

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA AMBIENTAL

**LUCAS RODRIGO KEHL**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA DEMANDA HÍDRICA PARA IRRIGAÇÃO NA  
AGRICULTURA CONSIDERANDO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM QUATRO  
REGIÕES DO BRASIL**

Porto Alegre, 2022.

**LUCAS RODRIGO KEHL**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA DEMANDA HÍDRICA PARA IRRIGAÇÃO NA  
AGRICULTURA CONSIDERANDO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM QUATRO  
REGIÕES DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul apresentado como requisito para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

**Orientador:** Walter Collischonn

Porto Alegre

2022

### CIP - Catalogação na Publicação

Kehl, Lucas Rodrigo  
ANÁLISE COMPARATIVA DA DEMANDA HÍDRICA PARA  
IRRIGAÇÃO NA AGRICULTURA CONSIDERANDO AS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS EM QUATRO REGIÕES DO BRASIL / Lucas Rodrigo  
Kehl. -- 2022.  
93 f.  
Orientador: Walter Collischonn.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia  
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Mudanças climáticas. 2. Irrigação. 3.  
Evapotranspiração. 4. Balanço hídrico. 5. Modelos  
climáticos. I. Collischonn, Walter, orient. II.  
Titulo.

LUCAS RODRIGO KEHL

ANÁLISE COMPARATIVA DA DEMANDA HÍDRICA PARA IRRIGAÇÃO NA  
AGRICULTURA CONSIDERANDO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM QUATRO  
REGIÕES DO BRASIL

Este Trabalho de Conclusão do Curso foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pela Comissão de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof. Dr. André Camargo de Azevedo

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Walter Collischonn  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS

---

Prof. Dr. Anderson Ruhoff  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Denise Cybis Fontana  
Faculdade de Agronomia/UFRGS

---

Dr. Bruno Collischonn  
ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão, por serem meu pilar e me apoiarem incondicionalmente em toda a minha trajetória acadêmica e pessoal. Aos meus padrinhos, madrinhas, cunhada e demais familiares por fazerem parte da minha vida, me acompanharem e apoiarem em todo esse caminho.

Aos amigos que a universidade me proporcionou e que estiveram do meu lado durante toda a graduação, aos professores da UFRGS e da Halmstad University pelos ensinamentos, conversas e apoio e aos amigos que fiz durante o intercâmbio e hoje fazem parte da minha vida. Aos amigos que participaram e compartilharam comigo todos os projetos paralelos à faculdade.

Agradeço também aos professores que me apoiaram nos estágios profissionais e de educação ambiental e ao Walter, cujos ensinamentos durante a graduação e durante esta orientação possibilitaram o pleno desenvolvimento deste trabalho. Por fim, a todos que de alguma forma fizeram parte da minha trajetória dentro da Engenharia Ambiental.

## RESUMO

As mudanças climáticas têm sido, nos últimos anos, um dos tópicos de grande relevância e preocupação por parte da sociedade civil e científica, de governos e organizações internacionais. Os relatórios do IPCC preveem um aumento de temperatura global considerando vários cenários, desde os mais conservadores até os mais alarmistas, e a sua intensidade está baseada na capacidade global de redução da emissão de gases do efeito estufa. Associado a este aumento de temperatura, são esperadas mudanças nos regimes de chuvas, ventos, eventos extremos, em diferentes intensidades e épocas em cada lugar. Este estudo busca avaliar os impactos das mudanças climáticas na demanda de água por irrigação na agricultura em quatro regiões do Brasil. Para isso, calculou-se o balanço hídrico através da evapotranspiração potencial utilizando como informações de entrada os dados de quatro modelos climáticos: BESM, CanESM2, HadGEM2-ES e MIROC5, todos associados ao modelo Eta-CPTEC/INPE. O conjunto de dados contempla o período de 1961 a 2099 e o método foi aplicado nas regiões do oeste da Bahia, centro do Mato Grosso, sul de São Paulo e noroeste do Rio Grande do Sul, de forma a avaliar os comportamentos para diferentes climas e biomas. Os resultados demonstram que as mudanças climáticas aumentarão a demanda hídrica por irrigação no oeste da Bahia, centro do Mato Grosso e sul de São Paulo com diferentes intensidades. Já o noroeste do Rio Grande do Sul apresentou um comportamento diferente, sem mudanças significativas na demanda de água por irrigação.

**Palavras-chave:** mudanças climáticas, irrigação, evapotranspiração, balanço hídrico, modelos climáticos, BESM, CanESM2, HadGEM2-ES, MIROC5.

## **ABSTRACT**

In recent years, climate change has been one of the topics of greatest relevance and concern by the civil society, scientists, governments and international organizations. The IPCC reports predict a global temperature increase considering several scenarios, from the most conservative to the most alarmist, and its intensity is based on the global capacity to reduce the emission of greenhouse gases. Associated with this temperature increase are expected changes in rainfall regimes, winds, extreme events, at different intensities and times in each place. This study seeks to assess the impacts of climate change on water demand by irrigation in agriculture in four regions of Brazil. For this, the water balance was calculated through potential evapotranspiration using data from four climate models as input: BESM, CanESM2, HadGEM2-ES and MIROC5, all associated with the Eta-CPTEC/INPE model. The dataset ranges from 1961 to 2099 and the method was applied in the regions of western Bahia, central Mato Grosso, southern São Paulo and northwest Rio Grande do Sul, in order to evaluate behaviors for different climates and biomes. The results indicate that climate change will increase water demand by irrigation in western Bahia, central Mato Grosso and southern São Paulo, but with different intensities. The northwest of Rio Grande do Sul presented a different behavior, without significant changes.

**Keywords:** climate change, irrigation, evapotranspiration, water balance, climate models, BESM, CanESM2, HadGEM2-ES, MIROC5.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização das regiões de estudo. ....	2
Figura 2 – Tipologia de cultura e irrigação predominante nos municípios com mais irrigação no Brasil.....	4
Figura 3 - Projeções de concentração de CO <sub>2</sub> nos quatro diferentes cenários de RCP de acordo com o AR4 (linha pontilhada) e AR5 (linha contínua), regionalizados para a região da Austrália. ....	10
Figura 4 - Mudanças de temperatura e precipitação ao redor do planeta considerando dois diferentes cenários: RCP2.6 e RCP8.5. ....	11
Figura 5 – Distribuição e limites dos biomas no território brasileiro, de acordo com a classificação do IBGE. ....	16
Figura 6 - Distribuição e limites dos tipos climáticos no território brasileiro de acordo com a classificação de Köppen. ....	17
Figura 7 - Mesorregiões Geográficas brasileiras de acordo com o IBGE (1989). ....	26
Figura 8 - Gráfico temporal do volume irrigado por ano no oeste da Bahia, de acordo com o modelo Eta-BESM indicando crescimento de irrigação tanto para o período anual quanto de safra. ....	31
Figura 9 - Gráfico comparativo dos resultados de cada modelo para irrigação no oeste da Bahia, indicando aumento da tendência de irrigação.....	32
Figura 10 - Gráfico temporal dos dias irrigados por ano no centro do Mato Grosso, de acordo com o modelo Eta-CanESM2, indicando tendência de aumento no número de dias irrigados. ....	33
Figura 11 - Gráfico comparativo dos resultados de cada modelo para irrigação no centro do Mato Grosso, indicando aumento da tendência de irrigação.....	34
Figura 12 - Gráfico do comportamento anual por década da irrigação no sul de São Paulo, de acordo com o modelo Eta-MIROC5, indicando similaridade no calendário ao longo das décadas.....	35
Figura 13 - Gráfico comparativo dos resultados de cada modelo para irrigação no sul de São Paulo, indicando variações nas tendências de irrigação. ....	36
Figura 14 - Gráfico do comportamento anual por década da irrigação no noroeste do Rio Grande do Sul, de acordo com o modelo Eta-BESM, indicando semelhança do calendário ao longo das décadas.....	37
Figura 15 - Gráfico comparativo dos resultados de cada modelo para irrigação no noroeste do Rio Grande do Sul, indicando variação da tendência de irrigação. ....	38



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Tabela resumo com latitude e altitude de cada região de estudo utilizadas no cálculo. .....	23
Tabela 2 – Tabela resumo com clima, bioma e cultura de cada região de estudo.....	25
Tabela 3 - Quadro resumo de resultados em volume e percentual para o período de safra considerando as quatro regiões e os quatro modelos.....	38
Tabela 4 - Quadro resumo de resultados categorizados em faixas para o período de safra considerando as quatro regiões e os quatro modelos.....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AR5	IPCC Fifth Assessment Report
AR6	IPCC Sixth Assessment Report
BESM	Brazilian Earth System Model
CanESM2	Canadian Earth System Model Second Generation
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCCma	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CCSR	Center for Climate Systems Research
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GCM	Global Climate Models
HadGEM2	Hadley Centre Global Environment Model version 2
HGE-IPH	Hidrologia de Grande Escala – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Instituto de Economia Agrícola
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JAMSTEC	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
LSPA	Levantamento Sistemático da Produção Agrícola
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5
NIES	National Institute for Environmental Studies
PAM	Produção Agrícola Municipal
RCM	Regional Climate Models
RCP	Representative Concentration Pathways
UNEP	United Nations Environment Programme
VPA	Valor da Produção Agropecuária
WMO	World Meteorological Organization
ZCIT	Zona de convergência intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS

$ET_o$	Evapotranspiração de referência
$ET_c$	Evapotranspiração de cultura
$ET_r$	Evapotranspiração real
$K_c$	Coefficiente de cultivo
$K_s$	Coefficiente de disponibilidade hídrica
<b><i>Precip.</i></b>	Precipitação
$T$	Temperatura
$P_s$	Pressão em superfície
$T_d$	Temperatura do ponto de orvalho
$U_{OL}$	Velocidade do vento oeste-leste
$U_{NS}$	Velocidade do vento norte-sul
$S_{sup}$ superfície	Radiação solar sobre a superfície/energia solar de ondas curtas incidente
$S_{abs}$	Energia solar absorvida
$e_s$	Pressão parcial de vapor na saturação
$e_d$	Pressão real de vapor na saturação
$U_R$	Umidade relativa
$\Delta$	Derivada da pressão parcial de vapor na saturação
$\epsilon$	Emissividade da superfície
$D_J$	Dia juliano
$d_r$	Fator de excentricidade da órbita da terra
$\delta$	Declinação solar
$\omega_s$	Ângulo do sol ao nascer
$\varphi$	Latitude
$\lambda$	Longitude
$H$	Altitude
$S_d$	Radiação solar em atmosfera transparente
$S_{máx}$	Energia solar incidente sem nuvens
$f$	Fator de correção em função da cobertura de nuvens

$S_{cte}$	Constante solar
$L$	Radiação líquida de ondas longas emitida pela superfície
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$R_L$	Radiação líquida na superfície
$\gamma$	Constante psicrométrica
$U_{10}$	Módulo resultante da velocidade do vento a 10 metros de altura
$U_2$	Módulo resultante da velocidade do vento a 2 metros de altura
$G$	Fluxo de calor para o solo
$S_n$	Capacidade de armazenamento de água no solo no dia n
$S$	Capacidade máxima de armazenamento de água no solo
<b>BH</b>	Balanço hídrico
$I_r$	Irrigação
$Q$	Escoamento de saída

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
2.1	AGRICULTURA.....	3
2.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MODELOS CLIMÁTICOS.....	7
2.3	EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, DE CULTURA E REAL .....	13
2.4	BALANÇO HÍDRICO .....	14
2.5	CLIMAS E BIOMAS .....	15
2.5.1	Oeste da Bahia .....	17
2.5.2	Sul de São Paulo.....	18
2.5.3	Centro do Mato Grosso.....	18
2.5.4	Noroeste do Rio Grande do Sul.....	19
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
3.1	FONTES DE DADOS .....	20
3.2	CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	20
3.3	CÁLCULO DE BALANÇO HÍDRICO .....	27
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>41</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS GRÁFICOS PARA O OESTE DA BAHIA.....</b>	<b>50</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS GRÁFICOS PARA O CENTRO DO MATO GROSSO .....</b>	<b>57</b>
	<b>APÊNDICE C – RESULTADOS GRÁFICOS PARA O SUL DE SÃO PAULO .....</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE D – RESULTADOS GRÁFICOS PARA O NOROESTE DO RS.....</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO A – LEVANTAMENTO DAS PRINCIPAIS CULTURAS.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o quinto relatório (AR5) sobre mudanças climáticas do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), de 2014, é extremamente provável que as mudanças climáticas sejam decorrentes de atividades antrópicas, ocasionadas principalmente pela emissão de poluentes da queima de combustíveis fósseis. Assim, estima-se que, desde 1880, o planeta já esquentou 0,85 °C e que o aquecimento global até 2100 fique entre 1,5°C e mais de 4°C considerando cenários de redução e de aumento das emissões de GEE (Gases do Efeito Estufa) (IPCC, 2014). Globalmente, passou-se a adotar uma meta de aumento de temperatura de 1,5°C até 2030 para redução dos danos associados. Mas dados da contribuição do grupo de trabalho III ao AR6, que deve ser lançado entre 2022 e 2023, indicam que as emissões de GEE seguem aumentando e para se atingir o objetivo de aumento mínimo (1,5°C) essas emissões precisam parar de crescer até 2025 e cair 43% em relação aos níveis de 2019 até 2030 (IPCC, 2022).

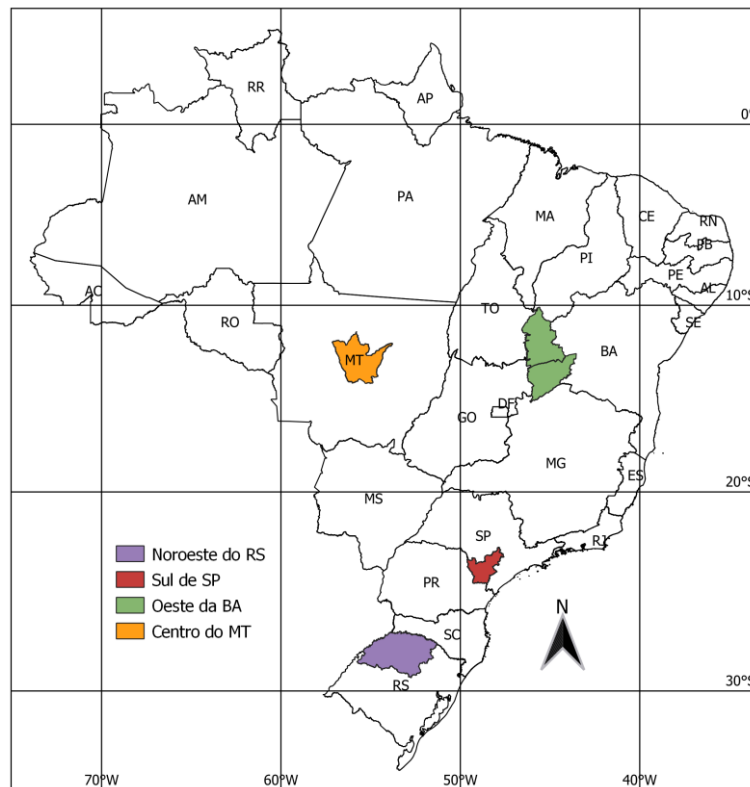
Independentemente do nível de redução de emissões de GEE e de aumento de temperatura que se atinja, projeta-se que as mudanças climáticas trarão diversos impactos para o Brasil, como mudança das temperaturas, das chuvas, da umidade, de eventos extremos, entre outros. Duas regiões muito impactadas devem ser o nordeste e o centro-oeste, com impactos previsto também para a região amazônica, sul e sudeste do país. Associado a estes impactos físicos, as mudanças climáticas podem causar impactos financeiros na produção de alimentos, podendo atingir R\$ 14 bilhões em 2070 (MARENGO, 2014).

No Brasil, estima-se que todas as regiões enfrentem aumento de temperatura e mais ondas de calor, com a região sul tendo menos geadas, aumento das chuvas e aumento das chuvas extremas, enquanto nas regiões sudeste e centro-oeste deve ocorrer menos geadas e aumento das chuvas extremas. Já as regiões norte e nordeste devem enfrentar aumento dos dias secos e redução das chuvas (MARENGO, 2014). Todas essas mudanças afetarão as rotinas agrícolas, alterando calendários das safras e safrinhas, época de colheita, produtividade e, principalmente, o balanço hídrico da lavoura e a necessidade e o volume de irrigação.

Tendo em vista a importância de entender os componentes climáticos na agricultura e compreender as mudanças que ocorrerão no futuro, este trabalho tem como objetivo comparar o impacto das mudanças climáticas nas demandas de água através da irrigação na agricultura em quatro regiões brasileiras. Os resultados deste estudo podem indicar que a demanda hídrica aumentará ou diminuirá nas quatro regiões de estudo, porém com magnitudes diferentes a depender do clima e bioma local. Este comportamento será determinado pela combinação de variáveis e com a variação da precipitação e evapotranspiração de cada lugar.

O estudo foi desenvolvido através do cálculo de evapotranspiração potencial em cada uma das quatro regiões, assim como o balanço hídrico e necessidade de irrigação. Os dados foram calculados numa rotina diária, de 1961 a 2099, utilizando dados base obtidos através do modelo regional Eta-INPE, com o cenário RCP4.5 do IPCC, acoplado à quatro modelos globais: BESM, CanESM2, HadGEM2 e MIROC5. As quatro regiões escolhidas para análise são regiões de grande produção agrícola, diferente posição geográfica, diferentes tipos de bioma e de clima. São elas: a região noroeste do Rio Grande do Sul (NO-RS), o sul de São Paulo (S-SP), o centro do Mato Grosso (C-MT) e o oeste da Bahia (O-BA).

Figura 1 - Mapa de localização das regiões de estudo.



Fonte: o autor, 2022.

O método de cálculo da evapotranspiração foi baseado no Paper 56 elaborado pela FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), que utiliza o método de Penman-Monteith para cálculo da evapotranspiração. A estimativa de necessidade de irrigação foi calculada através de um balanço hídrico considerando a precipitação e uma simplificação do armazenamento de água no solo. Os resultados foram avaliados com base na irrigação anual total e por safra estimada para cada local e cada modelo. Optou-se por adotar um período de safra indo de outubro a março para todas as regiões, com o objetivo de selecionar os resultados

para o período de plantio da soja e obter resultados mais relevantes. Entende-se que o período é mais longo do que o ciclo da planta, no entanto optou-se por esse período mais buscando abranger variações na data de início e fim de plantio.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 AGRICULTURA**

Nos últimos 40 anos o Brasil passou de importador para exportador de alimentos, mudança proporcionada pelo avanço tecnológico e desenvolvimento da agricultura brasileira. Através de diversas políticas públicas desenvolvidas pelo estado a partir da metade final do século XX, o país passou a sair de uma agricultura de pequena escala, familiar e de subsistência para uma agricultura em larga escala, com plantações em grandes áreas de terra, utilização de maquinário, pesticidas e fertilizantes. A partir daí, começou a tomar forma o agronegócio brasileiro. O conceito de agronegócio passou a ser utilizado a partir da década de noventa, representando o fenômeno de junção da agricultura, indústria, comércio e finanças (FERREIRA et al, 2019).

Essa mudança no cenário do agronegócio brasileiro levou o país a um novo patamar no mercado internacional, que passou de uma produção anual de grãos de 38 milhões de toneladas em 1975 para 238 milhões em 2017. O valor, cerca de seis vezes maior, foi possível utilizando apenas o dobro de área plantada. O setor passou a ser protagonista na economia brasileira e, em 2016, o agronegócio foi responsável por 23% do PIB e 46% das exportações, enviando alimentos para mais de 150 países em todos os continentes. Toda essa evolução foi potencializada pela alta produção de grãos (soja, milho, trigo, arroz, feijão), que permite ao produtor alto rendimento por área plantada, otimização do trabalho e venda ao mercado externo (EMBRAPA, 2018). Hoje a soja se tornou um dos principais produtos brasileiros, tornando o Brasil o maior produtor do grão em 2020 (EMBRAPA, 2021).

As diversas projeções para o futuro indicam um crescimento populacional, principalmente na Ásia e na África, associado com um desenvolvimento econômico e mudança nos perfis de consumo com mais pessoas pertencentes à classe média. Essas projeções indicam uma necessidade de aumento da produção agrícola, e espera-se que o comércio mundial de soja cresça 25% em dez anos, aumento liderado pela China e pela Índia. Também é esperado crescimento no mercado de milho e algodão. Estima-se que o Brasil produza, em 2027, mais de 290 milhões de toneladas de grãos (EMBRAPA, 2018), chegando a 320 milhões em 2030 (MAPA, 2020). No Brasil, a produção agrícola tem avançado das regiões sul e centro oeste para o norte e nordeste, e hoje diversos estados têm se destacado na produção de alimentos. Desta

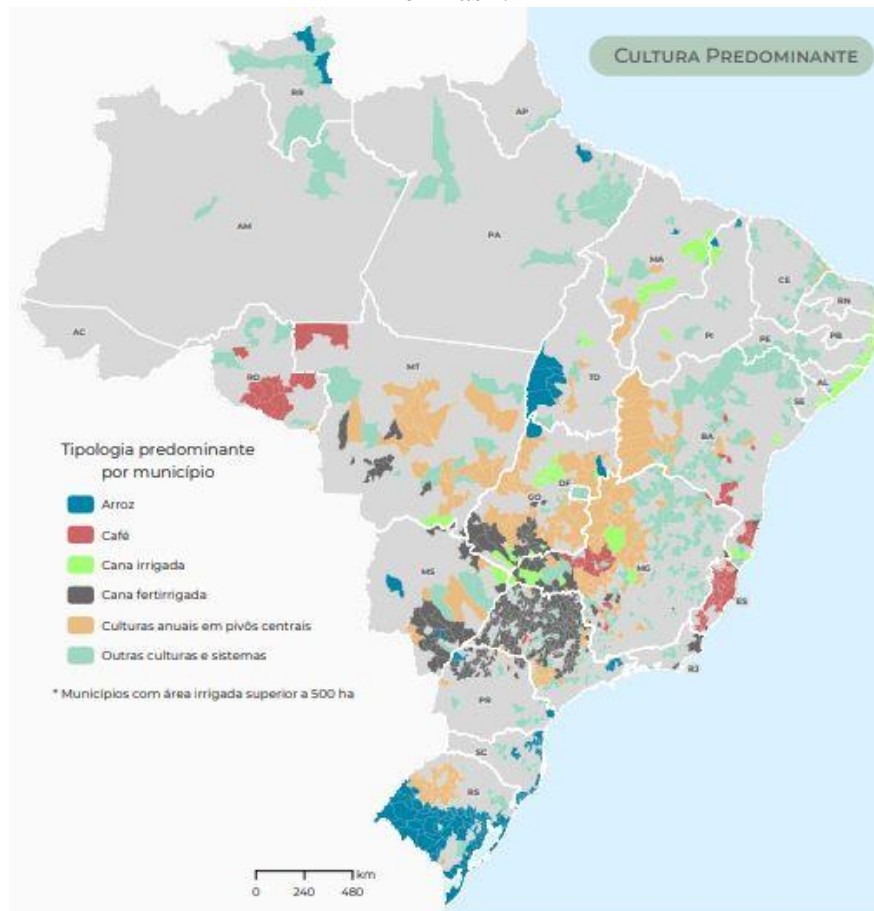


forma, abaixo é feita uma análise da agricultura de cada uma das regiões deste estudo, assim como as principais culturas cultivadas em cada uma delas.

O oeste baiano é uma das regiões com maior intensificação de agricultura em larga escala nas últimas décadas. A partir de 1970, a região sofreu intensa reorganização do seu espaço, marcada por um novo ciclo de desenvolvimento com intensificação e expansão da agricultura e da pecuária, principalmente da produção de grãos, entre eles a soja e o milho, café, frutas e pecuária (BATISTELLA et. al., 2002).

Essa expansão da agricultura para a região foi viabilizada através de uma combinação de alguns fatores, entre eles a disponibilidade de terras relativamente próximas de centros econômicos, a alta competitividade nacional no mercado externo (principalmente através dos grãos), o fortalecimento do capital financeiro privado com a reestruturação interna da produção e o estabelecimento do agronegócio e a inovação tecnológica proveniente de uma política de ciência e tecnologia coordenada, principalmente, pela EMBRAPA (MENKE et al, 2009).

Figura 2 – Tipologia de cultura e irrigação predominante nos municípios com mais irrigação no Brasil.



Fonte: Atlas de Irrigação (ANA, 2021).

De acordo com a 2ª edição do Atlas da Irrigação, a área utiliza como método principal de irrigação a aspersão através de pivôs centrais, onde aproximadamente 3% do território é irrigado e os principais municípios irrigantes, conforme pode-se observar na figura acima são: São Desidério, Barreiras, Jaborandi, Luís Eduardo Magalhães, Riachão das Neves, Correntina. A região é considerada um polo nacional de agricultura irrigada, possuindo uma demanda hídrica de 1,1 trilhão de litros/ano. Em 2019 e 2020 a região também passou a ser um Polo de Agricultura Irrigada instalada pelo MDR (Ministério do Desenvolvimento Regional), com a finalidade de potencializar a atividade na área (ANA, 2021.)

De toda a área cultivada, em 2009 cerca de 60% correspondia a cultura de soja (MENKE et.al, 2009), sendo que em 2002 a soja da região representava 100% da colheita do estado e 73,1% da produção do Nordeste (BATISTELLA et. al., 2002). De acordo com os dados do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola de Maio de 2022, desenvolvido pelo IBGE em 2021 e 2022, considerando a área plantada, por período da safra e produto (hectares), a soja corresponde a 42% da área, seguida por cacau e milho (1ª safra), ambos com 10%. A área plantada segue com o algodão herbáceo com 7% e o milho (2ª safra), com 6% (IBGE, 2022).

De acordo com o Atlas de Irrigação, em regiões mais secas como no oeste da Bahia, a estação chuvosa se inicia mais tarde, por volta de outubro e concentra-se majoritariamente entre dezembro e abril. Assim, há o favorecimento para a realização de dupla safra como soja-milho e soja-algodão (ANA, 2021). Embora essa prática possa levar a um rendimento subótimo da soja, os lucros da segunda safra tendem a possibilitar ao agricultor aproveitar ao máximo a estação chuvosa e acomodar dois ciclos de cultivo. No entanto, este sistema depende de um elevado índice de precipitação anual ou utilização de irrigação, o que já é amplamente observado na região (FONSECA, 2021). O calendário da safra e da dupla safra depende majoritariamente das variações de precipitação observadas anualmente (CORDOVA, 2017).

O potencial agropecuário do estado do Rio Grande do Sul (RS) é notório, tanto em retrospectiva histórica quanto atualmente. Em 2012, o arroz produzido no estado correspondia a 60,6% da produção nacional; a soja a 14,4%; os suínos a 12,4% e o leite a 10,6% (SULZBACHER, 2012). De acordo com o Painel do Agronegócio do Rio Grande do Sul de 2021, em 2020 o agronegócio teve uma participação de 26,6% no PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro, sendo que o estado está entre os que mais contribuem para esse valor. Dos estabelecimentos agropecuários no RS, cerca de 42,3% tem o uso do solo voltado às pastagens, e 36,1% às lavouras (FEIX et al., 2021).

Neste cenário, a mesorregião noroeste do estado desempenha papel fundamental na produção agrícola, sendo em 2019 a região com o maior número de empregos no setor. Até os

anos 2000, a região respondia por mais de 80% da área plantada de soja no estado e em 2020/2021 respondeu por cerca de 50% da safra (FEIX et al., 2021). Ela também se destaca pela alta produção de milho, trigo e feijão, contribuindo para o foco no cultivo de oleaginosas. Esse cultivo focado em grãos dá à região o título de região com maior capacidade de armazenamento no estado, possuindo mais do que o dobro de capacidade da segunda colocada, a região sudeste (Departamento de Políticas Agrícolas e Desenvolvimento Rural do Rio Grande do Sul, 2020). A soja, que é plantada há décadas na região vem aumentando a produção e a área plantada, influenciando no cultivo de outras variedades. Esse avanço está diretamente associado à uma redução na área plantada de milho (FEIX et al., 2021). Nos últimos anos, além de manter o domínio territorial no Noroeste, a soja obteve avanço sobre as culturas de milho e feijão primeira-safra (HIRAKUR et al., 2019).

O estado de São Paulo é historicamente conhecido pela alta produção de cana de açúcar, café e cítricos, principalmente a laranja. De acordo com o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola da safra de 2021, considerando a área plantada no estado, os principais cultivos são a cana-de-açúcar, a soja, o milho, a laranja e o café, respectivamente (IBGE, 2022).

A região produtora mais ao sul, conhecida como Alto Paranapanema, é considerada um dos Polos Nacionais de Agricultura Irrigada, junto com outras duas regiões no estado: Guaíra/Miguelópolis e Vertentes Pardo/Mogi Guaçu. A região, caracterizada pela utilização de irrigação através de pivôs centrais é uma das regiões com maior potencial de expansão no país, tem uma demanda hídrica de 219 bilhões de litros por ano e área irrigada de 117 mil ha com potencial de expansão para 427 mil ha (ANA, 2021).

A região do Alto Paranapanema engloba como principais municípios irrigantes as cidades de Itaí, Itapeva, Paranapanema, Avaré, Itaberá, Buri, Itapetininga, Taquarituba, Cerqueira César (ANA, 2021), e é considerada a região com maior diversificação de cultivo do estado, incluindo os principais grãos (milho, soja, feijão), abóbora, tomate, batata, soja, cana de açúcar, entre outros (FIRETTI et al., 2016). Embora seja uma das principais regiões produtoras de feijão, em 2004, já era observado um avanço da soja sobre cultivo do feijão, efeito que não era observado sobre o milho (TSUNECHIRO, 2004).

Dados de 2007 confirmam a tendência da sequência do milho como o principal produto em valor de mercado na região, representando cerca de 17,4% do VPA (Valor da Produção Agropecuária) daquele ano (TSUNECHIRO et al., 2008). Como a região detém grande parte da área equipada para irrigação de dupla e tripla safra (ANA, 2021), entende-se que o cultivo de soja, milho e feijão ocorrem de forma concomitante ao longo do ano, a depender das épocas de chuva e início de cada safra. Ao observar a área plantada, de acordo com estimativas do IEA

(Instituto de Economia Agrícola), através da Estatísticas de Produção Agrícola, a área plantada de soja já superou a de milho nos anos de 2019, 2020 e 2021 (IEA, 2022). Desta forma, entende-se a relevância tanto da cultura da soja quanto do milho na região. No entanto, tendo em vista que a área plantada de soja superou em cerca de 150 mil ha a área plantada de milho, observa-se que a soja é a principal cultura da região.

