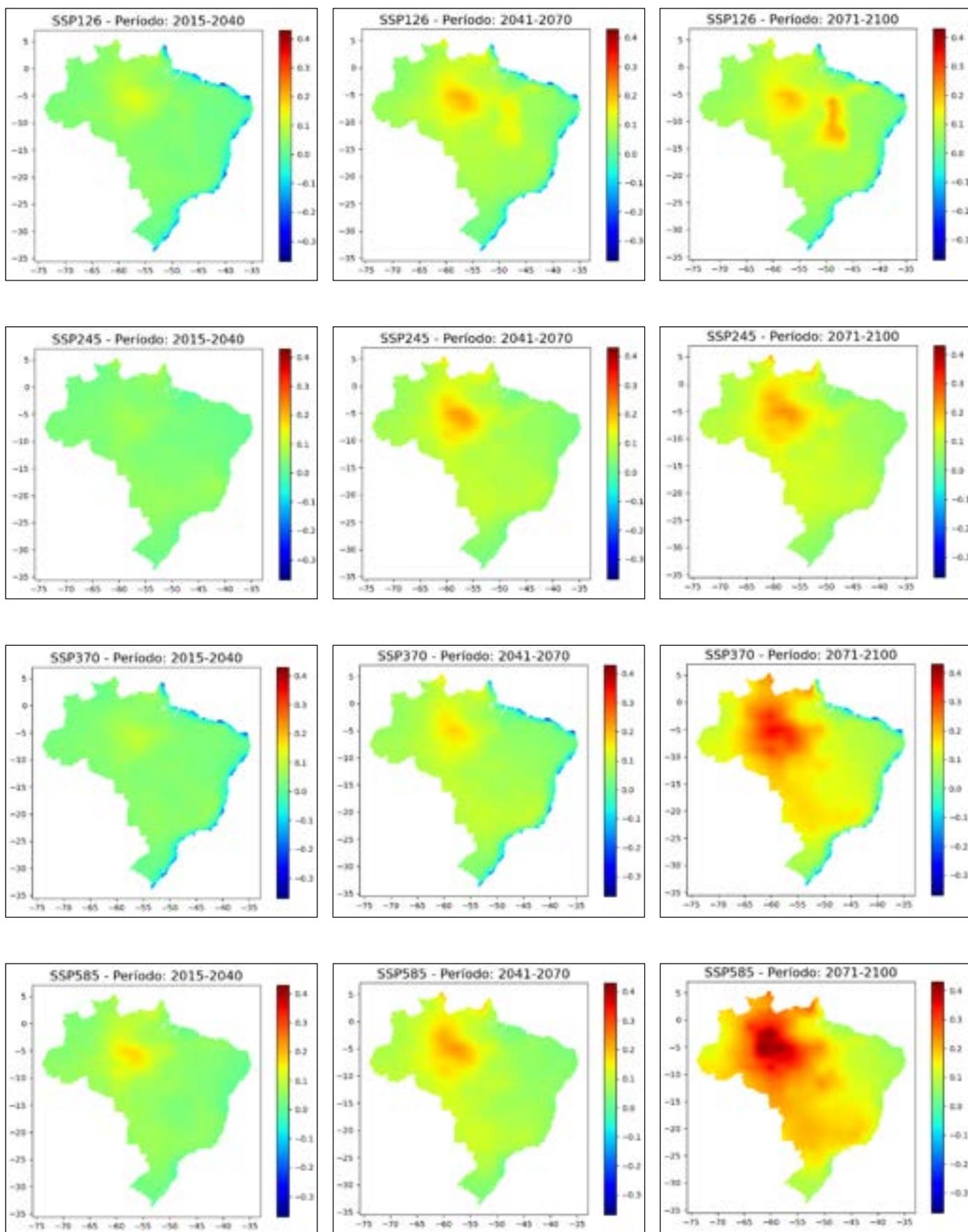


Figura 25 - Mapas da diferença relativa da E0 para todos os períodos e cenários de emissão do MCG ACCESS-ESM1-5.

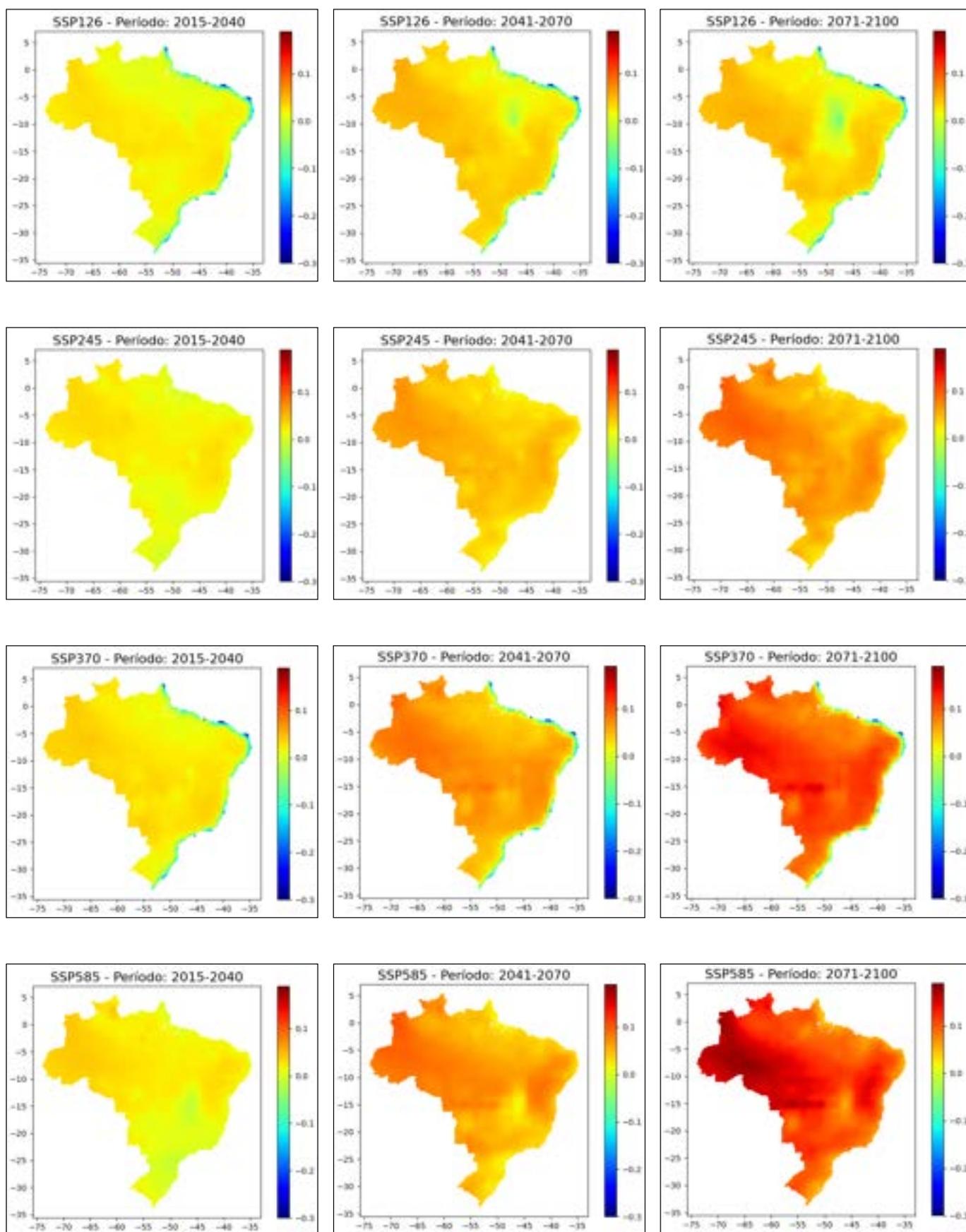


Figura 26 - Mapas da diferença relativa da E0 para todos os períodos e cenários de emissão do MCG BCC-CSM2-MR.

Modelo NORESM2-MM - Relação das evapotranspiração presente e futura ( $\Delta E0/E0$ )

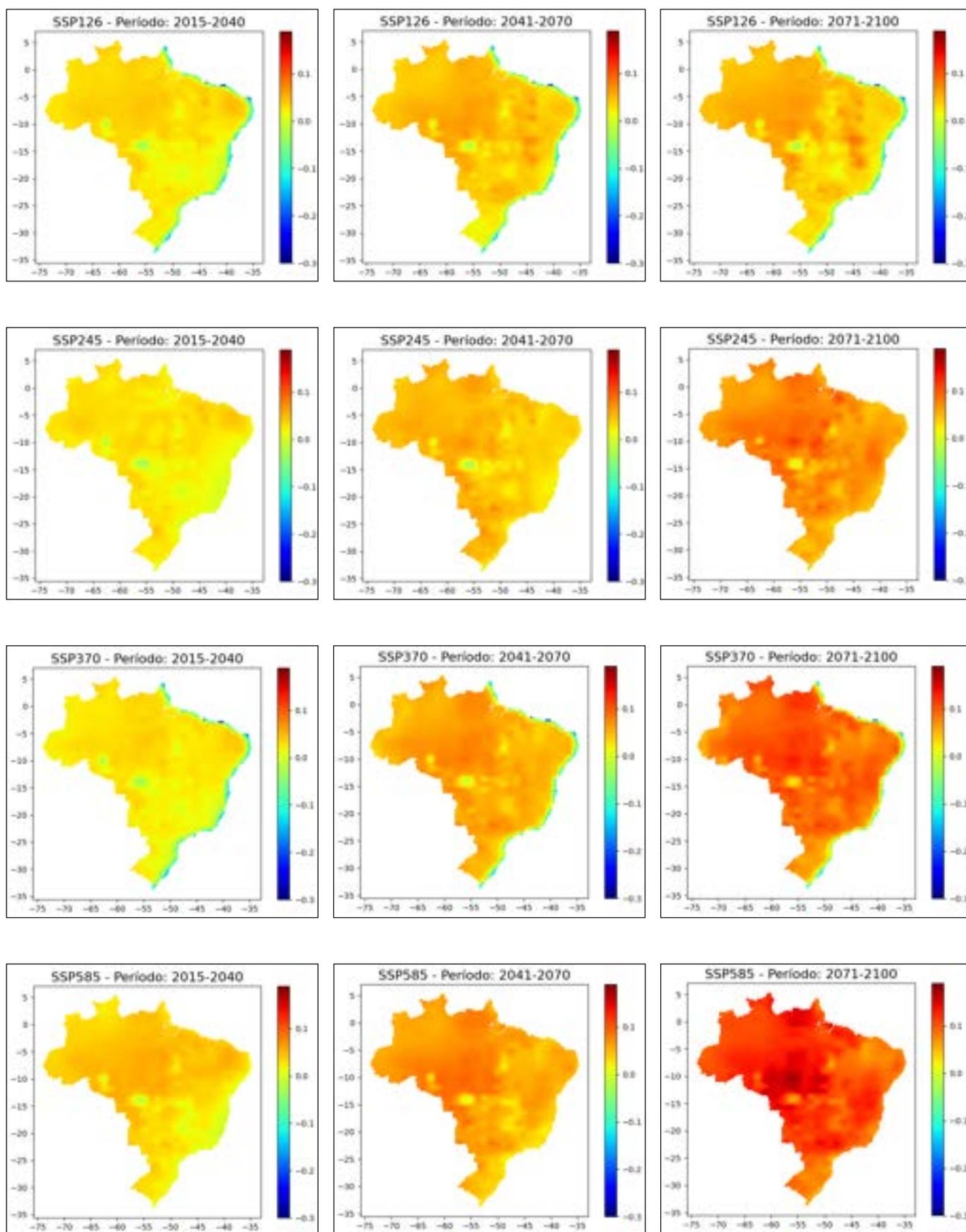


Figura 27 - Mapas da diferença relativa da E0 para todos os períodos e cenários de emissão do MCG NORESM2-MM.

## 7.2. Resultados das Estatísticas do Futuro da PLU

As Figuras 28 a 30 apresentam os mesmos tipos gráficos box plot apresentados para a  $E_0$ , no entanto, agora com os resultados da variação relativa da precipitação ( $\Delta P/P$ ). Observa-se nas figuras que de um modo geral, diferentemente da  $E_0$ , a variação foi negativa, ou seja, a precipitação do futuro tende a ser menor que a do presente considerando o Brasil como um todo. No entanto, para diversos cenários climáticos, observa-se que uma parte do box plot fica na região de aumento de precipitação, sinalizando a possibilidade de regiões com projeções de aumento nas chuvas do futuro.

Observa-se também nas figuras que a magnitude de diminuição varia bastante, algumas vezes ultrapassando o valor de 25% e com dispersão relativamente alta quando comparada com os valores de  $E_0$ . Esse fato sugere uma maior incerteza estrutural entre os modelos em representar a precipitação. Observa-se que na medida que o cenário de emissão aumenta, a magnitude de mudança da precipitação do futuro também tende a aumentar, no geral de forma negativa. Para os cenários SSP5-8.5 e o horizonte temporal 2071-2100 observa-se alguns MCGs com valores que ultrapassam 50% de diminuição na chuva do futuro.

A **Figura 31** apresenta os 12 gráficos de linhas correspondente a cada uma das regiões hidrográficas brasileiras. Esses gráficos são similares ao apresentado anteriormente para a  $E_0$ . Observa-se nesses gráficos uma tendência de diminuição da precipitação para a maior parte das regiões hidrográficas, a exceção da região Uruguai e Atlântico Sul. A dispersão das projeções futuras da precipitação é bem maior que para evapotranspiração potencial, sinalizando maiores incertezas no comportamento pluviométrico futuro.

Os mapas das Figuras 32 a 34 ilustram os resultados da variação relativa da precipitação ( $\Delta P/P$ ) para os mesmos três MCGs apresentados para a  $E_0$  considerando também os mesmos 4 cenários de emissão e os 3 horizontes temporais. Observa-se nesses mapas regiões com aumento na precipitação, principalmente mais ao Sul do Brasil, e diminuição para o restante do país, mas com grandes diferenças no padrão espacial da mudança entre os modelos, principalmente na magnitude. Essas diferenças espaciais no padrão da chuva entre os modelos representam uma fonte considerável de incerteza na definição da tendência de diminuição ou aumento da precipitação em determinadas regiões. Essa incerteza é transferida para as vazões e consequentemente dificulta a avaliação de como evoluirá a disponibilidade hídrica futura em certas regiões do Brasil.

