



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

MONITORAMENTO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Breno Hideki Nakagawa

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientada por
Juliana Anochi e Marília H. Shimizu

INPE
São José dos Campos
2023

MONITORAMENTO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Breno Hideki Nakagawa

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientada por
Juliana Anochi e Marília H. Shimizu

INPE
São José dos Campos
2023

RESUMO

O território brasileiro está dividido em cinco regiões distintas, as quais são impactadas por regimes climáticos tropicais, subtropicais e de latitudes médias, apresentando uma ampla variedade de padrões climáticos. Essas regiões abrigam as doze principais bacias hidrográficas do Brasil que ocupam aproximadamente 80% do território nacional. Devido à sua extensa cobertura no território brasileiro, e considerando que o Brasil é o quinto maior exportador agrícola do mundo, as bacias hidrográficas têm uma importância significativa para o desenvolvimento do país, sendo essenciais para diversos setores da economia, como a agricultura e a pecuária por meio da irrigação. Além disso, as bacias hidrográficas são responsáveis pelo abastecimento de água nas cidades e pela geração de eletricidade através de usinas hidrelétricas. O objetivo deste projeto, que teve início em janeiro de 2021, é expandir o monitoramento das bacias hidrográficas para todo o território brasileiro. A primeira etapa do trabalho consistiu na análise da precipitação proveniente de diferentes bases de dados (CHIRPS, GPCP) em períodos pré-determinados, focando nas bacias hidrográficas brasileiras. Dessa forma, através da observação da climatologia e anomalia, foram identificados os padrões de variação em cada bacia hidrográfica, seguindo os intervalos estabelecidos. Durante a segunda etapa, em 2022/23, a análise foi estendida temporalmente, incorporando projeções de cenários futuros do IPCC. Para a análise dos dados, foram utilizadas várias ferramentas computacionais, como o GrADS, a máquina virtual Ubuntu e a linguagem de programação NCL, que foi empregada na seleção das bacias, análises estatísticas e produção de imagens e/ou conjuntos de dados mais precisos. Além disso, foram implementadas melhorias nos códigos utilizados, automatizando a execução e permitindo a seleção de períodos e bacias hidrográficas específicas. Agora, em 2023, tem sido utilizada a linguagem de computação R, devido à sua ampla variedade de bibliotecas que auxiliam na visualização das informações disponíveis. As análises avaliaram a simulação da precipitação para os modelos do CMIP6 e as projeções de mudanças para os cenários SSP370 e SSP585. Os resultados dos modelos se assemelham consideravelmente ao observado em regiões da Bacia Amazônica e da Bacia do Tocantins-Araguaia, detalhando altos níveis de precipitação. Entretanto, outros modelos possuem discrepâncias, com valores altos de precipitação em regiões como a Bacia do Atlântico Nordeste Oriental, em contraste com os menores valores mostrados pelas observações. Com os resultados deste estudo foi possível avaliar as projeções das alterações futuras até 2100 no padrão de precipitação em cada bacia hidrográfica, com a maioria dos modelos indicando um aumento de precipitação em bacias como a do Parnaíba. Com o auxílio dessas ferramentas, foi possível tratar os dados e visualizá-los em imagens e informações breves e úteis, contribuindo para o monitoramento das bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Bacias Hidrográficas, Monitoramento, Climatologia, Mudanças climáticas, Cenários futuros.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Representação gráfica das bacias hidrográficas brasileiras.	3
Figura 3.1 – Exemplo de informação obtida com a ferramenta netCDF.	11
Figura 3.2 – Exemplo de visualização de arquivo de precipitação obtida com a ferramenta GrADS.	12
Figura 3.3 – Importação da máscara de bacias e dados de precipitação do INMET.	13
Figura 3.4 – Funções que permitem fazer modificações na imagem plotada, tais como paleta de cores escolhida.	13
Figura 3.5 – Funções que permitem modificar desde tamanho da fonte até onde será posicionado a escrita.	14
Figura 3.6 – Importação de bibliotecas e leitura dos dados utilizados.	14
Figura 3.7 – Tratamento de dados.	15
Figura 3.8 – Código para geração da imagem.	15
Figura 4.1 – Níveis de precipitação de 1991 até 2020 para os modelos climáticos utilizados.	17
Figura 4.2 – Níveis de precipitação de simulação histórica e projeções futuras no cenário SSP370.	18
Figura 4.3 – Níveis de precipitação de simulação histórica e projeções futuras no cenário SSP585.	18
Figura 4.4 – Níveis de anomalia de projeções futuras no cenário SSP370.	19
Figura 4.5 – Níveis de anomalia de projeções futuras no cenário SSP585.	20

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
GrADS	Grid Analysis and Display System
NCL	NCAR Command Language
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
ANA	Agência Nacional de Águas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Saveh	Sistema de Autoavaliação de Eficiência Hídrica
netCDF	Network Common Data Form
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
IAC	Índice de Anomalia de Chuvas IAC
NCAR	National Center for Atmospheric Research
CESM2	Community Earth System Model version 2
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace
MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute

SUMÁRIO

Pág.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo Geral	2
1.2	Objetivos específicos	2
2	BACIAS HIDROGRÁFICAS	3
3	DADOS E METODOLOGIA	4
3.1	Base de Dados	4
3.1.1	ANA	4
3.1.2	INMET	4
3.1.3	GPCC	5
3.1.4	Modelos climáticos	5
3.1.4.1	CESM2	6
3.1.4.2	GFDL-ESM4	6
3.1.4.3	IPSL-CM6A-LR	6
3.1.4.4	MPI-ESM1-2-LR	7
3.1.4.5	MRI-ESM2-0	7
3.1.4.6	GPCP v3.2	7
3.2	Ferramentas computacionais	8
3.2.1	Ubuntu Server	8
3.2.2	GrADS	8
3.2.3	NCL	8
3.2.4	netCDF	9
3.2.5	Shell	9
3.2.6	R	9
3.3	Metodologia	10
3.3.1	Tratamento e visualização dos dados	10

3.3.2	Análises realizadas	15
4	RESULTADOS.....	16
4.1	Avaliação da Simulação	16
4.2	Climatologia	17
4.3	Anomalia	19
5	CONCLUSÃO	20
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

1 INTRODUÇÃO

Sendo de conhecimento geral, a água é um elemento de extrema importância para a vida. Não só os seres vivos dependem dela, mas também há diversos processos culturais e industriais que necessitam de uma fonte de água, como exemplo a geração de energia hídrica, a agricultura e o transporte hidroviário. Segundo Freire (2009, citado por Oliveira, 2017), “a demanda desse bem para as mais diversas finalidades passou a ter um aumento significativo a partir do século XX”.

A disponibilidade de água doce no mundo é uma questão que tem levado a sérias preocupações pela comunidade global. De acordo com o Sistema de Autoavaliação da Eficiência Hídrica (Saveh), menos de 3% da água do planeta é doce, das quais 2,5% estão localizadas em geleiras. Dos 0,5% de água restantes no mundo, a maior parte está em aquíferos subterrâneos, dificultando o acesso humano, sendo que somente 0,04% da água do planeta está disponível na superfície, em rios, lagos, mangues, etc.