O estado do Mato Grosso é comumente retratado como o celeiro do país em virtude da sua alta capacidade de produção de alimentos, principalmente cereais, leguminosas e oleaginosas. O estado é líder nacional na produção de soja, milho, algodão e girassol. Ao se considerar apenas o Centro-Oeste, o Mato Grosso é responsável por, pelo menos, 60% da produção agrícola da região. Neste cenário, as culturas de soja e milho desempenham papel de destaque na produção estadual, representando cerca de 95% da área plantada na safra de 2016/2017. Ao se considerar a produção em toneladas, a participação das duas culturas sobre para 98% dos grãos produzidos no estado (VON DENTZ, 2019).

De acordo com o LSPA (Levantamento Sistemático da Produção Agrícola), ao considerar a área plantada no estado no ano de 2021, a soja é o cultivo com maior área plantada, com cerca de 10 milhões de hectares, seguida pelo milho, com um pouco mais da metade dessa área (IBGE, 2022). No entanto, estes dados não são de plantio no mesmo período do ano, tendo em vista que, em geral, os produtores cultivam a soja na primeira safra e o milho logo em seguida. Este é um sistema de dupla safra possibilitado pela agricultura de precisão, com a soja sendo a cultura principal (VON DENTZ, 2019).

A área central do estado, região onde se encontram grandes municípios produtores, como Sorriso, Vera, Ipiranga do Norte e Lucas do Rio Verde, possui um polo nacional de irrigação, chamado de Alto Teles Pires, que é considerado o polo com maior potencial de expansão no país. A área irrigada atualmente compreende cerca de 64 mil hectares, utilizando principalmente o método de pivô central, e pode chegar até cerca de 700 mil hectares de potencial efetivo (ANA, 2021). Observando os dados da Produção Agrícola Municipal e considerando a área plantada para a soja e o milho nos principais municípios da região, a soja supera o milho em todos eles. O mesmo comportamento é verificado ao comparar todas as mesorregiões geográficas do estado (IBGE, 2021).

## 2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MODELOS CLIMÁTICOS

O clima, entendido como o estado médio do tempo (meteorológico) em um ponto da terra, depende de um complexo sistema de interações físico-químicas ao redor da terra. Ele é avaliado através da evolução do tempo durante um longo período de análise, e compõe um

complexo sistema que inclui a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a geosfera e a biosfera (SAMPAIO e DIAS, 2014).

Historicamente, diversos autores caracterizaram o clima em cada local da terra, apresentando características gerais de comportamento que incluem o regime de chuvas, as temperaturas máximas, médias e mínimas, o comportamento dos ventos, os tipos de vegetação e de animais presentes. De forma geral, existem 10 climas principais ao redor da terra: equatorial, tropical, temperado, subtropical, mediterrâneo, frio, frio de montanha, polar, semiárido e desértico.

Para auxiliar no entendimento das diferentes interações atmosféricas, oceânicas e continentais que regem o clima na terra, e possibilitar a expansão dos conhecimentos relativos ao comportamento climático e as mudanças previstas para o futuro, surgiram, como um dos maiores avanços tecnológicos recentes, os modelos climáticos (SAMPAIO E DIAS, 2014). Eles já são utilizados há décadas, e buscam representar através de soluções numéricas e matemáticas as interações que ocorrem no meio físico. Em um modelo são simuladas cada uma das esferas que compõe o clima e a forma como elas interagem internamente e entre si (SAMPAIO E DIAS, 2014).

Através do entendimento da termodinâmica e da dinâmica dos fluidos, foi possível, já a partir do final dos anos 1800, propor uma série de metodologias de aplicação matemática para construir modelos de previsão do estado futuro da atmosfera. Inicialmente esses modelos simulavam apenas algumas das variáveis importantes para a previsão climática, o que foi mudando ao longo dos anos com o desenvolvimento de modelos cada vez mais complexos (SAMPAIO E DIAS, 2014).

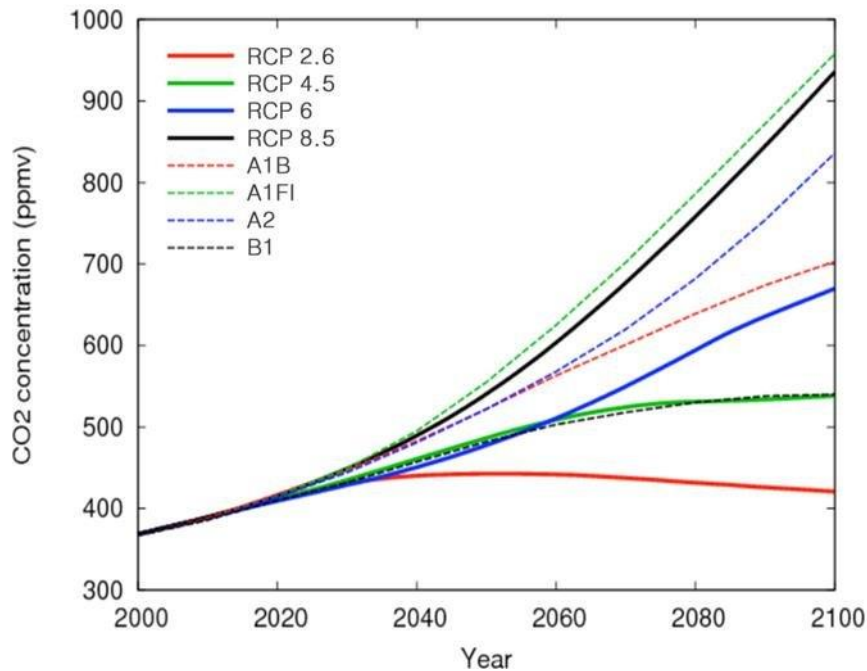
A partir das décadas de 1980 e 1990, os modelos de previsão do tempo e do clima já estavam se popularizando, sendo utilizados em diversas partes do mundo para previsões locais e regionais (SAMPAIO E DIAS, 2014). Foi através deste avanço tecnológico e com uma maior utilização da metodologia de modelagem matemática que os primeiros estudos a respeito das mudanças climáticas começaram a ser publicados. Foi possível observar, através de uma retrospectiva histórica de dados climáticos e das previsões futuras possibilitadas pelos modelos, que o clima global estava sofrendo alterações. O IPCC foi criado em 1988 pela WMO (Organização Meteorológica Mundial) e pela UNEP (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), com o objetivo de prover informações científicas a respeito das mudanças climáticas a todos os níveis governamentais para que possam desenvolver políticas específicas (IPCC, 2022).

O IPCC, que já publicou cinco grandes relatórios de avaliação, fez sua primeira publicação no ano de 1990 e iniciou as discussões acerca da importância de estudar, avaliar e prevenir as mudanças climáticas que estavam sendo projetadas pelos cientistas. O relatório foi seguido de análises mais aprofundadas, como o livro “*Climate Change 1992 – The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment*” que recomendou avanços nas áreas de modelagem, sensoriamento remoto para auxiliar nos estudos acerca do tema (HOUGHTON et al., 1992) e o “*Global Warming: The Complete Briefing*” que se constituiu como um dos guias mais completos acerca do tema (HOUGHTON, 1994).

Em 2006, já estava claro que as mudanças climáticas eram um dos maiores desafios da humanidade, e estava diretamente associada a causas antrópicas como a emissão de gases do efeito estufa, a industrialização, o crescimento econômico e o crescimento populacional. Os impactos das mudanças começaram a ser identificados, entre eles os aumentos globais de temperatura, aumento dos níveis dos oceanos causados pelo derretimento do gelo e a intensificação de eventos extremos (SCHELLNHUBER et al., 2006). As atenções passaram a se voltar para a emissão de gases do efeito estufa, principalmente o gás carbônico (CO<sub>2</sub>), que passou de aproximadamente 270 ppm na era pré-industrial para 310 ppm por volta dos anos 1950 (STEFFEN et al., 2007). Tendo em vista a necessidade de intervenção evidenciada pelos estudos e pelos relatórios do IPCC, que passaram a se tornar referência no assunto, em 2009 mais de 100 países haviam adotado um limite de aquecimento global de 2°C como guia para os esforços de mitigação e redução dos riscos climáticos (MEINSHAUSEN et al., 2009).

Em seu relatório mais recente, de 2022, o grupo de trabalho III do IPCC estima que há mais de 50% de chances que a temperatura aumente 1,5°C ou mais até 2044 caso seja adotada uma ação climática ambiciosa, podendo aumentar para até 4°C dependendo das práticas adotadas (prevê-se 3,2°C de aumento ao se continuar com os mesmos níveis de emissões observados até 2020). O mesmo IPCC apresentou, no AR5, uma metodologia que auxilia a avaliar diferentes cenários: RCP (Representative Concentration Pathways). Nessa metodologia são criados quatro cenários com diferentes Caminhos Representativos de Concentração, onde cada um deles simula uma tendência de emissões de gases do efeito estufa, concentrações atmosféricas, poluentes do ar e uso da terra para os próximos anos no século XXI. Os caminhos incluem um cenário de forte mitigação, dois cenários medianos e um cenário de alto crescimento de emissões, respectivamente: RCP2.6, RCP4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5 (IPCC, 2014).

Figura 3 - Projeções de concentração de CO<sub>2</sub> nos quatro diferentes cenários de RCP de acordo com o AR4 (linha pontilhada) e AR5 (linha contínua), regionalizados para a região da Austrália.

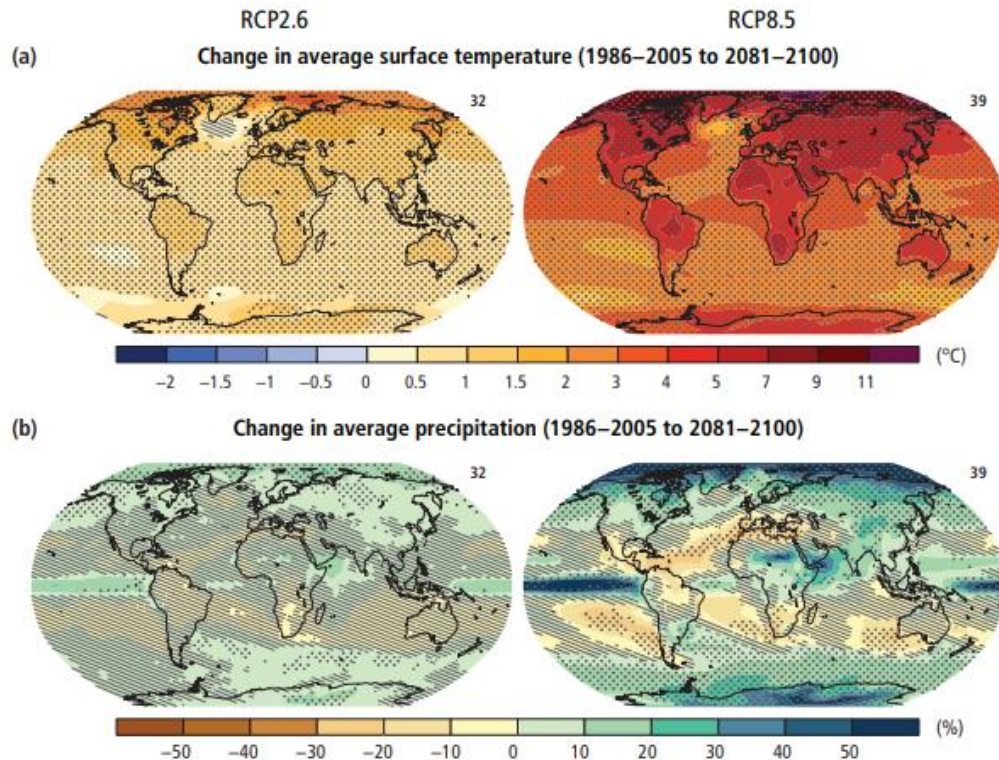


Fonte: Implications of climate change on fisheries resources of northern Australia. Part 1: Vulnerability assessment and adaptations. (WELCH et al, 2014).

Através deste aumento de temperatura, deve ocorrer um aumento na ocorrência de eventos climáticos extremos, mudança nos regimes de chuvas, ventos, temperatura e umidade. Essas mudanças devem ser observadas de diferentes formas e intensidades em cada local (IPCC, 2021), conforme pode ser observado na figura abaixo elaborada pelo próprio IPCC em 2014, considerando os cenários menos e mais intensos (IPCC, 2014).

Recentemente, no ano de 2017, surgiu um novo conceito para abordar os diferentes cenários de mudanças climáticas. O método SSP (Shared Socioeconomic Pathways) aborda diferentes abordagens de desenvolvimento socioeconômico com cenários de mitigação similares ao RCP. O 6º relatório do IPCC (AR6) passa a utilizar de forma mais abrangente o método SSP, assim como pesquisas mais recentes. Ao comparar os valores entre o SSP e o RCP existe uma pequena variação.

Figura 4 - Mudanças de temperatura e precipitação ao redor do planeta considerando dois diferentes cenários: RCP2.6 e RCP8.5.



Fonte: Climate Change 2014: Synthesis Report. (IPCC, 2014).

Para que se possa realizar estas projeções de aumento de temperatura e mudanças climáticas é fundamental a utilização dos modelos climáticos, conforme citado anteriormente. Cada modelo consiste em uma combinação de equações matemáticas que buscam representar as condições físicas do planeta, e quanto mais complexas melhor tende a ser a sua precisão. Os modelos climáticos, que na década de 1970 simulavam apenas a atmosfera, em 1990 passaram a incluir simulações de superfície terrestre, oceano, gelo marinho e aerossóis. Já os modelos mais recentes incluem, além destes, o ciclo de carbono, as dinâmicas de vegetação e a química atmosférica (SAMPAIO E DIAS, 2014).

Os modelos climáticos podem ter uma abordagem regional (RCMs – Regional Climate Models) ou global (GCMs – Global Climate Models). Eventualmente, para fornecer informações locais, um modelo regional é acoplado a um modelo global, aumentando a precisão das previsões pois melhora as condições de fronteira da área analisada. Essa interação permite que sejam feitas análises de impacto local (CHOU et al., 2014). Este estudo optou por trabalhar com o modelo Eta, um modelo regional (RCM) desenvolvido pelo INPE, acoplado à quatro modelos globais (GCMs): BESM, CanESM2, HadGEM2 e MIROC5.



O modelo regional Eta foi inicialmente desenvolvido pela Universidade de Belgrado e pelo Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, e passou a ser utilizado por diversos países. No Brasil, começou a ser utilizado a partir de 1995 para previsões do tempo e, a partir de 2010, para estudos de mudanças climáticas do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (CHOU, 1996) e é mantido pelo CPTEC-INPE. O modelo tem como principal característica a coordenada vertical definida por Mesinger em 1984, que possibilita que as superfícies da coordenada sejam aproximadamente horizontais, reduzindo o erro de cálculo de variáveis obtidas através de variáveis horizontais. A combinação com os modelos globais CanESM2, HadGEM2 e MIROC5 indica que o modelo Eta subestima os valores de temperatura, apresenta tendências negativas ou positivas para a precipitação em diferentes partes do Brasil, apresenta dificuldades em regiões de montanha e repercute erros dos modelos globais. No entanto, de forma geral, o modelo Eta reproduz adequadamente as características climatológicas gerais na América do Sul (CHOU et al., 2014).

Dentre os modelos globais, o BESM (Brazilian Earth System Model) é o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre e aborda as mudanças climáticas sobre uma perspectiva brasileira. Ele foi desenvolvido por cientistas do INPE em conjunto com diversos cientistas de outras instituições. Por ser um modelo brasileiro, apresenta de forma mais aproximada os processos regionais e remotos do país e amplia a capacidade de obtenção de informações detalhadas sobre o país (BESM, 2015). O modelo é uma combinação entre os componentes da atmosfera, o oceano, química e superfície e apresenta dois cenários distintos para o Brasil: o RCP4.5, com aumento de temperatura aproximado de 0,15 graus por década e o RCP8.5, com aumento aproximado de 0,38 graus por década. Cada um destes cenários considera diferentes níveis de concentração de gases de efeito estufa emitidos, uma vez que RCP significa Representative Concentration Pathways, ou seja, Caminhos Representativos de Concentração (CHOU et al, 2014).

O CanESM2 (Canadian Earth System Model) faz parte da quarta geração de modelos globais desenvolvidos pelo CCCma (Canadian Centre For Climate Modelling and Analysis), ou Centro Canadense de Análises e Modelagem Climática (GOVERNMENT OF CANADA, 2022). Este é um modelo físico oceânico acoplado a um modelo terrestre de carbono e a um modelo carbônico oceânico (CARDOSO, 2020).

Já o modelo global HadGEM2 (Hadley Centre Global Environment Model version 2) faz parte da segunda geração da família de modelos HagGEM, desenvolvido pelo Hadley Centre do Reino Unido (MET OFFICE, 2022). O modelo de 2011 foi melhorado a partir de uma versão inicial mais antiga, e inclui componentes de atmosfera, oceano, gelo marinho, ciclo

do carbono em terra e oceano, além da química atmosférica. As melhorias incluem a diminuição de um viés no cálculo de temperatura de superfície oceânica nos trópicos, o que afeta diretamente os cálculos no Brasil (COLLINS et al, 2011).

Por fim, o último modelo global utilizado neste estudo, o MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5) ou Modelo para Pesquisa Interdisciplinar sobre o Clima é a quinta versão do modelo japonês desenvolvido em conjunto entre o Center for Climate System Research (CCSR), o National Institute of Environmental Studies (NIES) e a Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) e foi utilizado no quinto relatório do IPCC (AR5) (CARDOSO, 2020). O modelo foi aperfeiçoado diversas vezes e atualmente capta um amplo espectro de cores, melhorando as estimativas de radiação, cobertura de nuvens, turbulências, aerossóis e outros (FONTOLAN, 2019).

### 2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, DE CULTURA E REAL

O processo de evapotranspiração é uma combinação de dois eventos físicos distintos de perda de água: a evaporação de água pela superfície do solo e a transpiração de água através da área foliar da planta. De forma resumida, a evapotranspiração encerra o ciclo hidrológico em razão de ser um processo de retorno de água para a atmosfera. Este processo, de forma geral, é influenciado pelos fatores de cultura e de clima e possibilita avaliar o balanço hídrico no solo através das entradas e saídas de água. Os dois eventos físicos de perda de água ocorrem simultaneamente, e não é fácil determinar a contribuição individual de cada um para a evapotranspiração. Assim, a metodologia apresenta diversas formas de determinar a evapotranspiração, desde métodos empíricos com coleta de dados em campo até métodos teóricos. Na metodologia conceitual foram definidos diferentes tipos de evapotranspiração para possibilitar fazer uma análise mais próxima do real, sendo elas a evapotranspiração de referência/potencial, de cultura e a real (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração de referência ou potencial é uma evapotranspiração padrão, que desconsidera os diferentes tipos de vegetação e estresse hídrico, levando em consideração apenas os fatores climáticos. Ela é calculada para uma cobertura vegetal padrão (grama, mantida cortada) e bem suprida de água (sem estresse hídrico). Ela faz parte do estágio inicial do cálculo de evapotranspiração e possibilita calcular o cenário real através de fatores de correção (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração de cultura e a real são muito semelhantes. Ambas têm uma abordagem relativa ao tipo específico de cultura que se está avaliando. Na evapotranspiração de cultura, é feita uma conversão de dados através da evapotranspiração de referência utilizando

fatores de conversão específicos para cada planta em diferentes estágios. Esses fatores foram obtidos através de métodos empíricos e são tabelados. Neste cenário, se obtêm o valor potencial que aquela cultura teria de evapotranspiração caso seja bem suprida de água. Já na evapotranspiração real, leva-se em conta as diferentes condições de disponibilidade hídrica. Ela é obtida através da evapotranspiração de cultura submetida a condições específicas de disponibilidade de água, e permite avaliar o comportamento real de uma cultura em diferentes situações (COLLISCHONN, 2015).

## 2.4 BALANÇO HÍDRICO

O conceito de balanço hídrico proposto por Thornwaite em 1948 considera o solo como um reservatório fixo, onde a água é armazenada até o máximo de sua capacidade. Nele, considera-se que o solo está sujeito à um balanço, onde tudo o que entra de água é igual ao que sai (ou fica armazenado) (FERREIRA et al, 2001).

Este armazenamento de água no solo é um dos componentes hidrológicos mais importantes para o estudo das respostas das culturas em condições de estresse hídrico, assim como para correto o planejamento, dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação (JERSZURK, et al, 2018). Atualmente, o principal método para determinação do balanço hídrico no solo com base em dados meteorológicos é através das equações de evapotranspiração de Penman-Monteith. Este método leva em conta que grande parte da água que entra no solo é retirada pela evapotranspiração das plantas (ÁVILA, 2016). De forma geral, o balanço hídrico é igual a zero e redistribuindo e equacionando as entradas e as saídas de água no sistema, têm-se a variação de armazenamento de água no solo, onde ela é igual a:

$$\Delta ARM = (P + O + EES + EESS + AC) - (ET + SES + SESS + DP) \quad (1)$$

Onde, P é a precipitação, O é orvalho, EES é a entrada através de escoamento superficial, EESS é a entrada através de escoamento sub-superficial, AC é a ascensão capilar, ET é a evapotranspiração, SES é a saída através de escoamento superficial, SESS é a saída através de escoamento sub-superficial e DP é a drenagem profunda.

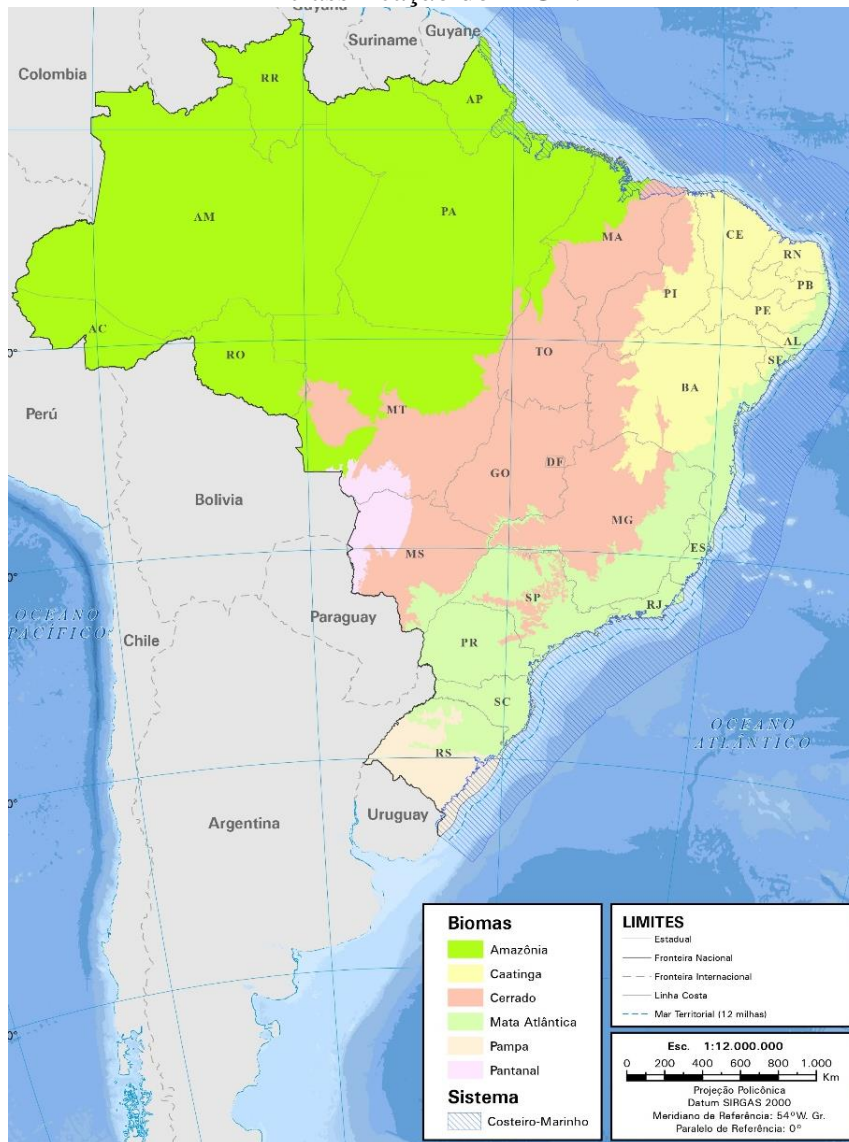
De forma geral, a chuva é a principal entrada e a evapotranspiração a principal saída de água do sistema, sendo que o orvalho e a ascensão capilar têm contribuições muito pequenas e podem ser desconsideradas. Já os fluxos horizontais de escoamento superficial e sub-superficial tendem a se anular e também podem ser desconsiderados.

Desta forma, considerando a precipitação como entrada de água, a evapotranspiração como saída e uma variação do armazenamento de água no solo mínimo permitido, é possível avaliar se há a necessidade de irrigação para completar o balanço hídrico. Essa irrigação ocorre quando o armazenamento do solo está abaixo deste valor estabelecido e visa ajustar o balanço hídrico para proporcionar o pleno desenvolvimento da planta.

## 2.5 CLIMAS E BIOMAS

O Brasil, um país com dimensões continentais e que se estende desde as proximidades da Linha do Equador ao norte e além do Trópico de Capricórnio ao sul, possui uma extensa área continental e de costa. Por esta razão, têm a incidência de diferentes tipos de climas e biomas. Cada um destes climas e biomas possui características de temperatura, precipitação, umidade, insolação, fauna e flora únicas. Conforme pode-se observar na figura abaixo, o país tem os biomas Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal e cada um dele estende-se por uma área específica do território. Existem diferentes limites e extensões de cada bioma, tendo em vista as diferentes abordagens de diferentes autores e a variação temporal das fronteiras entre eles. Aqui, adotou-se como padrão o que é estabelecido pelo IBGE, conforme exposto na figura 5.

Figura 5 – Distribuição e limites dos biomas no território brasileiro, de acordo com a classificação do IBGE.



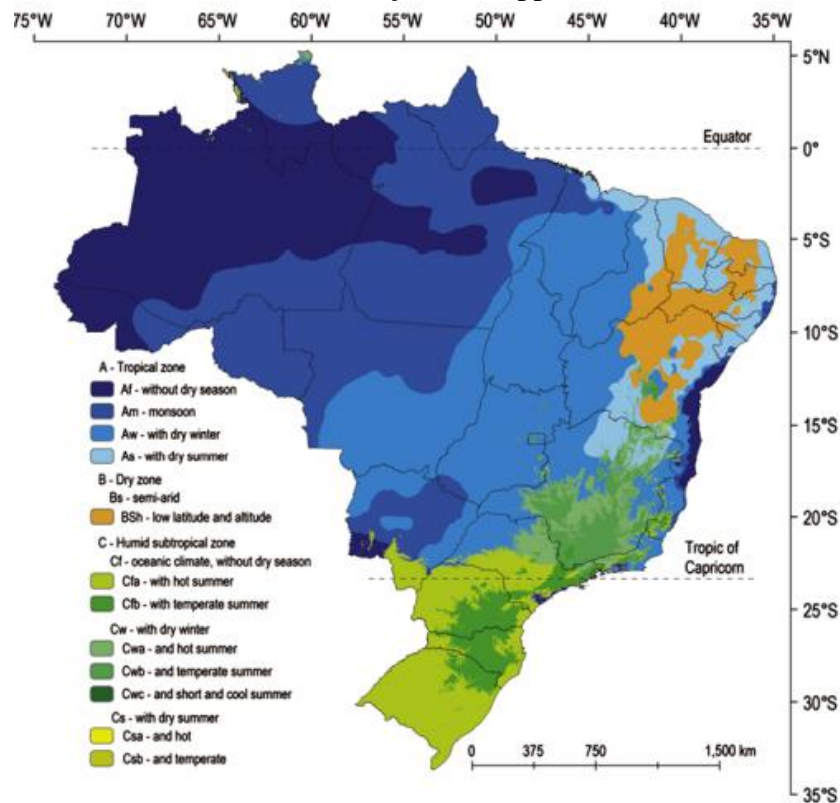
Fonte: Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil (IBGE, 2019).

Além dos diferentes biomas, o país conta ainda com diversos tipos de clima. A classificação climática possui ainda maior variabilidade a depender do autor proponente, assim como a data da elaboração. O IBGE apresenta uma classificação climática dividida em zonas, que é mais abrangente, e apresenta os climas Equatorial, Tropical Zona Equatorial, Tropical Nordeste Oriental, Tropical Brasil Central e Temperado. Dentro de cada uma dessas zonas existe ainda uma subdivisão considerando a temperatura média e umidade (IBGE, 2002).

Uma classificação mundialmente conhecida e detalhada é a classificação de Köppen, que tem como zonas principais no Brasil a tropical (A), a seca (B) e a subtropical úmida (C). Cada uma dessas zonas é subdividida considerando as características sazonais de temperatura

e umidade. Essa classificação se assemelha à classificação do IBGE, porém com pequenas variações. Para fins de estudo e comparação, este trabalho adotou a classificação de Köppen exposta na figura 6, tendo em vista sua relevância internacional na classificação climática.

Figura 6 - Distribuição e limites dos tipos climáticos no território brasileiro de acordo com a classificação de Köppen.



Fonte: Köppen's climate classification map for Brazil (ALVARES et.al., 2013).

Desta forma, a seguir apresenta-se uma descrição detalhada do clima e bioma de cada região de interesse deste estudo.

### 2.5.1 Oeste da Bahia

A região do Oeste da Bahia, próxima da divisa com o Tocantins e o Goiás, está localizada no limite leste do bioma Cerrado, que se estende desde o norte e nordeste até o sudeste do país. O bioma, que tem características de savana e possui uma grande biodiversidade, vêm sofrendo mudanças em sua cobertura original (SANTOS, 2015). Recentemente, a região do oeste baiano sofreu alterações significativas quando comparada com o seu limite original, com avanço do bioma Caatinga sobre o Cerrado, desde os arredores do Rio São Francisco até a cidade de Barreiras (IBGE, 2019).

Em relação ao clima, a região situa-se no clima tropical do Brasil central, de temperatura quente ( $>18^{\circ}\text{C}$  em todos os meses) (IBGE, 2002), sob domínio do semiárido com variações climáticas de úmido a subúmido e de seco a subúmido (BATISTELLA et al., 2002). De acordo com a classificação de Köppen, o oeste baiano apresenta clima Aw – Clima Tropical com estação seca de inverno (ALVARES et al., 2013). O clima da região proporciona uma estação seca e uma estação chuvosa bem definidas com o regime de chuvas influenciado por mecanismos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), frentes frias e El Niño. Com estas características de bioma e clima, o oeste da Bahia possui características climáticas (temperaturas e radiação solar), solos e topografia adequados para a agricultura (COMMAR, 2020).

### **2.5.2 Sul de São Paulo**

Em 2017, o Governo do Estado de São Paulo publicou uma resolução que instituiu o mapa de biomas do estado e que define a presença dos biomas Cerrado e Mata Atlântica. A legislação apresenta ainda neste mapa uma área configurada como Zona de Tensão, resultante entre o encontro dos dois biomas (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2017). A mesma divisão também é apresentada pelo IBGE, que caracteriza o Cerrado projetando um corte no sentido norte-sul aproximadamente na região central do estado, iniciando em Minas Gerais e chegando até o Paraná (IBGE, 2019). Desta forma, a região agrícola do sul de São Paulo apresenta tanto o bioma Mata Atlântica quanto Cerrado, assim sendo uma zona de tensão.