Relação  $\Delta P/P$  para as ottobacias da BHO2017 - 5k - Período: 2015 a 2040

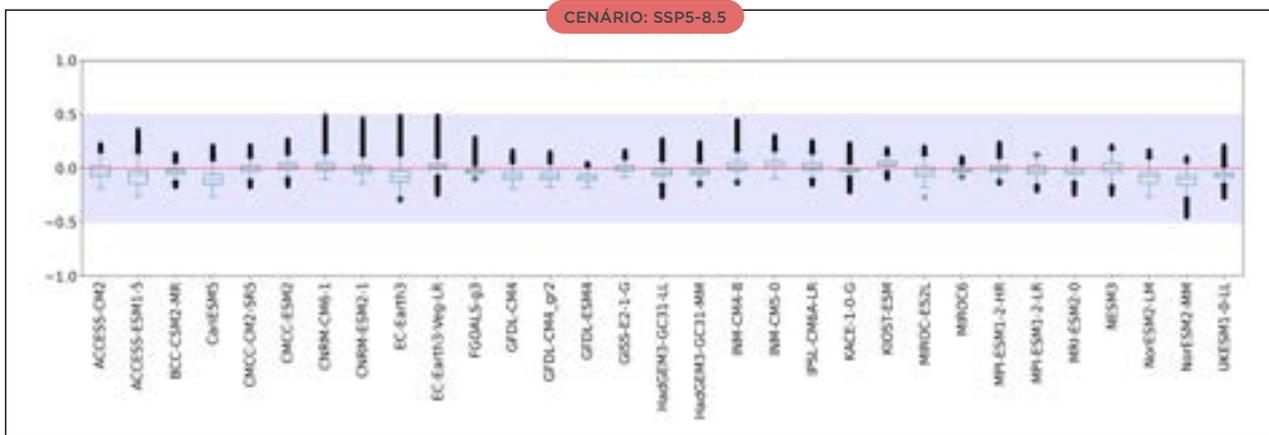
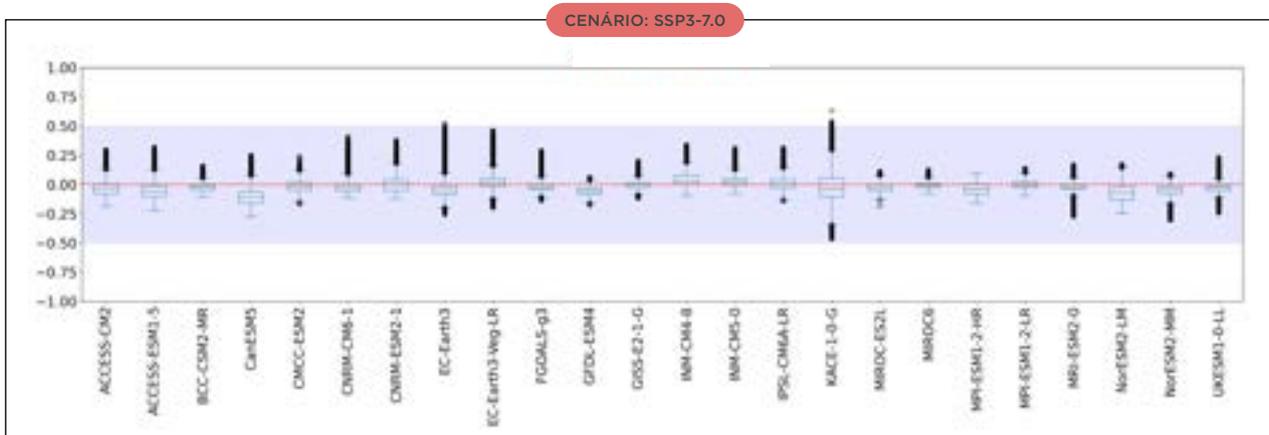
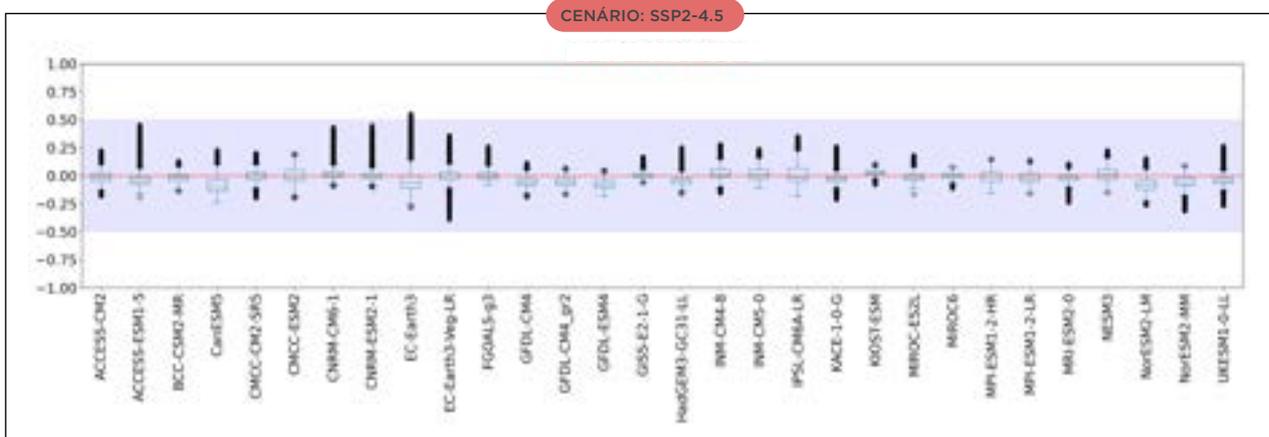
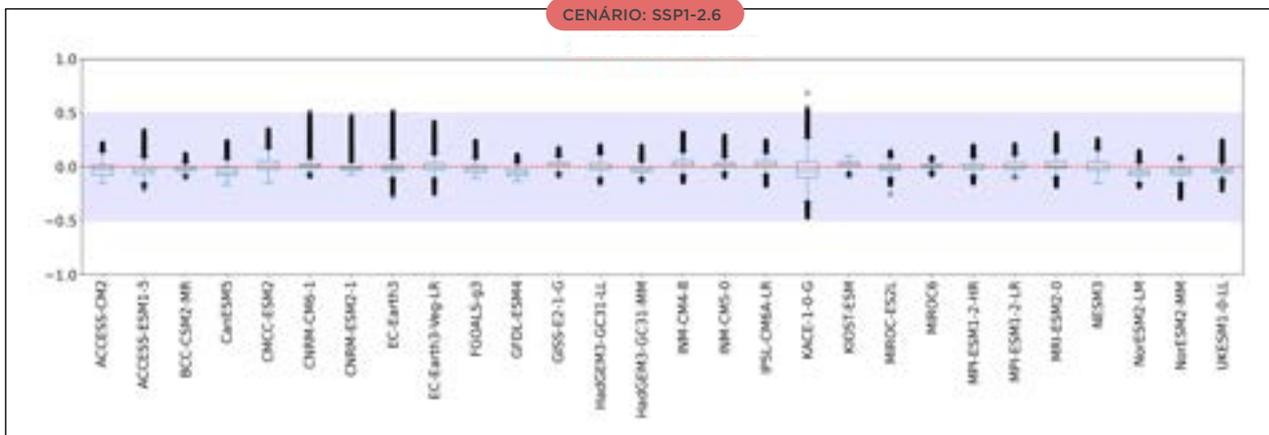
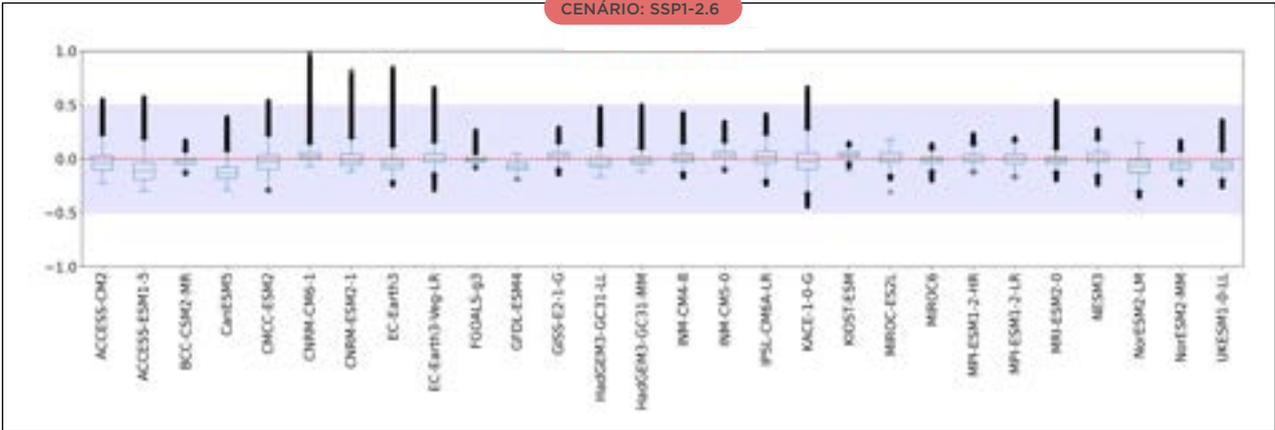


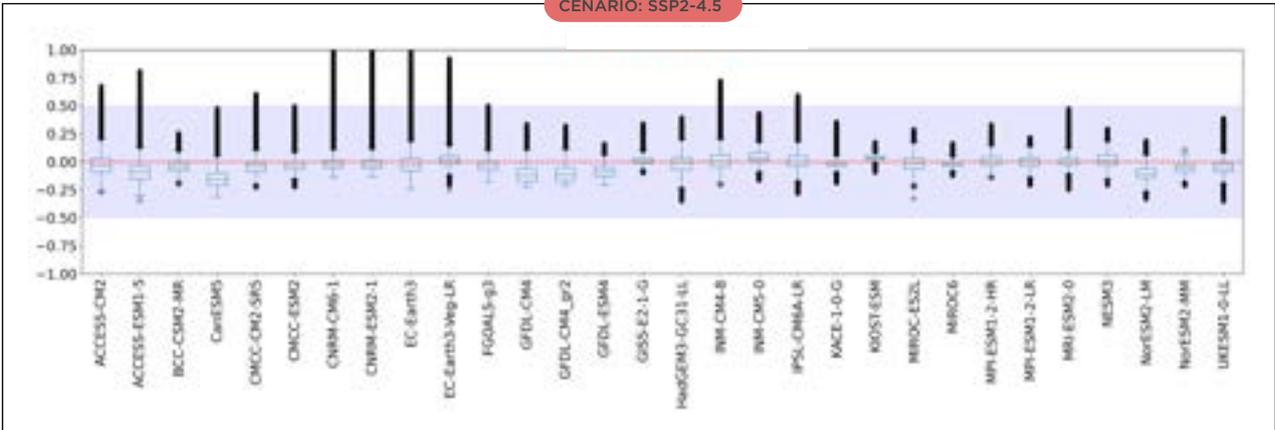
Figura 28 - Box Plot com todos os valores de P em todo o Brasil no período 2015-2040 considerando todos os MCGs e cenários de emissão.

Relação  $\Delta P/P$  para as ottobacias da BHO2017 - 5k - Período: 2041 a 2071

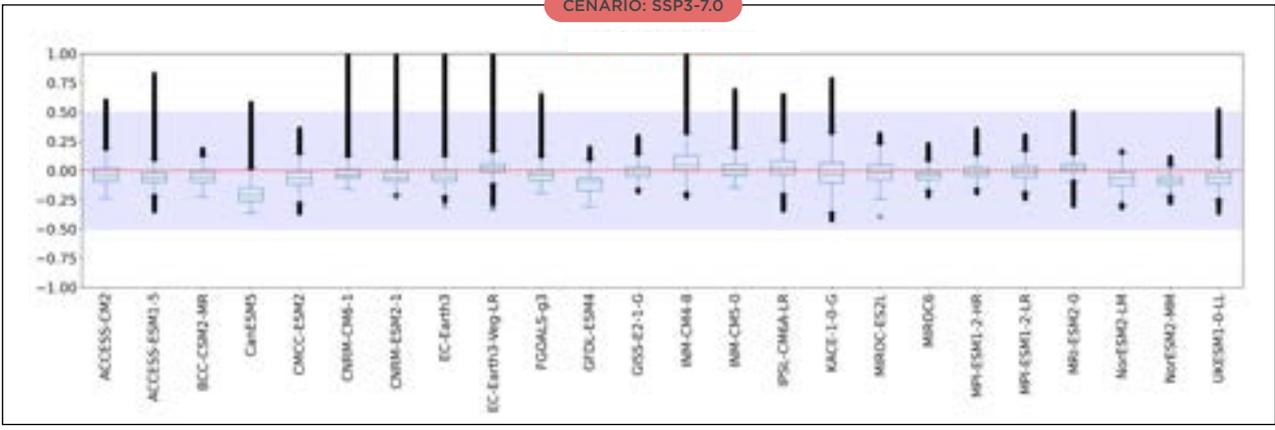
CENÁRIO: SSP1-2.6



CENÁRIO: SSP2-4.5



CENÁRIO: SSP3-7.0



CENÁRIO: SSP5-8.5

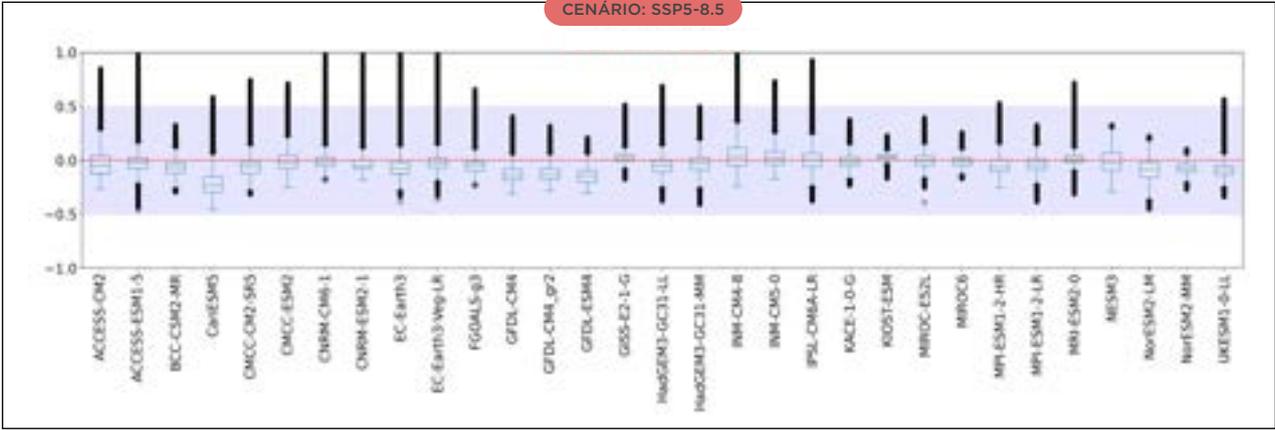


Figura 29 - Box Plot com todos os valores de P em todo o Brasil no período 2041-2070 considerando todos os MCGs e cenários de emissão.