O Brasil acaba por ser um dos países privilegiados pelo motivo de ter 14% dessas reservas de água doce do mundo em território nacional. De acordo com um relatório da Agência Nacional de Águas (ANA) em 2015, o Brasil utiliza cerca de 72% da água para agricultura, 9% para a dessedentação animal, 6% na indústria e 10% para fins domésticos.

No Brasil, cerca de 80% da água doce encontra-se na região Norte, que compreende a bacia Amazônica e abriga apenas 5% da população brasileira. Esta grande quantidade de água doce é parcialmente mantida pelos altos níveis de precipitação de cerca de 2300 mm / ano. Por outro lado, a disponibilidade hídrica no Nordeste do Brasil (NEB) é baixa devido aos baixos níveis de precipitação, à irregularidade de seu regime, às altas temperaturas ao longo do ano e à baixa capacidade de armazenamento de água no solo, entre outros fatores (ANA 2015). As regiões Sudeste e Centro-Oeste possuem estação chuvosa entre a primavera e o verão, com chuvas convectivas associadas a sistemas tropicais e de latitudes médias. Por fim, a região Sul do Brasil é caracterizada pela distribuição homogênea de precipitação ao longo do ano, especialmente devido à influência de sistemas frontais, que são os principais causadores de chuvas durante o ano.

Devido à heterogeneidade na distribuição de água doce e de precipitação nas regiões brasileiras, e no contexto da variabilidade climática que pode levar a extremos de chuvas, o monitoramento das condições hídricas tem se tornado fundamental. Esse monitoramento se faz mais essencial ainda no entorno das bacias hidrográficas, uma vez que a matriz energética do país é baseada na energia produzida em usinas hidrelétricas. Além disso, a recente crise hídrica, a qual afetou tanto a produção de energia hidrelétrica como diversos setores da economia, como a agricultura, pecuária e indústria, ressaltou ainda mais a importância da realização de estudos que verifiquem o padrão de precipitação no entorno das principais bacias hidrográficas brasileiras.

1.1 Objetivo Geral

Este projeto tem por objetivo expandir o monitoramento das bacias hidrográficas para todo o território brasileiro.

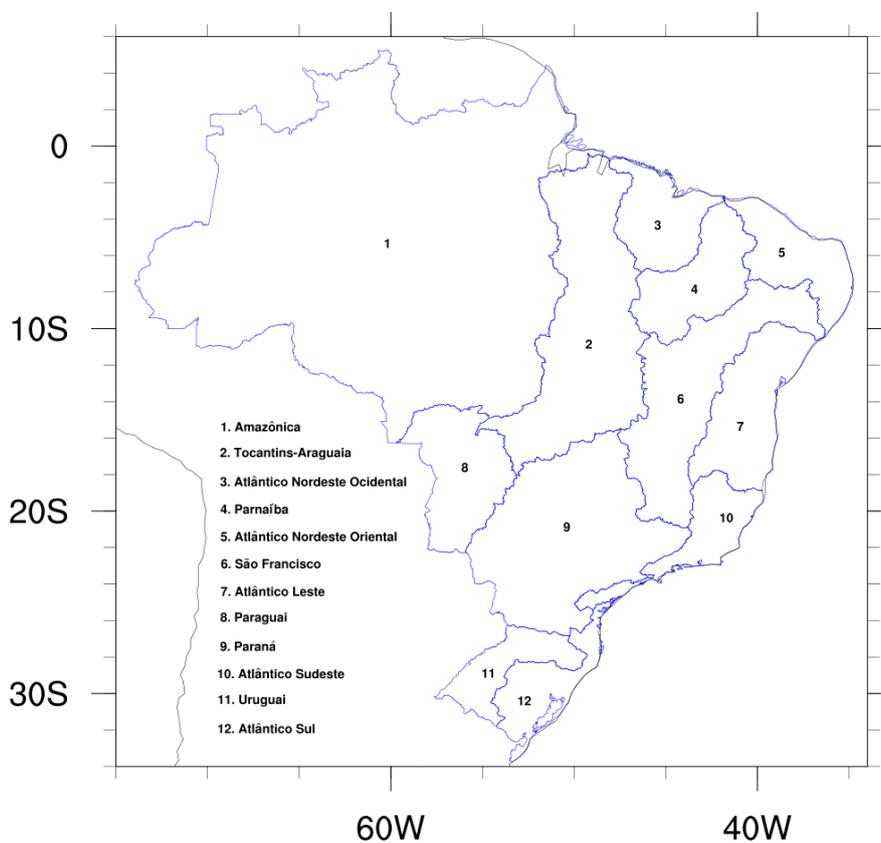
1.2 Objetivos específicos

- Confecção de séries temporais de precipitação para as bacias hidrográficas a serem utilizadas;
- Produção de rotinas computacionais para seleção automática das séries temporais a serem visualizadas;
- Avaliação de valores extremos de precipitação para cada uma dessas bacias;
- Aplicar a metodologia desenvolvida na fase anterior do projeto aos dados de precipitação de simulações de modelos climáticos (presente e futuro);
- Automatização das rotinas computacionais;

2 BACIAS HIDROGRÁFICAS

Bacia hidrográfica é uma área que atua como um receptor de água e sedimentos, formando uma espécie de reservatório natural. Esses espaços são formados pelo relevo (montes e depressões) de um local, ou seja, seus divisores topográficos (OLIVEIRA, 2017). O Brasil possui doze bacias hidrográficas principais distribuídas por todo o território nacional, sendo elas: a Bacia Hidrográfica Amazônica, Bacia Hidrográfica do São Francisco, Bacia Hidrográfica do Tocantins-Araguaia, Bacia Hidrográfica do Paraná, Bacia Hidrográfica do Parnaíba, Bacia Hidrográfica do Uruguai, Bacia Hidrográfica do Paraguai, Bacia Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental, Bacia Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental, Bacia Hidrográfica Atlântico Leste, Bacia Hidrográfica Atlântico Sudeste e a Bacia Hidrográfica Atlântico Sul. A Figura 2.1 mostra a representação das principais bacias do Brasil. O arquivo com o contorno das bacias foi obtido da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA).

Figura 2.1 – Representação gráfica das bacias hidrográficas brasileiras.



3 DADOS E METODOLOGIA

3.1 Base de Dados

Os dados climáticos são essenciais para a realização da pesquisa, pois é através deles que poderemos visualizar os padrões climatológicos sobre as bacias, após o tratamento e manipulação dos mesmos. Sendo assim, o primeiro passo consistiu na obtenção dos dados climáticos que são disponibilizados gratuitamente na internet. Os conjuntos de dados utilizados neste projeto serão detalhados a seguir.