Em relação ao clima, o estado está quase inteiramente situado no Clima Tropical do Brasil Central, com a sua ponta do extremo sul pertencendo ao clima temperado (IBGE, 2002). De acordo com a classificação de Köppen, o sul do estado apresenta os seguintes tipos climáticos: Af – Tropical Equatorial; Am – Tropical de Monção; Cfa – Subtropical Úmido e Cfb – Subtropical Oceânico (ALVARES et al., 2013). A área de estudo, no entanto, está em área de predomínio dos climas Cfa – Subtropical Úmido e Cfb – Subtropical Oceânico.

### **2.5.3 Centro do Mato Grosso**

O estado do Mato Grosso apresenta três biomas distintos: Amazônia, Cerrado e Pantanal. O Pantanal está restrito ao extremo sul do estado, junto à divisa com o Mato Grosso do Sul. Já o bioma amazônico está presente na metade norte e parte do leste do estado, sendo o restante ocupado pelo Cerrado. A área de interesse deste estudo, o centro, apresenta tanto o bioma amazônico quanto o Cerrado, sendo uma área de transição entre ambos. Um dos

municípios mais conhecidos pela sua produção agrária, Lucas do Rio Verde, encontra-se na área de transição e possui ambos os biomas. (IBGE, 2019)

O estado do Mato Grosso apresenta o clima equatorial em sua metade norte e clima tropical do Brasil central em sua metade sul (IBGE, 2002). De acordo com a classificação de Köppen, o centro do estado está no limite e, conseqüentemente, apresenta os tipos climáticos de clima tropical de monção (Am) e clima tropical de savana (Aw) (ALVARES et al., 2013).

#### **2.5.4 Noroeste do Rio Grande do Sul**

Toda a região noroeste do estado do Rio Grande do Sul se encontra em uma área de fronteira entre dois biomas: o Pampa e a Mata Atlântica. O Pampa, que se limita a um único estado da federação, abrange a metade sul do Estado do Rio Grande do Sul e se estende pelo Uruguai e Argentina, é classificado como Estepe no sistema fitogeográfico internacional. Por suas características de topografia relativamente plana e vegetação rasteira, propiciou uma homogeneização da cobertura vegetal e atualmente é amplamente utilizado para a criação de gado. Já a Mata Atlântica, inicia-se ao sul do país no limite com o Pampa, na região central do estado, e se estende até o nordeste do Brasil. Este bioma apresenta características diferentes, com grande biodiversidade de fauna e flora e é conhecida pelas florestas tropicais, com precipitação regular e volumosa (IBGE, 2019). Grande parte da região de interesse deste estudo, principalmente a região mais ao norte do estado, está no bioma Mata Atlântica, enquanto uma pequena parcela encontra-se em áreas de Pampa.

Em relação ao clima, todo o estado gaúcho está localizado em clima temperado (IBGE, 2002). De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo subtropical úmido, com grande parte do estado pertencendo ao grupo climático Cfa (Subtropical Úmido - sempre úmido com verões quentes) e uma pequena área ao grupo climático Cfb (Subtropical Oceânico - sempre úmido com verões amenos). Toda a região noroeste do estado, área de estudo deste trabalho, está na área de grupo climático Cfa (PESSOA, 2017).

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia deste estudo consiste inicialmente na utilização dos dados climáticos para o cálculo de estimativa de evapotranspiração potencial através de metodologia apresentada pela FAO. Com esta informação foi possível calcular o balanço hídrico em cada local considerando a precipitação estimada pelos modelos, e avaliar os resultados a fim de analisar o comportamento de aumento ou diminuição da necessidade de irrigação. Abaixo são



apresentadas de forma detalhada as fontes de dados, assim como o cálculo de evapotranspiração e balanço hídrico.

### 3.1 FONTES DE DADOS

Para a realização do estudo, foram obtidos dados climáticos através do modelo regional Eta Model, do INPE, acoplado à quatro modelos climáticos globais: o BESM, modelo global brasileiro; o CanESM2, modelo global canadense; o HadGEM2-ES, modelo global britânico e o MIROC5, modelo global japonês. Para cada modelo foram obtidos dados de precipitação (mm), temperatura a 2 metros do solo (°C), pressão em superfície (hPa), temperatura do ponto de orvalho (°C), velocidade do vento oeste-leste (m/s) e velocidade do vento sul-norte (m/s) a 10 metros do solo e a radiação solar sobre a superfície (W/m<sup>2</sup>).

Os dados foram obtidos de acordo com o cenário RCP4.5 estabelecido pelo IPCC, que considera um RCP conservador (aumento leve da temperatura), no período de 1961 até 2099. Optou-se por escolher este cenário (RCP4.5) por ele ser o mais indicado para estudos com uma previsão realista, sendo o mais provável de acontecer ou ficando mais próximo de uma variação diferente. Além disso, como mencionado anteriormente, já existe um método mais detalhado (SSP) dos cenários de mudanças climáticas, no entanto, este trabalho segue abordando através do RCP pois os dados estão associados à esta metodologia. Estes dados foram obtidos para cada uma das regiões estudadas nos quatro estados brasileiros.

Os arquivos foram previamente obtidos pelo HGE-IPH (Grupo de Pesquisa de Hidrologia de Grande Escala do Instituto de Pesquisas Hidráulicas) da UFRGS através de uma parceria com um projeto da CAPES-ANA, em formato .txt. Os dados foram previamente tratados pelo aluno de doutorado João Paulo Breda, com remoção de viés através do método quantil-quantil. Estes dados foram disponibilizados para este estudo, e o primeiro passo foi a conversão de dados em formato .txt para planilhas de Excel, em.xlsx. Todo o trabalho foi desenvolvido dentro do software Excel para o desenvolvimento dos cálculos, tratamento dos dados, obtenção dos resultados e geração dos gráficos.

### 3.2 CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Para o cálculo da evapotranspiração foi utilizada a metodologia elaborada pela FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) em 1998. A metodologia é apresentada em um artigo intitulado “*Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*”, que é chamado de “*Paper 56*” e foi elaborado por Richard G. Allen,

Luis S. Pereira, Dirk Raes e Martin Smith. Ele e é considerado um guia para metodologias de evapotranspiração de cultivo.

O método de cálculo apresentado no artigo considera a utilização da equação de Penman-Monteith para determinação da evapotranspiração de referência ( $ET_o$  – mm/dia); seguida pelo cálculo da evapotranspiração de cultura ( $ET_c$  – mm/dia), considerando o coeficiente de cultivo (Kc), e pelo cálculo da evapotranspiração real de cultura ( $ET_r$  – mm/dia), considerando o coeficiente de disponibilidade hídrica (Ks). Para cada modelo e região de estudo foram obtidos dados de data, precipitação (*Precip.* – mm), temperatura ( $T$  – °C), pressão em superfície ( $P_s$  – hPa), temperatura do ponto de orvalho ( $T_d$  – °C), velocidade do vento oeste-leste ( $U_{OL}$  – m/s), velocidade do vento norte-sul ( $U_{NS}$  – m/s) e a radiação solar sobre a superfície ( $S_{sup}$  – W/m<sup>2</sup>).

Inicialmente foi calculada a energia solar de ondas curtas incidente em superfície ( $S_{sup}$  – MJ/m<sup>2</sup>) utilizando como base a radiação solar incidente sobre a superfície obtida na coleta de dados. O cálculo consiste em uma conversão de unidades, de W/m<sup>2</sup> para MJ/m<sup>2</sup>, cujo o valor inicial foi multiplicado pelo número de segundos existentes em um dia (86.400) e dividido por 1 000 000 (10<sup>6</sup>) que é correspondente ao prefixo Mega. Em seguida foi calculada a energia solar absorvida ( $S_{abs}$  – MJ/m<sup>2</sup>), conforme a fórmula 2, abaixo . O albedo é definido como 0,23 para a vegetação de referência conforme o padrão estabelecido na bibliografia (ALLEN et al., 1998).

$$S_{abs} = S_{sup} * (1 - albedo) \quad (2)$$

Calculou-se a pressão parcial de vapor na saturação ( $e_s$ ) e a pressão parcial real de vapor na saturação ( $e_d$ ), ambos em kPa, utilizando a temperatura diária ( $T$ ) e a temperatura do ponto de orvalho ( $T_d$ ), respectivamente, através das fórmulas 3 e 4 abaixo. Ambas as equações são iguais, apenas variando  $T$  e  $T_d$  (ALLEN et al., 1998). Em seguida, foi calculada a umidade relativa ( $U_R$  – %), dividindo  $e_d$  por  $e_s$ , e multiplicando por 100. Ainda, foi calculada a derivada ( $\Delta$  - kPa/°C) da pressão parcial de vapor na saturação ( $e_s$ ) através da formula (5).

$$e_s = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right] \quad (3)$$

$$e_d = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27 * T_d}{T_d + 237,3} \right] \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon = 0,34 - 0,14 * \sqrt{e_d} \quad (6)$$

Em seguida, calculou-se a emissividade da superfície ( $\varepsilon$  – adimensional), considerando a pressão parcial real de vapor na água ( $e_d$ ), através da fórmula (6). Também foi definido o dia juliano ( $D_J$ ) de 1 a 365, que é utilizado para calcular o fator de excentricidade da órbita da terra ( $d_r$  - adimensional) através da equação 7, assim como a declinação solar ( $\delta$  - radianos) através da equação 8. A partir da declinação solar calculou-se o ângulo do sol ao nascer ( $\omega_s$  – radianos) através da equação 9, que considera a latitude ( $\varphi$  – radianos) da área de estudo.

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2 * \pi}{365} * D_J\right) \quad (7)$$

$$\delta = 0,4093 * \text{sen}\left(\frac{2 * \pi}{365} * D_J - 1,39\right) \quad (8)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) * \tan(\delta)] \quad (9)$$

Assim como para determinar o ângulo do sol ao nascer, para a sequência dos cálculos, foi necessário utilizar a altitude e latitude do local de análise. Os dados de latitude foram determinados de acordo com os pontos escolhidos para obtenção dos dados através dos modelos. Os dados de altitude foram obtidos através da plataforma Google Earth para cada ponto. Todos os dados seguem dispostos na tabela 1, abaixo:

Tabela 1 – Tabela resumo com latitude e altitude de cada região de estudo utilizadas no cálculo.

<b>Locais</b>	<b>φ Latitude (S)</b>	<b>λ Longitude (W)</b>	<b>φ Latitude (rad)</b>	<b>H Altitude (m)*</b>
Bahia	12°00'	46°00'	-0.2094	805
Mato Grosso	12°00'	56°00'	-0.2094	355
São Paulo	23°00'	50°00'	-0.4014	740
Rio Grande do Sul	28°30'	53°30'	-0.4974	447

Fonte\*: Google Earth, 2009.

Com os dados previamente calculados, calculou-se a radiação solar em atmosfera transparente ( $S_d$  - MJ/m<sup>2</sup>.dia) de acordo com a fórmula 10, a energia solar incidente sem nuvens ( $S_{máx}$  - MJ/m<sup>2</sup>.dia) de acordo com a fórmula 11 e o fator de correção em função da cobertura de nuvens ( $f$  - adimensional) limitado à um máximo de 1, de acordo com a fórmula 12. O valor de  $S_{cte}$  é a constante solar e é igual a 1367 W/m<sup>2</sup> e H é a altitude (m) apresentada na tabela acima.

$$S_d = S_{cte} * \frac{24 * 3600}{\pi} * d_r * (\omega_s * \text{sen}(\varphi) * \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \text{sen}(\omega_s)) \quad (10)$$

$$S_{máx} = (0,75 + 2 * H * 10^{-5}) * S_d \quad (11)$$

$$f = 1,35 * \frac{S_{sup}}{S_{máx}} - 0,35 \quad (12)$$

Em seguida foi calculada a radiação líquida de ondas longas emitida pela superfície ( $L$  - MJ/m<sup>2</sup>) de acordo com a fórmula 13, onde  $\sigma$  é a constante de Stefan–Boltzmann e é igual a  $4,903 \times 10^{-9}$  MJ/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>.dia. Após, foi determinada a radiação líquida na superfície ( $R_L$  - MJ/m<sup>2</sup>.dia), subtraindo  $L$  de  $S_{abs}$  de acordo com a fórmula 14. A pressão ( $P_s$ ), dado original obtido no conjunto de dados, foi convertida de hPa para kPa ( $P_{atm}$ ), e foi utilizada para calcular a constante psicrométrica ( $\gamma$  - kPa/C) de acordo com a fórmula 15. Os dados de velocidade do vento obtidos originalmente apresentam valores vetoriais no sentido Oeste-Leste e Sul-Norte. Estes dados foram utilizados para cálculo do vetor resultante e módulo ( $U_{10}$ ), conforme apresentado na fórmula 16 de acordo com Santana (2014). Em seguida foi convertido para ( $U_2$ ),

a velocidade do vento a 2 metros de altura, conforme a metodologia da FAO e apresentado na fórmula 17. Como última variável, considerou-se o fluxo de calor para o solo ( $G$  – MJ/m<sup>2</sup>.dia) como sendo igual a zero, seguindo recomendação da FAO para estimativa de evapotranspiração de referência diária (ALLEN et al., 1998 e COLLISCHONN, 2015).

$$L = f * \varepsilon * \sigma * (T + 273,2)^4 \quad (13)$$

$$R_L = S_{abs} - L \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{0,665 * (P_{atm})}{1000} \quad (15)$$

$$U_{10} = \sqrt{U_{LO}^2 + U_{NS}^2} \quad (16)$$

$$U_2 = U_{10} * \frac{4.87}{\ln(67,8 * 10 - 5,42)} \quad (17)$$

A partir dos resultados obtidos através das fórmulas descritas acima, calculou-se a evapotranspiração de referência ( $ET_o$  – mm/dia) para cada região de estudo, conforme a equação de Penman-Monteith descrita no método da FAO e representada na equação abaixo,

$$ET_o = \frac{0,408 * \Delta * (R_L - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * U_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * U_2)} \quad (18)$$

onde,  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência (mm/dia);  $R_L$  é a radiação líquida na superfície (MJ/m<sup>2</sup>.dia);  $G$  é o fluxo de calor para o solo (MJ/m<sup>2</sup>.dia);  $\gamma$  é a constante psicométrica (kPa/°C);  $T$  é a temperatura a 2 metros do solo (°C);  $U_2$  é a velocidade do vento a 2 metros do solo;  $e_s$  é a pressão parcial de vapor na saturação (kPa);  $e_a$  é a pressão parcial real de vapor na água (kPa) e  $\Delta$  é a derivada da pressão parcial de vapor na saturação (kPa/°C) (ALLEN et al., 1998).

Através da evapotranspiração de referência, que corresponde a um tipo de vegetação padrão (grama) e bem suprida de água, é possível determinar a evapotranspiração de cultivo

( $ET_c$ ) e a evapotranspiração real de cultivo ( $ET_r$ ). Para a conversão dos valores da  $ET_o$  para a  $ET_c$  e a  $ET_r$ , deve-se avaliar o tipo de vegetação estudado, assim como as condições de disponibilidade de água no solo. Um resumo com dados levantados no referencial teórico é apresentado na Tabela 2 abaixo. Nela, são indicados o clima (de acordo com a classificação de Köppen), o bioma e a cultura de cada uma das quatro regiões.

Tabela 2 – Tabela resumo com clima, bioma e cultura de cada região de estudo.

<b>Locais</b>	<b>Clima*</b>	<b>Bioma**</b>	<b>Cultura***</b>
Oeste da BA	Aw	Cerrado	Soja
Centro do MT	Am e Aw	Cerrado e Amazônia	Soja
Sul de SP	Cfa e Cfb	Mata Atlântica e Cerrado	Soja
Noroeste do RS	Cfa	Mata Atlântica e Pampa	Soja

Fontes: \* Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil (IBGE, 2019).

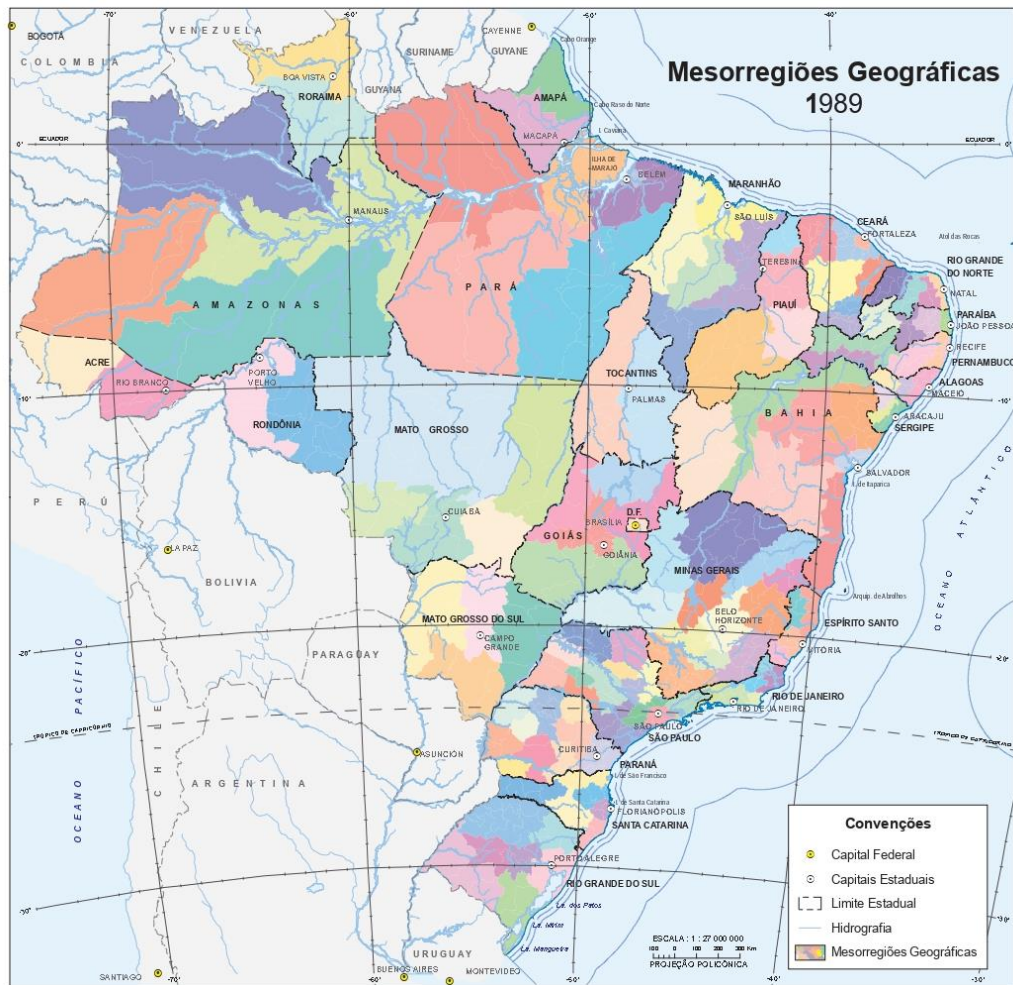
\*\* Köppen's climate classification map for Brazil (ALVARES et.al., 2013).

\*\*\* Produção Agrícola Municipal, (IBGE, 2022).

De acordo com a classificação de Köppen e conforme foi descrito no referencial teórico, as siglas acima significam: Aw – Zona tropical com inverno seco, Cfa – Zona subtropical úmida com verão quente, Cfb - Zona subtropical úmida com verão temperado e Am – Zona tropical de monção.

O levantamento da principal cultura de cada região foi feito através da comparação de área plantada total no ano de 2020, para cada uma das regiões de estudo, utilizando o painel de Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE. Para esta avaliação o site da PAM adota um sistema de mesorregiões elaborada pelo IBGE em 1990, onde a região do oeste da Bahia está representada como Extremo Oeste Baiano, o noroeste do Rio Grande do Sul como Noroeste Rio-Grandense, o sul de São Paulo como Itapetininga (englobando partes de Bauru e Assis) e o centro do Mato Grosso como Norte Mato-grossense (IBGE, 1990). A divisão regional elaborada pelo IBGE pode ser observada na figura 7 abaixo e o levantamento das informações de cultivo através do painel de PAM está apresentado no Anexo A.

Figura 7 - Mesorregiões Geográficas brasileiras de acordo com o IBGE (1989).



Fonte: Divisão do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas (IBGE, 1990).

Observa-se que a soja é o principal tipo de cultivo em todas as regiões analisadas. Quando ela é cultivada nos trópicos possui período de plantio no final do ano, 85 dias de desenvolvimento e chega a uma altura entre 0,5 e 1,0 metro (ALLEN et al., 1998). No entanto, o calendário de cultivo, o rodízio de culturas (safra dupla ou tripla) e o tempo de desenvolvimento da planta variam entre cada local. De acordo com o a metodologia de cálculo da FAO56, o valor do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) varia, para a soja, entre 1,15 durante o desenvolvimento (primeiros 70 dias) e 0,5 no estágio final (últimos 15 dias). Esta variação do coeficiente pode ser calculada através de uma fórmula que leva em consideração o número do dia na temporada de plantio e a altura da planta no estágio analisado, assim como os valores de coeficiente inicial, médio e final tabelados.

Como o período de início de plantio varia para cada local e pode ser influenciado pelas mudanças climáticas às quais se busca analisar aqui, o ideal seria adotar um valor de  $K_c$  único e não variável ( $K_{c\text{máx}}$ ) igual a 1,15, que representa o valor máximo atingido durante o

desenvolvimento da planta (ALLEN et al., 1998 e COLLISCHONN, 2015). Como a cultura é a mesma em todos os locais de estudo e ao adotar o valor de  $K_c$  único todos os resultados apenas seriam multiplicados por um valor fixo, a análise temporal não seria alterada. Portanto, para fins de simplificação, optou-se por desconsiderar o valor de  $K_c$ , adotando como valor da evapotranspiração de cultura o mesmo valor da evapotranspiração de referência, conforme pode ser observado através da fórmula 19 abaixo.

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (19)$$

Por fim, para determinar a evapotranspiração real, considerando a disponibilidade hídrica, multiplica-se  $ET_p$  pelo coeficiente de disponibilidade hídrica ( $K_s$ ). Este coeficiente varia de 0 a 1, sendo que 0 representa escassez e 1 representa boa disponibilidade hídrica (COLLISCHONN, 2015). Entende-se que, quando  $K_s$  está próximo de 1, há o fornecimento de água para a planta e a evapotranspiração real é próxima da de cultura, capacitando o desenvolvimento do cultivo. Considerando que o fator  $K_s$  representa a razão entre a evapotranspiração de cultura e a real, adotou-se que  $K_s$  decaia de forma linear através da redução capacidade de armazenamento de água no solo (ALLEN et al, 1998). Assim, a evapotranspiração real consiste na evapotranspiração de cultura multiplicada pelo armazenamento de água no solo no dia analisado sobre a capacidade de armazenamento de água total, conforme a fórmula 20.

$$ET_r = ET_p * \frac{S_n}{S} \quad (20)$$

Desta forma, calculou-se o valor de evapotranspiração real para cada dia, conforme a metodologia acima. Os valores de armazenamento de água no solo foram obtidos com base no balanço hídrico, descrito a seguir.

### 3.3 CÁLCULO DE BALANÇO HÍDRICO

Para a obtenção dos resultados finais deste estudo, a necessidade ou não de irrigação diária, é necessário calcular o balanço do hídrico do solo, considerando as entradas e saídas de água. As entradas de água podem se dar através da precipitação, orvalho, irrigação, escoamento



superficial e sub-superficial, ascensão capilar, enquanto as saídas ocorrem através da evapotranspiração, evaporação do solo, infiltração, escoamento superficial e sub-superficial. Em geral, vários destes fatores têm dimensão ínfima ou desconhecida e podem ser desconsiderados. Desta forma, com o cálculo de balanço hídrico (BH - mm) pode-se avaliar se as entradas fornecem água suficiente para a evapotranspiração real naquele dia ou se é necessária irrigação para suprimento da demanda.

$$BH = Precip. - ET_r + I_r - Q \quad (21)$$

Inicialmente foi estimado um valor como a capacidade máxima inicial de armazenamento de água no solo, igual a 300 mm, conforme a fórmula 22. Este valor máximo foi atribuído ao dia 1 do ano de 1961 ( $S_1$ ). Do dia 2 em diante, o valor de armazenamento inicial ( $S_n$ ) é definido como igual ao armazenamento final do dia anterior ( $S_{final}$ ), conforme a fórmula 23. Em seguida foi calculado um valor de armazenamento instantâneo ( $S^*$ ), de acordo com a fórmula 24, somando o armazenamento inicial do dia à precipitação e subtraindo a evapotranspiração real. Caso este valor de armazenamento instantâneo seja maior do que o armazenamento inicial máximo (300 mm), a diferença é considerada escoamento de saída (Q), conforme a fórmula 25, podendo ser superficial, sub-superficial ou outro, não sendo necessário definir o formato de saída. Caso seja menor, o escoamento de saída é nulo. Por fim, é calculado o armazenamento final de acordo com a fórmula 26, subtraindo o escoamento do armazenamento intermediário, caso esta subtração seja positiva. Caso seja negativa, o armazenamento final é zero (ocorre quando há grandes períodos de seca).

$$S_1 = 300 \text{ mm} \quad (22)$$

$$S_n = S_{final\ n-1} \quad (23)$$

$$S^* = S_n + Precip. - ET_p \quad (24)$$

$$Q = S_n - S^*, \text{ se } S^* > S_1. \text{ Se } S^* < S_1, = 0. \quad (25)$$

$$S_{final} = S^* - Q \quad (26)$$

Estes valores de  $S_{final}$  são utilizados, em conjunto com  $S_1$  (300 mm) para o cálculo da evapotranspiração real  $ET_r$ , conforme descrito anteriormente. Como espera-se que o cálculo de balanço hídrico seja igual a zero, ou seja, tudo que entra, sai, utiliza-se estes valores para calcular a irrigação necessária para suprir a demanda diária. Desta forma, com base na precipitação diária e no armazenamento de água no solo se obtém a evapotranspiração real. Quanto mais próximas da demanda hídrica estiverem a precipitação e o armazenamento, mais próximo da evapotranspiração de cultura ficará a evapotranspiração real.

Por fim, estipulou-se que a necessidade de irrigação ocorre sempre que o armazenamento de água no solo está abaixo de 280 mm (20 mm a menos do armazenamento máximo). Quando isso ocorre, a irrigação deve suprir toda a deficiência, retornando o armazenamento para 300 mm. Esta abordagem possibilita que sejam utilizados menos dias de irrigação, porém com maior volume a cada aplicação, aproveitando dias de precipitação futura. Ou seja, mesmo que o armazenamento de água no solo esteja abaixo do máximo, pode ser que uma chuva em um ou dois dias no futuro o recarregue, dispensando o uso da irrigação. Assim, a irrigação ( $I_r - mm$ ) é dada pela diferença entre o armazenamento máximo e o armazenamento final. A seguir, segue a fórmula 27 do cálculo de irrigação, apenas quando  $S_{final} < 280$  mm.

$$I_r = S_1 - S_{final} \quad (27)$$

Portanto, a demanda diária de água para irrigação foi calculada considerando a variação de armazenamento de água no solo, influenciada pela evapotranspiração e pela precipitação. Conforme indicam algumas bibliografias, um cálculo simplificado poderia ter sido aplicado, considerando como irrigação apenas a diferença entre a evapotranspiração potencial e a precipitação. No entanto, esta simplificação não levaria em conta a água armazenada no solo de um dia para o outro e poderia sub ou superestimar a necessidade de irrigação em períodos de transição entre épocas de alta e baixa precipitação.

#### 4 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

O principal resultado obtido consiste no volume diário de irrigação necessária para o período de 1961 a 2099 para os quatro modelos e para as quatro regiões analisadas, ou seja, 16 cenários com dados diários de 138 anos (50.370 valores para cada cenário). Com esse dado principal foram desenvolvidas algumas análises para cada um dos 16 cenários.

Inicialmente foi criado um gráfico do volume irrigado por ano ao longo do período de estudo, tanto para o ano inteiro quanto para o período de safra da soja (adotado de outubro a março para todas as regiões). Através deste gráfico é possível observar se há tendência de aumento, estabilidade ou diminuição do volume irrigado ao longo do tempo, assim como avaliar a diferença na previsão dos modelos. Também foi analisado o número de dias irrigados por ano, assim como uma irrigação acumulada mensal a cada década, análise que possibilita avaliar se há mudança no perfil anual de irrigação e possíveis mudanças nas épocas mais e menos irrigadas. Por fim, elaborou-se uma análise comparativa utilizando a distribuição normal da irrigação anual (jan-jan) e de safra (out-mar) entre duas épocas acumulando diversos anos. Entende-se que o período de safra pode variar alguns dias entre uma região e outra, além de estudos indicarem que no futuro o calendário pode ser antecipado, postergado, encurtado ou alongado em função das mudanças climáticas (FONSECA, 2022). Em razão do período de safra ser semelhante para todas as regiões, adotou-se um período único para todas elas.

A análise considera um clima atual, contemplando o período de 1961 a 2021, e um clima futuro, contemplando o período de 2039 a 2099. Para cada período de clima (atual e futuro) foi elaborado um gráfico de caixa (box plot) com medianas, primeiro e terceiro quartis, além das máximas e mínimas. Através destes resultados apresenta-se aqui a comparação entre clima atual (1961-2021) e clima futuro (2039-2099).