Relação  $\Delta P/P$  para as ottobacias da BHO2017 - 5k - Período: 2071 a 2100

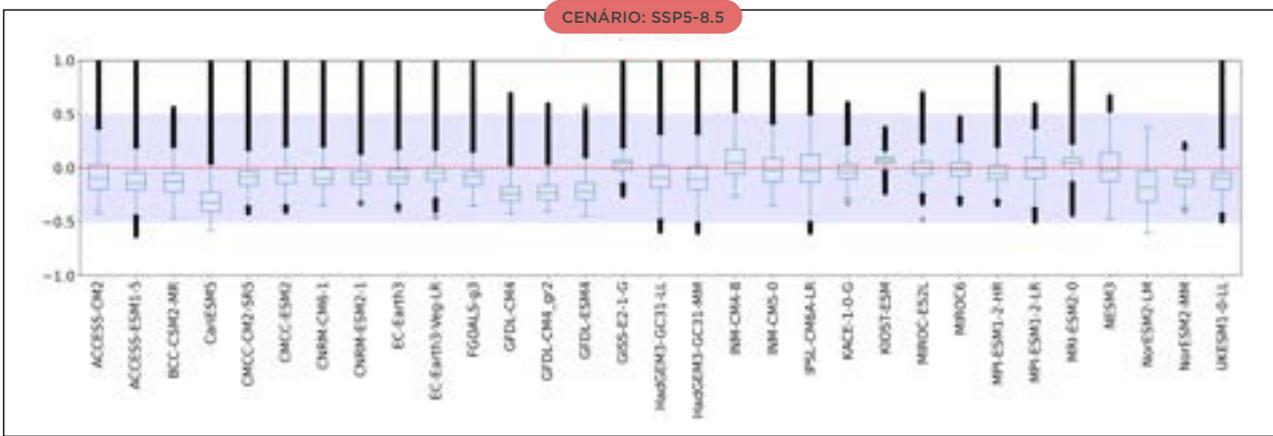
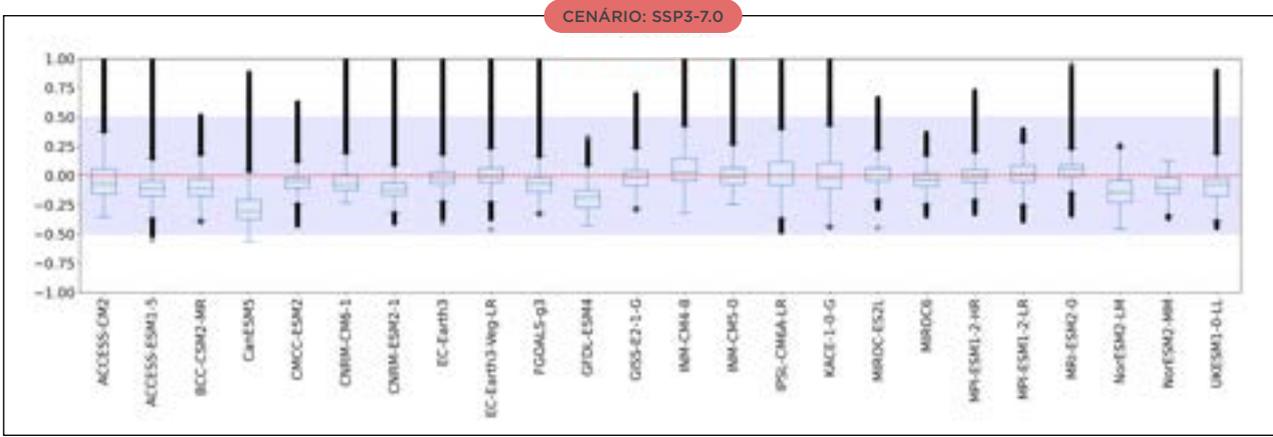
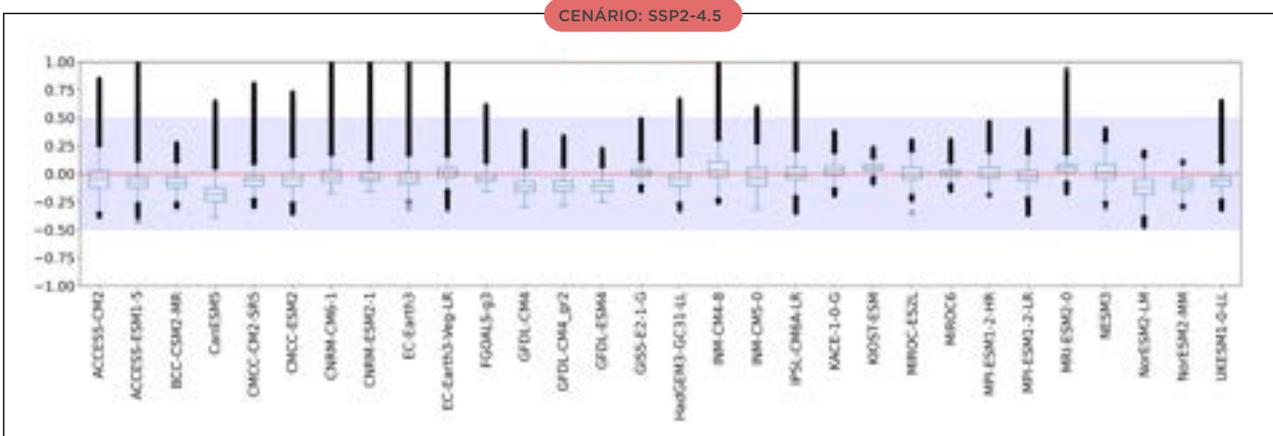
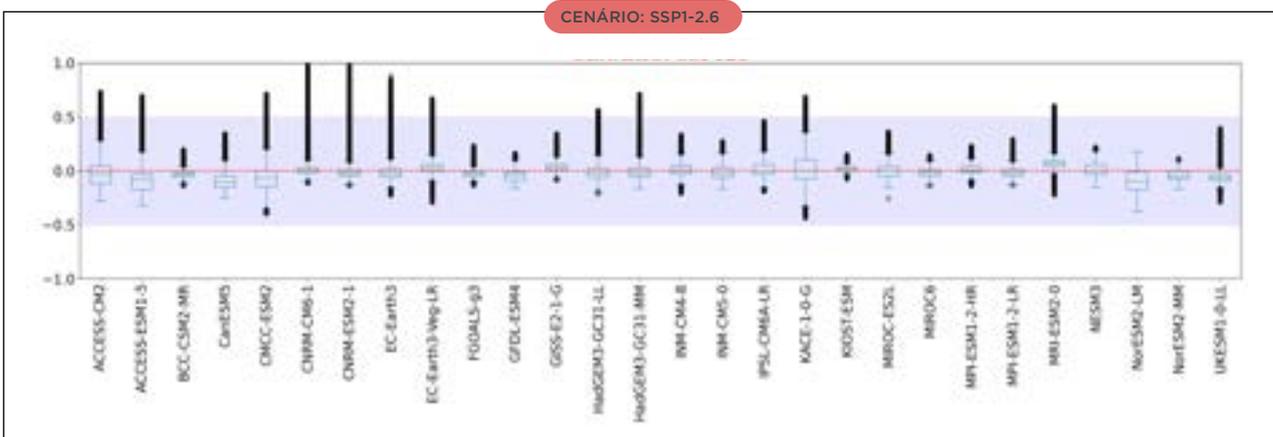


Figura 30 - Box Plot com todos os valores de P em todo o Brasil no período 2071-2100 considerando todos os MCGs e cenários de emissão.

Precipitação média total anual dos MCGs nas Regiões Hidrográficas

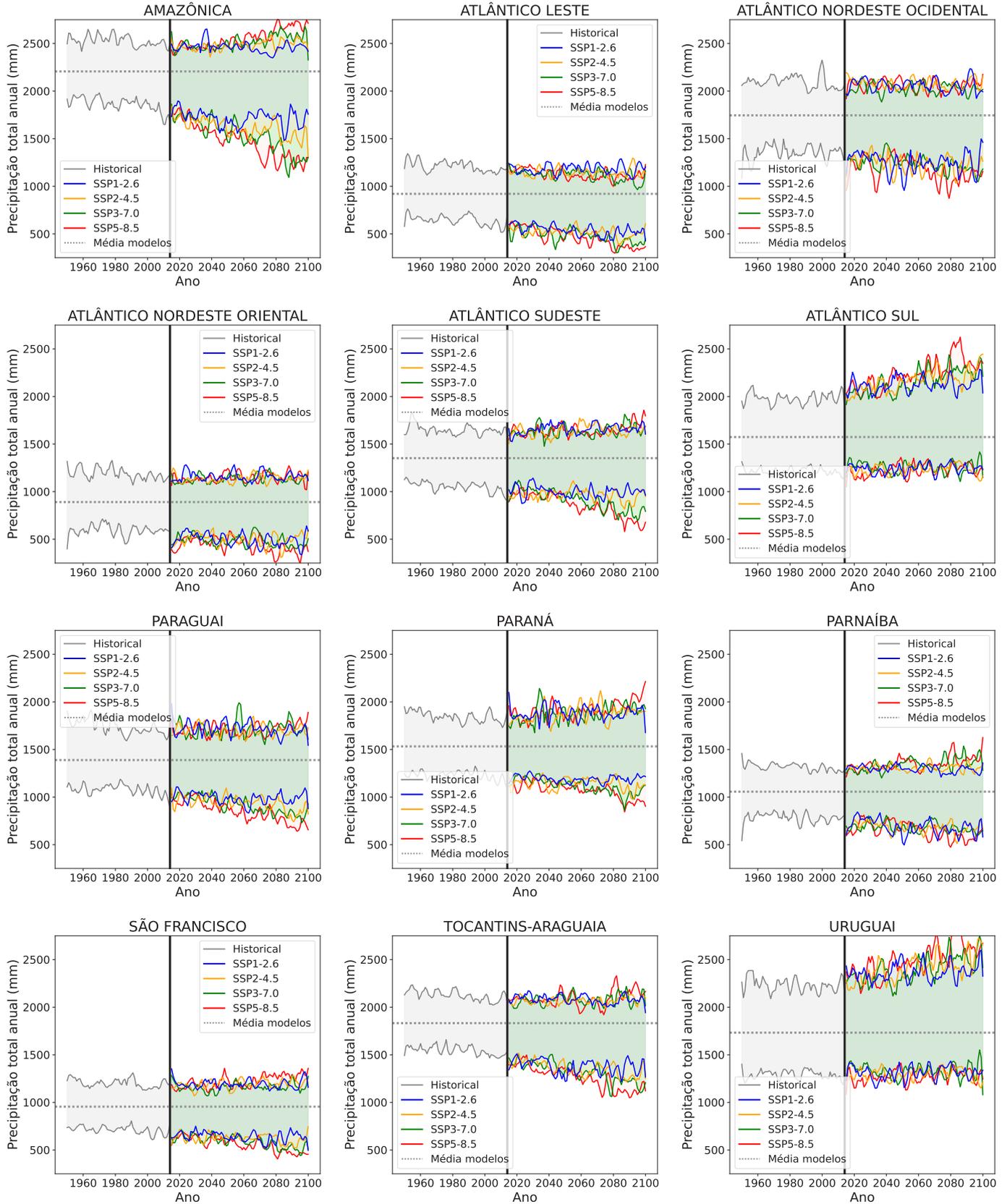


Figura 31 - Evolução das projeções futuras de P média de todos os MCGs e cenários de emissão para as 12 regiões hidrográficas brasileiras. As curvas coloridas são os limites de cada cenário.

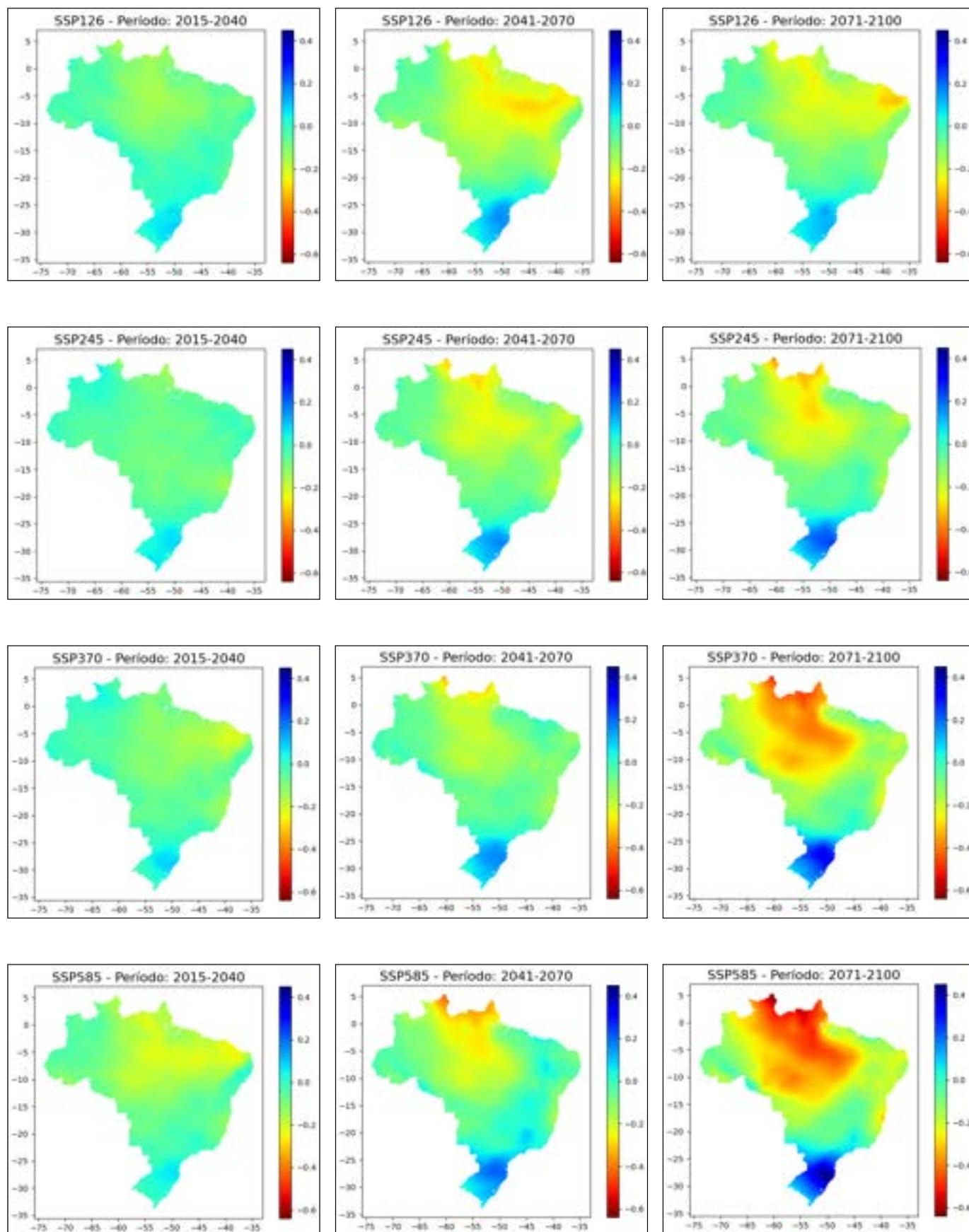


Figura 32 - Mapas da diferença relativa da P para todos os períodos e cenários de emissão do MCG ACCESS-ESM1-5.

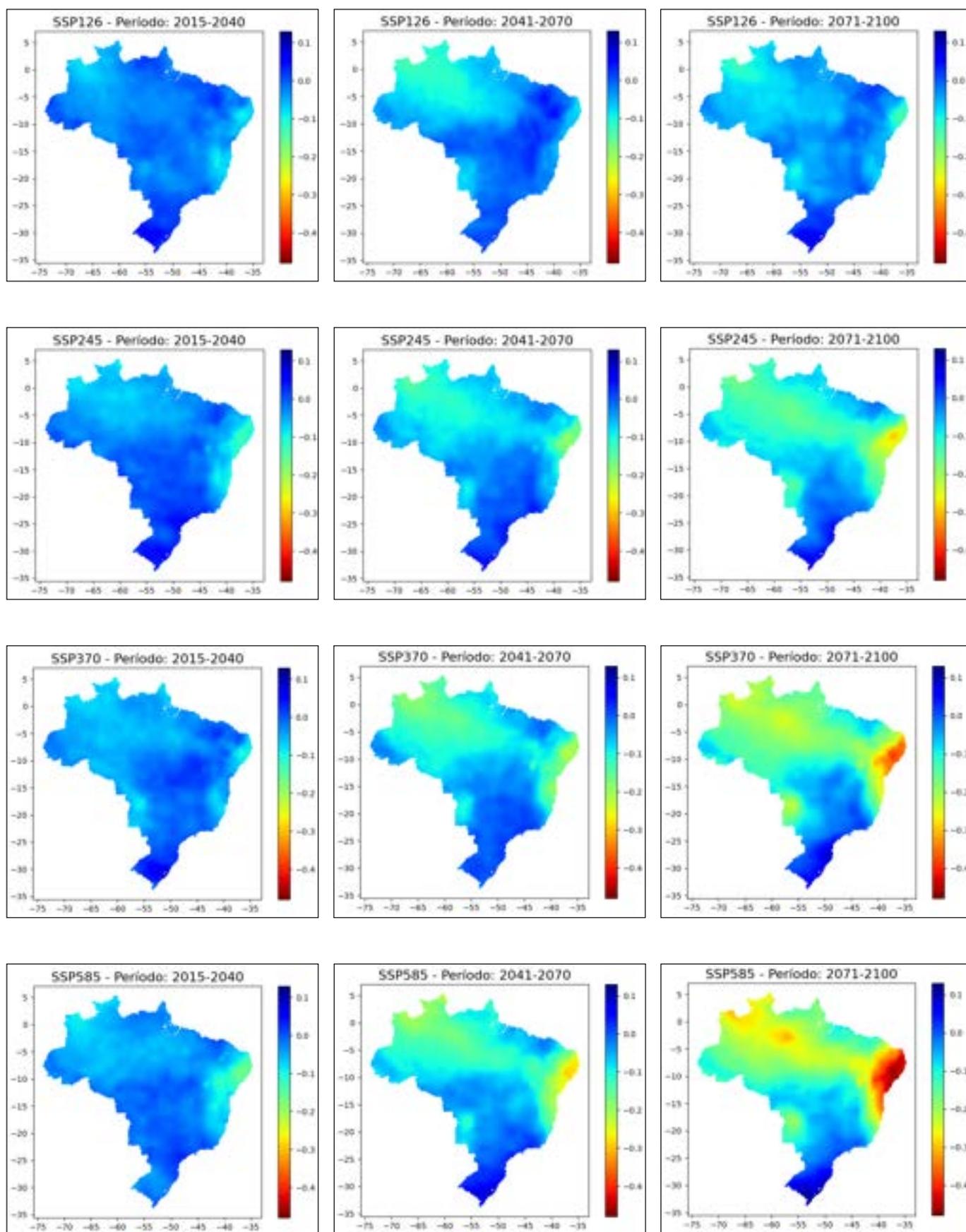


Figura 33 - Mapas da diferença relativa da P para todos os períodos e cenários de emissão do MCG BCC-CSM2-MR.