3.1.1 ANA

A Agência Nacional de Águas (ANA) tem como missão implementar e coordenar a gestão compartilhada e integrada dos recursos hídricos e regular o acesso à água, promovendo o seu uso sustentável em benefício da atual e das futuras gerações. A gestão de recursos hídricos é fundamental ao desenvolvimento socioeconômico de nosso país e aborda as diferentes características desses recursos, das limitações quantitativas na região semiárida, aos aspectos de poluição hídrica mais evidentes nas regiões Sul e Sudeste, à abundância quantitativa na região amazônica. Em todas essas vertentes, a ANA dispõe de um conjunto de iniciativas que contemplam os aspectos envolvidos na implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, traduzidos especialmente nas questões de planejamento, regulação, articulação institucional e capacitação, sistema de informações e garantia de uso múltiplo. O produto da ANA utilizado neste projeto foi o mapa das regiões hidrográficas brasileiras.

3.1.2 INMET

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é o órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sua missão principal é realizar a análise e previsão do tempo e clima, a fim de prover informações meteorológicas para contribuir com o desenvolvimento sustentável do País. Os dados do INMET vêm de estações

meteorológicas, sendo depois interpolados para os pontos de grade para estimar a precipitação climatológica mensal em uma grade nacional de 0,25° entre os anos de 1981 até 2010.

3.1.3 GPCC

O Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) fornece produtos de análise de medidor em grade derivados de dados de estação com controle de qualidade. Dois produtos são para o clima: (a) o *Full Data Reanalysis Product* (1901-2010) é recomendado para estudos de balanço hídrico global e regional, calibração / validação de estimativas de precipitação baseadas em sensoriamento remoto e verificação de modelos numéricos, e (b) o *VASCLimO 50-Year Data* para estudos de tendência e variabilidade climática. Os produtos não são corrigidos de viés para erros sistemáticos de medição de calibre. No entanto, o GPCC fornece estimativas para esse erro, bem como o número de medidores usados na grade.

3.1.4 Modelos climáticos

Os dados de modelos climáticos são provenientes da sexta fase do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). Os dados foram obtidos através da base de dados do Program for Climate Model Diagnosis & Intercomparison (PCMDI) no endereço <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/>. O CMIP6 engloba simulações do período histórico, entre 1850 e 2014, e cinco cenários de projeções futuras, que descrevem os diferentes tipos de caminhos de desenvolvimento que uma sociedade pode prosseguir. As primeiras quatro categorias (SSP1 ao SSP4), vão de um cenário sustentável, com uma sociedade preservando seus recursos e respeitando os limites da natureza, até um cenário de pura desigualdade, onde há baixo nível de educação e grande diferença econômica em grande parte da população. O cenário SSP5 foge um pouco da premissa de ir do melhor ao pior, descrevendo uma sociedade que baseia seu desenvolvimento à base de combustíveis fósseis. Os experimentos analisados foram o *historical*, para o período entre 1981-2014, e o *ssp370* e *ssp585*, entre os anos de 2015 e 2100.

Para este estudo foram analisadas as simulações de 5 modelos climáticos, cuja breve descrição é fornecida abaixo.

3.1.4.1 CESM2

O CESM2 tem sua origem no *Community Climate Model* (CCM), criado pelo NCAR em 1983 como um modelo de atmosfera global disponível gratuitamente para uso por toda a comunidade de pesquisa climática. A formulação do CCM melhorou constantemente nas últimas duas décadas e a disponibilidade de supercomputadores tornou o uso do modelo generalizado na comunidade universitária e em alguns laboratórios nacionais. As simulações realizadas utilizando o CESM2 são feitas utilizando sua resolução horizontal de 1.25° em longitude e 0.9° em latitude. O CESM2 simula diversos aspectos do sistema climático, possuindo as componentes de superfície terrestre, atmosfera, oceano, rios e ondas.

3.1.4.2 GFDL-ESM4

O *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) é um laboratório de pesquisa localizado nos Estados Unidos, dedicado ao estudo e modelagem de processos físicos que ocorrem na atmosfera e nos oceanos da Terra. Fundado em 1955, o GFDL é afiliado ao Escritório de Pesquisa Oceânica e Atmosférica (NOAA) e está localizado em Princeton, Nova Jersey. O GFDL-ESM4 é um modelo do sistema terrestre com resolução atmosférica de 1° e oceânica de 0,5°, incorporando química interativa e aerossóis, um modelo de vegetação dinâmica e biogeoquímica oceânica.

3.1.4.3 IPSL-CM6A-LR

O IPSL-CM6A-LR, desenvolvido pelo Instituto Pierre-Simon Laplace (IPSL) para estudar as mudanças climáticas, é um modelo climático de última geração que combina

informações sobre a atmosfera, o oceano, os ecossistemas terrestres e os ciclos biogeoquímicos. IPSL-CM6A-LR é uma sigla que representa o modelo IPSL Climate Model 6, com uma resolução relativamente baixa (LR, do inglês "Low Resolution"). Esse modelo possui uma grade espacial relativamente grosseira, o que significa que sua resolução não é tão detalhada quanto em modelos de alta resolução. No entanto, essa abordagem permite que ele simule uma ampla gama de fenômenos climáticos e seja executado em supercomputadores com menor demanda computacional.

3.1.4.4 MPI-ESM1-2-LR

O modelo climático MPI-ESM1-2-LR é uma ferramenta desenvolvida pelo Max Planck Institute for Meteorology (MPI) para estudar as mudanças climáticas. Ele faz parte da família de modelos MPI Earth System Model (ESM). O modelo possui resolução horizontal atmosférica e oceânica de 250 km.

3.1.4.5 MRI-ESM2-0

O modelo climático MRI-ESM2-0 é um avançado modelo desenvolvido pelo Meteorological Research Institute (MRI) do Japão para estudar o sistema climático da Terra. Ele é uma evolução do modelo anterior MRI-ESM1 e representa uma melhoria em relação à sua capacidade de simular os processos climáticos. O modelo possui resolução horizontal atmosférica e oceânica de 100 km.

3.1.4.6 GPCP v3.2

O Global Precipitation Climatology Project (GPCP) versão 3.2 é a componente de precipitação de um conjunto coordenado internacionalmente de produtos globais (principalmente) baseados em satélites que lidam com os ciclos de água e energia da

Terra, sob os auspícios dos Global Water and Energy Experiment (GEWEX) Data and Assessment Panel (GDAP) do World Climate Research Program (WCRP). O conjunto de dados GPCP v3.2 consiste atualmente em produtos mensais e diários de 0,5° para o período de 1983 a 2020.

3.2 Ferramentas computacionais

Um dos itens mais importantes para a realização do trabalho, as ferramentas computacionais possibilitam diversos métodos de modificação, absorção e visualização dos resultados obtidos.

3.2.1 Ubuntu Server

Ubuntu é um sistema operacional de código aberto, construído a partir do núcleo Linux, baseado no Debian e utiliza GNOME como ambiente de desktop de sua mais recente versão com suporte de longo prazo (LTS), sendo desenvolvido pela Canonical Ltd.

