

# Zoneamento Agrícola da Cana-de-Açúcar em Cenários de Mudanças Climáticas

## *Agricultural Zoning of Sugarcane in Climate Change Scenarios*

*Guilherme Botega Torsoni<sup>1</sup>*

*Lucas Eduardo de Oliveira Aparecido<sup>2</sup>*

*João Antônio Lorençone<sup>1</sup>*

*Viviane Lima Catelan Moreira<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal do Sul de Minas, Muzambinho, MG, Brasil

### Resumo

A cultura da cana-de-açúcar, essencial para a economia do Mato Grosso do Sul, enfrenta desafios significativos devido a fatores climáticos como radiação solar, temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração potencial. Para compreender e mitigar essas vulnerabilidades, utiliza-se o Zoneamento de Risco Climático, avaliando cenários futuros baseados no CMIP6. Os estudos indicam um aumento na temperatura média anual, variando de 4,0% no cenário mais otimista a 28,4% no mais pessimista até 2100, além de um impacto negativo no déficit hídrico, tornando o estado mais árido. Projeções apontam para uma redução drástica nas áreas apropriadas para o cultivo, com até 83,28% até 2060 e possibilidade de inviabilidade até o final do século. Diante desses desafios, enfatiza-se a necessidade de adotar práticas agrícolas adaptativas e sustentáveis para garantir a viabilidade futura da produção de cana-de-açúcar na região.

Palavras-chave: Variabilidade climática; Modelagem climática; Mato Grosso do Sul; Temperatura do ar; CMIP6.

### Abstract

The sugarcane culture, crucial for the economy of Mato Grosso do Sul, faces significant challenges due to climatic factors such as solar radiation, air temperature, precipitation, and potential evapotranspiration. To understand and mitigate these vulnerabilities, Climate Risk Zoning is used, evaluating future scenarios based on CMIP6. Studies indicate an increase in the annual average temperature, varying from 4.0% in the most optimistic scenario to 28.4% in the most pessimistic by 2100, in addition to a negative impact on the water deficit, making the state more arid. Projections point to a drastic reduction in suitable areas for cultivation, with up to 83.28% by 2060 and the possibility of complete inviability by the end of the century. In light of these challenges, the necessity of adopting adaptive and sustainable agricultural practices is emphasized to ensure the future viability of sugarcane production in the region.

Keywords: Climate variability; Climate modeling; Mato Grosso do Sul; Air temperature; CMIP6.

Áreas Tecnológicas: Climatologia. Agrometeorologia.



# 1 Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma das culturas mais importantes globalmente devido à sua versatilidade e aplicação em diversas indústrias, desde a produção de açúcar até a geração de bioenergia. O Brasil, como o maior produtor mundial dessa cultura, desempenha um papel fundamental no mercado global, com a indústria canavieira tendo um impacto significativo na economia do país. Conforme apontam os dados da Conab (2023), a contribuição da cana-de-açúcar para o PIB brasileiro, particularmente no setor sucroenergético, foi de aproximadamente 2% em 2020, refletindo a importância estratégica dessa cultura para o país. O valor de produção registrado em 2021, que alcançou a cifra de R\$ 75.284.266,00 com uma produção total de 715.659.212 toneladas em uma área de 9.970.958 hectares colhidos, destaca ainda mais a relevância econômica e social desse cultivo para o desenvolvimento sustentável do Brasil (IBGE, 2022).

O Estado do Mato Grosso do Sul, com sua vasta extensão territorial de 357.142,082 km<sup>2</sup> (Lopes, 1980) e uma população de 2.839.188 habitantes (Serra; Ferreira; Magalhães, 2024), emergiu como um dos principais polos de produção canavieira no país. Posicionando-se como o quarto maior produtor brasileiro, o Estado tem experimentado um crescimento significativo em sua produção, contribuindo decisivamente para o PIB e a geração de empregos. A safra de 2020/21, por exemplo, atingiu um volume de produção de 48,8 milhões de toneladas, evidenciando o potencial produtivo e a importância econômica (Pretel, 2023).

No entanto, a produção de cana-de-açúcar enfrenta desafios significativos, especialmente relacionados às variabilidades climáticas, que impactam diretamente no rendimento das safras. Fatores como a radiação solar, temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração potencial são determinantes para o sucesso da produção. Essas variáveis climáticas, além de influenciarem diretamente na produtividade, são também fatores críticos para o desenvolvimento de doenças nas plantações, como apontam Silva *et al.* (2020). A compreensão dessas vulnerabilidades é essencial para o planejamento e a gestão eficazes da cultura canavieira, conforme destacado por Rolim, Escobedo e Oliveira (2008).