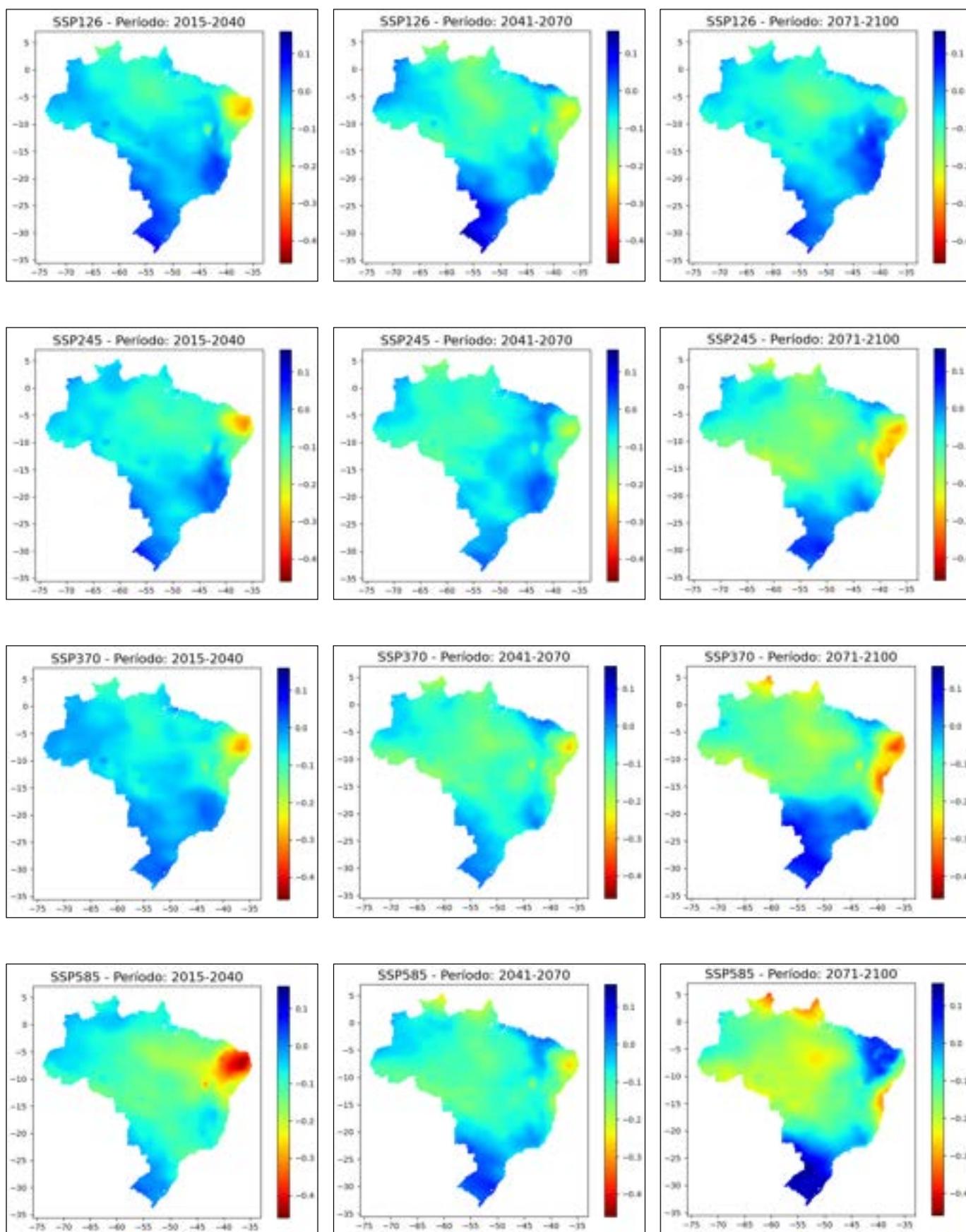


Figura 34 - Mapas da diferença relativa da P para todos os períodos e cenários de emissão do MCG NORESM2-MM.

### 7.3. Resultados das Estatísticas do Futuro da Vazão

As Figuras 35 a 37 apresentam gráficos box plot agora com os resultados da variação relativa da vazão ( $\Delta Q/Q$ ) oriundos da modelagem hidrológica considerando todos os MCGs (eixo x) e os 4 cenários de emissão para as três janelas temporais, respectivamente. Observa-se nas figuras, assim como o observado para a precipitação, que de um modo geral a variação é negativa, ou seja, a vazão do futuro tende a ser menor que a do presente considerando o Brasil como um todo. No entanto, devido ao aumento consistente da E0 do futuro, a diminuição nas vazões é mais pronunciada que aquela observada na precipitação. Da mesma forma que observado para as chuvas futuras, para alguns cenários climáticos, observa-se que uma parte do box plot fica na região de aumento de vazão, sinalizando também a possibilidade de regiões com projeções de aumento nas vazões do futuro.

A magnitude de mudança da vazão varia bastante, algumas vezes ultrapassando o valor de 75% e com dispersão alta quando comparada com os valores de P e E0. Observa-se que na medida que o cenário de emissão aumenta, a magnitude de mudança da vazão do futuro também tende a aumentar, no geral de forma negativa. Para os cenários SSP5-8.5 e o horizonte temporal

2071-2100 observa-se alguns MCGs com valores chegam próximo de 100% de diminuição na vazão do futuro.

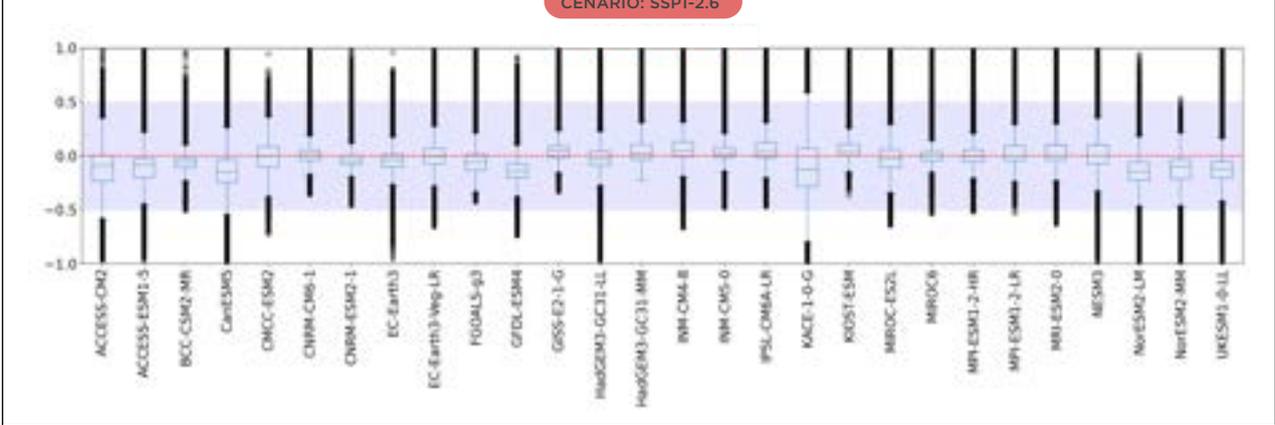
A Figura 38 apresenta os 12 gráficos de linhas correspondente a cada uma das regiões hidrográficas brasileiras. Esses gráficos são similares aos apresentados acima para a P e E0. Observa-se nesses gráficos uma tendência de diminuição da vazão para a maior parte das regiões hidrográficas, a exceção da região Uruguai e Atlântico Sul. A dispersão das projeções futuras da vazão é bem maior tanto em relação a E0 como em relação a P, sinalizando maiores incertezas no comportamento da disponibilidade hídrica futura.

Os mapas das Figuras 39 a 41 ilustram os resultados da variação relativa da vazão ( $\Delta Q/Q$ ) para os mesmos três MCGs apresentados para a E0 e P considerando também os mesmos 4 cenários de emissão e os 3 horizontes temporais. Observa-se nesses mapas regiões com aumento na vazão, principalmente mais ao Sul do Brasil, e diminuição para o restante do país, da mesma forma que observado para E<sub>0</sub> e P, observa-se também grandes diferenças no padrão espacial da mudança nas vazões entre os modelos, principalmente na magnitude.

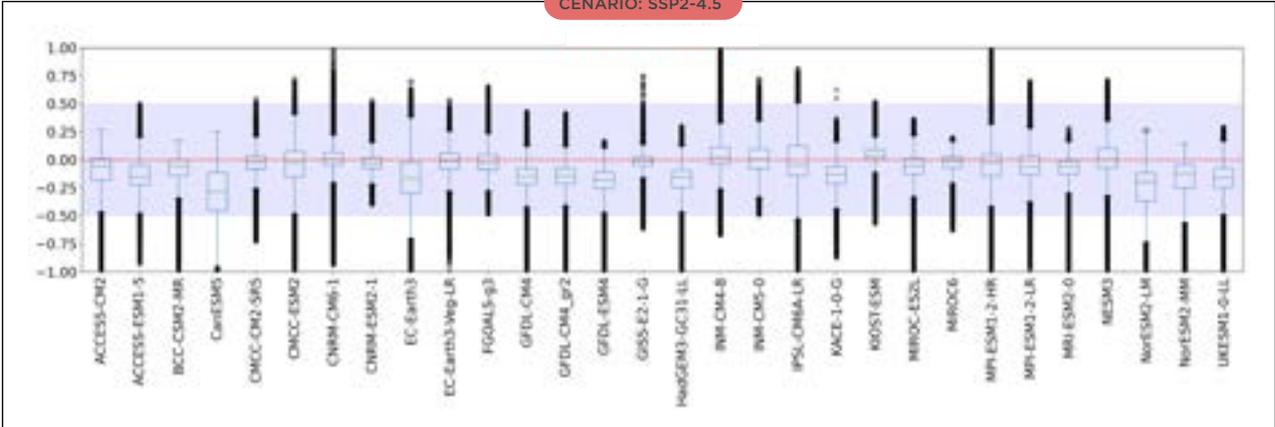


Enchente histórica atinge mais de 800 famílias na região de fronteira Sérgio Vale - Agência de Notícias do Acre