3.2.2 GrADS

O Grid Analysis and Display System (GrADS) é uma ferramenta de desktop interativa usada para fácil acesso, manipulação e visualização de dados de ciências da terra. O GrADS possui dois modelos de dados para lidar com dados em grade e de estação. Também suporta muitos formatos de arquivo de dados, incluindo binário (fluxo ou sequencial), GRIB (versão 1 e 2), NetCDF, HDF (versão 4 e 5) e BUFR (para dados de estação). O GrADS foi implementado mundialmente em uma variedade de sistemas operacionais comumente usados e é distribuído gratuitamente pela Internet.

3.2.3 NCL

O National Center for Atmospheric Research (NCAR) desenvolveu, através do Laboratório de Sistemas de Informação e Computação, o NCAR Command Language (NCL).

O NCL é uma linguagem interpretada livre projetada especificamente para processamento e visualização de dados científicos.

NCL tem entrada e saída de arquivos robustas. Ele pode ler e gravar dados netCDF-3, netCDF-4 classic, netCDF-4, HDF4, binários e ASCII. Ele pode ler arquivos HDF-EOS2, HDF-EOS5, GRIB1, GRIB2 e OGR (shapefiles, MapInfo, GMT, Tiger). Ele pode ser construído como um cliente OPeNDAP.

3.2.4 netCDF

Network Common Data Form (NetCDF) é um conjunto de bibliotecas de software e formatos de dados independentes de máquina que suportam a criação, acesso e compartilhamento de dados científicos orientados a array. É também um padrão da comunidade para compartilhamento de dados científicos. O *Unidata Program Center* suporta e mantém interfaces de programação netCDF para C, C ++, Java e Fortran. Interfaces de programação também estão disponíveis para Python, IDL, MATLAB, R, Ruby e Perl.

3.2.5 Shell

O Shell Script é uma linguagem de script embutida no terminal dos sistemas operacionais da família Linux, possibilitando executar comandos diretamente ao sistema operacional. O Shell Script está presente em todos os sistemas Unix e suas variantes como FreeBSD, OpenBSD, Solaris, NetBSD, Irix, entre outros.

3.2.6 R

R é uma linguagem de programação de código aberto amplamente utilizada para análise estatística e manipulação de dados. Ela oferece uma ampla gama de pacotes e bibliotecas que permitem a realização de análises avançadas, visualizações de dados e modelagem estatística. R é popular entre cientistas de dados, estatísticos e pesquisadores, devido à sua capacidade de trabalhar com grandes conjuntos de dados e suas poderosas ferramentas estatísticas. A linguagem possui uma sintaxe simples e intuitiva, permitindo que os usuários realizem análises complexas com poucas linhas de código.

3.3 Metodologia

3.3.1 Tratamento e visualização dos dados

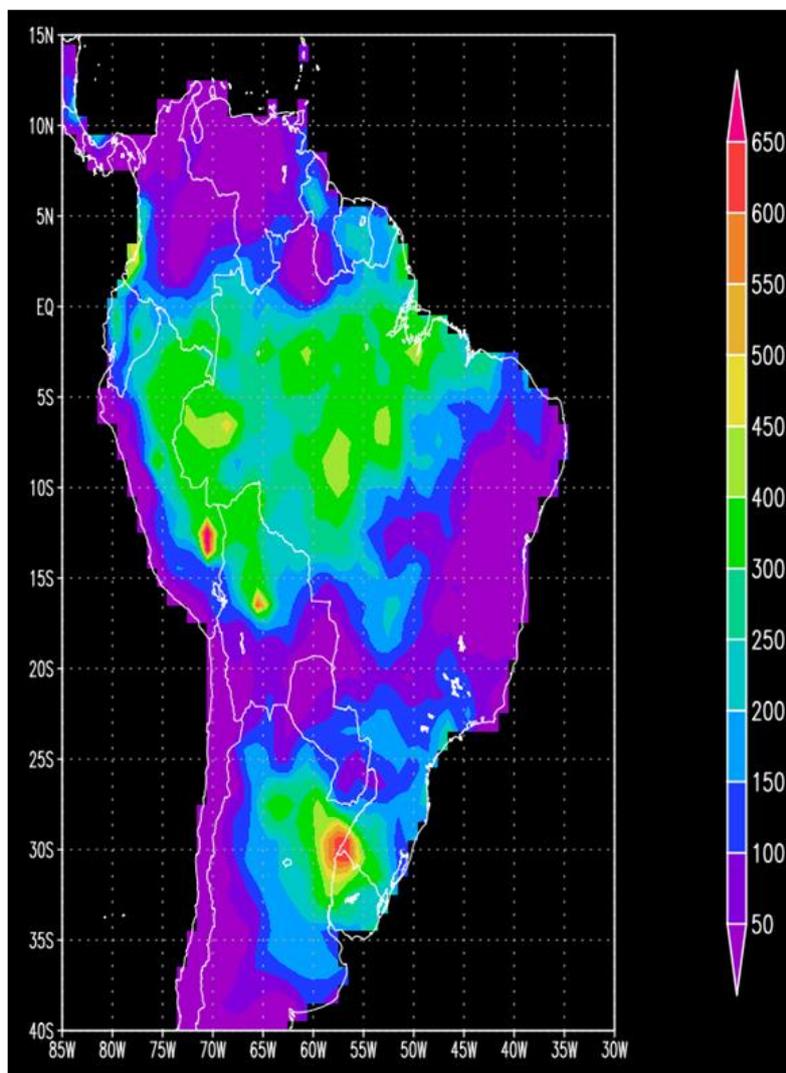
Para realizar o tratamento e visualização dos resultados, foi utilizada a ferramenta Ubuntu Server. Através dela, foi necessário instalar os outros instrumentos que auxiliaram no projeto. Para a leitura da maioria dos dados com extensão .nc que foram obtidos, foi utilizada a ferramenta netCDF para verificar informações mais complementares, tais como o nome das variáveis e/ou tamanho da grade de um arquivo de precipitação, vistos no exemplo da Figura 3.1.

Figura 3.1 – Exemplo de informação obtida com a ferramenta netCDF.

```
(base) brenonak@DESKTOP-87CPJOB:/mnt/c/users/breno/documents/inpe$ ncdump -h gpcc.nc
netcdf gpcc {
dimensions:
    lat = 75 ;
    lon = 360 ;
    time = UNLIMITED ; // (1428 currently)
variables:
    float lat(lat) ;
        lat:units = "degrees_north" ;
        lat:long_name = "Latitude" ;
        lat:standard_name = "latitude" ;
        lat:axis = "Y" ;
        lat:coordinate_defines = "point" ;
        lat:actual_range = 14.5f, -59.5f ;
    float lon(lon) ;
        lon:long_name = "Longitude" ;
        lon:units = "degrees_east" ;
        lon:standard_name = "longitude" ;
        lon:axis = "X" ;
        lon:coordinate_defines = "point" ;
        lon:actual_range = 0.5f, 359.5f ;
    float precip(time, lat, lon) ;
        precip:long_name = "GPCC Monthly total of precipitation" ;
        precip:missing_value = -9.96921e+36f ;
        precip:statistic = "Total" ;
        precip:valid_range = 0.f, 8000.f ;
        precip:parent_stat = "Observations" ;
        precip:var_desc = "Precipitation" ;
        precip:actual_range = 0.f, 3153.04f ;
        precip:dataset = "GPCC Precipitation 1.0degree V7 Full Reanalysis" ;
        precip:units = "mm" ;
        precip:level = "Surface" ;
    double time(time) ;
        time:long_name = "Time" ;
        time:units = "days since 1800-1-1 00:00:00" ;
        time:delta_t = "0000-01-00 00:00:00" ;
        time:avg_period = "0000-01-00 00:00:00" ;
        time:standard_name = "time" ;
        time:axis = "T" ;
        time:coordinate_defines = "start" ;
        time:actual_range = 36889., 80322. ;
```