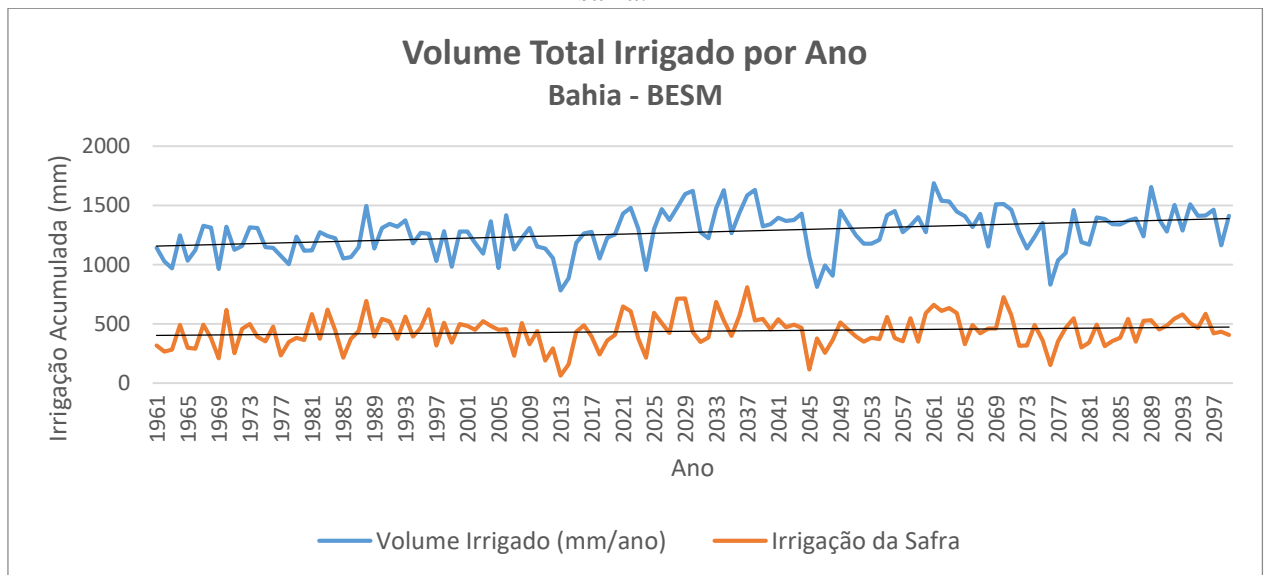
Em função da grande quantidade de cenários e gráficos gerados, a seguir segue um resumo dos principais resultados para cada estado. Optou-se por apresentar apenas os gráficos resumo de caixa (box plot) dos quatro modelos para cada região de estudo. Os gráficos que não são apresentados ao longo do texto podem ser vistos nos apêndices A (oeste da Bahia), B (centro do Mato Grosso), C (sul de São Paulo) e D (noroeste do Rio Grande do Sul).

O primeiro gráfico gerado apresenta a evolução temporal do volume irrigado por ano considerando o ano todo e o período de safra. Este gráfico foi gerado para cada modelo e cada região, e eles podem ser observados nos arquivos em apêndice. Na Bahia, de acordo com a figura 8, a simulação utilizando o modelo Eta-BESM, indicou uma tendência de aumento da irrigação ao longo do tempo, aumentando de uma média aproximada de 1150mm nos anos 60

para quase 1500mm nos anos 2090. Avaliando apenas o período de safra também é possível visualizar um aumento, porém menos acentuado, da irrigação.

As simulações com os modelos CanESM2, HadGEM2-ES e MIROC5 apresentam tendências similares, porém com valores totais variando de um para o outro. Avaliando o número de dias irrigados ao longo do ano também é possível ver uma tendência de aumento, subindo de aproximadamente 50 para 60 dias por ano. O mesmo comportamento é observado nos outros modelos, no entanto, com aumento de aproximadamente 70 para 80 ou 90 dias. Estes gráficos podem ser observados no apêndice A.

Figura 8 - Gráfico temporal do volume irrigado por ano no oeste da Bahia, de acordo com o modelo Eta-BESM indicando crescimento de irrigação tanto para o período anual quanto de safra.



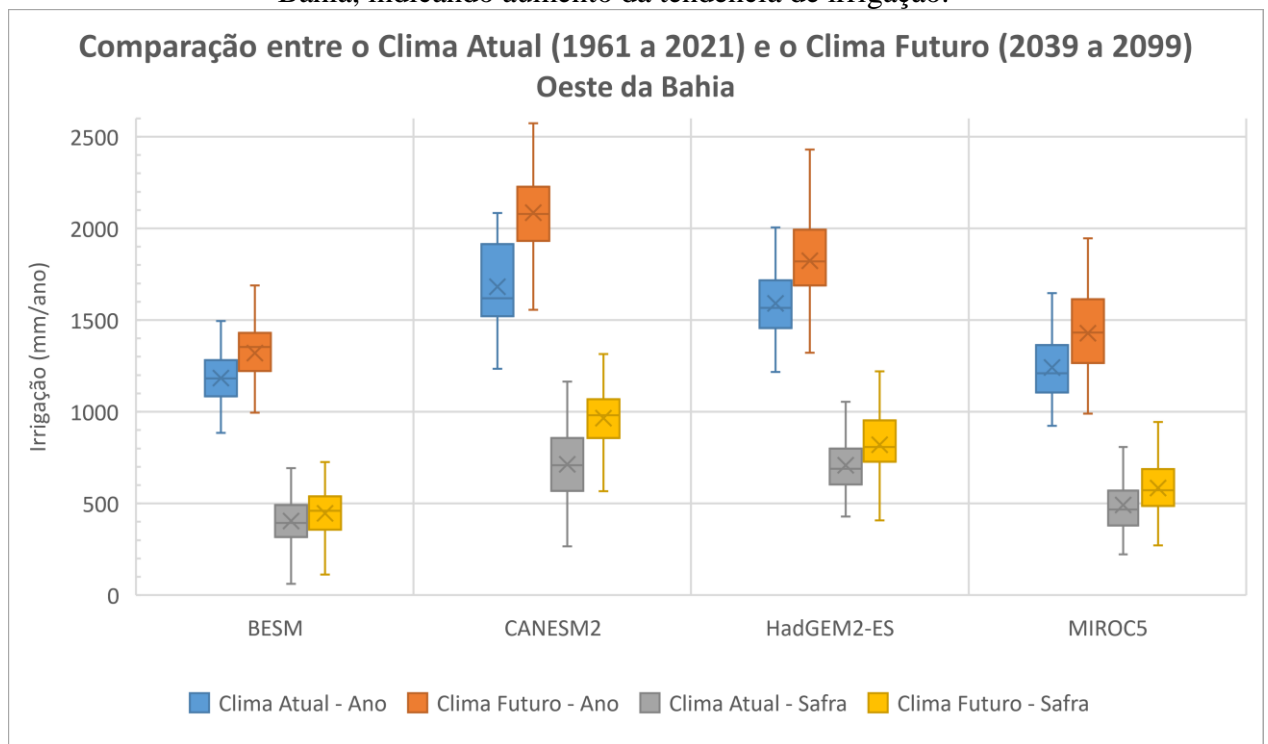
Fonte: o autor, 2022.

Ao avaliar o comportamento anual de irrigação, pode-se ver que não há grandes mudanças de calendário, com período de maior irrigação nos meses de setembro e outubro, e menor irrigação nos meses de fevereiro e março. O mesmo comportamento foi observado nos quatro modelos. Os gráficos de comportamento anual gerados para cada modelo podem ser observados no apêndice A.

Por fim, ao realizar uma comparação global entre o clima atual e o clima futuro para os períodos anuais e de safra, para os quatro modelos, foi gerado um gráfico resumo de caixa, que pode ser observado na figura 9 abaixo. Pelo modelo Eta-BESM, observou-se aumento das médias e medianas tanto ao considerar os valores anuais quanto durante o período da safra. Na avaliação anual o clima futuro apresentou maior variabilidade, com máximos e mínimos mais

distantes, enquanto na avaliação de safra, embora os valores tenham aumentado, a variabilidade se manteve constante. A simulação com o modelo Eta-CANESM2 apresentou os maiores valores, seguida pelo modelo Eta-HadGEM2-ES. Todos os modelos apresentaram aumento de irrigação no clima futuro em relação ao clima atual, tanto para a análise anual quanto para de safra. Ressalta-se, porém, a diferença entre os valores obtidos em cada um deles e a grande variabilidade apresentada no clima futuro de período anual.

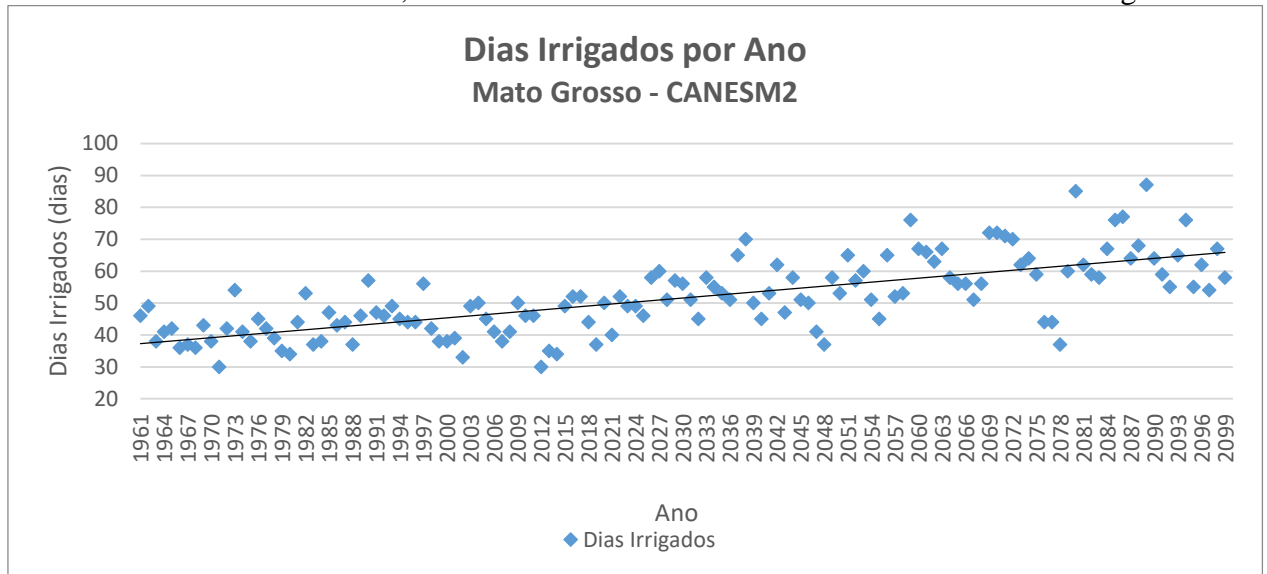
Figura 9 - Gráfico comparativo dos resultados de cada modelo para irrigação no oeste da Bahia, indicando aumento da tendência de irrigação.



Fonte: o autor, 2022.

Para o centro do Mato Grosso, os quatro modelos indicaram aumento do volume irrigado anual ao longo do período analisado. Porém, ao observar apenas o período de safra, são indicados aumento leve ou estabilidade, a depender do modelo. Os valores absolutos obtidos por cada modelo também diferem um do outro. Observando os dias irrigados ao longo do ano, todos os modelos indicaram um aumento relativamente acentuado, com aumento entre 10 a 25 dias, conforme pode ser observado na figura 10 abaixo, gerada pela simulação com o modelo Eta-CANESM2.

Figura 10 - Gráfico temporal dos dias irrigados por ano no centro do Mato Grosso, de acordo com o modelo Eta-CanESM2, indicando tendência de aumento no número de dias irrigados.

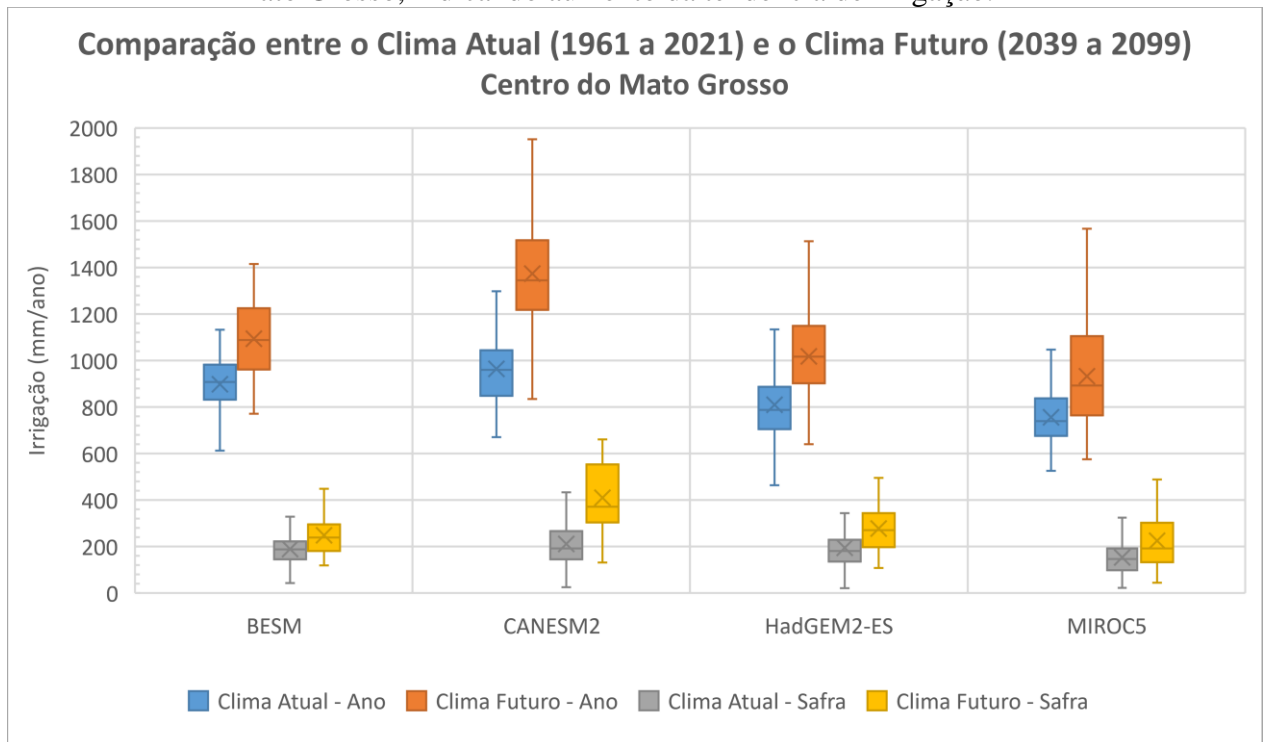


Fonte: o autor, 2022.

Observando o comportamento anual ao longo das décadas de estudo, todos os modelos indicam uma irrigação maior entre os meses de maio e outubro. Os modelos BESM e CANESM2 indicaram curvas mais acentuadas, enquanto os modelos HadGEM2-ES e MIROC5 apresentaram curvas mais brandas, conforme pode ser observado nos gráficos apresentados no apêndice B.

Por fim, comparando os valores anuais e do período de safra para o clima atual e o clima futuro, todos os modelos indicaram aumento das medianas, com intensidade menor no período de safra do que no ano completo. Ao avaliar todo o ano também se observa maior variabilidade entre máximos e mínimos. No período de safra o comportamento é relativamente semelhante, com exceção do modelo MIROC5, que indicou grande alteração no valor máximo e no quartil superior. Novamente, foram observados diferentes valores ao comparar os modelos, porém com medianas do período de safra no clima atual próximo de 200 mm e no período futuro entre 200 e 400 mm para todos os quatro modelos, indicando relativa coerência entre os resultados, conforme pode ser visto na figura 11.

Figura 11 - Gráfico comparativo dos resultados de cada modelo para irrigação no centro do Mato Grosso, indicando aumento da tendência de irrigação.

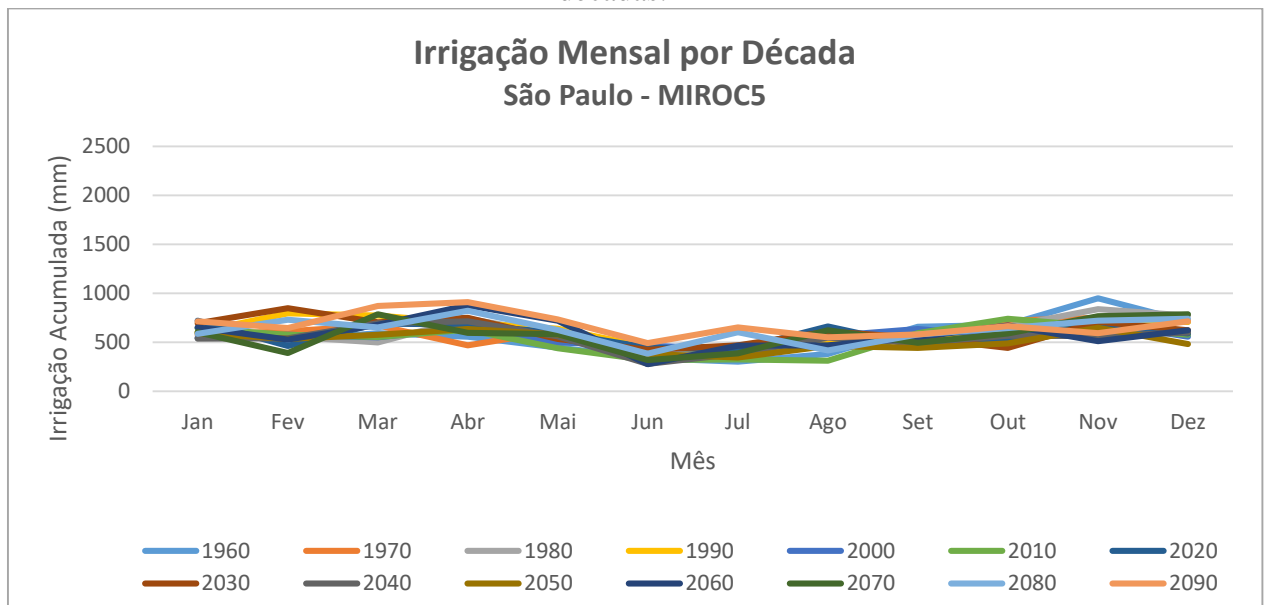


Fonte: o autor, 2022.

O sul do estado de São Paulo apresentou aumento da irrigação acumulada no ano, tanto para o período anual quanto para o período de safra, através dos modelos Eta-CANESM2 e Eta-HadGEM2. No entanto, o modelo Eta-BESM apresentou um aumento muito leve para a avaliação do período anual e de safra, estando próximo de uma estabilidade. O mesmo comportamento foi observado através do modelo Eta-MIROC5, chegando, porém, a apresentar leve queda para o período de safra. Ao observar o número de dias irrigados ao longo do ano, todos os modelos apresentaram aumento, com exceção do modelo Eta-MIROC5 que apresentou estabilidade entre 30 e 35 dias.

Ao avaliar o comportamento anual ao longo das décadas, essa região apresentou uma tendência muito semelhante ao longo do ano, sem estações de alta e de baixa irrigação bem definidas. O modelo Eta-HadGEM2 apresentou curvas com maior variabilidade ao longo das décadas, enquanto o modelo Eta-MIROC5, conforme a figura 12, apresentou um comportamento muito semelhante para todas as décadas, porém com valores inferiores aos outros três modelos.

Figura 12 - Gráfico do comportamento anual por década da irrigação no sul de São Paulo, de acordo com o modelo Eta-MIROC5, indicando similaridade no calendário ao longo das décadas.

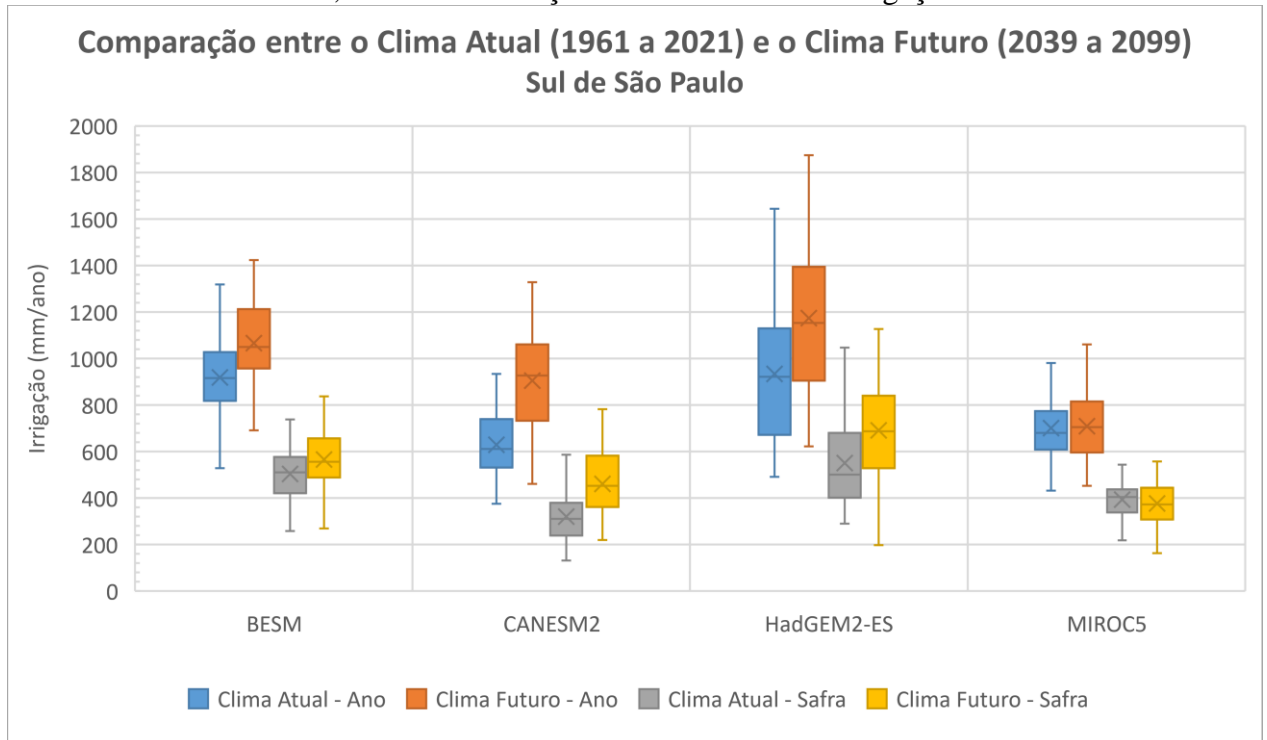


Fonte: o autor, 2022.

Comparando as curvas de variação resumidas nos gráficos de caixa, apresentado na figura 13, dos modelos Eta acoplado ao BESM, CANESM2 e HadGEM2 indicaram aumento da irrigação tanto na observação anual quanto na do período de safra. Em contrapartida, o modelo Eta-MIROC5 indicou estabilidade na comparação entre clima atual e futuro para o período anual e queda para o período de safra. Destaca-se que os valores obtidos através da simulação com Eta-HadGEM2-ES foram maiores do que os obtidos através dos outros modelos. Por fim, observa-se também em todos os modelos, tanto para o período anual quanto para o de safra, aumento da variabilidade dos dados do clima futuro em relação ao clima atual, com máximas, mínimos, primeiro e terceiro quartis com valores mais elevados.



Figura 13 - Gráfico comparativo dos resultados de cada modelo para irrigação no sul de São Paulo, indicando variações nas tendências de irrigação.



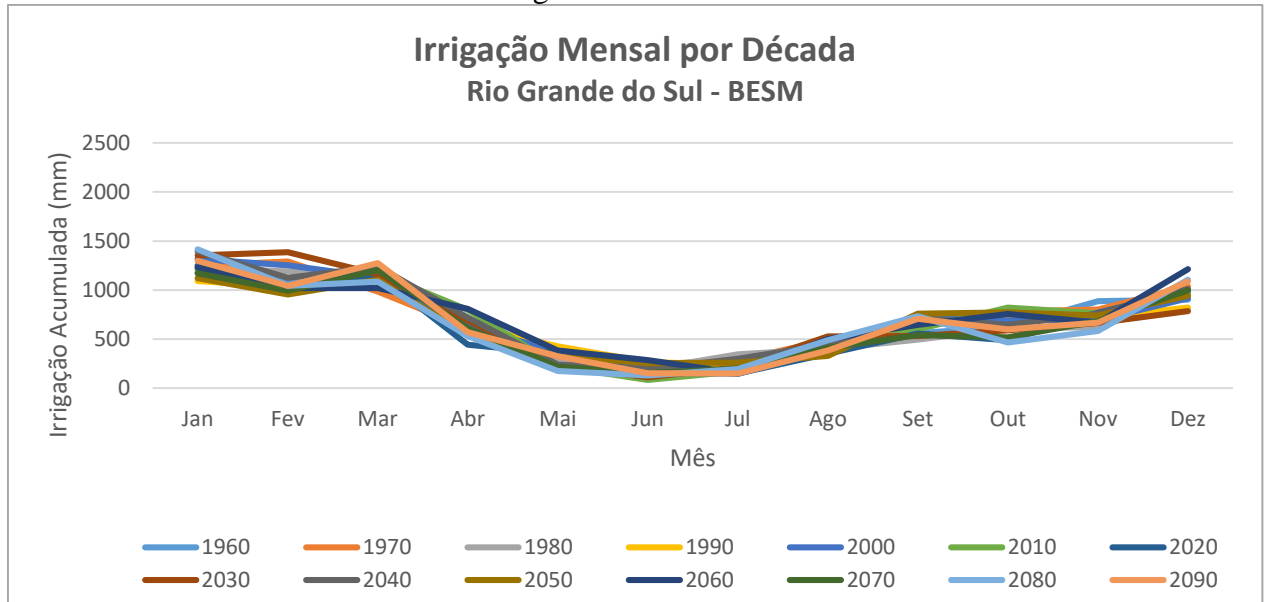
Fonte: o autor, 2022.

Por fim, ao observar o noroeste do Rio Grande do Sul, as simulações apresentaram resultados diferentes dos obtidos para as outras três regiões mais ao norte do país. Observado o comportamento anual, os modelos Eta-BESM, CANESM2 e MIROC5 indicaram uma pequena queda tanto para o volume irrigado anualmente quanto para o irrigado durante a safra, sendo que a queda mais acentuada foi apresentada pelo MIROC5. A exceção cabe ao modelo Eta-HadGEM2 que apresentou um pequeno aumento para ambos. Cabe ressaltar que, para esta região, se observou que as curvas de irrigação de safra e anual ficaram muito próximas, indicando que grande parte da irrigação utilizada durante o ano ocorre justamente durante o período de safra. Avaliando o número de dias irrigados ao longo do ano, o modelo BESM apresentou estabilidade com uma pequena queda, o CANESM2 apresentou estabilidade, o HadGEM2 indicou aumento e o MIROC5 apresentou queda, manifestando um comportamento mais acentuado que nos demais.

Observado o comportamento anual de irrigação ao longo das décadas na figura 14, observa-se que há uma pequena queda no período do meio do ano, contemplando aproximadamente o período de abril a outubro. Nos demais meses, de verão, é observado o período com maior de volume de irrigação. Este comportamento, além de apresentado no

modelo Eta-BESM, foi solidamente observado em todos os modelos, inclusive com pouca variação ao longo das décadas.

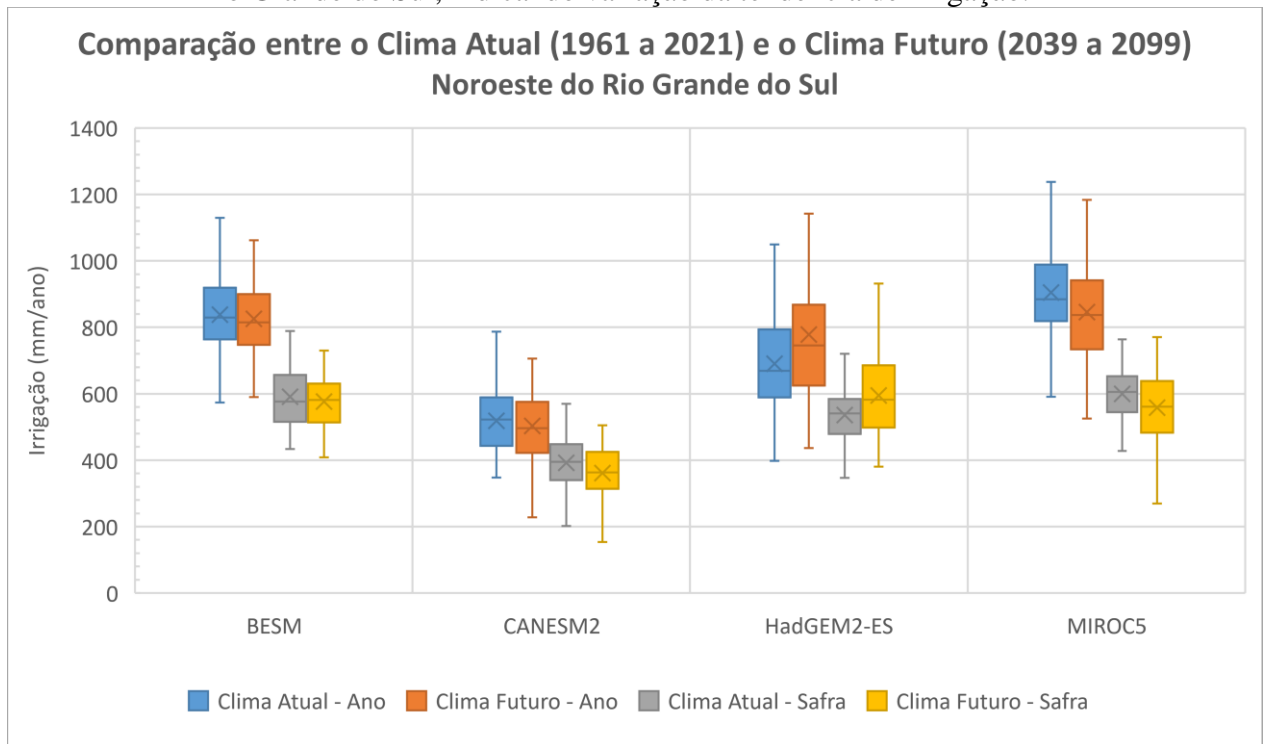
Figura 14 - Gráfico do comportamento anual por década da irrigação no noroeste do Rio Grande do Sul, de acordo com o modelo Eta-BESM, indicando semelhança do calendário ao longo das décadas.



Fonte: o autor, 2022.

Ao comparar o clima atual com o clima futuro através dos gráficos de caixa na figura 15, observa-se uma pequena variação em todos eles. O modelo Eta-BESM apresentou estabilidade tanto para o período anual quanto para o período de safra, com redução da variabilidade em ambos. Já o modelo Eta-CANESM2 apresentou queda para ambos, apresentando valores absolutos com uma diferença relativamente pequena entre o período anual e de safra. Este também foi o modelo que apresentou os menores valores. O modelo HadGEM2 apresentou um comportamento oposto aos demais modelos, com aumento tanto para o período anual quanto para o período de safra, novamente com valores muito próximos entre o clima atual e futuro. Destaca-se também o aumento da variabilidade entre máximos e mínimos no clima futuro. Por fim, o modelo MIROC5 apresentou uma pequena queda na irrigação ao comparar o clima atual com o clima futuro tanto para a observação anual quanto para o período de safra.

Figura 15 - Gráfico comparativo dos resultados de cada modelo para irrigação no noroeste do Rio Grande do Sul, indicando variação da tendência de irrigação.



Tendo em vista que os resultados mais relevantes dizem respeito ao período de safra, que é justamente quando se busca utilizar a irrigação suplementar para o plantio da soja, ao comparar o clima atual com o clima futuro, pode-se resumir os resultados através da tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Quadro resumo de resultados em volume e percentual para o período de safra considerando as quatro regiões e os quatro modelos.