Para mitigar os riscos associados às adversidades climáticas, ferramentas como o Zoneamento de Risco Climático (ZARC) têm sido empregadas. Essa metodologia utiliza informações detalhadas sobre os fatores que afetam a produção agrícola e as características específicas das regiões de cultivo para avaliar os riscos climáticos e identificar áreas potencialmente adequadas para a agricultura. Essa abordagem é crucial para orientar os produtores na tomada de decisões relacionadas ao planejamento e manejo das culturas.

Além disso, o contexto das mudanças climáticas globais acrescenta uma camada de complexidade à produção agrícola. Países como o Brasil, que são fortemente dependentes de suas *commodities* agrícolas para exportação, enfrentam desafios particulares nesse cenário. Marin e Nassif (2013) destacaram como as mudanças climáticas podem afetar negativamente os

ecossistemas e, por consequência, a produtividade agrícola. A utilização de modelos globais do IPCC para projeções climáticas futuras tornou-se uma prática mais confiável, permitindo avaliações mais precisas e abrangentes dos impactos potenciais das mudanças climáticas na agricultura (Moss *et al.*, 2010; Samuels *et al.*, 2018). É uma ferramenta atual poderosa para avaliar os impactos das mudanças climáticas, oferecendo alta resolução e melhorias em processos em comparação com versões anteriores como o CMIP1 e o CMIP5. Essas projeções são fundamentais para descrever características futuras, como PIB, população e urbanização, em diferentes cenários socioeconômicos para enfrentar os desafios das mudanças climáticas (O'Neill *et al.*, 2016; Gusain; Ghosh; Karmakar, 2020).

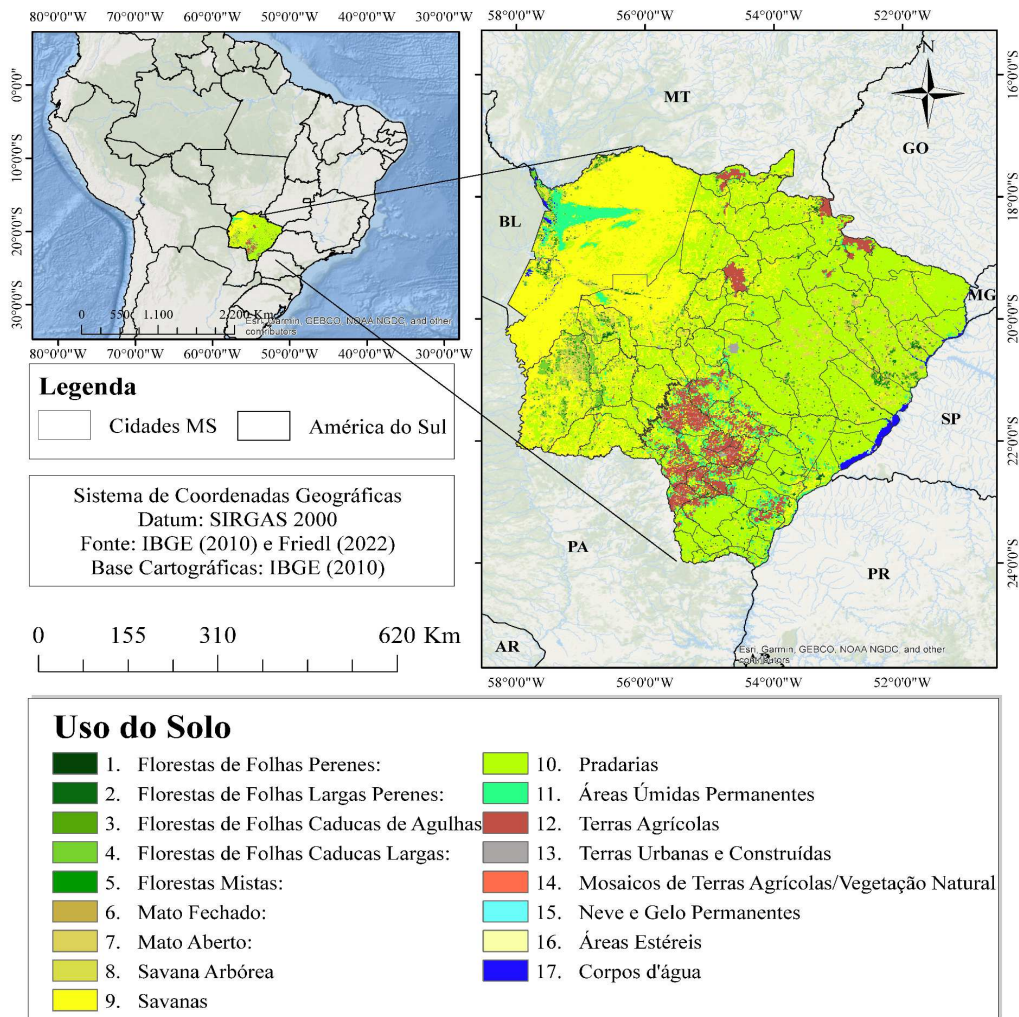
Este estudo focou no desenvolvimento de um zoneamento climático específico para a cultura da cana-de-açúcar no Estado do Mato Grosso do Sul, considerando os cenários de mudanças climáticas projetados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e utilizando a mais recente fase do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). O principal objetivo foi mapear e identificar as áreas dentro da região de estudo que apresentam maior risco climático para o cultivo com o intuito de fornecer uma base sólida para decisões estratégicas que possam impulsionar o desenvolvimento socioeconômico do país frente às adversidades climáticas futuras.