Para melhor visualização, foi utilizada a ferramenta GrADS, que é uma interface interativa para acesso e observação de dados. Através da tecnologia, é possível gerar interfaces visuais parecidas com mapas de acordo com os comandos digitados, podendo alterar diversas informações, como latitude, longitude e unidade de tempo, tudo dependendo das variáveis do arquivo selecionado para edição. A ferramenta também aceita arquivos de extensão .nc. A Figura 3.2 é um exemplo da imagem obtida de um dos arquivos após modificação da latitude e longitude para a região da América do Sul.

Figura 3.2 – Exemplo de visualização de arquivo de precipitação obtida com a ferramenta GrADS.



Ao utilizar o GrADS para modificar a ilustração que seria gerada do arquivo, utilizou-se comandos pré-preparados da ferramenta. Para criar uma imagem mais precisa e detalhada, foi necessário utilizar a linguagem NCL que abrange vastas bibliotecas com as mais diversas funções. Ao escrever códigos utilizando NCL, é preciso seguir três etapas para fazer com que o script funcione. Primeiramente é necessário preparar a importação dos dados que irão ser utilizados. É através deste passo que é confirmado qual arquivo será importado. Também é possível importar mais de um arquivo para se utilizar, como no caso da necessidade de se utilizar as máscaras (Fig. 3.3).

Figura 3.3 – Importação da máscara de bacias e dados de precipitação do INMET.

```
dirc = "/mnt/c/users/breno/documents/inpe/atividade4/";
dir = "/mnt/c/users/breno/documents/inpe/atividade4/";
sname = dir+"Regioes_Hidrograficas.shp";
f = addfile(sname,"r")

fc = addfile(dirc+"Normais_INMET_1981_2010_prec.nc","r")
vp = fc->prec(:, :, :)
```

Para a segunda etapa, tem-se a Modificação. Esse passo permite modificar as características que serão implementadas na hora de fazer o plot ou criação da imagem. Através dela é possível modificar tamanhos, cores e até inserir limitações a certas funções (Fig. 3.4).

Figura 3.4 – Funções que permitem fazer modificações na imagem plotada, tais como paleta de cores escolhida.

```
res = True
res@gsnDraw = False
res@gsnFrame = False
res@gsnAddCyclic = False
res@gsnRightString = ""
res@gsnLeftString = ""
res@cnLineLabelsOn = False
res@cnFillOn = True
res@cnLinesOn = False
res@cnFillPalette = palT1
res@cnFillMode = "RasterFill"
res@cnFillDrawOrder = "Predraw"
res@cnSpanFillPalette = True
res@cnLevelSelectionMode = "ManualLevels"
res@cnMaxLevelValF = 400 ; mudar valores maximos
res@cnMinLevelValF = 0 ; e intervalo
res@cnLevelSpacingF = 40
```

Por fim, tem-se a Impressão. É através dela que será permitido verificar o modo que a imagem será impressa. É possível definir se serão colocadas diversas imagens em uma só, a fonte que será utilizada caso haja palavras a serem impressas ou até o que será imprimido em alguma certa posição na imagem (Fig. 3.5).

Figura 3.5 – Funções que permitem modificar desde tamanho da fonte até onde será posicionado a escrita.

```
txres = True
txres@txFontColor = "black" ; muda a cor da fonte
txres@txFont = 22
txres@txFontHeightF = 0.015 ; muda o tamanho da fonte
;--- Identificar cada regioao com um numero
;-- mudar os valores x e y para ficar dentro
;--- de cada regioao
;--- gsn_text_ndc(wks,text,x,y,res)
gsn_text_ndc(wks,"1", 0.43, 0.57, txres) ; AMAZÔNICA
gsn_text_ndc(wks,"2", 0.55, 0.52, txres) ; TOCANTINS-ARAGUAIA
gsn_text_ndc(wks,"3", 0.60, 0.60, txres) ; ATLÂNTICO NORDESTE OCIDENTAL
gsn_text_ndc(wks,"4", 0.625, 0.57, txres) ; PARNAÍBA
gsn_text_ndc(wks,"5", 0.68, 0.58, txres) ; ATLÂNTICO NORDESTE ORIENTAL
gsn_text_ndc(wks,"6", 0.61, 0.5, txres) ; SÃO FRANCISCO
gsn_text_ndc(wks,"7", 0.65, 0.49, txres) ; ATLÂNTICO LESTE
gsn_text_ndc(wks,"8", 0.475, 0.45, txres) ; PARAGUAI
gsn_text_ndc(wks,"9", 0.535, 0.41, txres) ; PARANÁ
gsn_text_ndc(wks,"10", 0.63, 0.42, txres) ; ATLÂNTICO SUDESTE
gsn_text_ndc(wks,"11", 0.485, 0.325, txres) ; URUGUAI
gsn_text_ndc(wks,"12", 0.52, 0.319, txres) ; ATLÂNTICO SUL
```

Para gerar os gráficos que serão visualizados mais a frente, foi utilizado a linguagem da programação R. Sua vasta seleção de bibliotecas permite gerar os mais diversos tipos de imagens, sendo apropriado para se obter visões diferentes dos dados utilizados. Para escrever os códigos na linguagem, foi utilizado o Jupyter Notebook (Fig. 3.6).

Figura 3.6 – Importação de bibliotecas e leitura dos dados utilizados.

```
1. Importando Bibliotecas

In [18]: library(ggplot2)
library(tidyverse)
library(viridis)
library(raster)
library(plotly)
library(RColorBrewer)
library(sp)

In [19]: require(ncdf4)

2. Leitura de Dados

In [20]: ### open netcdf file
dset <- raster("C:/Users/Breno/Documents/INPE/Atividade8.2/gfdl/ssp370/prec-gfdl-ssp370.nc", stopIfNotEqualSpaced = FALSE)
eset <- raster("C:/Users/Breno/Documents/INPE/Atividade8.2/mri/ssp370/prec-MRI-ssp370.nc", stopIfNotEqualSpaced = FALSE)
fset <- raster("C:/Users/Breno/Documents/INPE/Atividade8.2/CESM2/ssp370/prec-CESM2-ssp370.nc", stopIfNotEqualSpaced = FALSE)
gset <- raster("C:/Users/Breno/Documents/INPE/Atividade8.2/IPSL/ssp370/prec-IPSL-ssp370.nc", stopIfNotEqualSpaced = FALSE)
hset <- raster("C:/Users/Breno/Documents/INPE/Atividade8.2/MPI/ssp370/prec-MPI-ssp370.nc", stopIfNotEqualSpaced = FALSE)

dset
eset
fset
gset
hset
```

Logo após, os dados importados são configurados em formato de tabela, alterando os nomes das colunas, aplicando filtros e realizando a média, caso necessário. Este passo é realizado em todos os modelos do CMIP6 utilizados (Fig. 3.7). Antes da geração da imagem, as tabelas são reunidas em uma única grande tabela, que é utilizada na parte final do código (Fig. 3.8).