	<b>BESM</b>	<b>CanESM2</b>	<b>HadGEM2-ES</b>	<b>MIROC5</b>
Oeste da BA	+ 42mm (10%)	+ 268mm (38%)	+ 130mm (19%)	+ 106mm (22%)
Centro do MT	+ 51mm (27%)	+ 180mm (94%)	+ 76mm (39%)	+ 46mm (31%)
Sul de SP	+ 56mm (11%)	+ 143mm (46%)	+ 185mm (37%)	- 33mm (8%)
Noroeste do RS	+ 5mm (1%)	- 32mm (8%)	+ 41mm (8%)	- 122mm (20%)

Fonte: o autor, 2022.

Interpretando estes resultados, pode-se observar que a variação em mm para cada região e cada modelo varia consideravelmente. Assim, optou-se por criar uma faixa de escala conforme descrito acima com base na variação percentual, obtendo assim a tabela 4 a seguir.

Através dela é indicado se cada região apresentou aumento leve (até + 25%), aumento acentuado (além de +25%), estabilidade (entre -5% e +5%), queda leve (até -25%) ou queda acentuada (além de -25%) de acordo cada modelo acoplado ao Eta.

Tabela 4 - Quadro resumo de resultados categorizados em faixas para o período de safra considerando as quatro regiões e os quatro modelos.

	<b>BESM</b>	<b>CanESM2</b>	<b>HadGEM2-ES</b>	<b>MIROC5</b>
Oeste da BA	Aumento leve	Aumento acentuado	Aumento leve	Aumento leve
Centro do MT	Aumento acentuado	Aumento acentuado	Aumento acentuado	Aumento acentuado
Sul de SP	Aumento leve	Aumento acentuado	Aumento acentuado	Queda leve
Noroeste do RS	Estabilidade	Queda leve	Aumento leve	Queda leve

Fonte: o autor, 2022.

O método escolhido possibilitou obter resultados interessantes, mas cabe ressaltar algumas observações e limitações do estudo. Inicialmente, como descrito na metodologia, diversas simplificações foram feitas como a escolha de um Kc único e igual a 1, o período de safra de outubro a março e o balanço hídrico considerando a precipitação, a evapotranspiração e o armazenamento de água no solo. Um melhor nível de detalhe poderia ter sido obtido ao adotar um calendário preciso da cultura estudada, com Kc variável ao longo do seu crescimento seguindo a metodologia indicada no Paper56. Além disso, se poderia estudar de forma mais aprofundada o solo de cada local adotando cálculos de armazenamento, sem adotar um armazenamento padrão igual a 300 mm, pois ele pode se apresentar superdimensionado. Como mencionado ao longo do texto, entende-se que estas simplificações não alteram significativamente os resultados, mas uma maior confiabilidade poderia ser obtida com um aprofundamento da metodologia.

Também é importante ressaltar que não foi aplicada qualquer metodologia estatística para avaliar a significância dos resultados. Adotar uma análise estatística permitiria afirmar se os resultados obtidos apresentam uma relevância significativa para cada local. Além disso, se poderia avaliar a semelhança e divergência entre os modelos, indicando quais deles apresentam resultados mais próximos ou divergentes. Isso é interessante para concluir qual modelo apresenta os melhores resultados para cada região, análise não desenvolvida neste trabalho.

Por fim, como este trabalho calcula a irrigação através de dados obtidos dos modelos climáticos, há incertezas associadas aos próprios dados de entrada oriundos destes modelos, assim como as que foram impostas através da metodologia adotada e as simplificações impostas. Assim, os dados não são absolutos e frutos de observações, mas sim aproximações físicas e matemáticas proporcionadas pelo método científico.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados obtidos para o período de safra entre os climas atual e futuro descritos acima, conclui-se que o oeste da Bahia deve enfrentar um aumento da demanda hídrica por irrigação de acordo com todos os modelos abordados. Os modelos onde o Eta é associado ao BESM, HadGEM2-ES e MIROC5 indicam aumento leve, enquanto o modelo CanESM2 indica aumento acentuado. Para o centro do estado do Mato Grosso conclui-se que todos os modelos indicaram aumento acentuado da demanda hídrica por irrigação.

Já para o sul de São Paulo e noroeste do Rio Grande do Sul, os modelos apresentaram uma maior divergência entre os resultados obtidos, podendo indicar maior similaridade e capacidade de simulação dos modelos para a metade norte do país. O sul de São Paulo deve enfrentar um aumento de irrigação, variando levemente, de acordo com o modelo Eta-BESM, e acentuadamente, de acordo com os modelos Eta- CanESM2 e HadGEM2-ES. Cabe destacar aqui que o modelo Eta-MIROC5 foi o único que indicou queda leve da irrigação. Por fim, o noroeste do Rio Grande do Sul apresenta, em geral, um comportamento de estabilidade, tendo em vista que os modelos apresentam queda e aumento leves, além da própria estabilidade. Aqui destaca-se a diferença dos resultados absolutos entre todos os modelos, mas com todos eles apresentando pouca variabilidade entre o clima atual e futuro na região.

Entende-se que o objetivo deste estudo de comparar os impactos das mudanças climáticas na agricultura em quatro regiões brasileiras foi plenamente atingido. O estudo demonstrou diferentes variações para cada local, indicando aumento da necessidade de irrigação nas regiões do centro do Mato Grosso, no oeste da Bahia e no sul de São Paulo. Já no noroeste do Rio Grande do Sul observa-se que o resultado indica estabilidade. Verifica-se também que, para os quatro modelos, observou-se três comportamentos diferentes, indicando que mais análises futuras podem fornecer resultados mais sólidos para esta região.

Tendo em vista que este trabalho adotou um cenário de mudanças climáticas relativamente conservador, o RCP4.5, sugere-se que, no futuro, a metodologia seja refeita para outros cenários, como RCP6.0 e RCP8.5. Essa análise permitirá avaliar essas alterações de irrigação sob influência de um cenário mais intenso de mudanças climáticas.

Embora os mesmos comportamentos gerais tenham sido identificados nos quatro diferentes modelos climáticos estudados, observa-se que os valores absolutos e intensidades variam de um para o outro. Assim, é recomendável realizar uma análise a respeito similaridade entre os modelos, estatísticas gerais e quais modelos geram resultados mais confiáveis para cada região.

Para aprofundar as análises derivadas deste estudo, também se sugere o desenvolvimento de novas pesquisas buscando identificar quais fatores dos dados de entrada (variáveis) mais influenciam nos resultados obtidos. Essa análise permitirá encontrar possíveis simplificações no desenvolvimento deste tipo de estudo.

Por fim, entende-se que a metodologia aplicada e desenvolvida apresentou resultados interessantes sob a perspectiva do entendimento dos impactos das mudanças climáticas na agricultura. Ela se apresenta como uma boa ferramenta de análise do impacto das mudanças climáticas na irrigação e pode ser replicada para outras regiões do país.

## **RERERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALLEN, R. G. *et al.* Crop Evapotranspiration: (guidelines for computing crop water requirements). **FAO Irrigation and Drainage Paper**, Roma, p. 1-300, 1998.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 5 jul. 2022.

ANA. **Atlas Irrigação: Uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil), 2021. p. 1-130.

ÁVILA, V. S. D. Balanço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e feijão submetidos à irrigação deficitária no sul do Brasil: Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola). **Universidade Federal de Santa Maria**, Santa Maria, p. 1-89, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7617/AVILA%2c%20VIVIANE%20SCHONS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 ago. 2022.

BATISTELLA, M. *et al.* Monitoramento da Expansão Agropecuária na Região Oeste da Bahia. **Embrapa Monitoramento por Satélite**, Campinas, p. 1-39, 2002. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/16804/1/d20babndes.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

BESM. **Brazilian Earth System Model**. Disponível em: <http://www.inpe.br/besm/>. Acesso em: 5 ago. 2022.

BONETTI, I. *et al.* **Radiografia da Agropecuária Gaúcha**: 2020. 1. ed. Porto Alegre: Departamento de Políticas Agrícolas e Desenvolvimento Rural, 2021. p. 1-39.

CARDOSO, I. P. Impactos das mudanças climáticas sobre as demandas de água para irrigação de culturas de sequeiro na região Sul e Campanha do Rio Grande do Sul: Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais). **Universidade Federal de Pelotas**, Pelotas, p. 1-196, 2020. Disponível em: [http://guaiaca.ufpel.edu.br/bitstream/prefix/7525/1/Dissertacao\\_Iulli\\_Pitone\\_Cardoso.pdf](http://guaiaca.ufpel.edu.br/bitstream/prefix/7525/1/Dissertacao_Iulli_Pitone_Cardoso.pdf). Acesso em: 15 jul. 2022.

CHOU, S. C. *et al.* Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, online, v. 3, n. 5, p. 512-525, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>. Acesso em: 12 jul. 2022.

CHOU, S. C. *et al.* Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, online, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>. Acesso em: 12 jul. 2022.

CHOU, S. C. Modelo Regional ETA. **Climanalise**, São José dos Campos, p. 1-5, 1996. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/27.html>. Acesso em: 12 jul. 2022.

COLLINS, W. J. *et al.* Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, online, v. 4, n. 4, p. 1051-1075, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>. Acesso em: 15 jul. 2022.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F.; **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: ABRHidro, 2015.

COMMAR, L. F. S. A. Avaliação da previsão climática do início da estação chuvosa no oeste da Bahia: Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada). **Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa - MG, p. 1-62, 2020. Disponível em:

<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/27722/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

CORDOVA, C.; Produção de sementes de soja na região do extremo oeste da Bahia: Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes). **Universidade Federal de Pelotas**, Pelotas, v. 1, n. 1, p. 1-47, 2017. Disponível em:

[http://www.repositorio.ufpel.edu.br/bitstream/prefix/4461/1/dissertacao\\_celso\\_cordova.pdf](http://www.repositorio.ufpel.edu.br/bitstream/prefix/4461/1/dissertacao_celso_cordova.pdf). Acesso em: 30 jun. 2022.

EMBRAPA. **Soja em números (safra 2020/21)**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 25 jul. 2022.

EMBRAPA. **Visão 2030: O Futuro da Agricultura Brasileira**. 1. ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2018. p. 1-212.

FEIX, R. D.; JÚNIOR, S. L.; BORGES, B. K. Painel do Agronegócio do Rio Grande do Sul — 2021. **Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão**, Porto Alegre, p. 1-60, 2021. Disponível em: <https://dee.rs.gov.br/upload/arquivos/202206/29144608-painel-do-agronegocio-2021-sem-capa.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2022.

FERREIRA, A. B. R. *et al.* O agronegócio no Brasil: uma breve revisão histórica e conceitual. **Revista Interdisciplinária de Estudos Agrários**, online, v. 1, n. 50, p. 1-26, 2019. Disponível em: <https://www.ciea.com.ar/web/wp-content/uploads/2019/12/Barbosa.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2022.



FERREIRA, A. S. *et al.* **Agricultura e balanço hídrico**: Relatório técnico de monitoramento 2001. 1. ed. Campinas: EMBRABA, 2001. p. 1-30.

FIRETTI, R.; PINATTI, E.; BONACELLI, M. B. M. Especialização produtiva da agropecuária em diferentes regiões do estado de São Paulo: Ensaio para identificação e caracterização de sistemas locais de produção e inovação agrícola. **1º Encontro da Nacional de Economia Industrial e Inovação**, Araraquara, v. 3, n. 4, p. 463-479, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5151/engpro-lenei-027>. Acesso em: 5 jul. 2022.

FONSECA, H. P. Datas de plantio e início da estação chuvosa no Oeste da Bahia no período de 2001 a 2019: Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada). **Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa, p. 1-61, 2021. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/28201/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

FONSECA, H.P.; PIRES, G.F.; BRUMATTI, L.M. Spatial and Temporal Evolution of Sowing and the Onset of the Rainy Season in a Region of Large Agricultural Expansion in Brazil. **Agronomy**, 2022, 12, 1679. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071679>

FONTOLAN, M. R. Modelos Climáticos ETA-HADGEM2-ES e ETA-MIROC5 no Estudo de Eventos Extremos no Estado de São Paulo: Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical). **Instituto Agrônomo**, Caminas, v. 1, n. 1, p. 1-74, 2019. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstitutoposgraduacao/repositorio/storage/pb169817.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2022.

GOOGLE EARTH. **Google Earth**. Disponível em: <http://earth.google.com/>. Acesso em: 20 ago. 2022.

GOVERNMENT OF CANADA. **CanESM2 predictors: CMIP5 experiments**. Disponível em: <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2>. Acesso em: 6 ago. 2022.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Resolução SMA nº 146. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2017. Disponível em: <http://arquivo.ambiente.sp.gov.br/legislacao/2017/11/resolucao-sma-146-2017.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2022.

HIRAKURI, M. H. *et al.* **Diagnóstico da Produção de Soja na Macrorregião Sojícola 1: DOCUMENTOS 423**. 1. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2019. p. 1-115.

HOUGHTON, J. **Global Warming: The Complete Briefing**. 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. p. 1-458.

HOUGHTON, J.; CALLANDER, B. A.; VARNEY, S. K. **Climate Change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 1-220.

IBGE. **Divisão do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Geografia, 1990. p. 1-137.

IBGE. **Biomass e Sistema Costeiro-Marinheiro do Brasil: Compatível com a escala 1:250 000**. 45. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. p. 1-168.

IBGE. **LSPA - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/>. Acesso em: 30 jun. 2022.

IBGE. **Mapa de Biomass e Sistema Costeiro-Marinheiro do Brasil**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: [https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/estudos\\_ambientais/biomass/mapas/biomass\\_e\\_sistema\\_costeiro\\_marinho\\_250mil.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/estudos_ambientais/biomass/mapas/biomass_e_sistema_costeiro_marinho_250mil.pdf). Acesso em: 30 jun. 2022.

IBGE. **Mapa de Clima do Brasil**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2002. Disponível em: [http://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map\\_BR\\_clima\\_2002.pdf](http://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf). Acesso em: 30 jun. 2022.

IBGE. **Portal de Mapas**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1990. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa222455>. Acesso em: 9 jul. 2022.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 8 jul. 2022.

IEA. **Estatísticas da Produção Paulista**. Instituto de Economia Agrícola, 2022. Disponível em: [http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod\\_sis=1&idioma=1](http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1). Acesso em: 9 jul. 2022.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. 1. ed. Genebra: IPCC, 2014. p. 1-151.

IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**: Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1. ed. Genebra: IPCC, 2022. p. 1-2913.

IPCC. **The Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 10 jul. 2022.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M; ADAMUCHIO, J. Funções de estimativa do armazenamento de água no solo sob diferentes níveis de capacidade de água disponível. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 3, p. 1-9, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i3a5552>. Acesso em: 5 ago. 2022.

MAPA. **Projeções do Agronegócio**: Brasil 2019/20 a 2029/30 Projeções de Longo Prazo. 11. ed. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2020. p. 1-102.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. **REVISTA USP**, São Paulo, v. 103, n. 1, p. 25-32, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i103p25-32>. Acesso em: 30 jul. 2022.

MEINSHAUSEN, M. *et al.* Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. **Nature**, online, v. 458, n. 1, p. 1158-1162, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature08017>. Acesso em: 10 jul. 2022.

MENKE *et al.* Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no Município de Luis Eduardo Magalhães (BA – Brasil). **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 21, n. 3, p. 315-326, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/cxPVMxvZhX3mscQ9363KxD/?lang=pt>. Acesso em: 30 jun. 2022.

MET OFFICE, 2022. **HadGEM2 family: Met Office climate prediction model**. Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem2>. Acesso em: 7 ago. 2022.

PESSOA, M. L. Clima do RS. **Atlas FEE**, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <http://atlas.fee.tche.br/rio-grande-do-sul/socioambiental/clima/>. Acesso em: 4 jul. 2022.

PROJETA (CPTEC/INPE). **Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo ETA**. Disponível em: <https://projeta.cptec.inpe.br/#/dashboard>. Acesso em: 2 ago. 2022.

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. D. S. Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. **REVISTA USP**, São Paulo, v. 103, n. 1, p. 41-54, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i103p41-54>. Acesso em: 10 jul. 2022.

SANTANA, L. V. R. Análise do comportamento da velocidade do vento na região nordeste do Brasil utilizando dados da ERA-40. **Universidade Federal Rural de Pernambuco**, Recife, p. 1-59, 2014. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede/bitstream/tede2/5146/2/Leda%20Valeria%20Ramos%20Santana.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2022.

SANTOS, P. S.; SANTOS, C. A. P. D. O Oeste da Bahia e o sudoeste goiano: transformações no bioma Cerrado. **Revista Entre-Lugar**, Dourados, v. 6, n. 11, p. 152-167, 2015. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/entre-lugar/article/view/5159>. Acesso em: 30 jun. 2022.

SCHELLNHUBER, H. J. *et al.* **Avoiding Dangerous Climate Change**. 1. ed. Cambridge, EUA: Cambridge University Press, 2006. p. 1-406.

STEFFEN, W.; CRUTZEN, P. J.; MCNEILL, J. R., The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, Stockholm, v. 38, n. 8, p. 614-621, 2007. Disponível em: [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[614:TAAHNO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2). Acesso em: 10 jul. 2022.

SULZBACHER, A. W., A estrutura produtiva agrícola e pecuária no Rio Grande do Sul: Natureza, ocupação e políticas de desenvolvimento. **XXI Encontro Nacional de Geografia Agrária**, Uberlândia, p. 1-22, 2012. Disponível em: [http://www.lagea.ig.ufu.br/xx1enga/anais\\_enga\\_2012/eixos/1333\\_1.pdf](http://www.lagea.ig.ufu.br/xx1enga/anais_enga_2012/eixos/1333_1.pdf). Acesso em: 1 jul. 2022.

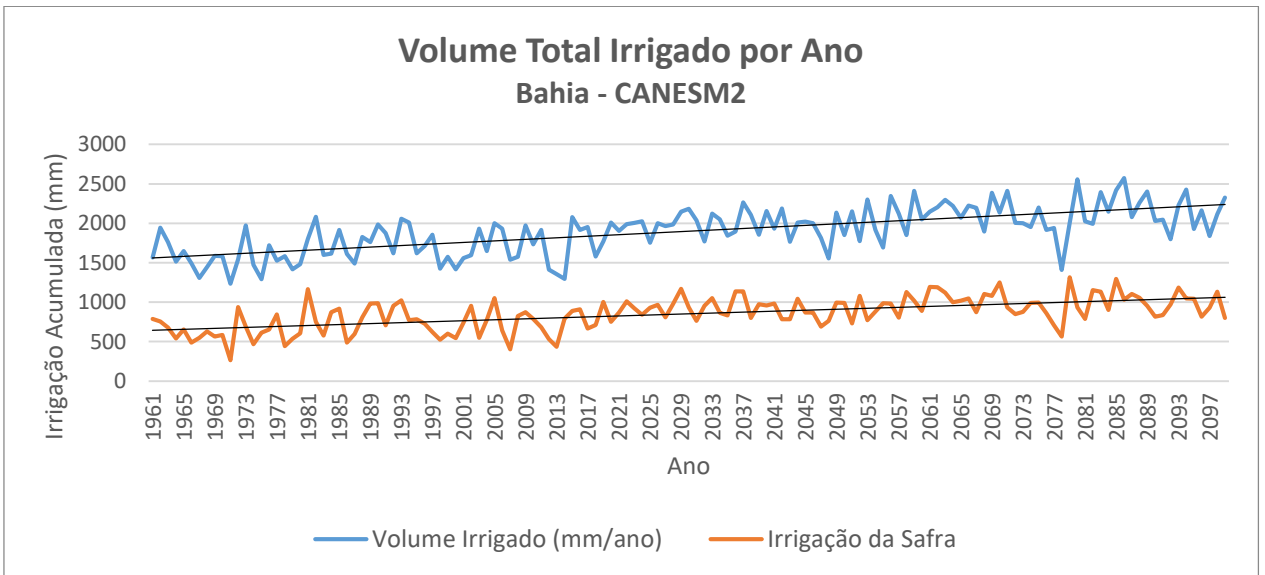
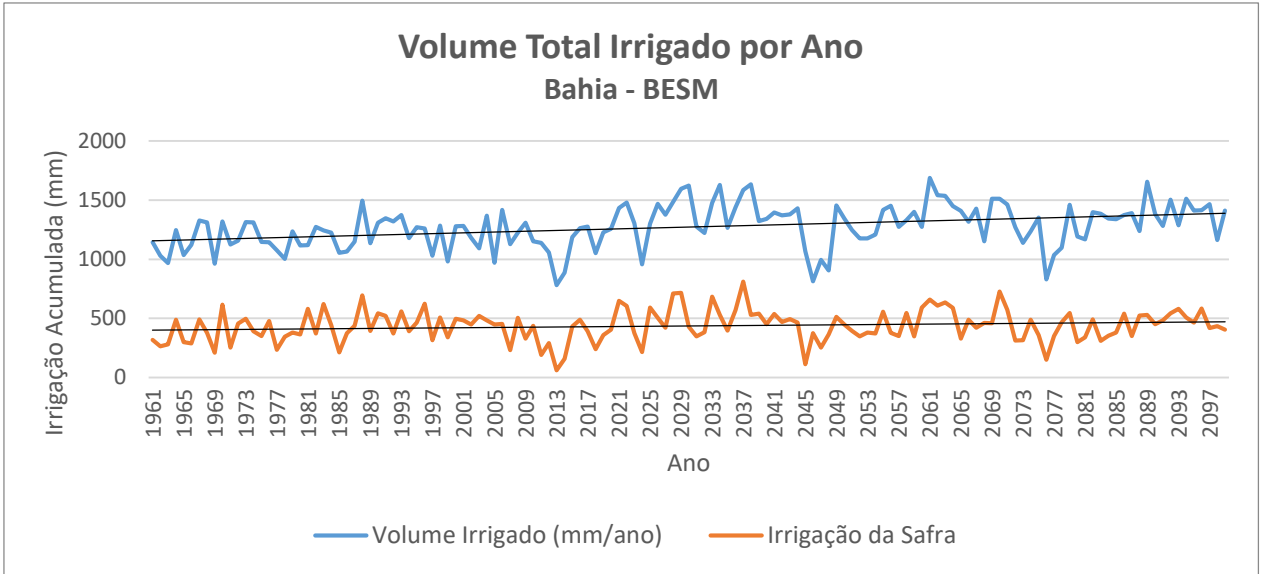
TSUNECHIRO, A. Avanço da soja e recuo do feijão no Sudoeste Paulista. **Instituto de Economia Agrícola**. Governo do Estado de São Paulo. São Paulo, 2004. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=1239>. Acesso em: 6 jul. 2022.

TSUNECHIRO, A.; COELHO, P. J.; CASER, D. V., Valor da Produção Agropecuária por Pólo Regional, Estado de São Paulo: 2007. **Análises e indicadores do agronegócio**, São Paulo - SP, v. 3, n. 7, p. 1-5, 2008. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/ftpiea/AIA/AIA-60-2008.pdf>. Acesso em: 6 jul. 2022.

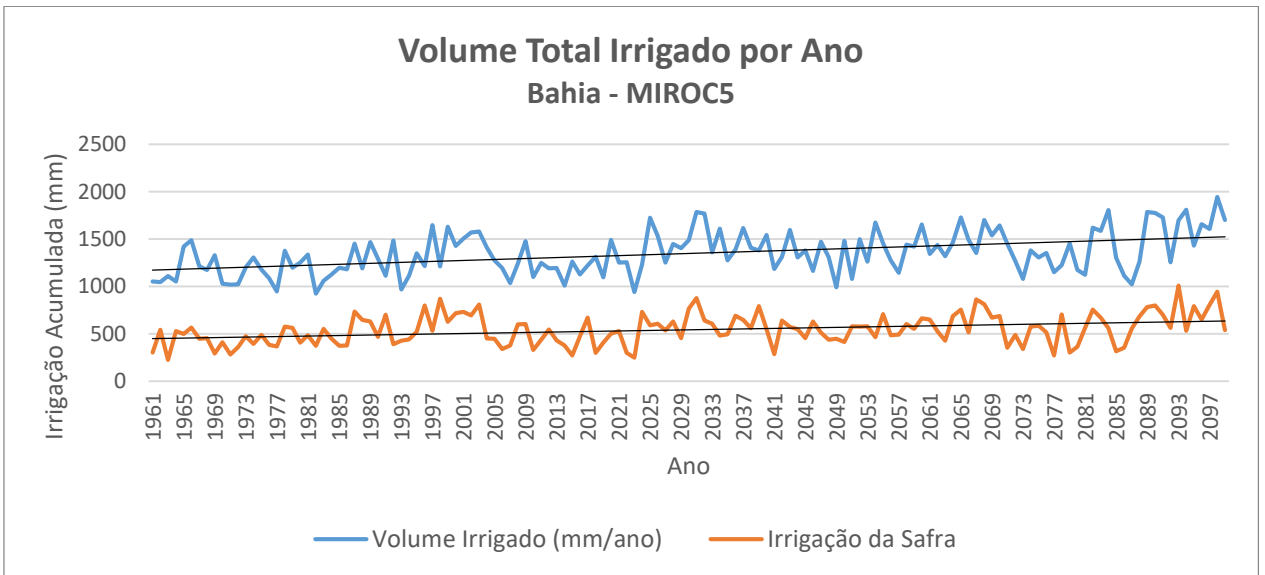
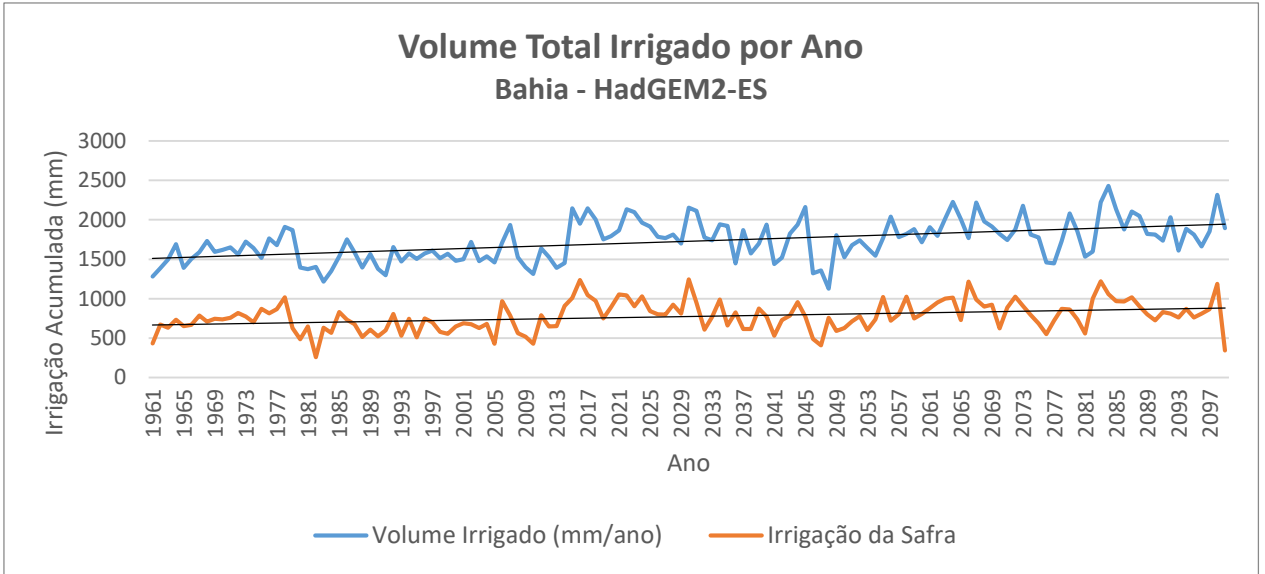
VON DENTZ, E. Produção agrícola no estado do Mato Grosso e a relação entre o agronegócio e as cidades: o caso de Lucas do Rio Verde e Sorriso. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 13, n. 2, p. 165-186, 2019.

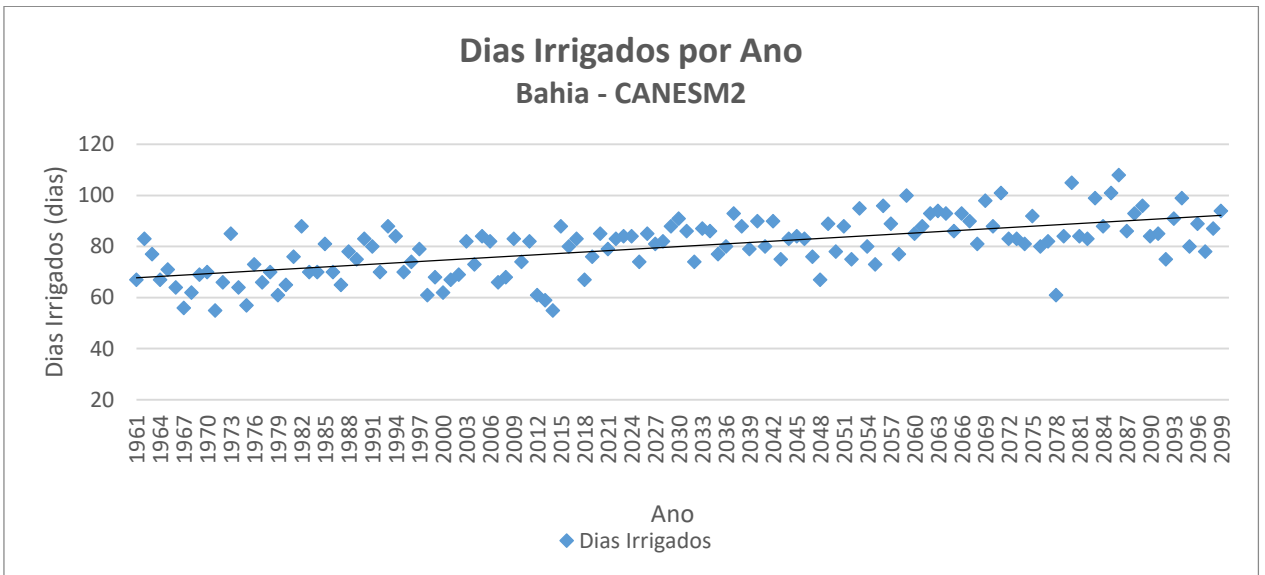
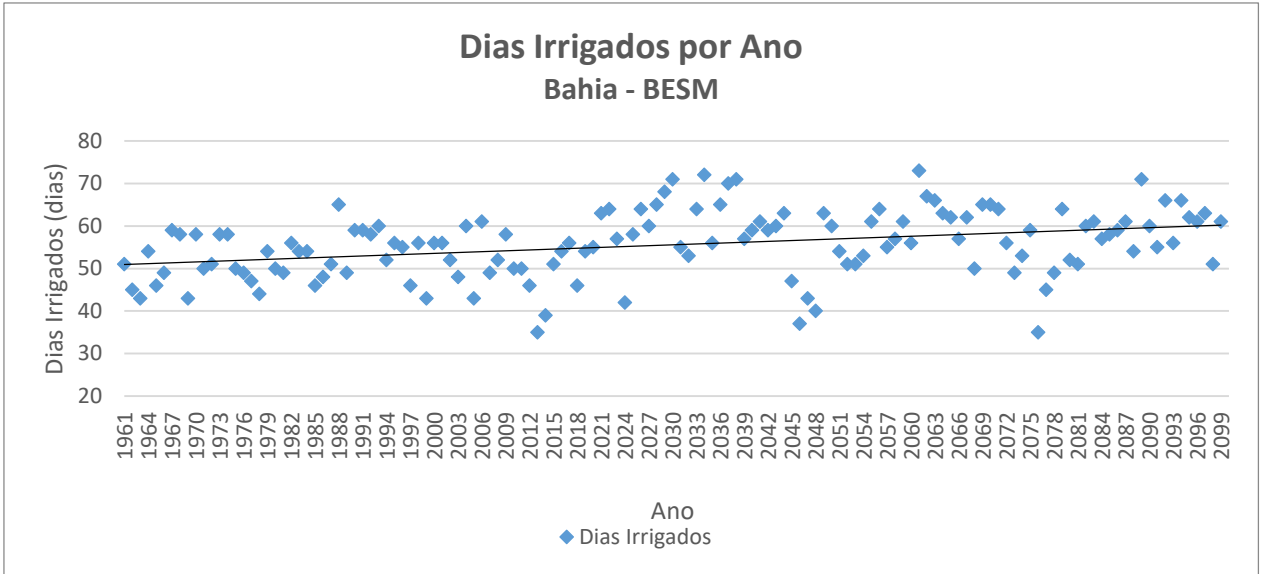
WELCH, D. J. *et al.* **Implications of climate change on fisheries resources of northern Australia**: Part 1: Vulnerability assessment and adaptation options, 1. ed. Queensland: James Cook University, 2014. p. 1-234.