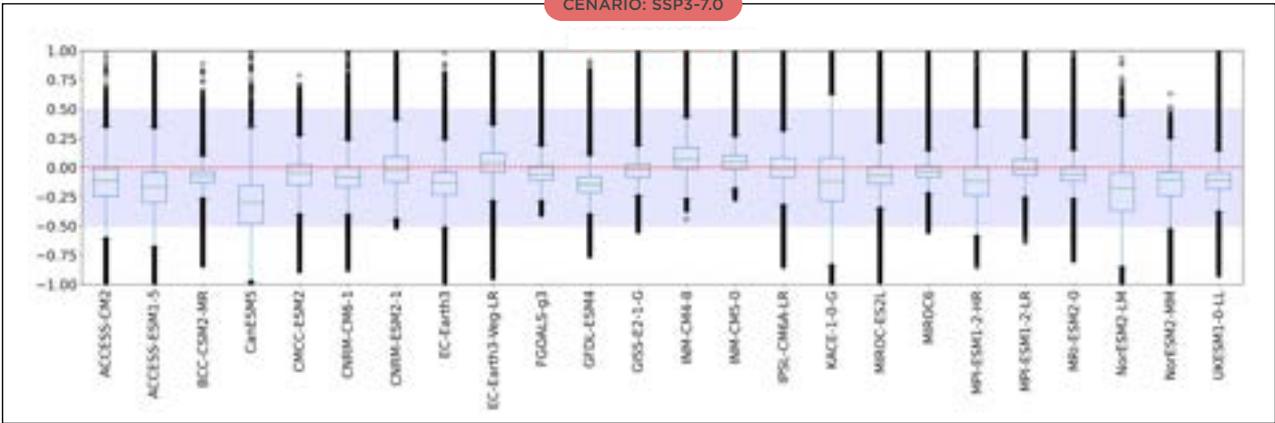
CENÁRIO: SSP1-2.6



CENÁRIO: SSP2-4.5



CENÁRIO: SSP3-7.0



CENÁRIO: SSP5-8.5

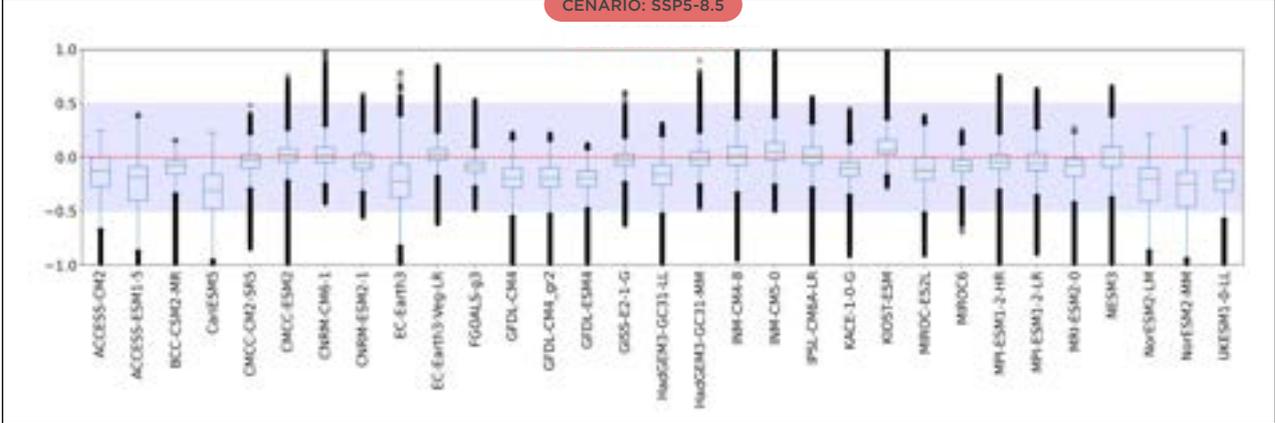
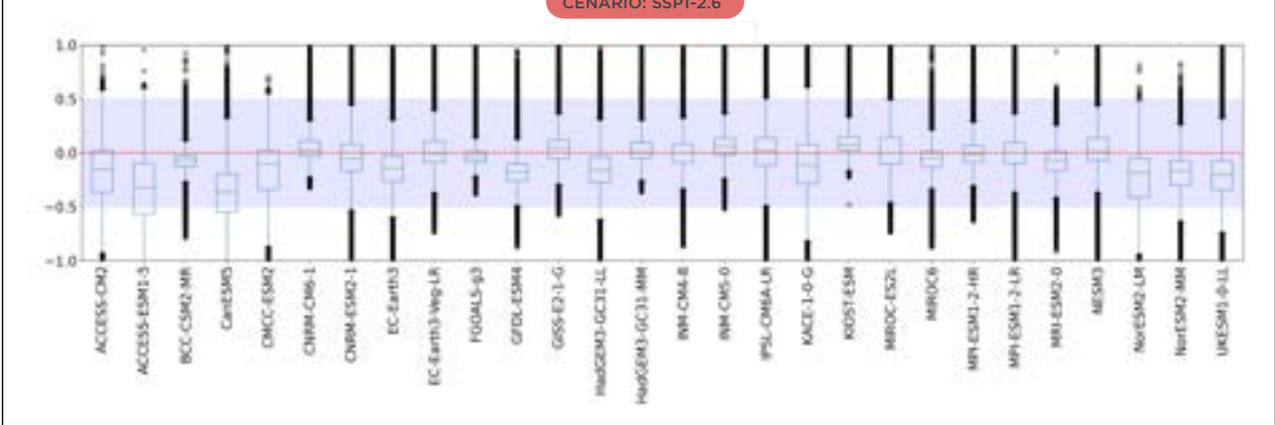
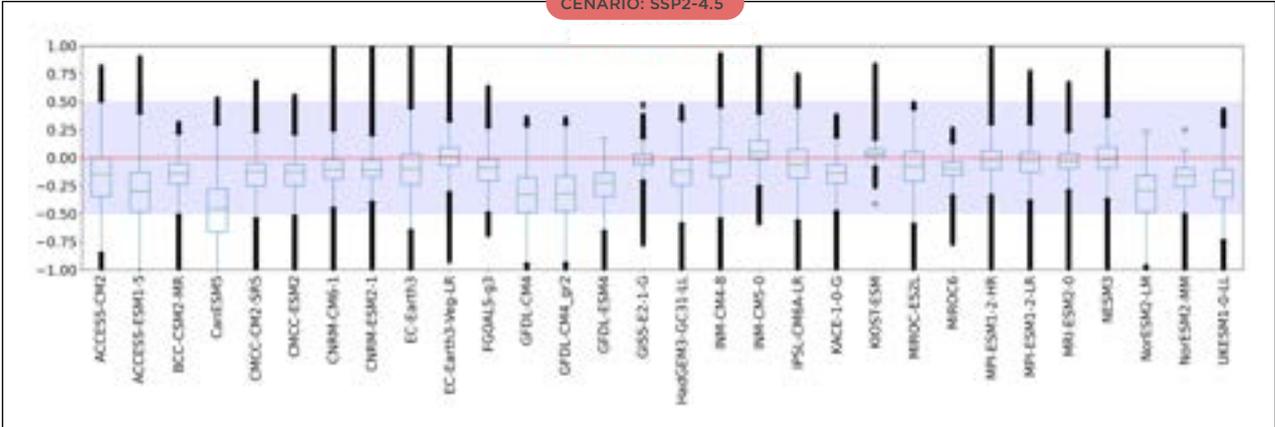


Figura 35 - Box Plot com todos os valores de  $Q_{m1t}$  em todo o Brasil no período 2015-2040 considerando todos os MCGs e cenários de emissão.

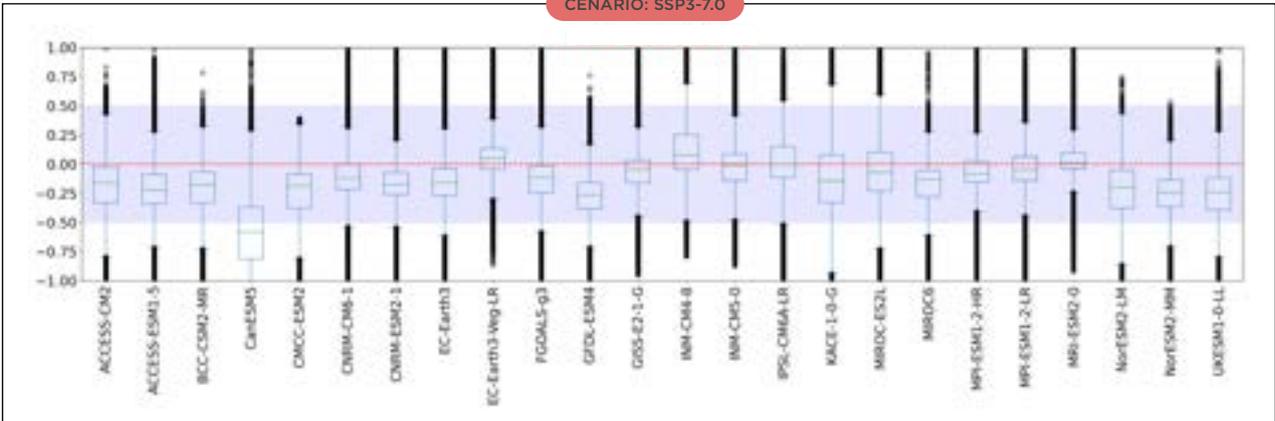
CENÁRIO: SSP1-2.6



CENÁRIO: SSP2-4.5



CENÁRIO: SSP3-7.0



CENÁRIO: SSP5-8.5

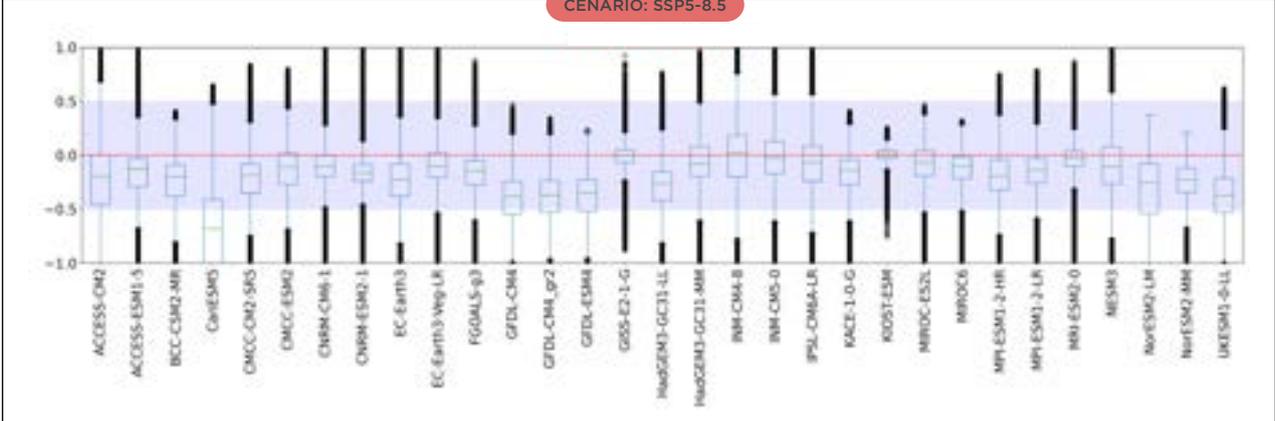
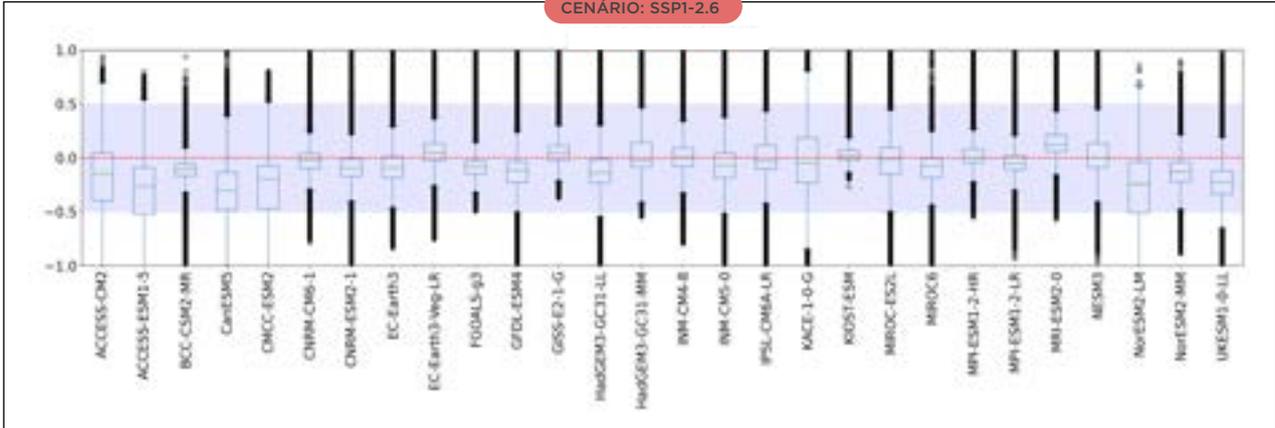
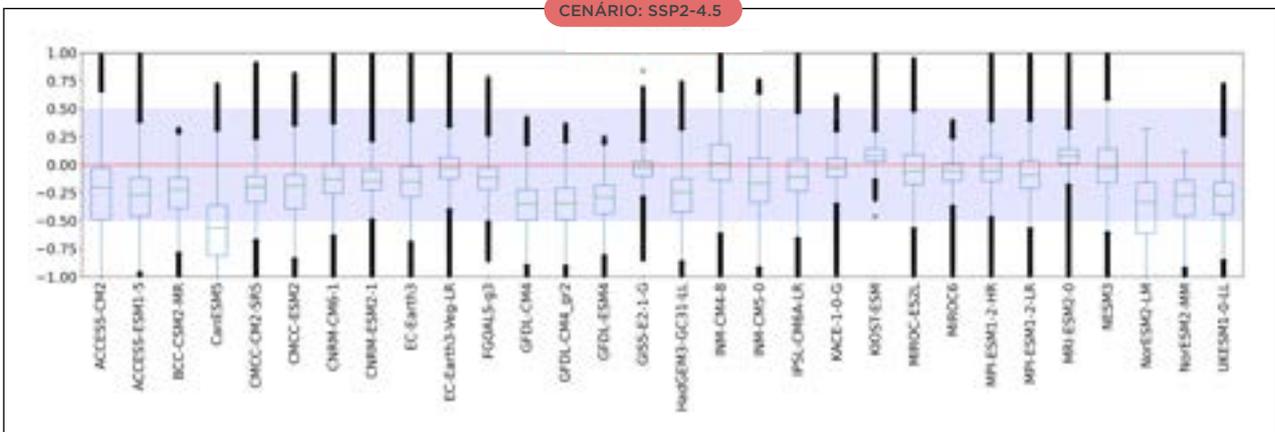


Figura 36 - Box Plot com todos os valores de Qmlt em todo o Brasil no período 2041-2070 considerando todos os MCGs e cenários de emissão.

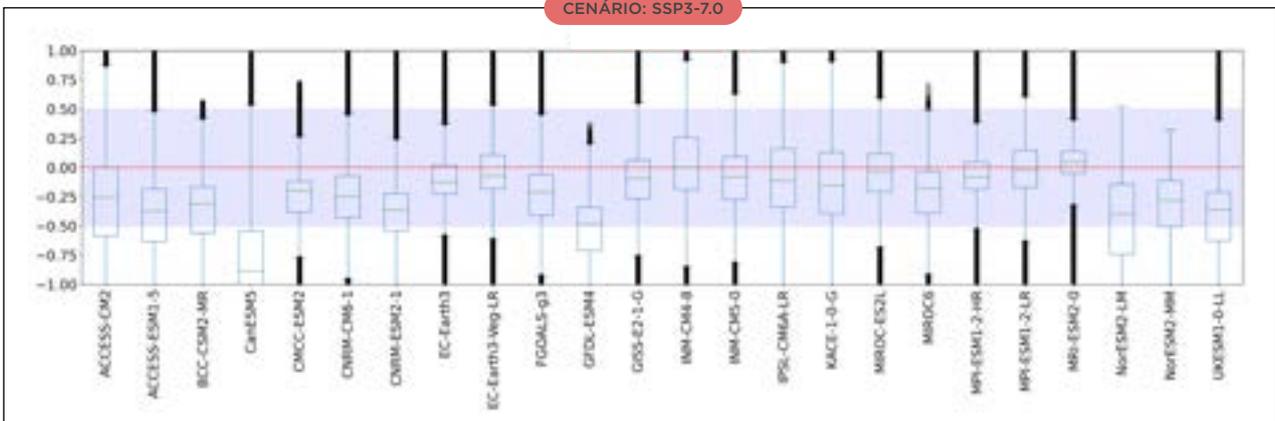
CENÁRIO: SSP1-2.6



CENÁRIO: SSP2-4.5



CENÁRIO: SSP3-7.0



CENÁRIO: SSP5-8.5

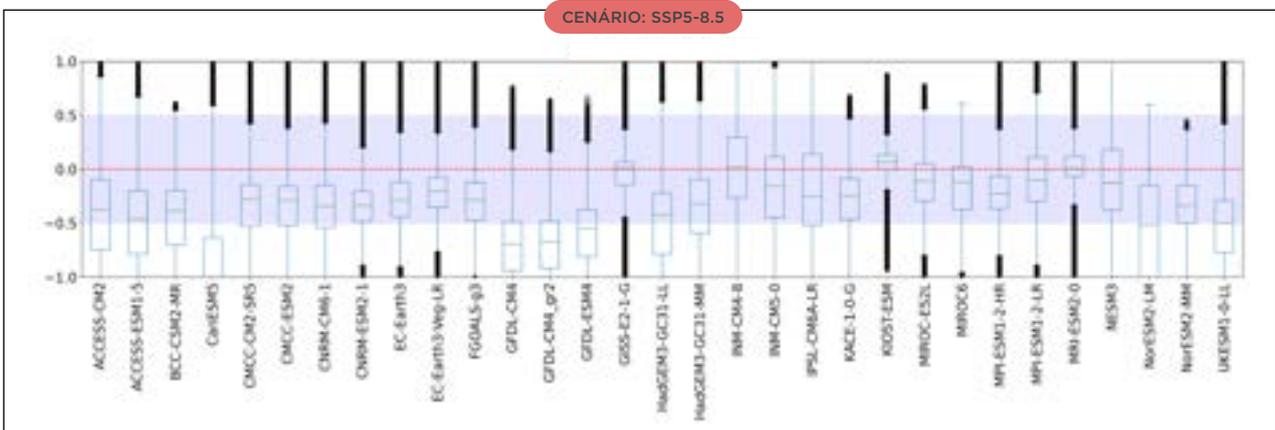


Figura 37 - Box Plot com todos os valores de  $Q_{milt}$  em todo o Brasil no período 2071-2100 considerando todos os MCGs e cenários de emissão.