Figura 3.7 – Tratamento de dados.

```
df12.0 <- as.data.frame(dset,xy=TRUE,long = TRUE)
b12.0 <- df12.0 %>%
mutate(model = "GFDL-2.0") %>%
filter(x >= 2048, x <= 2067) %>%
group_by(y,model) %>%
summarise(value = mean(value))
(b12.0)
```

Figura 3.8 – Código para geração da imagem.

```
myplot2 <- tabela %>%
  ggplot(aes(x = model, y = area, fill=value, text=text)) +
  ylab("") + xlab("Modelo") + labs(fill = "") +
  scale_fill_distiller(palette = 'BrBG', direction = "horizontal", limits = c(-0.7, 0.7)) +
  geom_tile()

ggplotly(myplot2, tooltip="text")
```

3.3.2 Análises realizadas

No projeto atual, foram utilizados cinco modelos do CMIP6 e a precipitação observada do GPCP. Após a obtenção dos dados, foram calculadas a climatologia mensal de precipitação para cada modelo, e também as diferenças com relação à precipitação observada, para avaliação da habilidade dos modelos em simular os padrões de precipitação. Para a análise das projeções futuras, foram calculadas as anomalias de precipitação com base nos anos selecionados de acordo com um nível de aquecimento global específico nos dados do CMIP6 (Hauser; Engelbrecht; Fischer, 2022), mais

especificamente 2.0 °C e 3.0 °C. Como resultado final, foi possível obter gráficos do tipo *Heatmap* e um com visualização das bacias hidrográficas do Brasil.

Segundo Rooy (1965, citado por Júnior e Zanella, 2019), o Índice de Anomalia de Chuvas (IAC) contribui para monitorar os anos de seca e chuva excessiva. É calculado a partir de uma série histórica e possibilita a comparação do regime pluviométrico de um local, bem como a caracterização da variabilidade espacial e temporal da precipitação. Calcular a anomalia é importante pois permite que sejam analisados casos críticos acima ou abaixo de, por exemplo, precipitação média, e em quais períodos de tempo foram coletados, para verificar qual seria o motivo de ter acontecido.

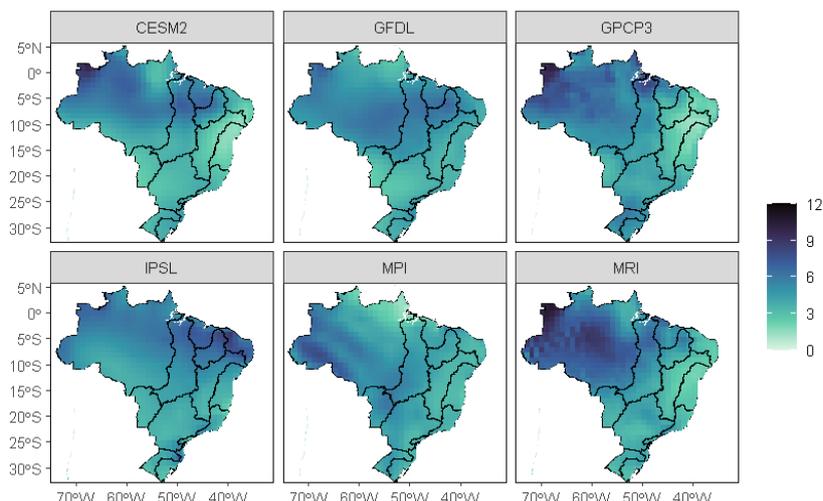
Ao utilizar as ferramentas e base de dados previamente mencionados, foi possível realizar a análise da climatologia de precipitação e anomalia de precipitação e visualizar as diferenças entre os níveis de aquecimento aplicados no SSP370 e SSP585 com a base histórica do GPCP.

4 RESULTADOS

4.1 Avaliação da Simulação

Projeções futuras podem ter resultados que divergem para cada modelo climático. Com o propósito de realizar uma breve comparação com um período histórico, foi utilizado o período de 1991 até 2020 dos modelos de projeção futura e do GPCP v3.2. Observando a figura 4.1, pode-se visualizar a precipitação calculada em mm/dia para cada modelo da simulação histórica. Os resultados permitem localizar semelhanças entre alguns modelos, como o CESM2 e MRI-ESM2-0, e os dados observados do GPCP v3.2, demonstrando precipitação alta na região da Bacia da Amazônia e níveis mais baixos na região Sul do país.

Figura 4.1 – Níveis de precipitação de 1991 até 2020 para os modelos climáticos utilizados.



4.2 Climatologia

Com o objetivo de comparar os resultados dos modelos climáticos, foi possível obter suas precipitações médias. Utilizando um shapefile do Brasil e suas bacias, foi possível gerar duas imagens para o SSP370 e SSP585, respectivamente. Cada uma possui três gráficos para cada modelo nos anos de 1981 até 2010 (simulação histórica) e para cada nível de aquecimento (projeções futuras). Analisando a figura 4.2, pode-se visualizar que alguns modelos exibem aumento de precipitação conforme o nível de aquecimento, como o GFDL-ESM4. Entretanto, também é possível confirmar diminuição, como no modelo MPI. Se comparado com a figura 4.3, é possível notar diferenças entre os níveis de precipitação. No modelo CESM2, mesmo que pouca, há uma queda nos níveis de chuva, e no modelo IPSL é possível notar aumento.

Figura 4.2 – Níveis de precipitação de simulação histórica e projeções futuras no cenário SSP370.