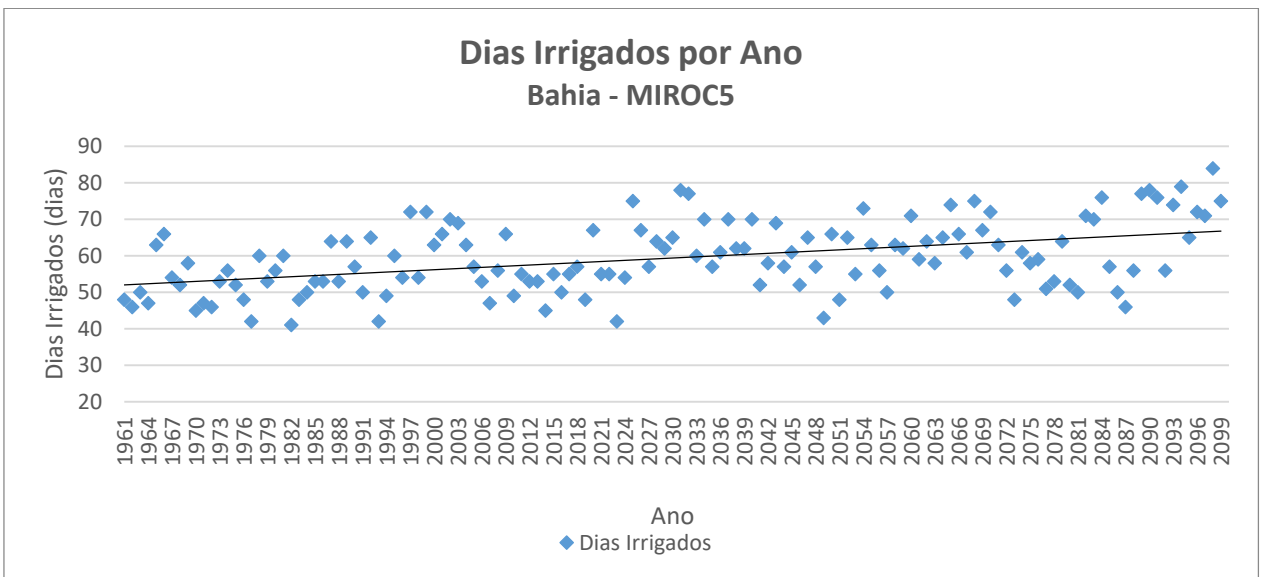
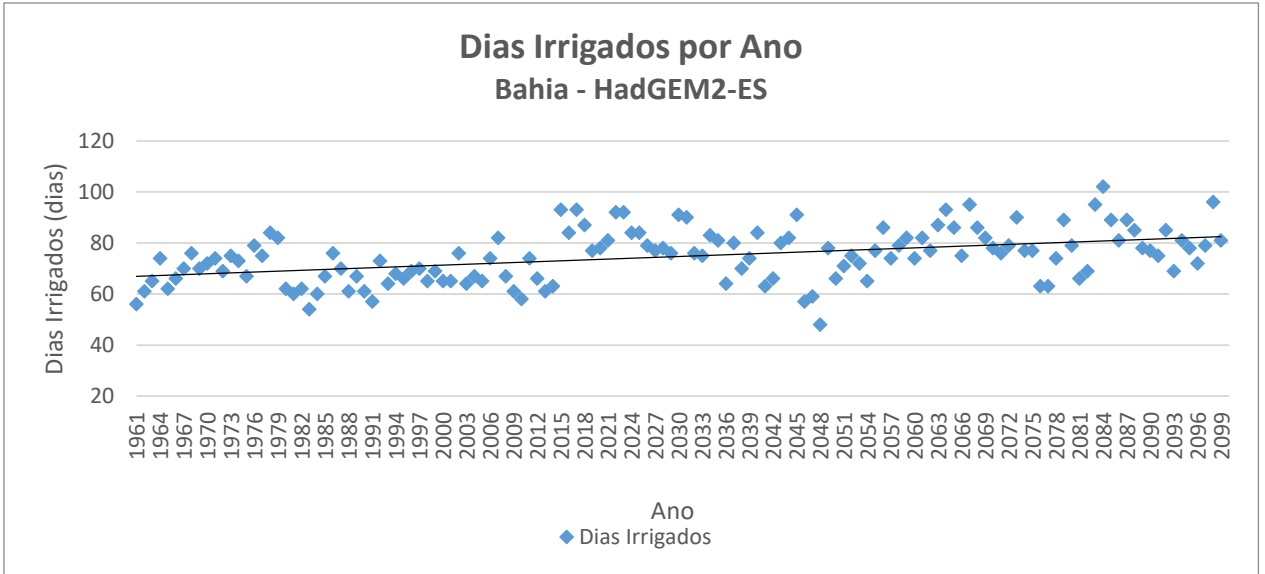
**APÊNDICE A – RESULTADOS GRÁFICOS PARA O OESTE DA BAHIA**

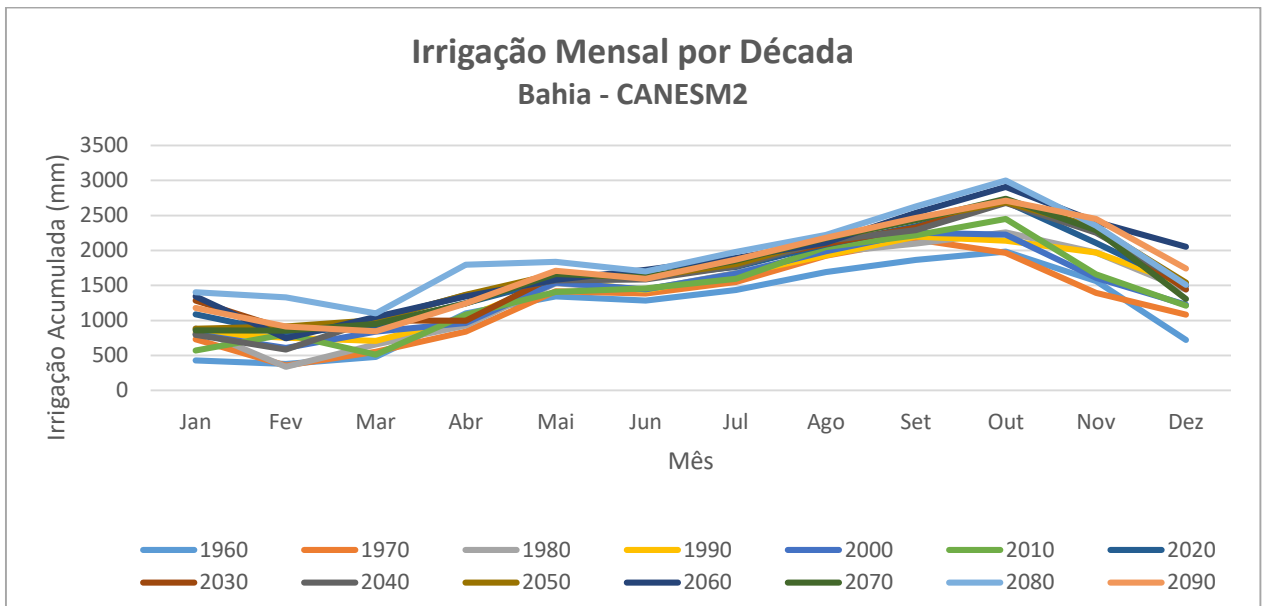
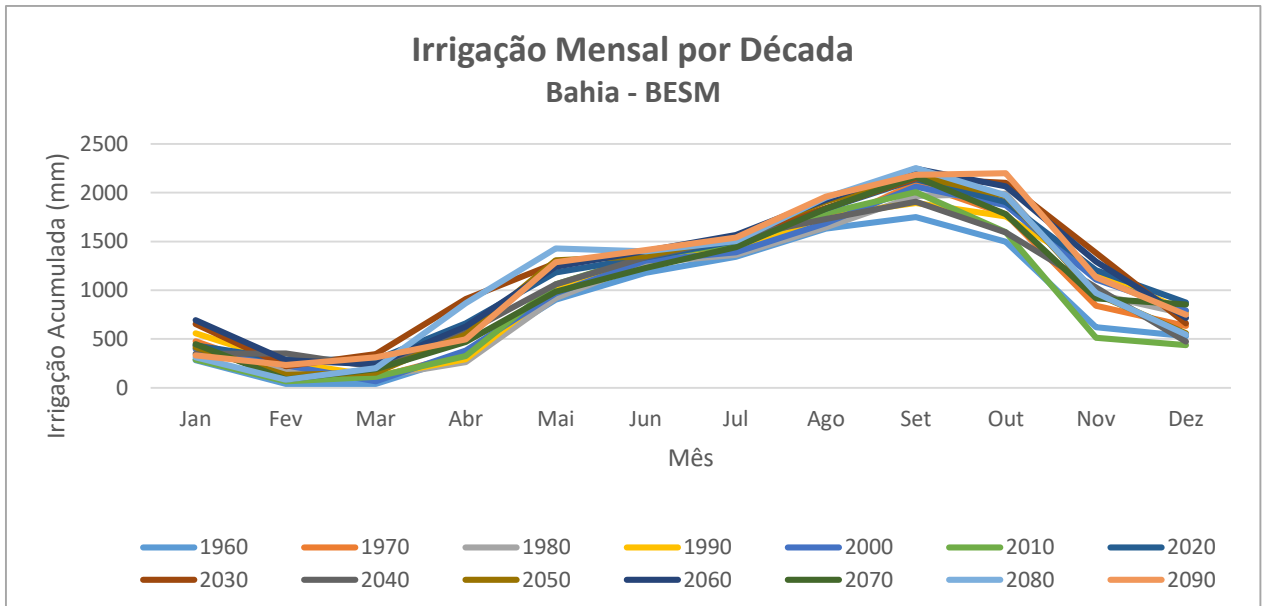






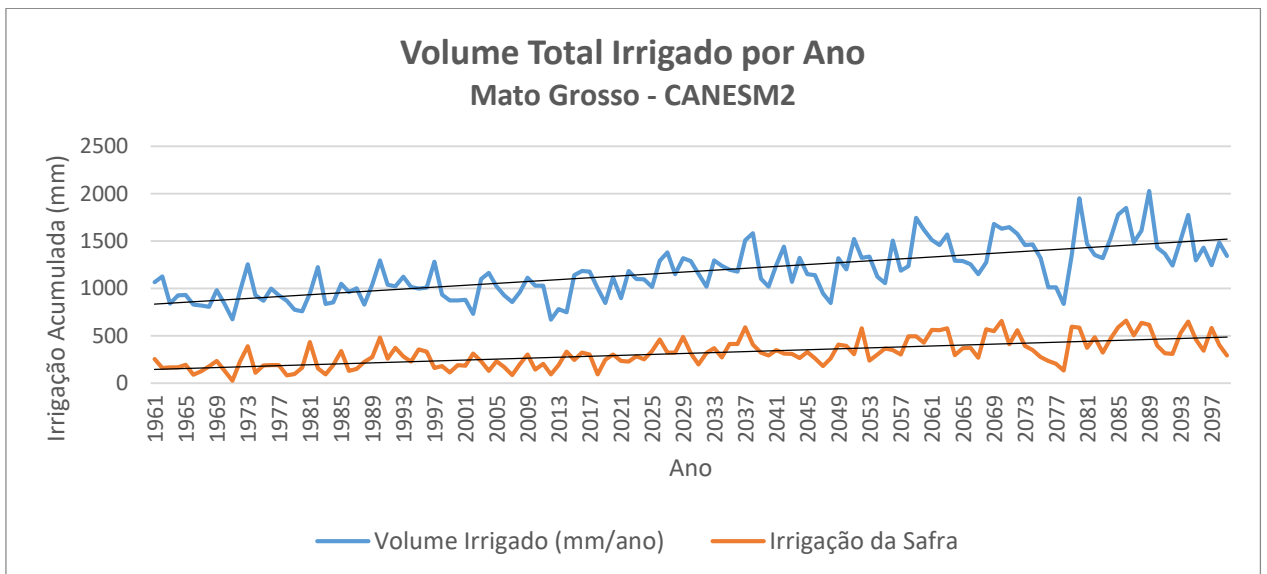
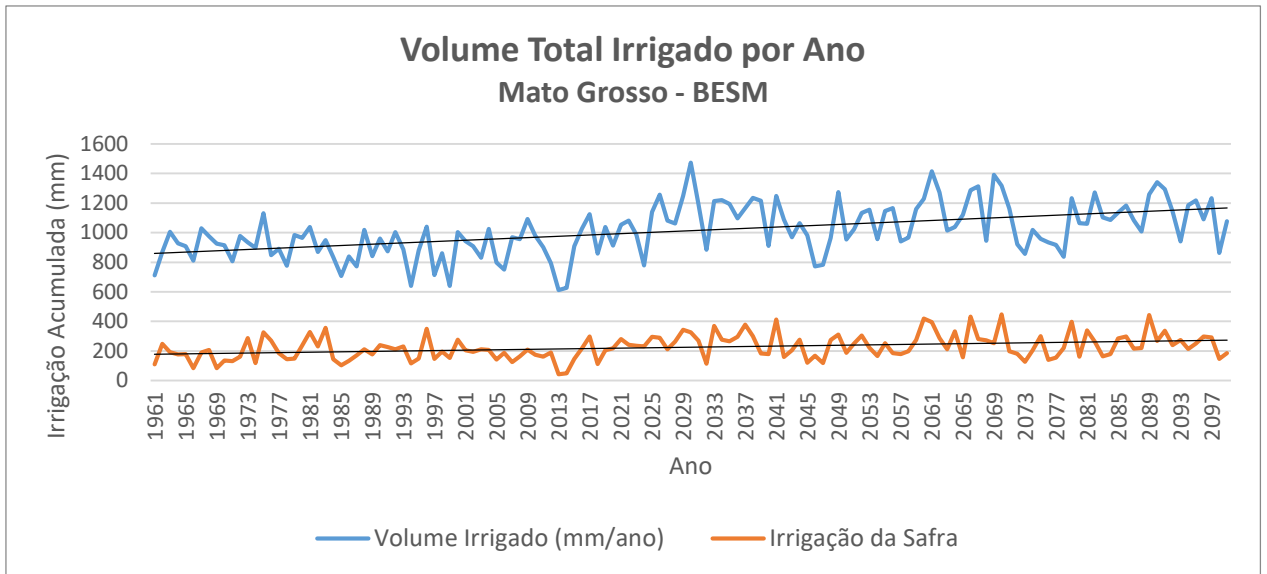


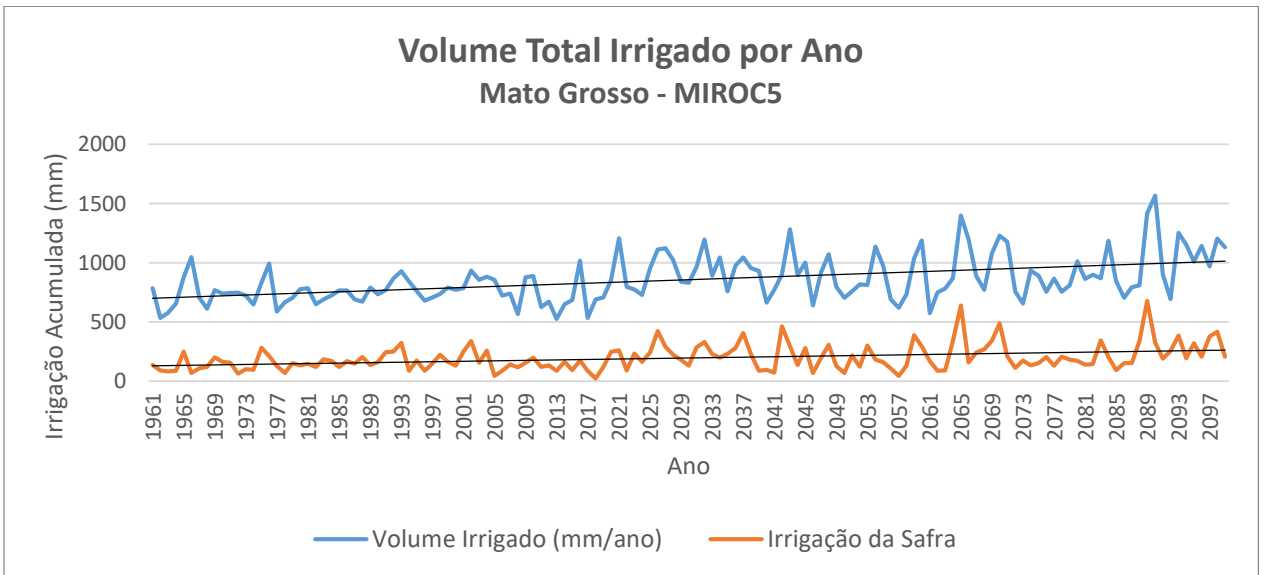
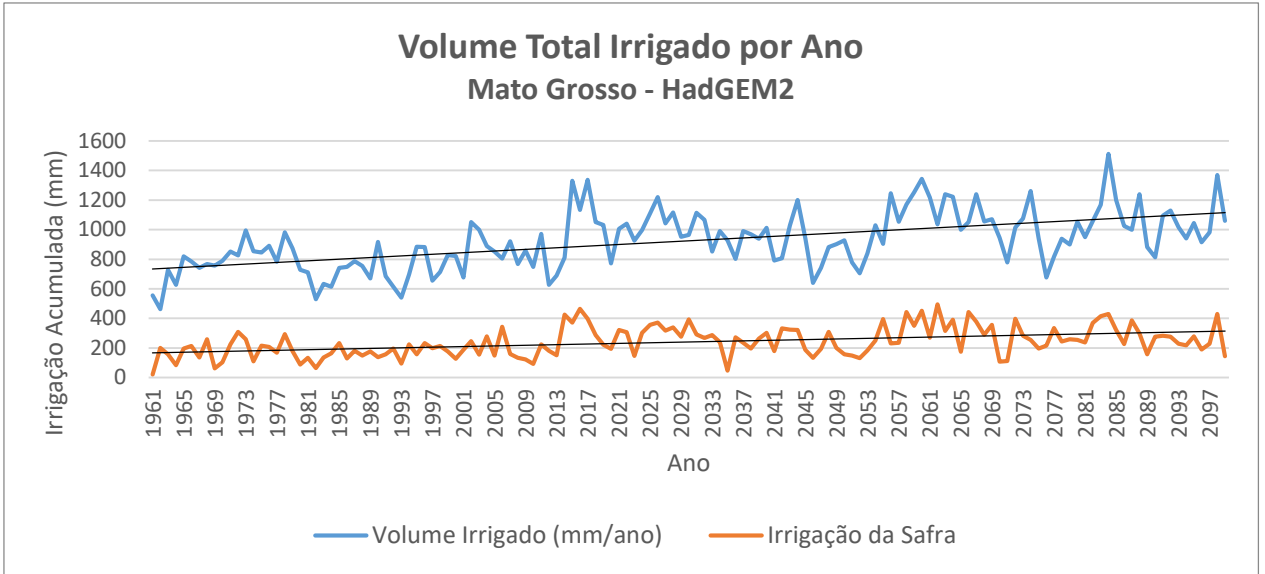




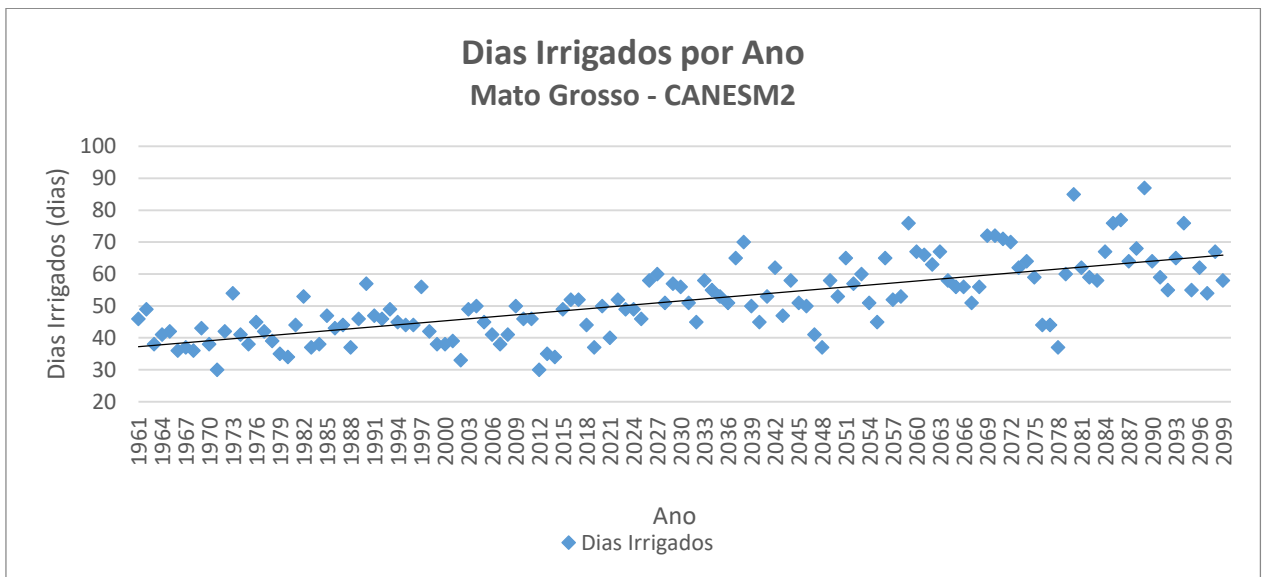
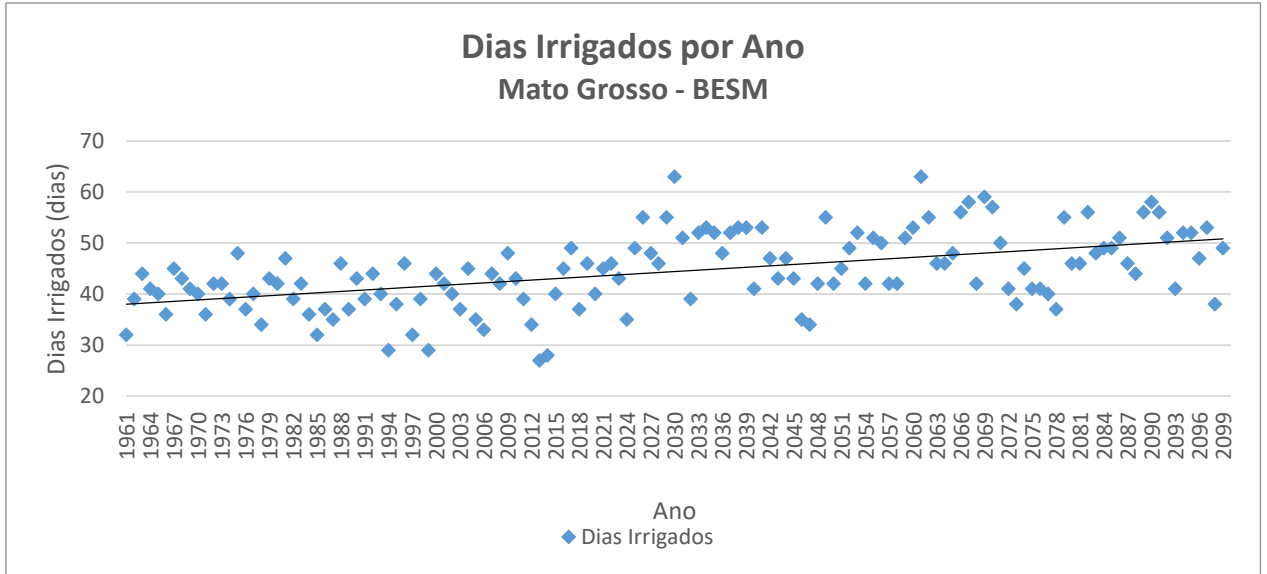


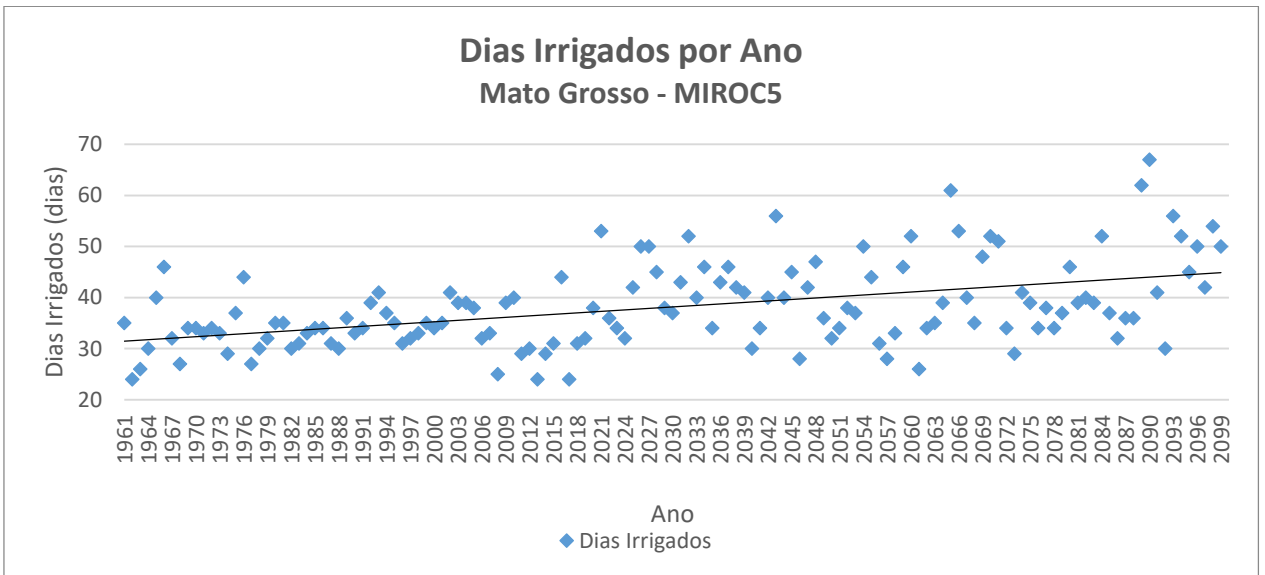
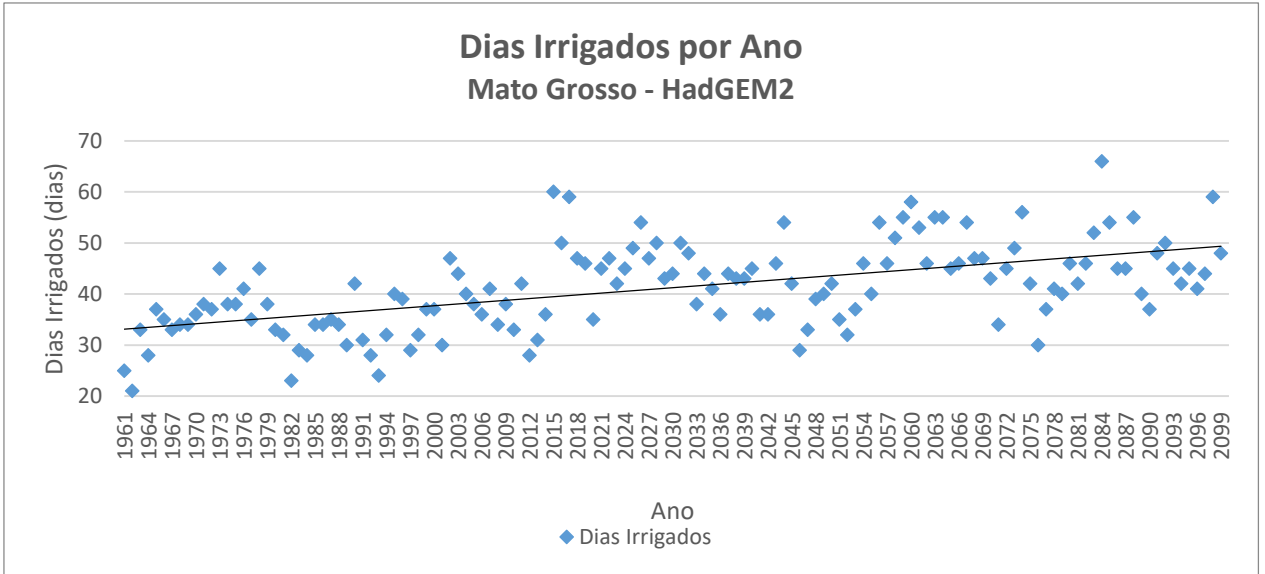
## **APÊNDICE B – RESULTADOS GRÁFICOS PARA O CENTRO DO MATO GROSSO**