Vazão incremental específica média das ottobacias nas Regiões Hidrográficas para os MCGs

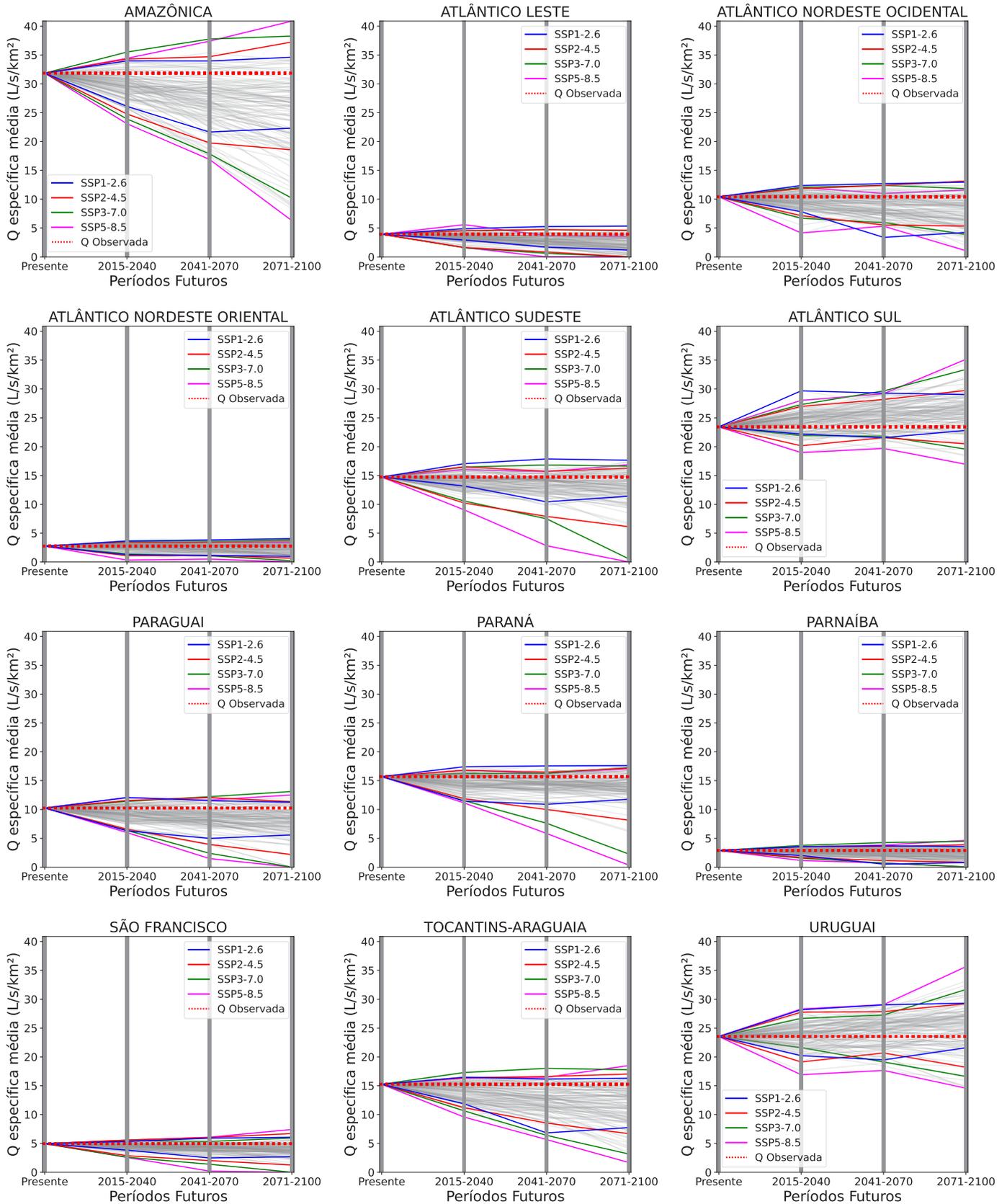


Figura 38 - Evolução das projeções futuras de Qm específica incremental média de todos os MCGs e cenários de emissão para as 12 regiões hidrográficas brasileiras. As curvas coloridas são os limites de cada cenário.

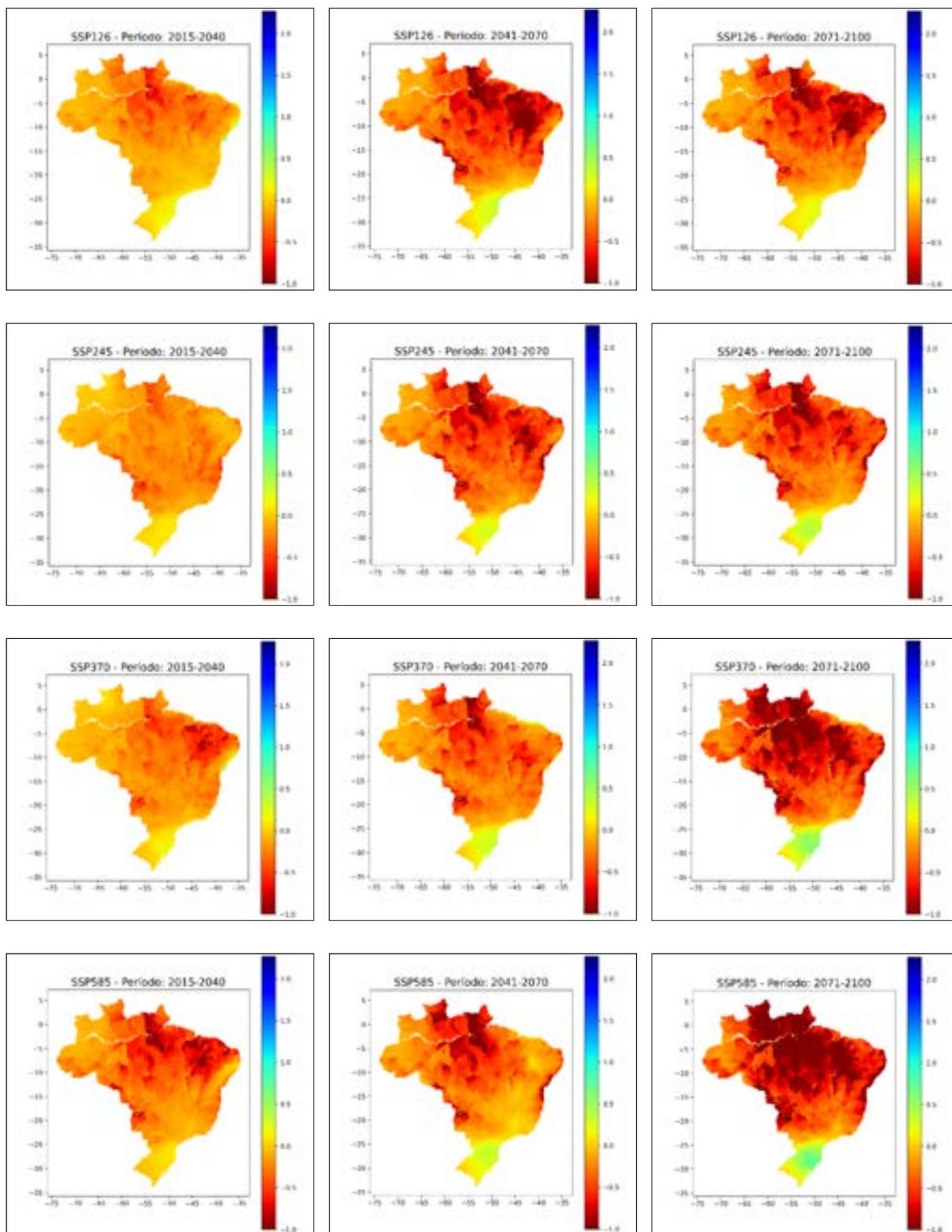


Figura 39 - Mapas da diferença relativa da P para todos os períodos e cenários de emissão do MCG ACCESS-ESM1-5.

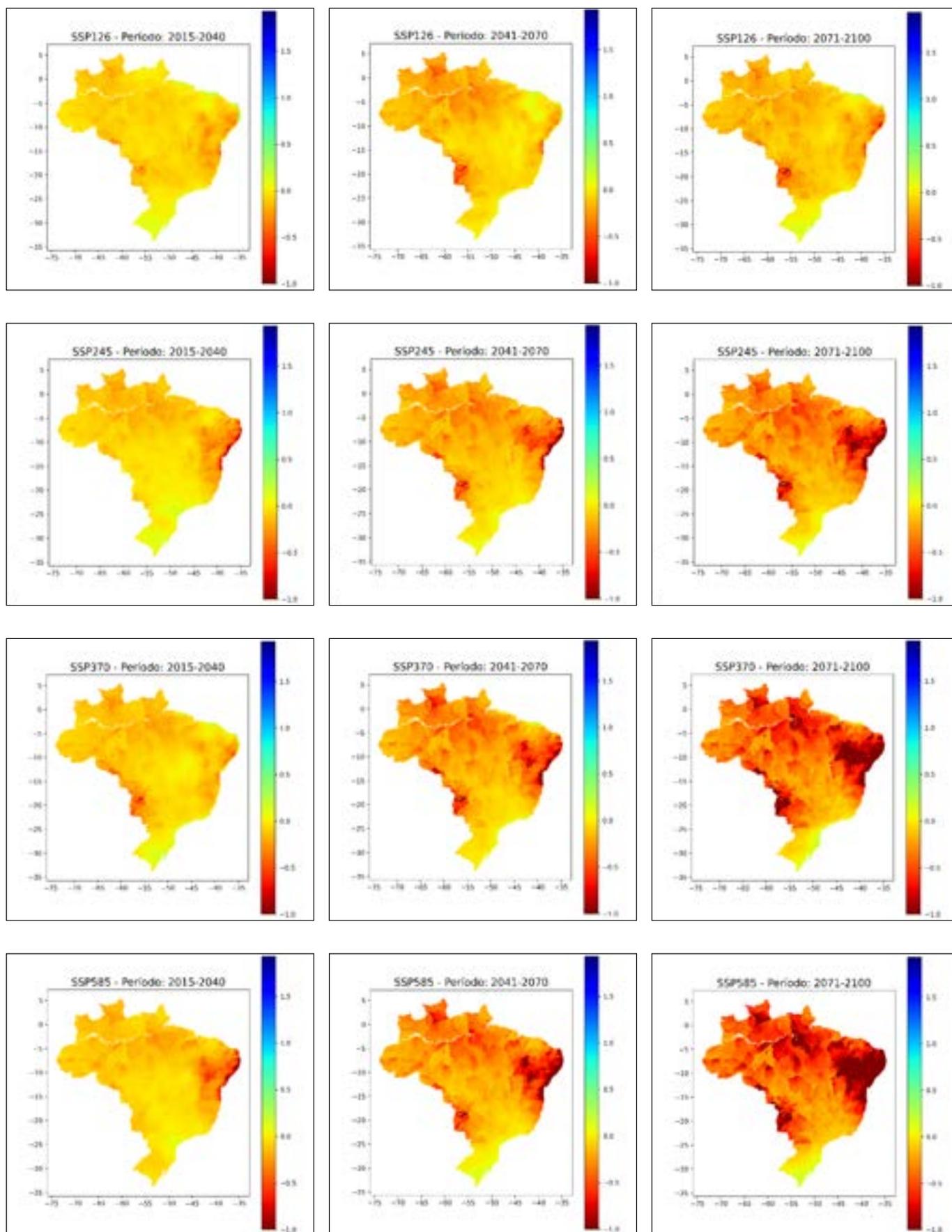


Figura 40 - Mapas da diferença relativa da Qm1t para todos os períodos e cenários de emissão do MCG BCC-CSM2-MR.

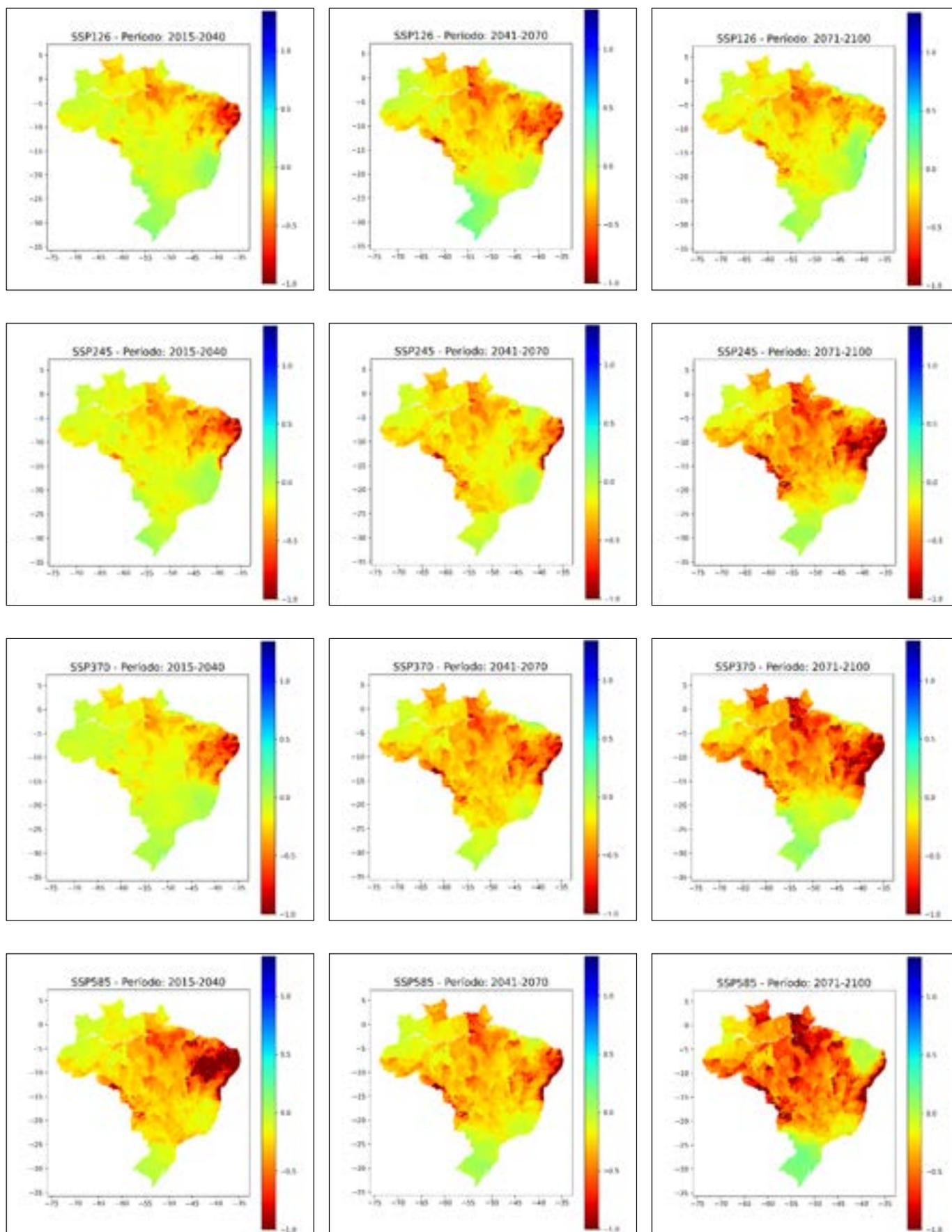


Figura 41 - Mapas da diferença relativa da P para todos os períodos e cenários de emissão do MCG NORESM2-MM

Dada essa condição de incerteza relacionada a como, quando e onde as mudanças se processarão, deve-se fazer uso de um número representativo de cenários hidrológicos futuros, obtidos a partir das projeções climáticas oriundas dos MCGs. O objetivo não é se preparar para um único futuro desconhecido e com um alto grau de incerteza, mas ser robusto o suficiente para lidar satisfatoriamente com os diferentes futuros hidroclimáticos plausíveis que podem ocorrer no Brasil. Assim, a partir da avaliação do percentual de cenários que apontam para o

aumento ou a redução nas vazões, em diferentes níveis de alteração, tendo como referência a verificação desses níveis na maioria dos trechos de rios das regiões hidrográficas, observa-se nas Figuras 42 e 43 uma preponderância de cenários de diminuição das vazões, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Na região Sul há uma preponderância de cenários de aumento na disponibilidade hídrica associados ao aumento na frequência de cheias e inundações.