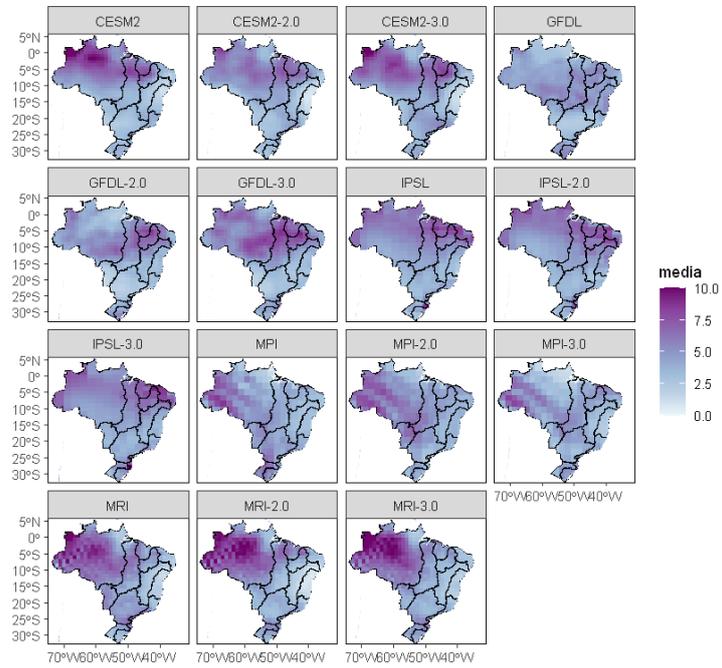
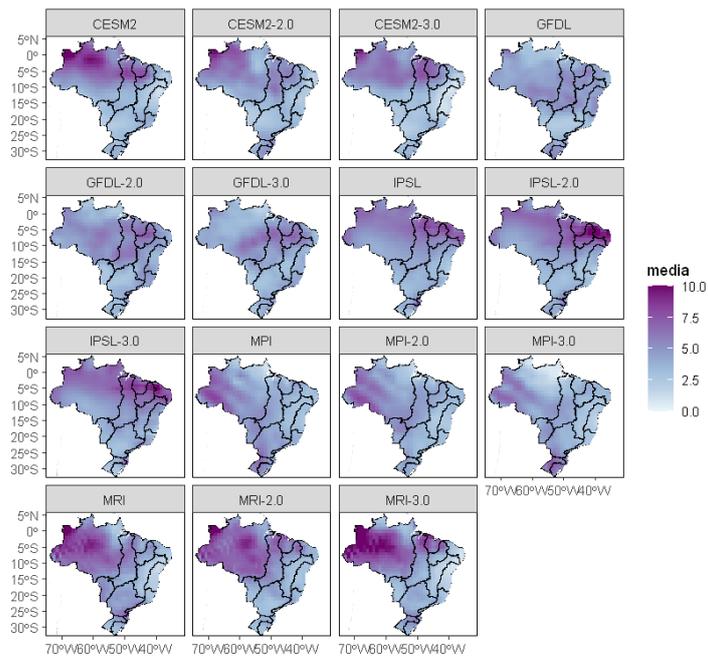


Figura 4.3 – Níveis de precipitação de simulação histórica e projeções futuras no cenário SSP585.



4.3 Anomalia

Com o objetivo de realizar uma comparação das projeções futuras entre os modelos do CMIP6 em seus anos respectivos sobre o nível de aquecimento global, foram calculadas as anomalias para cada uma das doze bacias em um gráfico de *heatmap*, gerando duas figuras de SSPs diferentes, onde é possível visualizar no eixo x as demarcações com o nome dos modelos e seu nível de aquecimento em °C, e no eixo y as demarcações com os nomes das bacias hidrográficas brasileiras (Figura 4.4 e Figura 4.5). O período climatológico considerado para o cálculo da anomalia varia para cada modelo e o nível de aquecimento. Em uma análise inicial, no *heatmap* com SSP370, é possível perceber certas similaridades entre a projeção de alguns modelos, tais como o CESM2-3.0 e MRI-3.0, apresentando anomalias positivas. Entretanto, também existem discrepâncias, como no modelo GFDL-3.0 e MPI-3.0, demonstrando que em algumas bacias, a anomalia tem forte presença para ambos os níveis, como é possível ver na bacia do Uruguai no GFDL e na bacia do Paraguai do MPI.

Figura 4.4 – Níveis de anomalia de projeções futuras no cenário SSP370.

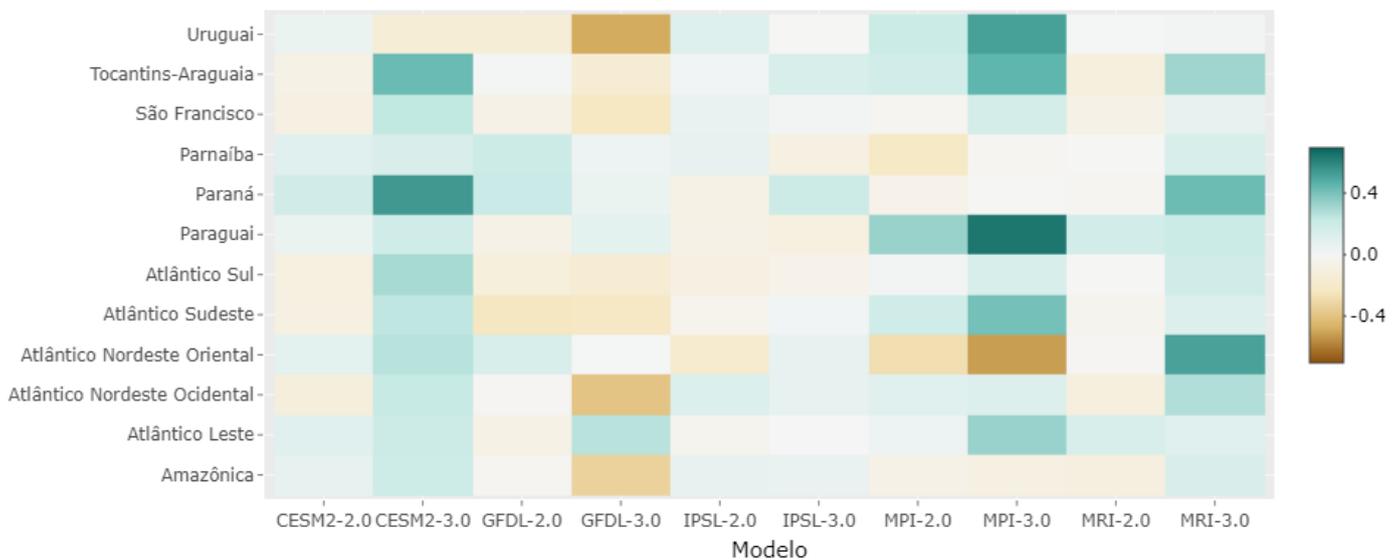
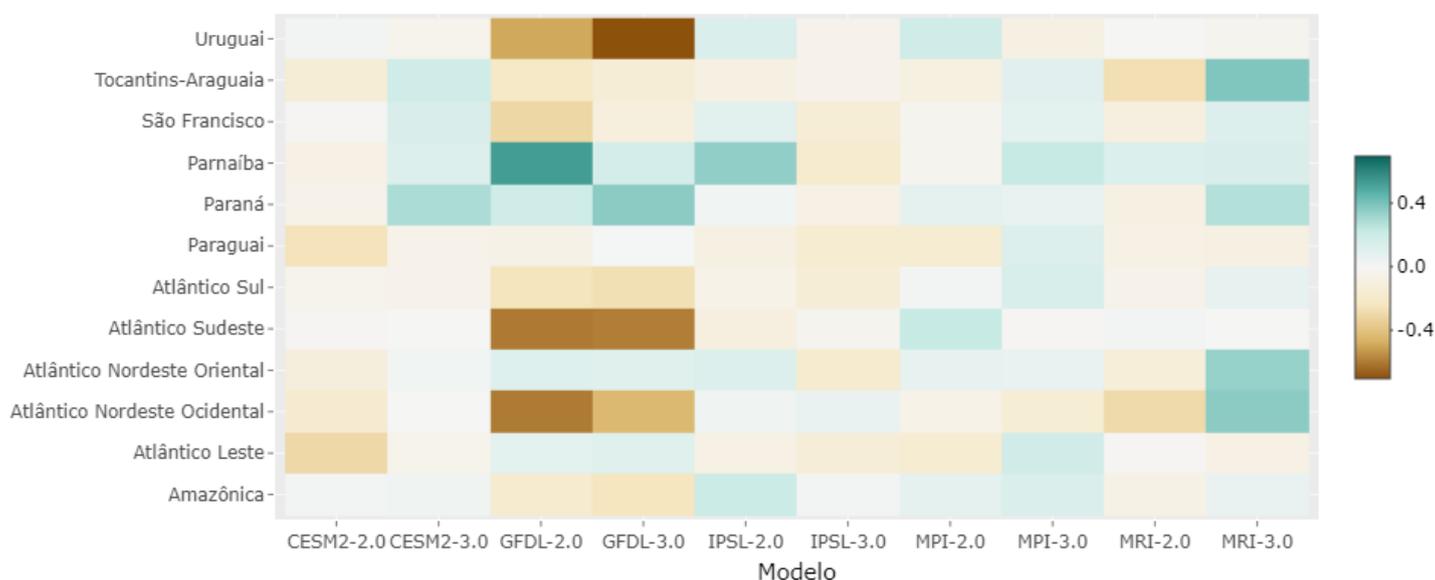