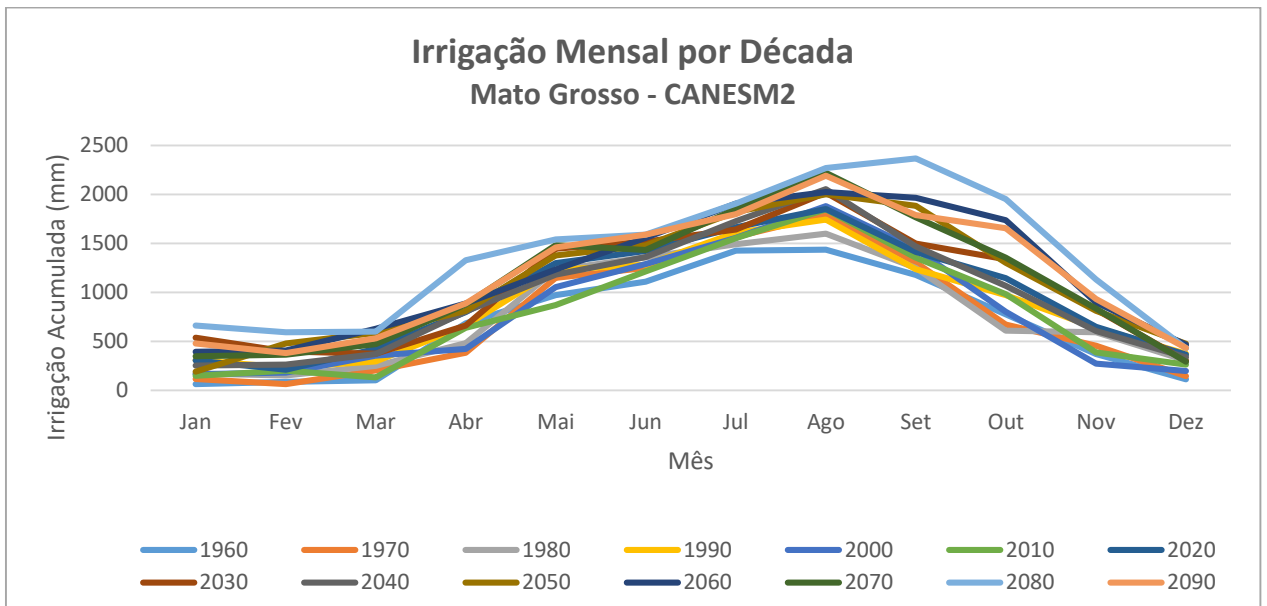
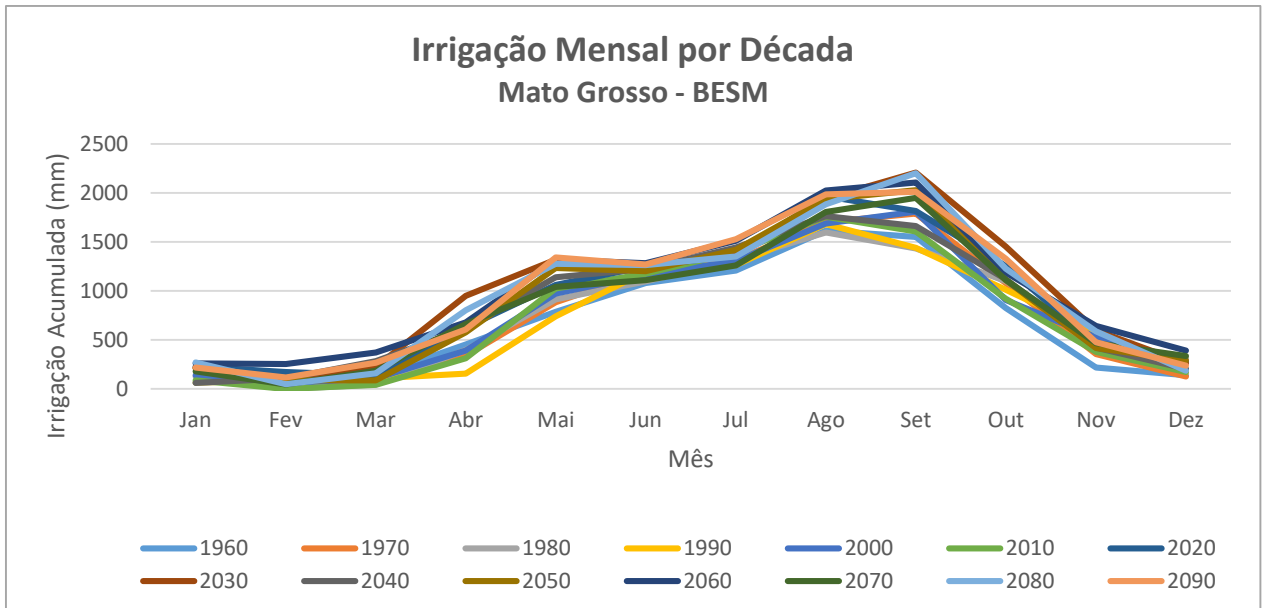


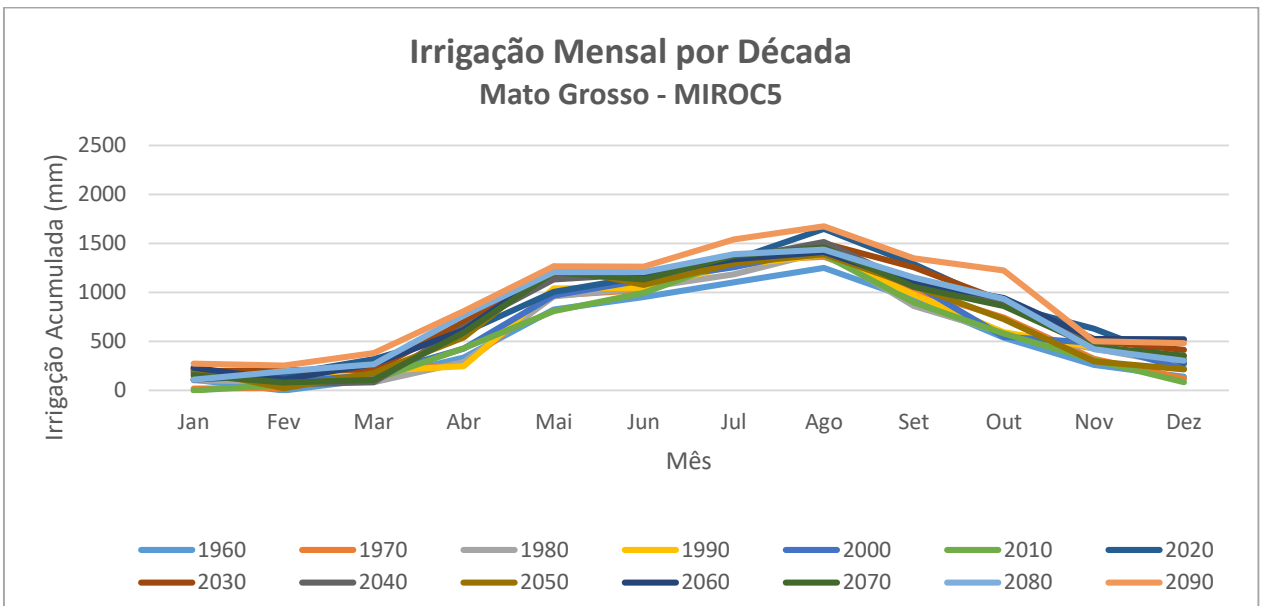
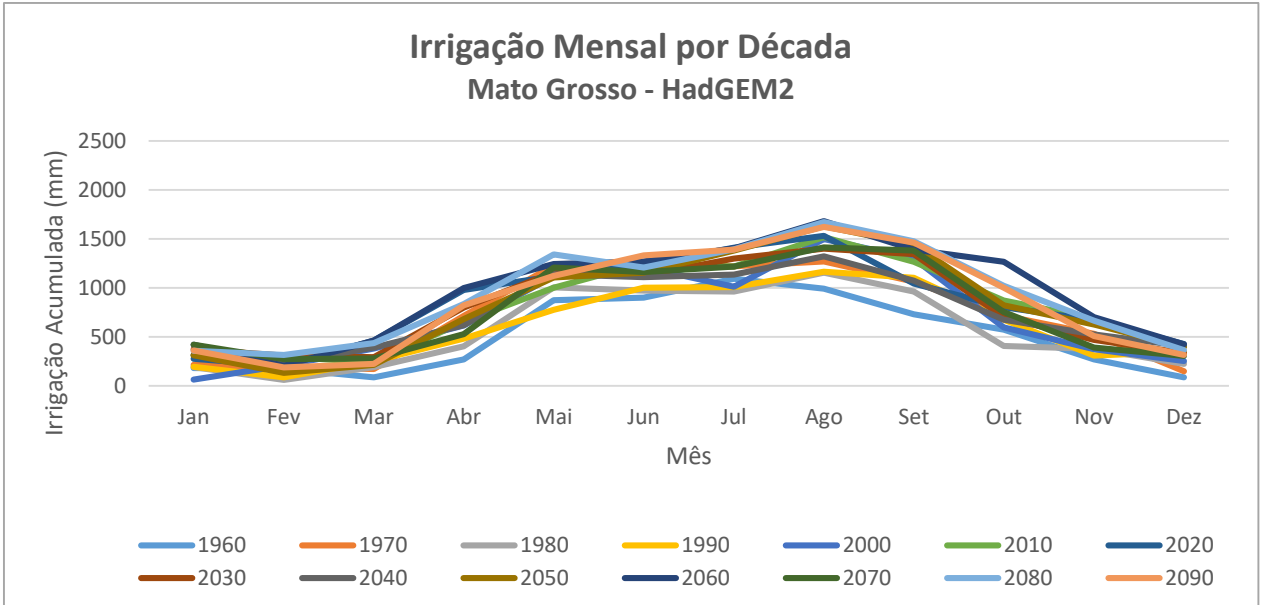




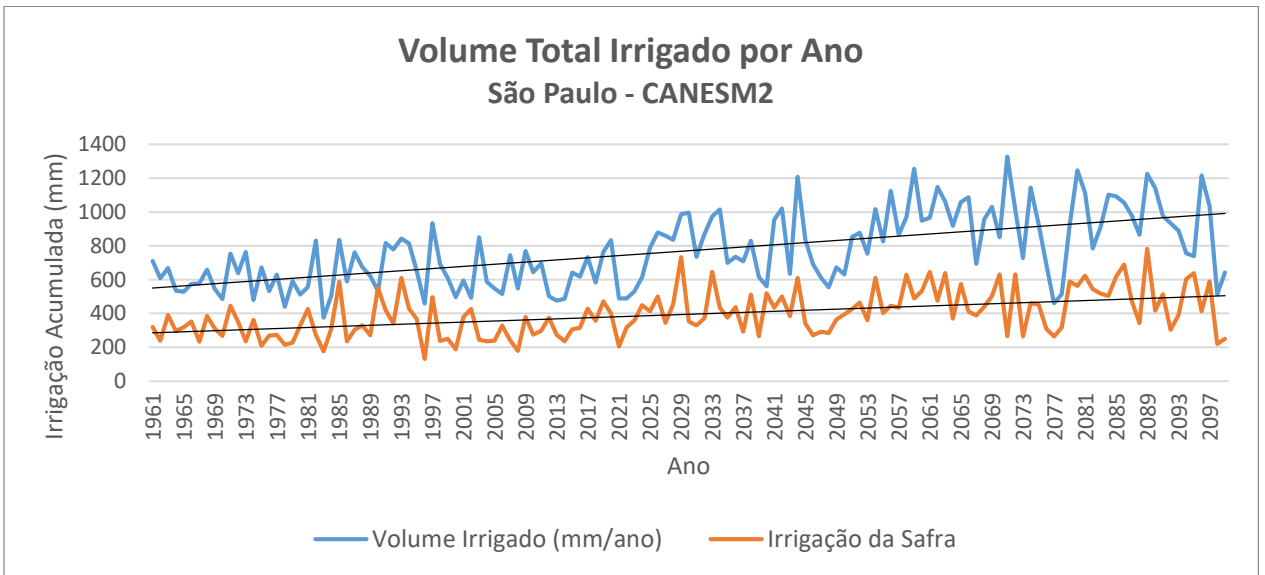
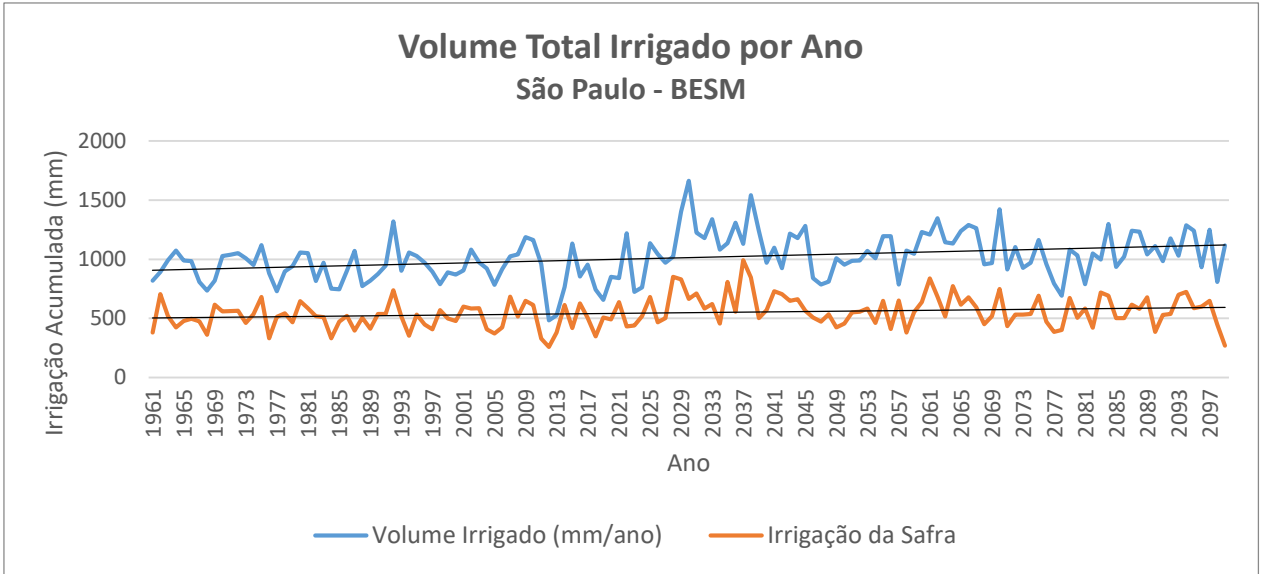


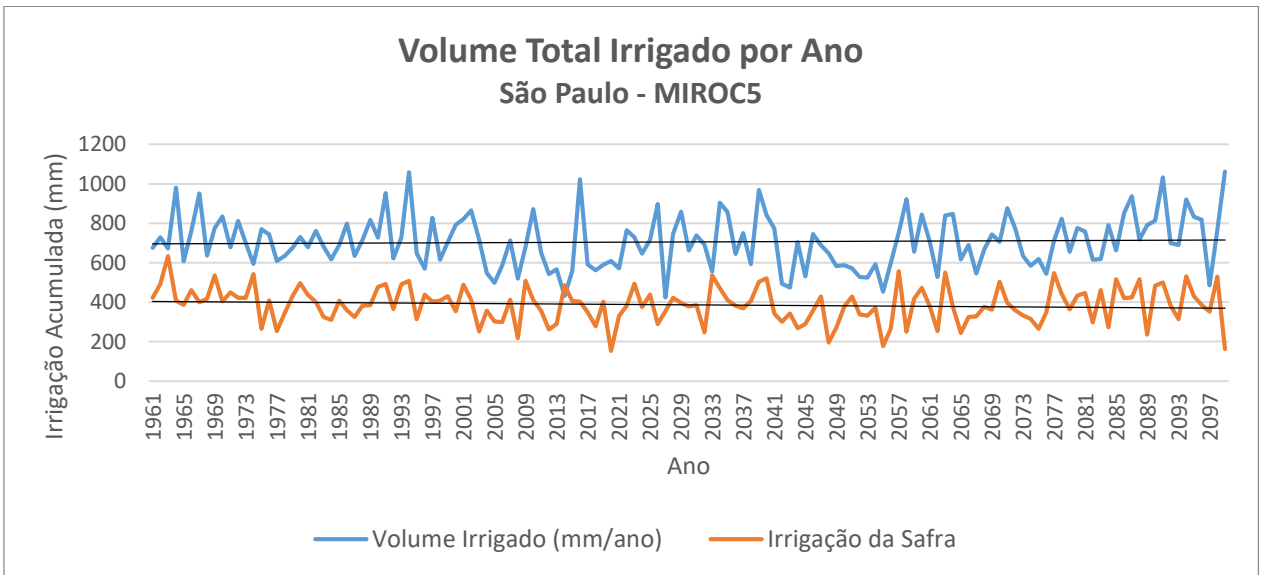
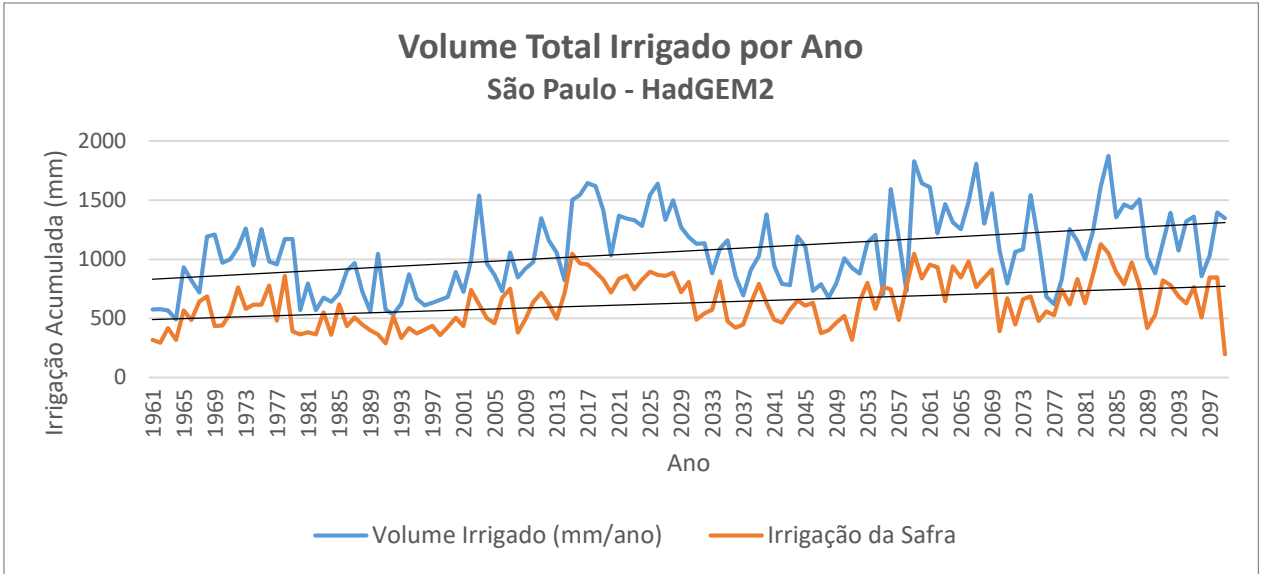


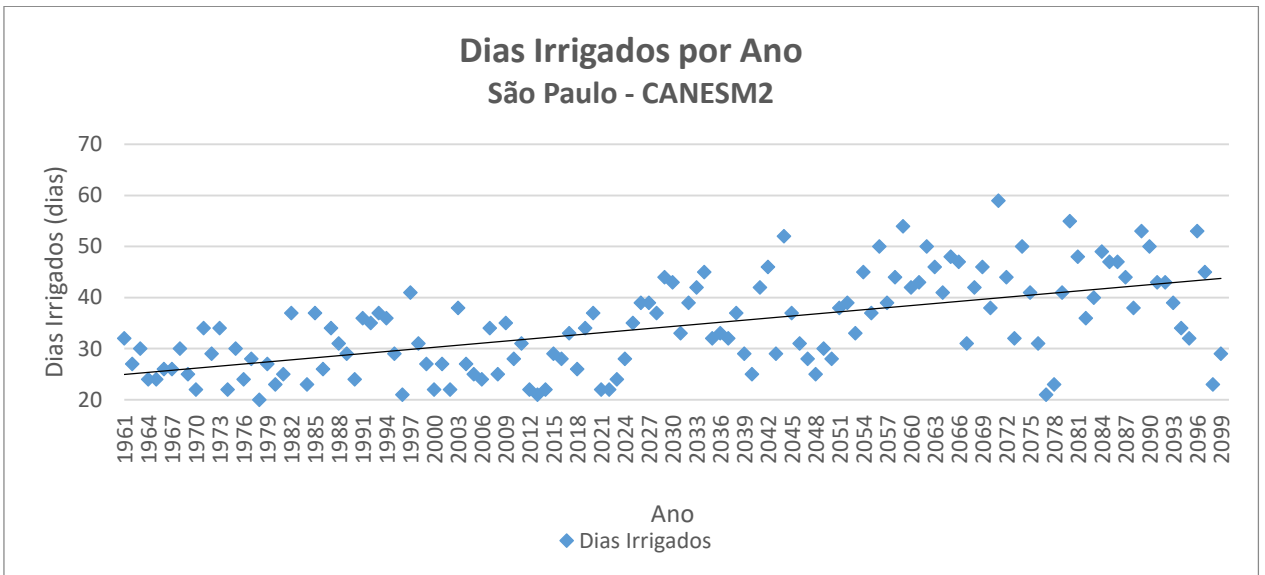
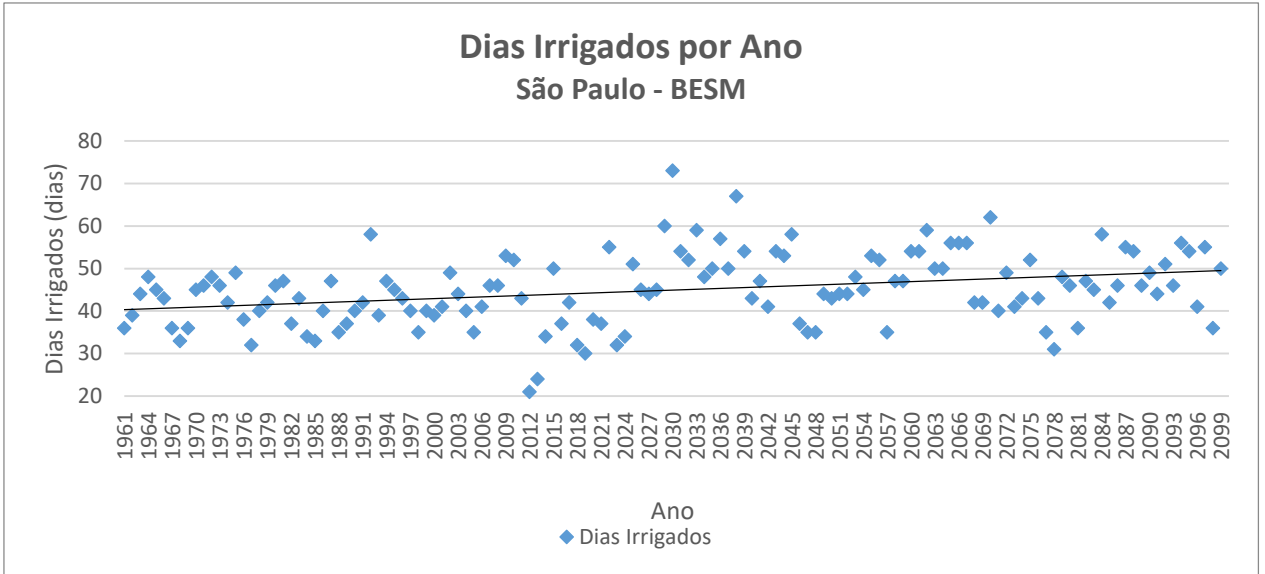




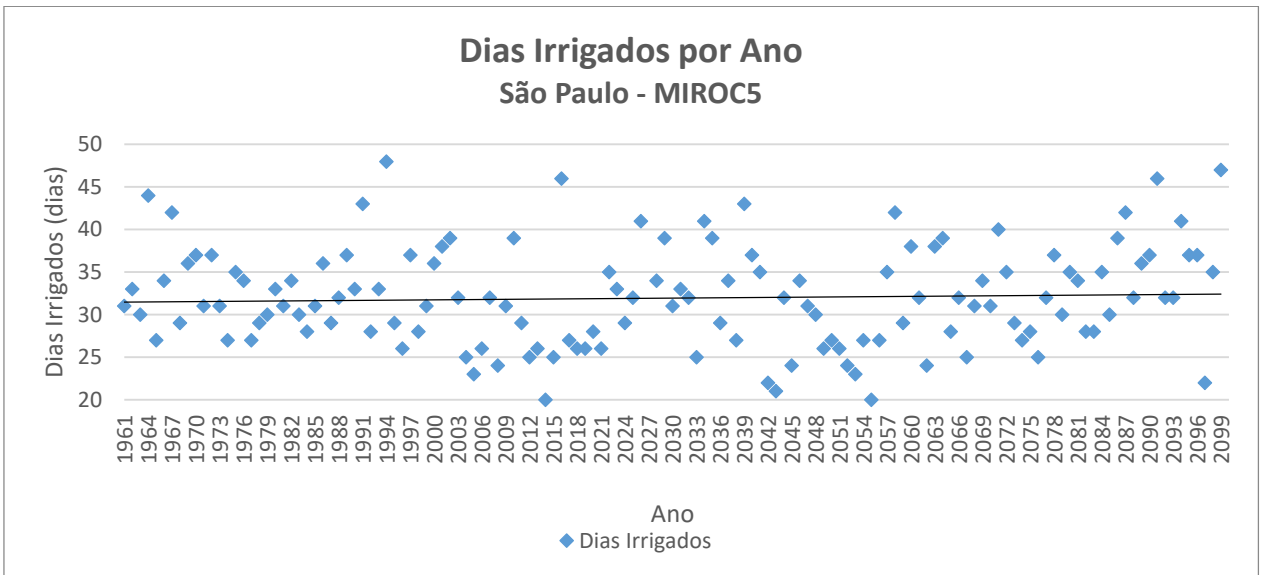
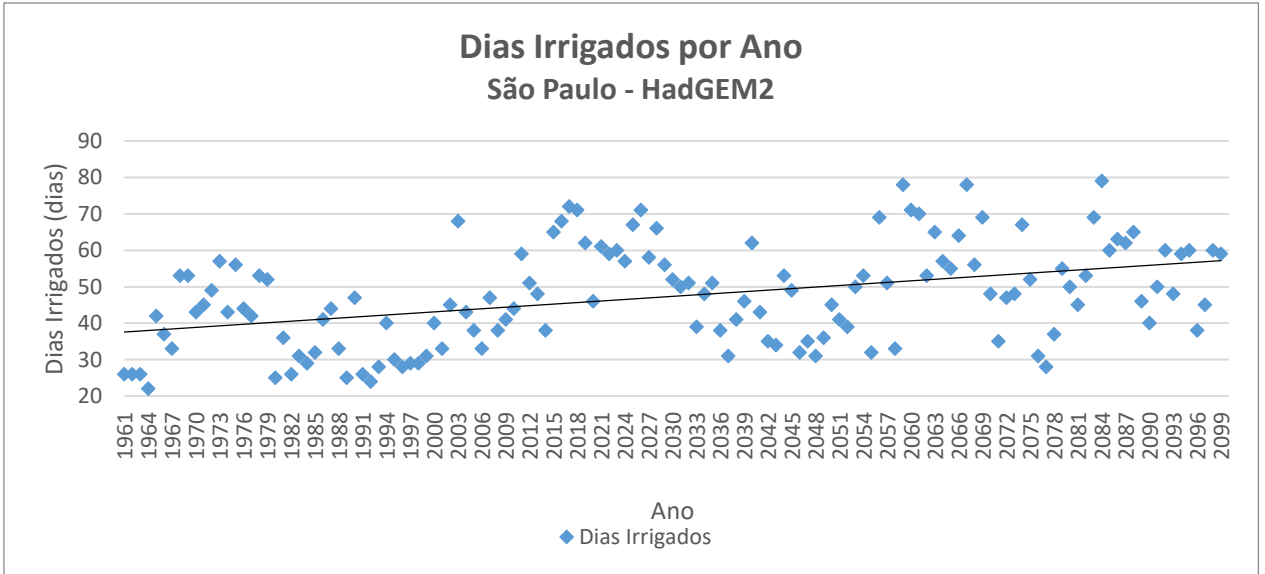
## **APÊNDICE C – RESULTADOS GRÁFICOS PARA O SUL DE SÃO PAULO**

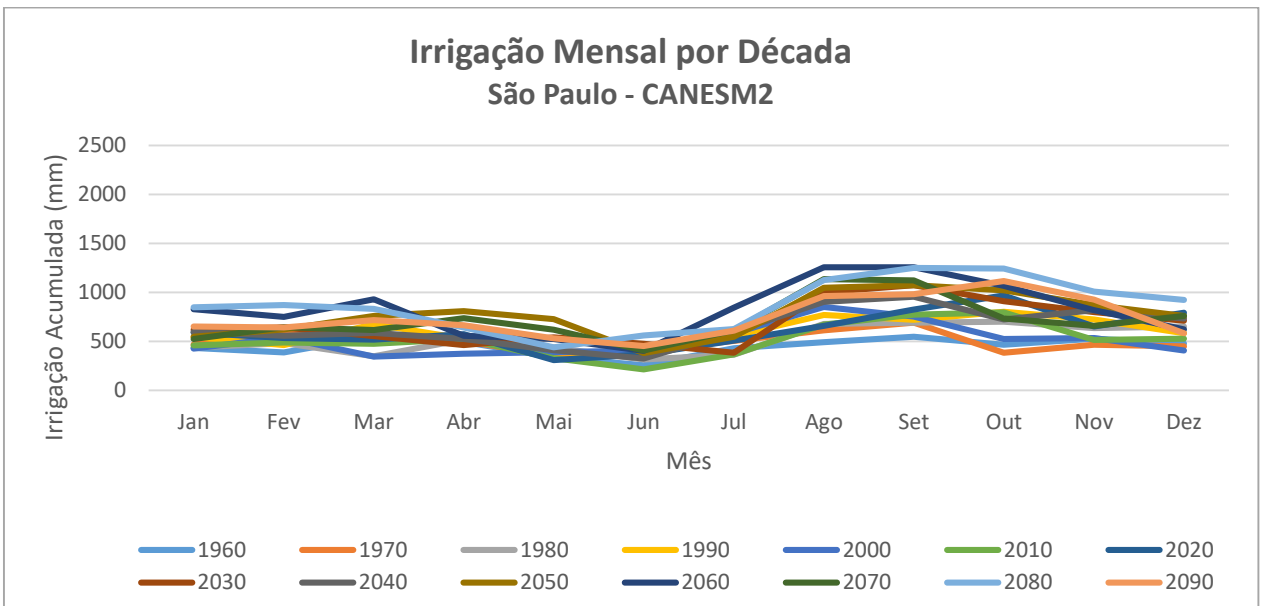
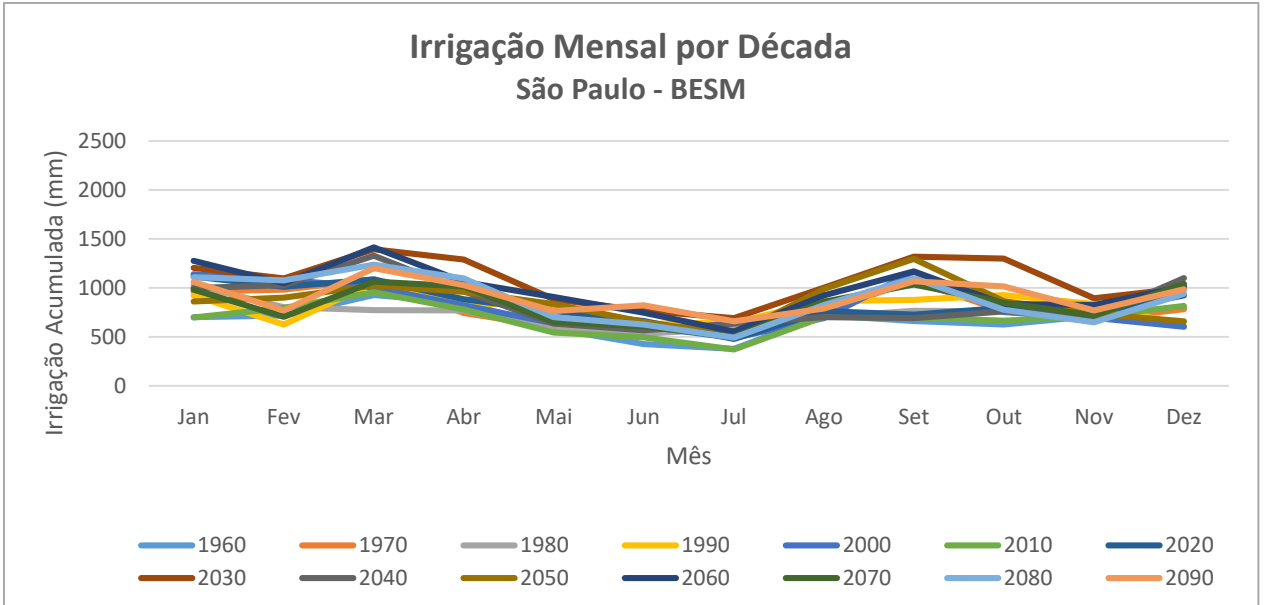