Morro da Oficina, em Petrópolis local mais atingido pela enchente  
Tomaz Silva - Agência Brasil

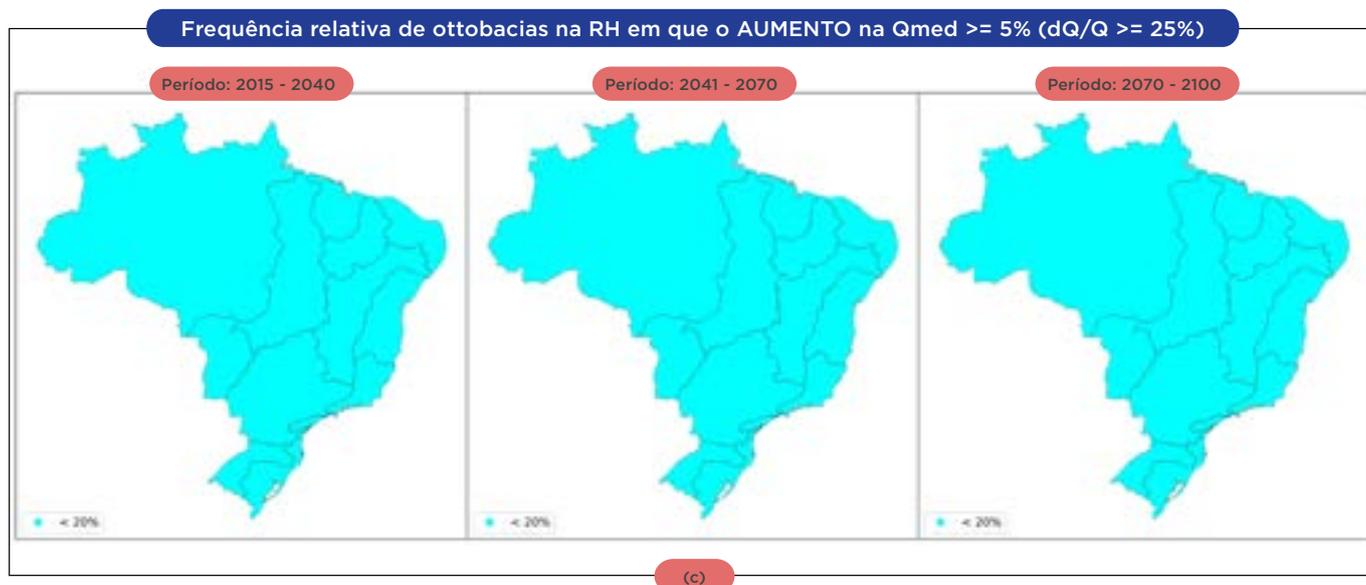
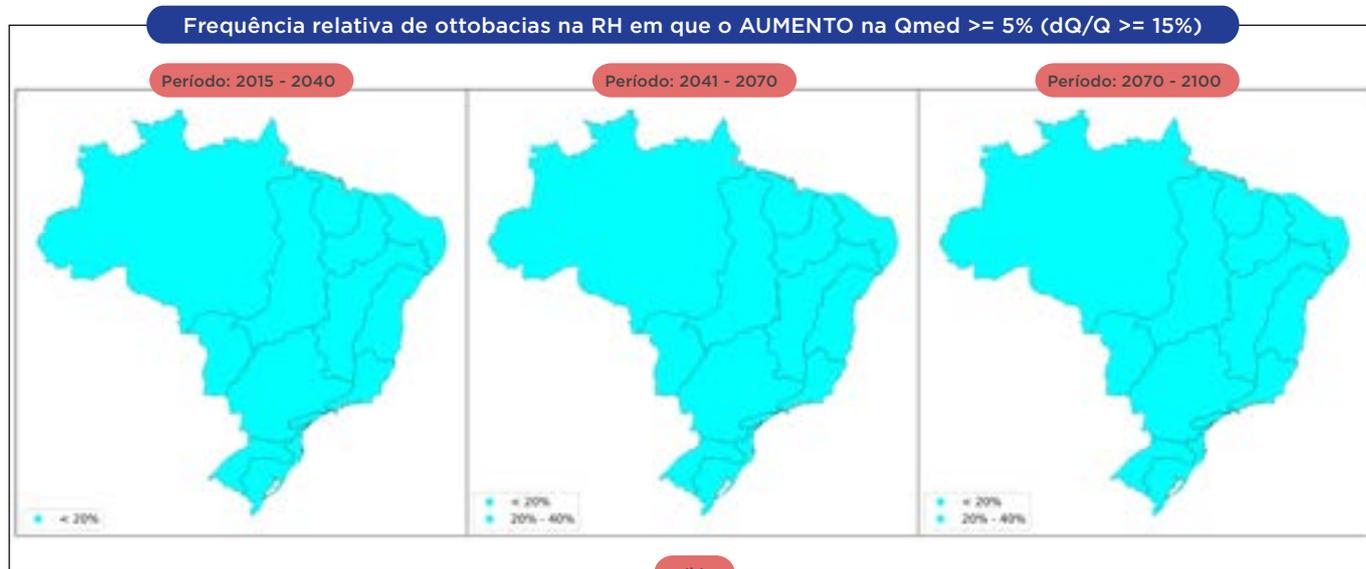
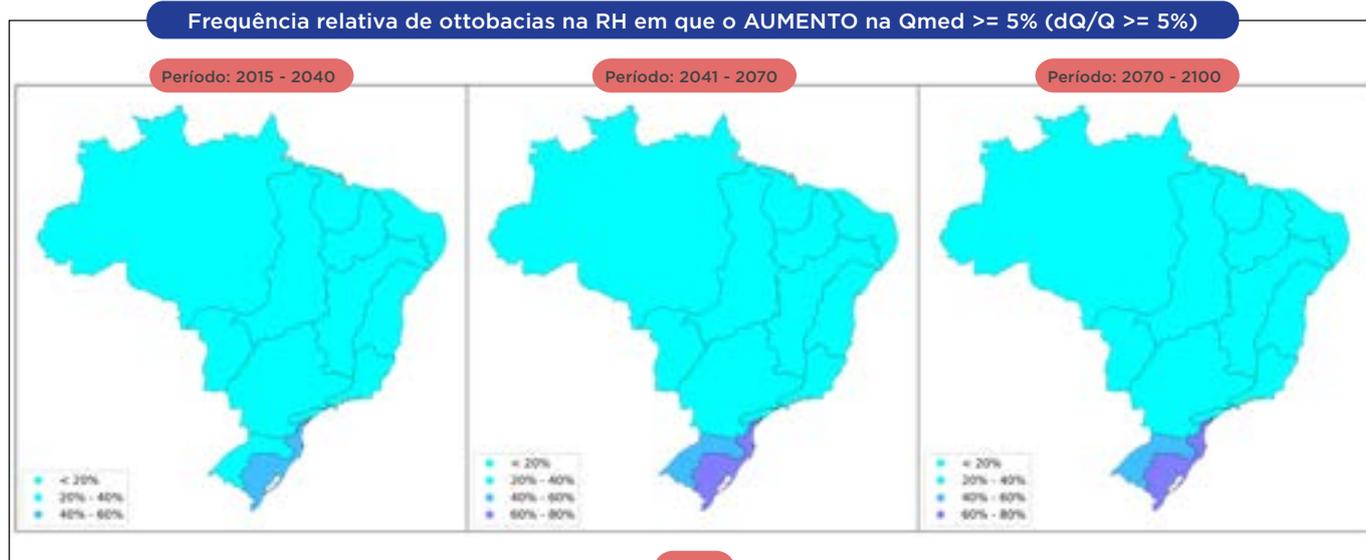
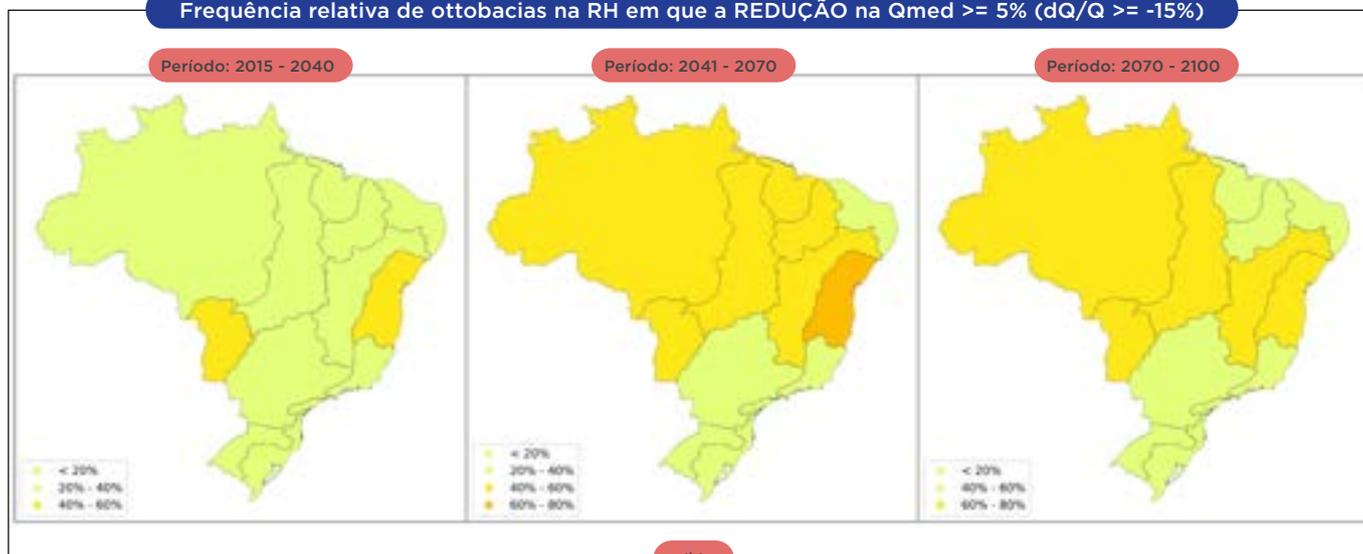


Figura 42 - Mapas do grau de convergência dos cenários climáticos para aumento na Qmlt em todos os períodos.

Frequência relativa de ottobacias na RH em que a REDUÇÃO na Qmed  $\geq 5\%$  ( $dQ/Q \geq -5\%$ )



Frequência relativa de ottobacias na RH em que a REDUÇÃO na Qmed  $\geq 5\%$  ( $dQ/Q \geq -15\%$ )



Frequência relativa de ottobacias na RH em que a REDUÇÃO na Qmed  $\geq 5\%$  ( $dQ/Q \geq -25\%$ )

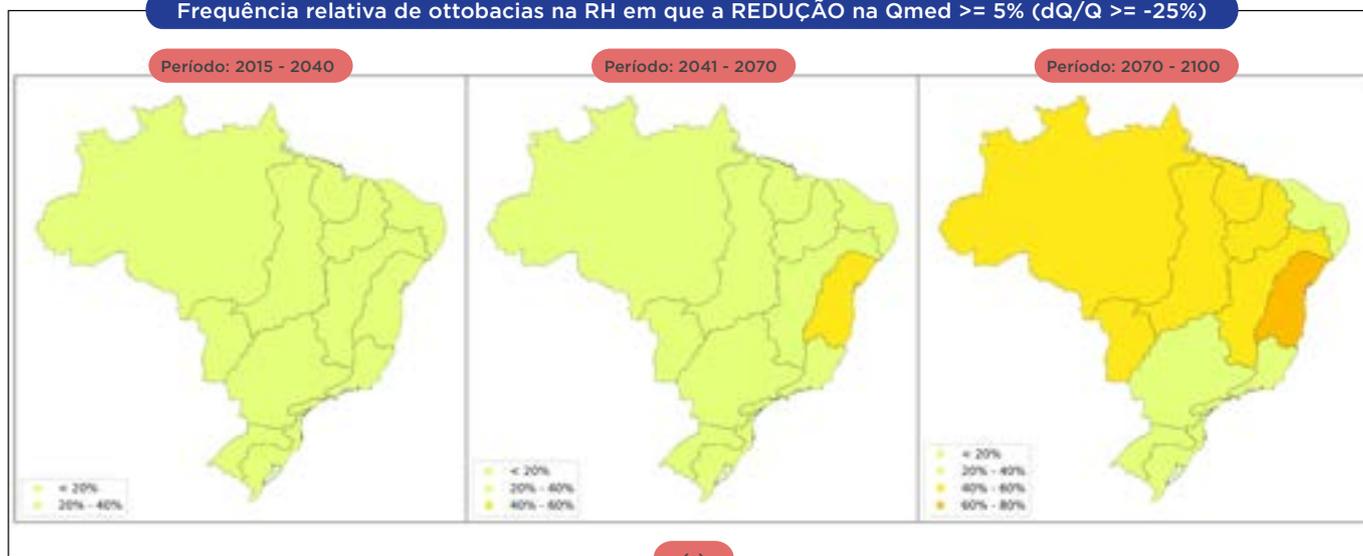


Figura 43 - Mapas do grau de convergência dos cenários climáticos para diminuição na Qmt em todos os períodos.

# 8

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

**P**esquisas têm demonstrado cada vez mais a estreita relação entre as atividades antrópicas e a mudança global do clima e, mesmo nos cenários mais otimistas, são esperados efeitos, em diferentes níveis, por todo o planeta. O setor de recursos hídricos por ser fortemente dependente de fatores climáticos é um dos mais vulneráveis a serem impactados pela mudança climática, principalmente nos países em desenvolvimento. Nesse contexto, estudos de impacto e vulnerabilidade a mudança climática são um importante instrumento a ser empregado na adaptação às condições mais adversas do clima, sendo crucial na garantia da segurança hídrica no Brasil.

Este estudo apresentou uma avaliação do impacto da mudança climática nos recursos hídricos do Brasil a partir da utilização de cenários de clima futuros oriundos dos MCGs. Os resultados aqui apresentados fornecem relevantes informações para o processo de tomada de decisão e o desenvolvimento de eventuais políticas públicas no setor de recursos hídricos, permitindo que se conheça a priori, mesmo que de forma incompleta, as possíveis consequências de eventuais mudanças no clima futuro na segurança hídrica do Brasil. Isso é fundamental na questão de elaboração de estratégias de adaptação no setor de recursos hídricos brasileiro.

A abordagem aplicada neste estudo, parte de uma visão onde reconhece-se a incerteza advinda da impossibilidade estrutural de se prever de forma determinística o futuro e de controlá-lo, incerteza esta que pode ser traduzidas em cenários que informam futuros potenciais (críveis-verossímeis com o conhecimento atual), e que demandam estratégia de adaptação que proporcione ao setor de recursos hídricos flexibilidade para operar de forma persistente (eficaz) nos diferentes futuros potenciais alternativos constituindo em uma estratégia robusta. Assim, os cenários apresentados e discutidos aqui oferecem um vislumbre

do estado potencial dos recursos hídricos brasileiros em diferentes horizontes temporais sob as restrições e impactos da mudança climática, podendo ser utilizados no desenvolvimento dessas estratégias de adaptação.

É importante destacar que mesmo buscando representar o máximo possível as incertezas a partir da consideração de múltiplos cenários desenvolvidos sob uma ampla variedade de modelos e cenários de emissão, há ainda muita incerteza associada. Essas outras incertezas surgem de várias fontes, cenários de emissão, os métodos de downscaling e a modelagem hidrológica empregados são alguns desses exemplos. No entanto, não é apenas o clima que muda no futuro, mas também os sistemas socioeconômicos e ambientais, mudanças estas que devem ocorrer mesmo na ausência de mudança climática. No caso específico da área de recursos hídricos, é preciso compreender as suas nuances, as diferentes características e especificidades da segurança hídrica nas mais diferentes regiões do Brasil.