Figura 4.5 – Níveis de anomalia de projeções futuras no cenário SSP585.



No caso da figura 4.5 com SSP585, é possível visualizar níveis mais negativos de anomalia na maioria dos modelos. Comparado com a figura 4.4, modelos anteriormente inclinados a níveis positivos de anomalia, agora estão perto de neutro ou negativo. O GFDL-2.0, que possuía um equilíbrio, mantendo a maioria das bacias próximas do neutro, acabou divergindo e demonstrando resultados mais negativos neste SSP. No geral, é possível ver uma queda dos níveis de anomalia, resultando na maioria dos modelos demonstrarem números negativos.

5 CONCLUSÃO

Neste projeto foram realizadas análises com intuito de colaborar com o monitoramento da precipitação sobre as principais bacias hidrográficas brasileiras. Aproveitando-se dos conhecimentos obtidos na fase anterior do projeto, desta vez foi possível comparar os resultados obtidos de dados observacionais com simulações numéricas de cinco modelos climáticos do CMIP6, além de avaliar as projeções de cenários futuros, podendo assim visualizar expectativas diferentes para o futuro da sociedade. Além disso, a interface de automatização feita através da plataforma Ubuntu para facilitar a criação dos gráficos foi

aprimorada e poderá ser usada futuramente para auxiliar com informações ao usuário sobre quais tipos de dados selecionar e quais tipos de gráficos deseja plotar.

Os resultados alcançados demonstraram que os modelos climáticos conseguiram simular com sucesso os principais padrões de precipitação mensal nas diversas bacias hidrográficas em diferentes tipos de cenários. Contudo, observaram-se algumas disparidades no que concerne à intensidade das precipitações. As projeções futuras de precipitação para as mesmas bacias hidrográficas, exibiram padrões semelhantes entre si, embora também tenham destacado suas variações distintas.

A fim de realizar análises mais precisas e detalhadas, as sugestões para trabalhos futuros são a utilização de novas ferramentas para obter uma visão diferenciada das obtidas através do projeto, e de outros modelos climáticos para uma comparação melhor.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas (ANA). **Dados Abertos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**, 2021. Página Inicial. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br>. Acesso em: 02 ago. 2021.

A DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO MUNDO E NO BRASIL. **SAVEH**, 2016. Disponível em: <https://saveh.ambev.com.br/artigos/a-disponibilidade-de-agua-no-mundo-e-no-brasil>. Acesso em: 09 ago. 2021.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Sci. Data**, 2:150066, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>. Acesso em: 11 ago. 2021.

INPE. **Condições Atuais do ENOS: Neutro**. 2016. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br>. Acesso em 16 ago. 2021.

INMET. **Instituto nacional de Meteorologia**, 2021. Sobre. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/sobre>. Acesso em: 05 ago. 2021.

NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH STAFF (Eds) et al. **The Climate Data Guide: GPCP (Monthly): Global Precipitation Climatology Project**. 2020. Disponível em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcp-monthly-global-precipitation-climatology-project>. Acesso em: 10 ago. 2021.

NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH STAFF (Eds). **The Climate Data Guide: GPCC: Global Precipitation Climatology Centre**, 2020. Disponível em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcc-global-precipitation-climatology-centre>. Acesso em: 13 ago. 2021.

NCAR. **NCAR Command Language (NCL)**. 2021. Disponível em: <https://www.ncl.ucar.edu>. Acesso em: 01 ago. 2021.

OLIVEIRA, D. B. D. **Hidrologia**. Editora Pearson, 2017. 137 p. Disponível em: <https://www.bvirtual.com.br/NossoAcervo/Publicacao/127458>. Acesso em: 10 ago. 2021.

SCHNEIDER, U. et al. **GPCC Full Data Reanalysis Version 6.0 at 1.0°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data**. 2011. Disponível em: https://psl.noaa.gov/data/gridded/data_gpcc.html. Acesso em: 10 ago. 2021.

UNIDATA. **Network Common Data Form (NetCDF)**. 2021. Disponível em: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>. Acesso em: 14 ago. 2021.

ZANELLA, M. E. JÚNIOR, A. R. G. Identificação do Índice de Anomalia de Chuva da Pré-Estação Chuvosa de São Luís, Maranhão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 18., 2019, Fortaleza. **Anais...** 2019. p. 1-13.

DEUTSCHES KLIMARECHENZENTRUM (DKRZ). **The SSP Scenarios**. Disponível em: <https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>. Acesso em: 25 jul. 2022.

DANABASOGLU, G. et al. The Community Earth System Model Version 2 (CESM2). **Journal of Advances in Modeling Earth Systems (JAMES)**, v. 12, n. 2, 2020. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019MS001916>. Acesso em: 24 ago. 2022.

DANABASOGLU, G., et al. The Community Earth System Model Version 2 (CESM2). **Journal of Advances in Modeling Earth Systems (JAMES)**, v. 12, n. 2, 2020. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019MS001916>. Acesso em: 24 ago. 2022.

ANDREWS, M. B., et al. Historical Simulations With HadGEM3-GC3.1 for CMIP6. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems (JAMES)**, v. 12, n. 6, 2020.

Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019MS001995>. Acesso em: 24 ago. 2022.

KUHLBRODT, T., et al. The Low-Resolution Version of HadGEM3 GC3.1: Development and Evaluation for Global Climate. **Journal of Advances in Modeling**

Earth Systems (JAMES), v. 10, n. 11, 2018. Disponível em:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018MS001370>. Acesso em: 25 ago. 2022.

ENGELBRECHT, F. FISCHER, E. M. HAUSER, M. (2022). **Transient global warming levels for CMIP5 and CMIP6 (v0.3.0)**. Zenodo.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7390473>