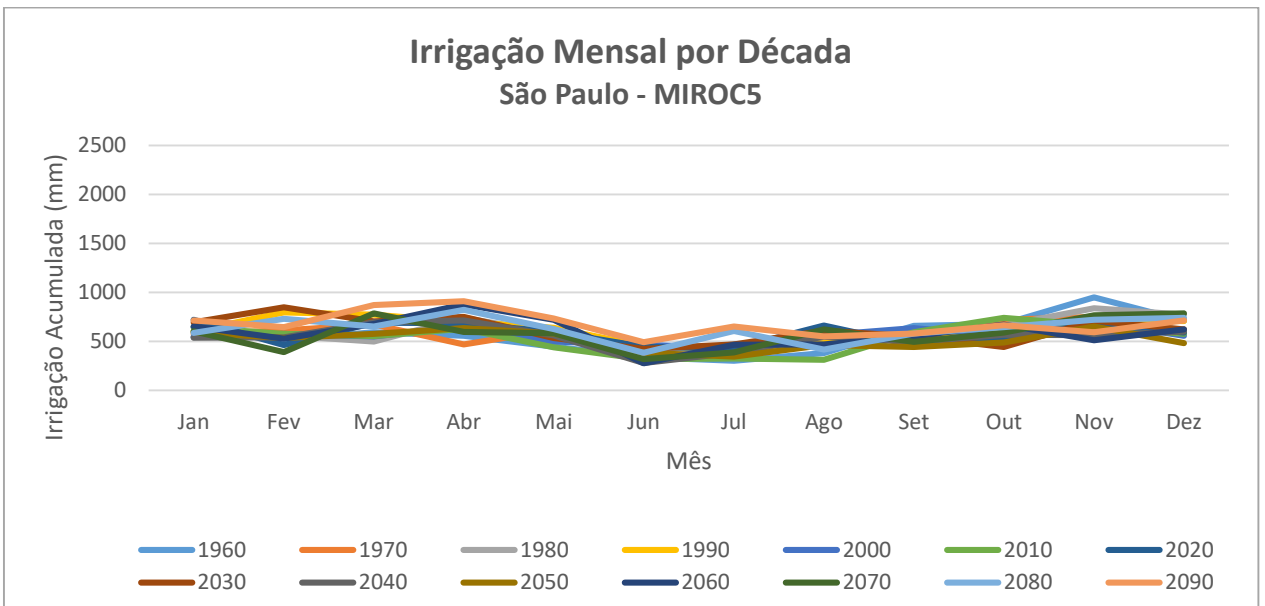
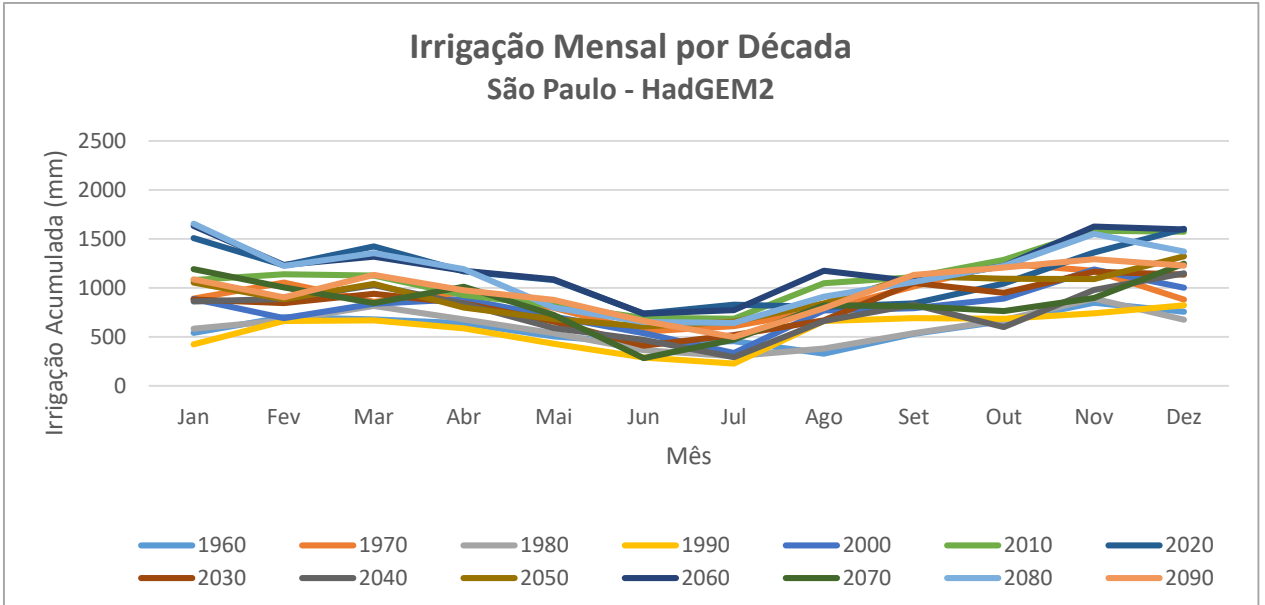




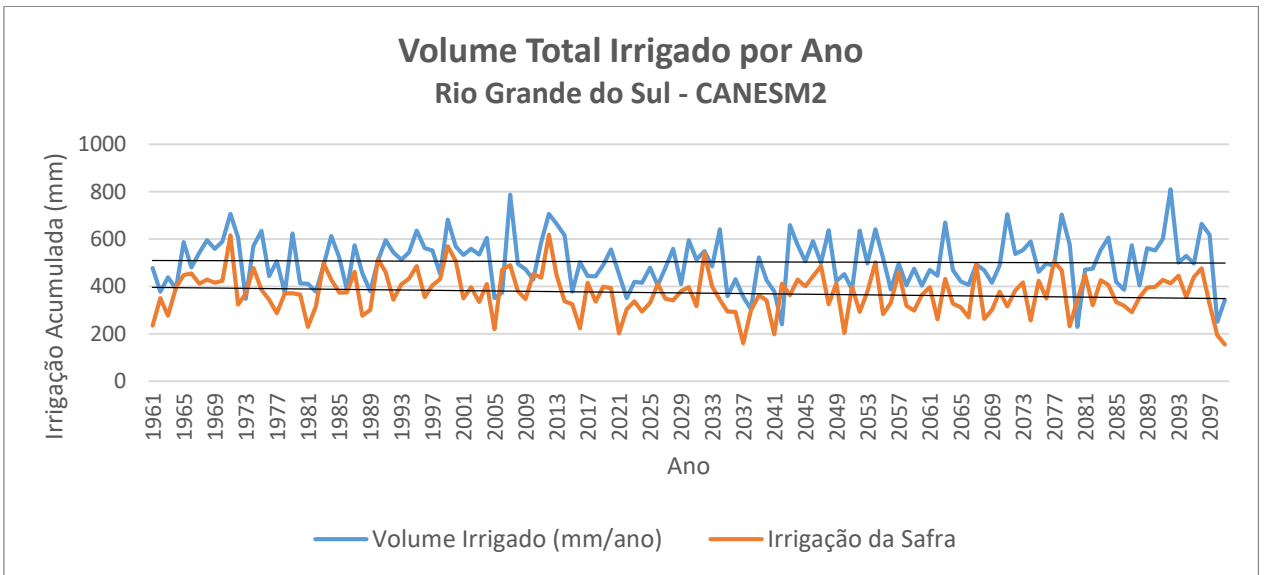
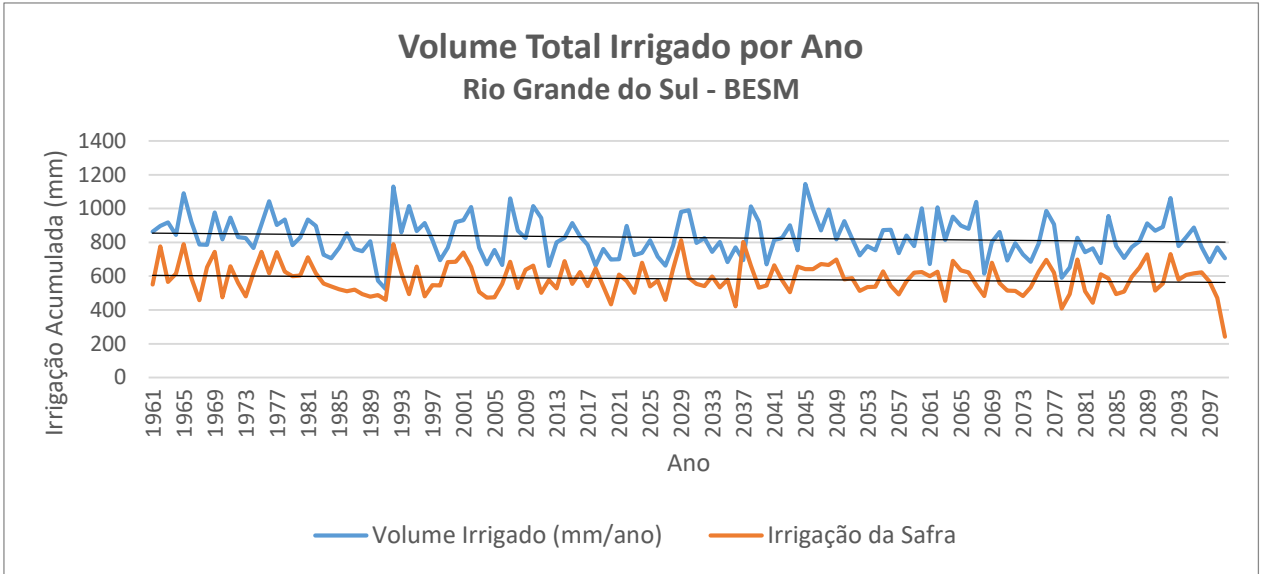


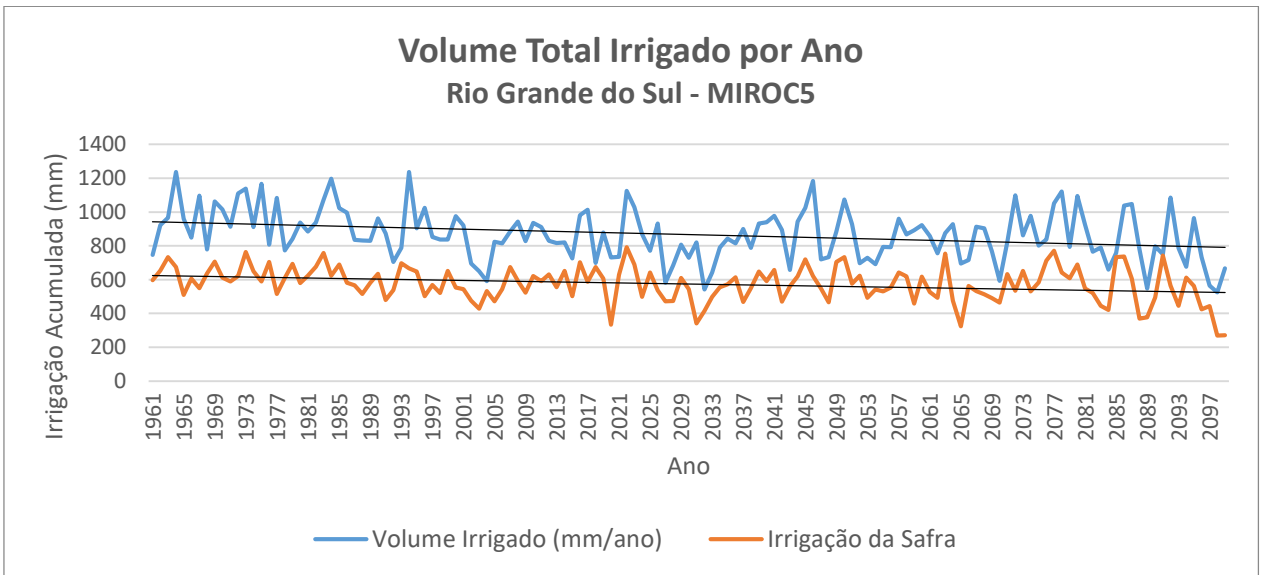
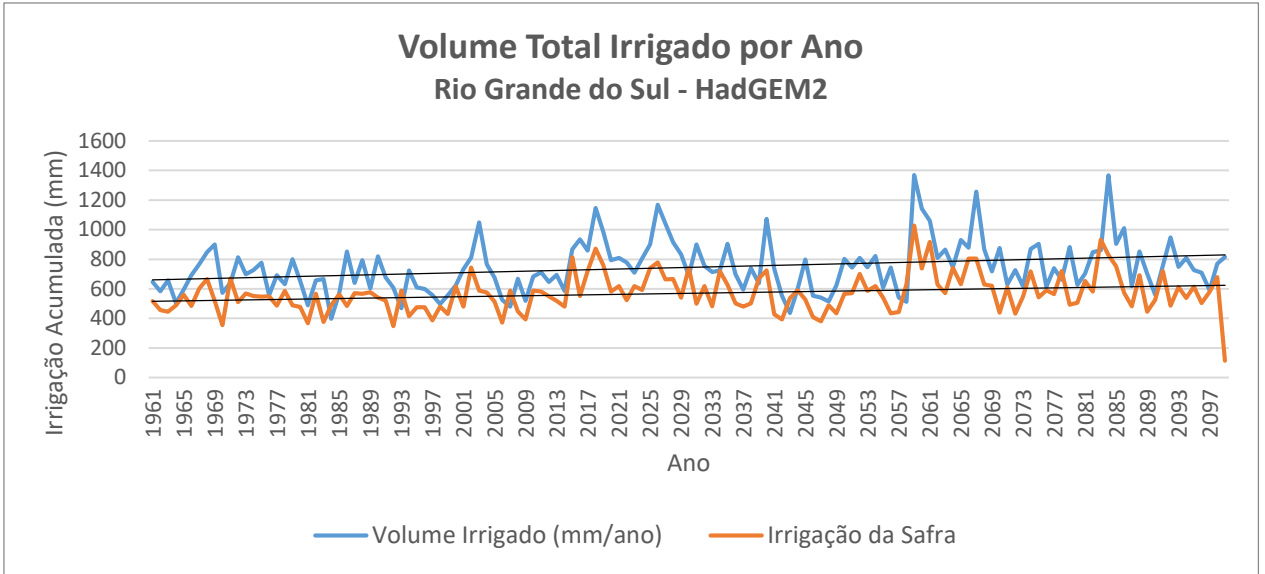


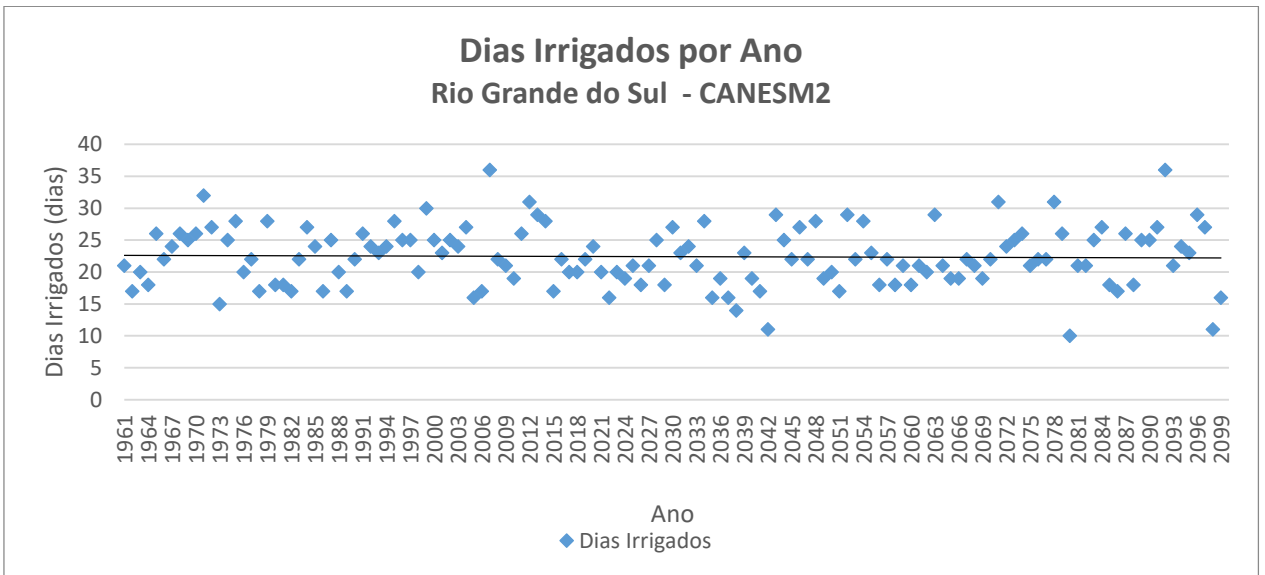
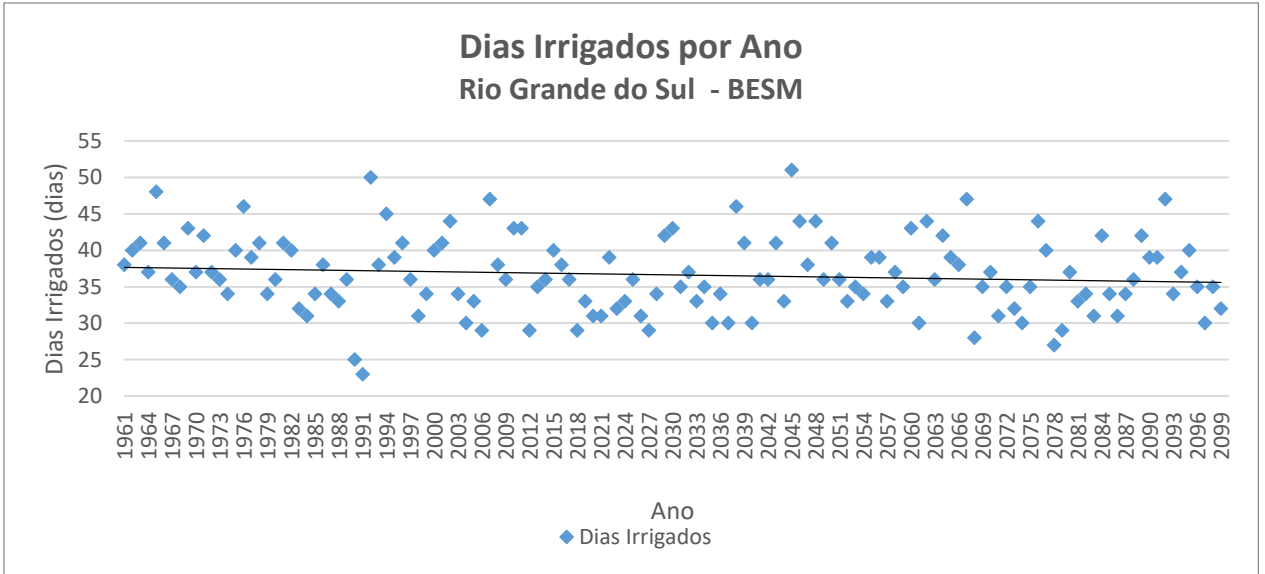


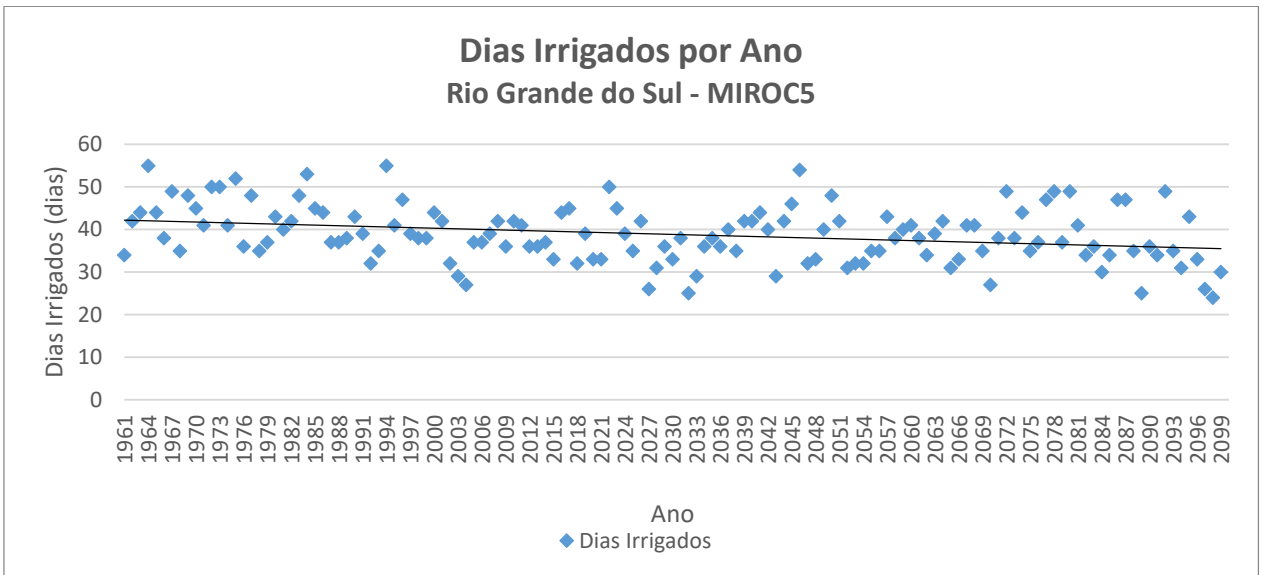
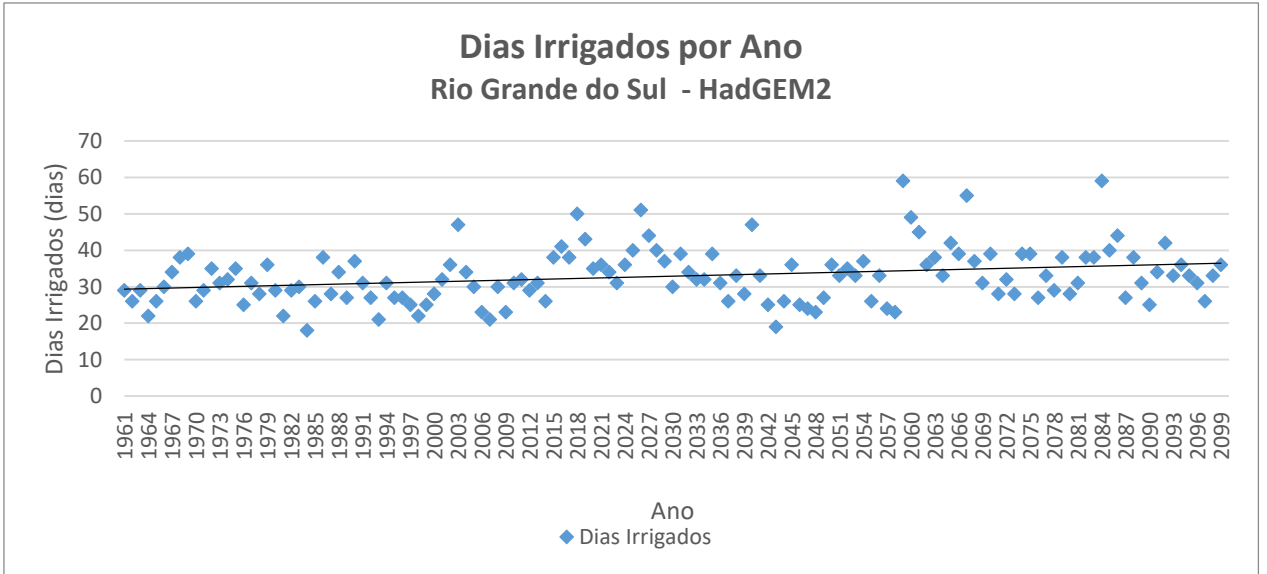


**APÊNDICE D – RESULTADOS GRÁFICOS PARA O NOROESTE DO RS**



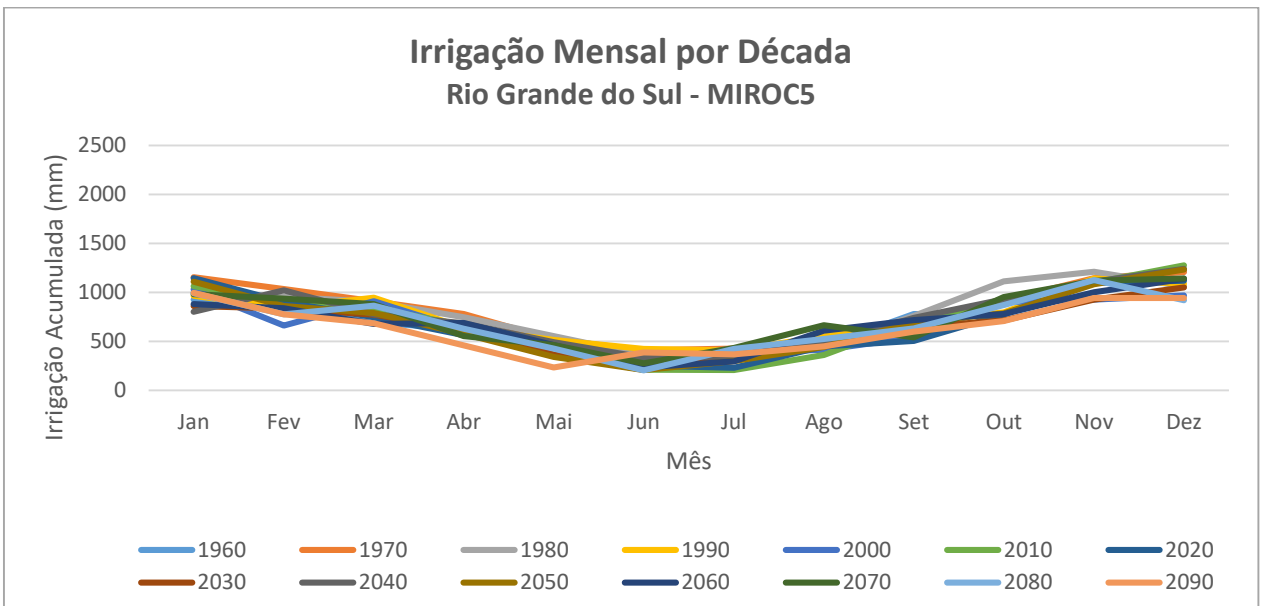
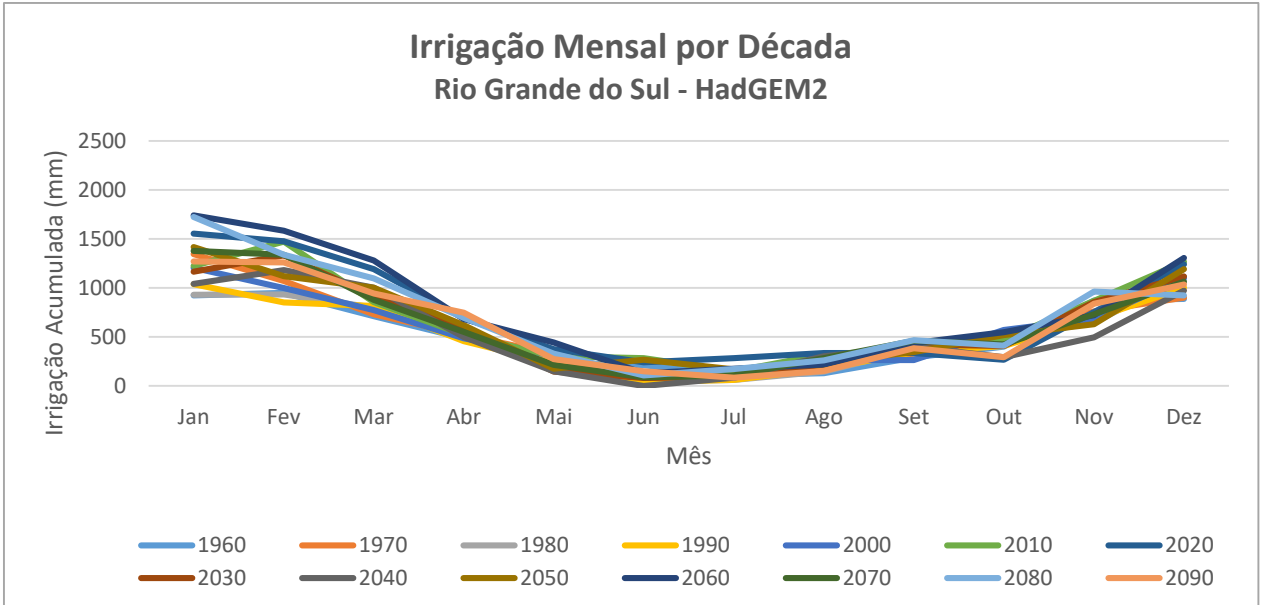












## **ANEXO A – LEVANTAMENTO DAS PRINCIPAIS CULTURAS**