Cabe ressaltar, que esse estudo embora se configure como uma ferramenta que pode melhorar o planejamento e gestão de recursos hídricos num contexto de incertezas devido a mudança climática, não é, contudo, uma panaceia e nem imune a falhas e contestações. Os resultados aqui apresentados podem ajudar aos tomadores de decisão a implementar políticas e ações apropriadas de gestão e alcançar o desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos na região de estudo. Ainda assim, permanecem incertezas na análise. Em primeiro lugar, as estimativas aqui obtidas foram baseadas na suposição de que a mudança climática e as atividades humanas são independentes. No entanto, nas bacias hidrográficas do mundo real, esses dois fatores estão inter-relacionados e interagem continuamente em todos os locais e momentos. Em segundo lugar, as estimativas

de elasticidade do clima com base na hipótese de Budyko assumem que as mudanças no armazenamento de água no solo são insignificantes a longo prazo. No entanto, não há evidências científicas suficientes para confirmar a falta de mudança no armazenamento de água no solo ao longo do tempo nas bacias hidrográficas. As estimativas de evapotranspiração potencial, qualidade dos dados de precipitação e qualidade das estimativas das vazões são fontes adicionais de incerteza.

Todos as questões e incertezas colocadas acima ampliam muito a complexidade em avaliar como estará os recursos hídricos do Brasil no futuro. Somadas a isso, tem-se a dificuldade na própria comunicação dessas incertezas realizadas a partir da abordagem por cenários utilizadas aqui. A relevância desta abordagem muitas vezes não é identificada por grande parte dos tomadores de decisão ligados a água possivelmente em conformidade com o Paradoxo de Giddens (Giddens, 2010): “Os perigos do aquecimento global não são palpáveis, imediatos ou visíveis no decorrer da vida cotidiana, por mais assustador que se afigurem, mui-

ta gente continua sentada, sem fazer nada de completo ao seu respeito. No entanto, esperar que eles se tornem visíveis e agudos para só então tomarmos medidas sérias, por definição, será tarde demais”. Assim, construir canais de comunicação entre os diferentes atores ligados a questão hídrica de forma que as informações geradas por estudos como o desenvolvido aqui sejam de fato relevantes ao processo de adaptação e que sejam transmitidas de forma clara e no tempo adequado para a tomada de decisão.

Por fim, é importante lembrar que o desenvolvimento dessas estratégias de adaptação tem que ser amparado por políticas públicas inovadoras, capazes de criar as circunstâncias necessárias ao enfrentamento das consequências da mudança climática, numa perspectiva de longo prazo e numa abordagem baseada na construção de sistemas de aprendizagem para ação em situações de complexidade e incerteza. Este conjunto de informações produzidos nesse estudo, além de orientar os tomadores de decisão e formuladores das políticas públicas, permitirá também contribuir na construção desse sistema.







# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGHAKOUCHAK, A., EASTERLING, D., HSU, K., SCHUBERT, S., e SOROOSHIAN, S. (Eds.). *Extremes in a Changing Climate*. Springer Netherlands. 2013.
- ANA - Agência Nacional de Águas. *Manual de Construção da Base Hidrográfica Ottocodificada: fase 1 - construção da base topológica de hidrografia e ottobacias conforme a codificação de bacias hidrográficas de Otto Pfafstetter : versão 2.0 de 1/11/2007*. Brasília: ANA, SGI, 144 p. 2007.
- ANA (Brasil). *Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande - PIRH-Grande: resumo executivo / Agência Nacional de Águas*. -- Brasília: ANA, 95 p.: il. 2018.
- ANA - Agência Nacional de Águas. *Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil / Agência Nacional de Águas*. - Brasília: ANA, 75 p.: il. ISBN: 978-85-8210-057-8. 2019a.
- ANA - Agência Nacional de Águas. *Portal de Metadados Geoespaciais da ANA*. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>>. Acesso em: 30 jan. 2019b.
- ARORA, V. K. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *J. Hydrol.* 265 (1-4), 164-177. 2002.
- ASCE - American Society of Civil Engineers. *Climate-resilient infrastructure: Adaptive design and risk management* (B. M. Ayyub, Ed.). Committee on Adaptation to a Changing Climate. 2018.
- AVILA-DIAZ, A.; ABRAHÃO, G.; JUSTINO, F.; TORRES, F.; WILSON, A. Extreme climate indices in Brazil: evaluation of downscaled earth system models at high horizontal resolution. *Climate Dynamics*. 54:5065-5088. 2020a.
- AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, F.; WILSON, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climate Dynamics*. 55:1403-1426. 2020b.
- BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. *Water Resources Research*. Volume 47, Issue 4, 2011.
- BEH, E. H. Y., MAIER, H. R., e DANDY, G. C. Scenario driven optimal sequencing under deep uncertainty. *Environ. Model. Softw.*, 68, 181-195. 2015.
- BORGOMEIO, E., HALL, J. W., FUNG, F., WATTS, G., COLQUHOUN, K., e LAMBERT, C. Risk based water resources planning: Incorporating probabilistic nonstationary climate uncertainties. *Water Resour. Res.*, 50(8), 6850-6873. 2014.
- BORGOMEIO, E., MORTAZAVI-NAEINI, M., HALL, J. W., e GUILLOD, B. P. Risk, robustness and water resources planning under uncertainty. *Earths Future*, 6(3), 468-487. 2018.
- BUDYKO, M. I. "Climate and life". Academic Press, Nova Iorque. 1974.
- CGEE. *Documento sobre Bases Conceituais sobre Mudanças Climáticas, Impactos e Adaptação em Recursos Hídricos. Estudos Relativos às Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos para embasar o Plano Nacional de Adaptação*. 2014.
- CLARK, M. P., WILBY, R. L., GUTMANN, E. D., VANO, J. A., GANGOPADHYAY, S., WOOD, A. W., FOWLER, H. J., PRUDHOMME, C., ARNOLD, J. R., & BREKKE, L. D. Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change. *Current Climate Change Reports*, 2(2), 55-64. 2016.
- COLLIGNAN, J., POLCHER, J., BASTIN, S., e QUINTANA-SEGUÍ, P. Budyko framework based analysis of the effect of climate change on watershed characteristics and their impact on discharge over Europe. In *Earth and Space Science Open Archive*. 2022.

CORTEZ, B. C. Precipitações Extremas Em Condições Não Estacionárias Para Cenários De Mudanças Climáticas no Brasil. Dissertação de Mestrado Submetida à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada. Universidade Federal de Viçosa. 2020.

FGVces e ANA. Análise custo-benefício de medidas de adaptação à mudança do clima: trajetórias da aplicação na bacia hidrográfica dos rios Piancó-Piranhas-Açu. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da FGV. 2018.

FRITZSCHE, K.; STEFAN, S.; BUBECK, P.; KIENBERGER, S.; BUTH, M.; ZEBISCH, M. and KAHLENBORN, W. The Vulnerability Sourcebook: Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments. Bonn and Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). 2014.

FU; GUOBIN; CHARLES, S. P.; CHIEW, F. H. S. "A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow." In: *Water Resources Research*, 43 (11) (November 24): 1-12. 2007.

GALLOWAY, G. E. If stationarity is dead, what do we do now?1: If stationarity is dead, what do we do now? *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 47(3), 563-570. 2011.

GARCÍA, L. E.; MATTHEWS, J. H.; RODRIGUEZ, D. J.; WIJNEN, M.; DIFRANCESCO, K. N.; RAY, P. Beyond Downscaling: A Bottom-Up Approach to Climate Adaptation for Water Resources Management. AGWA Report 01. Washington, DC: World Bank Group. 2014.

GIDDENS, A. O mundo na era da globalização. Lisboa: Presença, 4ª ed., 2010, 65p. Política da Mudança Climática. São Paulo: Zahar. 2010.

HALLEGATTE, S.; ANKUR, S.; LEMPERT, R.; BROWN, C. e GILL, S. Investment Decision Making Under Deep Uncertainty - Application to Climate Change. World Bank Policy Research Working Paper 6193. Washington, D.C.: World Bank, 2012.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. In: *Appl. Eng. Agric.*, 1(2), 96-99. 1985.

HIRSCH, R. M. A perspective on nonstationarity and water Management1: A perspective on nonstationarity and water management. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 47(3), 436-446. 2011.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M. B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex and Paline M. Midgley. Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press, 2013.

IPCC. Summary for policymakers. In: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32. 2014.

JIANG, C., XIONG, L. H., WANG, D. B., LIU, P., GUO, S. L., XU, C. Y. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko type equations with time-varying parameters. *J. Hydrol.* 522, 326-338. 2015.

KUNDZEWICZ, Z. W.; e STAKHIV, E. Z. Are Climate Models 'ready for Prime Time' in Water Resources Management Applications, or Is More Research Needed? *Hydrological Sciences Journal* 55 (7): 1085-89. 2010.

LV, X., ZUO, Z., NI, Y., SUN, J., e WANG, H. The effects of climate and catchment characteristic change on streamflow in a typical tributary of the Yellow River. *Scientific Reports*, 9(1), 14535. 2019.

MALLOCH, S., GARRITY, M. The Water Report. <https://wrc.wsu.edu/documents/2015/04/malloch-and-garrity-2015-the-water-report-prepub.pdf>. 2015.

- MENDOZA, G.; JEUKEN, A.; MATTHEWS, J.; STAKHIV, E.; KUCHARSKI, J.; GILROY, K. Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA): collaborative water resources planning for an uncertain future. Paris : UNESCO, 162 pg. ISBN 978-92-3-100287-8. 2018.
- MENEZES, L. S. et al. Mudanças climáticas no DF e Ride: detecção e projeções das mudanças climáticas para o Distrito Federal e região integrada de desenvolvimento do DF e entorno. Brasília, Secretaria do Meio Ambiente. 192 p. 2016.
- MILLY, P. C. D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., HIRSCH, R. M., KUNDZEWICZ, Z. W., LETTENMAIER, D. P., e STOUFFER, R. J. Climate change. Stationarity is dead: whither water management? *Science*, 319(5863), 573-574. 2008.
- NRC - National Research Council. Building Community Disaster Resilience through Private-Public Collaboration. The National Academies Press, Washington, DC. 2011.
- NEXGDDP - NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections. Technical Note. Junho, (Disponível em: [https://cds.nccs.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/06/NEX-GDDP\\_Tech\\_Note\\_v1\\_08June2015.pdf](https://cds.nccs.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/06/NEX-GDDP_Tech_Note_v1_08June2015.pdf)). 2015.
- OLSEN, J. R.; e K. GILROY. Risk Informed Decision-Making in a Changing Climate. In 3rd International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology, and Water Resources Management. Vienna. 2012.
- OLSEN, J.R. Adapting Infrastructure and Civil Engineering Practice to a Changing Climate. American Society of Civil Engineers. 2015.
- O'NEILL, B. C.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D. P.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J. F.; LOWE, J.; MEEHL, G. A.; MOSS, R.; RIAHI, K.; and SANDERSON, B. M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461-3482. 2016.
- OTSUKI, R. G. Estimativa de Séries Anuais de Evapotranspiração Real e Vazão em Bacias sem Monitoramento Fluviométrico com Base nas Hipóteses de Budyko. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-170/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p. 2015.
- PFAFSTETTER, O. Classificação de Bacias Hidrográficas - Metodologia de Codificação. Rio de Janeiro, RJ:Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), p. 19. Manuscrito não publicado. 1989.
- REIS, D. S., Jr.; CERQUEIRA, C.M.; VIEIRA, R.F.; e MARTINS, E.S. Budyko's Framework and Climate Elasticity Concept in the Estimation of Climate Change Impacts on the Long-Term Mean Annual Streamflow. World Environmental and Water Resources Congress, May 19-23, Cincinnati, Ohio, 2013.
- SALAS, J., B.; RAJAGOPALAN, L.; SAITO, e BROWN, C. Special Section on Climate Change and Water Resources: Climate Non-Stationarity and Water Resources Management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 138 (5): 385-88. 2012.
- SALAS, J. D.; OBEYSEKERA, J.; e VOGEL, R. M. Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review. *Hydrol. Sci. J.*, 63(3), 325-352. 2018.
- SANKARASUBRAMANIAN, A.; VOGEL, R. M.; LIMBRUNNER, J. F. Climate elasticity of streamflow in the United States. In: *Water Resources Research*, 37 (6): 1771-1781. 2001.
- SANTOS, D. F. Impacto Das Mudanças Climáticas No Zoneamento De Aptidão Climática Das Principais Frutíferas De Clima Temperado Nas Regiões Sul E Sudeste Do Brasil. Dissertação de Mestrado Submetida à Universidade Federal de Itajubá como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Viçosa. 2018.
- SCHAAKE, J. C. From climate to flow. In: Waggoner, P.E. (Ed.), *Climate Change and U.S. Water Resources*. John Wiley, New York, pp. 177-206. 8. 1990.
- SHEFFIELD, J.; GOTETI, G.; e WOOD, E. F. Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological

forcings for land surface modeling, *J. Climate*, 19 (13), 3088-3111. 2006.

SOUZA, S. A.; REIS, D. S. Avaliação do Impacto de Mudanças Climáticas na Precipitação Máxima Diária nas Capitais Brasileiras. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis. 2017.

STEINSCHNEIDER, S.; WI, S.; e BROWN, C. The integrated effects of climate and hydrologic uncertainty on future flood risk assessments: flood risk under hydrologic and climate uncertainty. *Hydrol. Process.*, 29(12), 2823-2839. 2015.

THRASHER, B.; WANG, W.; MICHAELIS, A.; MELTON, F.; LEE, T.; e NEMANI, R. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Nature Scientific Data*, 9 (254), 2022.

THRASHER, B.; XIONG, J.; WANG, W.; MELTON, F.; MICHAELIS, A.; e NEMANI, R. Downscaled climate projections suitable for resource management. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94 (37), 321-323, 2013.

THRASHER, B.; MAURER, E. P.; MCKELLAR, C.; e DUFFY, P. B. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16 (9), 3309-3314, 2012.

VANROLLEGHEM, P. A. Modelling aspects of water framework directive implementation. IWA Publishing, p333. 2010.

WILLOWS, R. I.; CONNELL, R. K. Climate Adaptation: Risk, Uncertainty and Decision-making. UKCIP, Oxford UKCIP Technical Report. 2003.

WU, J.; MIAO, C.; WANG, Y.; DUAN, Q.; e ZHANG, X. Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods. *Journal of Hydrology*, 545, 263-275. 2017.

XAVIER, A.; KING W.; SCANLON, B. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *Int J Climatol*. 36:2644-2659. 2015.

XAVIER, A.; KING, C.; SCANLON, B. An update of Xavier, King and Scanlon. Daily precipitation gridded data set for the Brazil. In: Conference proceedings, pp 562-569. 2016.

YANG, H.; YANG, D. Derivation of Climate Elasticity of Runoff to Assess the Effects of Climate Change on Annual Runoff. *Water Resources Research*, 47 (7) (July 14): 1-12. 2011.

ZHANG, L.; HICKEL, K.; DAWES, W. R.; CHIEW, F. H. S.; WESTERN, A. W.; BRIGGS, P. R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. In: *Water Resources Research*, 40 (2): W02502. 2004.

ZHOU, G.; WEI, X.; CHEN, X.; ZHOU, P.; LIU, X.; XIAO, Y.; SUN, G.; SCOTT, D. F.; ZHOU, S.; HAN, L.; e SU, Y. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 6, 5918. 2015.



**MINISTÉRIO DA  
INTEGRAÇÃO E DO  
DESENVOLVIMENTO  
REGIONAL**