## 2 Metodologia

O estudo foi desenvolvido no Estado do Mato Grosso do Sul, o qual apresenta três biomas: Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal, representando uma área diversificada, como ilustrado na Figura 1. Foram coletados dados, por meio da plataforma WorldClim version 2.1, de temperatura do ar (Tair-°C) e precipitação acumulada anual (Prec-mm) para o cenário atual e variáveis futuras (Fick; Hijmans, 2017), para a última normal climatológica (1991-2020). Os dados são disponibilizados em formato GeoTiff (.tif), com resolução de 30 segundos (1 km<sup>2</sup>).

Foram utilizados quatro cenários para quatro períodos (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100) na plataforma WorldClim: SSP-1 2.6, SSP-2 4.5, SSP-3 6.0 e SSP-5 8.5 (Riahi *et al.*, 2017). Os SSPs são calculados com base no número de reflexão no forçamento radiativo terrestre (W/m<sup>2</sup>), no qual cada cenário varia em relação a cada forçamento radiativo terrestre, sendo 2.6 o cenário otimista, 4.5 e 6.0 os intermediários e 8.5 o cenário pessimista, associado com cenários das medidas que serão aplicadas pela sociedade para redução da emissão de gases do efeito estufa (Kriegler *et al.*, 2017; Van Vuuren *et al.*, 2017).

**Figura 1** – Mapa de localização do Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil, e o uso do solo em toda sua extensão territorial



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

Neste estudo, a análise do balanço hídrico climatológico (BH) foi meticulosamente realizada empregando o renomado método de Thornthwaite e Mather (1955), uma abordagem consagrada pela sua precisão e relevância em estudos hidrológicos e agrícolas. A determinação da Capacidade de Água Disponível no solo (CAD) foi estabelecida em 100 mm, um valor alinhado com os padrões de referência para a cultura da cana-de-Açúcar, conforme mostra o estudo de Silva *et al.* (2014). Esse valor é crucial para a correta avaliação das dinâmicas de água no solo, tendo impacto direto na eficiência do uso da água e na sustentabilidade da produção agrícola.

A aplicação desse método permitiu uma análise detalhada das componentes do balanço hídrico, como o armazenamento de água no solo, a deficiência hídrica (Def) e o excedente hídrico. Esses elementos são fundamentais para compreender as condições hídricas da região do Mato Grosso do Sul e suas implicações para a agricultura de cana-de-açúcar. A deficiência hídrica, em particular, foi determinante na classificação das áreas segundo sua aptidão climática para o cultivo, oferecendo uma ferramenta valiosa para o planejamento agrícola na região.

Além disso, as variáveis climáticas essenciais (temperatura média anual do ar e precipitação anual) e o Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA) foram considerados para avaliar a adequação das áreas para o cultivo de cana-de-açúcar. Esse índice é calculado com

base em Monteiro e Sentelhas (2014) e Vianna e Sentelhas (2014) e representa um indicador-chave da relação entre a disponibilidade hídrica e as necessidades da planta, baseando-se na comparação entre a evapotranspiração real e potencial da cultura. Ademais, é crucial para a identificação de períodos críticos de deficiência hídrica que podem afetar o rendimento e a qualidade da cultura estudada.

$$ISNA = \frac{E_{tr}}{E_{tp}} \quad (1)$$

$E_{tr}$  é a evapotranspiração real e  $E_{tp}$  é a evapotranspiração potencial.

As classes de aptidão agroclimática para o cultivo da cana-de-açúcar (Tabela 1) foram estabelecidas com base em um cenário de risco climático delineado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa, 2017), refletindo uma abordagem proativa na identificação e na mitigação de potenciais vulnerabilidades agrícolas diante das mudanças climáticas. A classificação adotada segue um conjunto de critérios detalhados, extraídos tanto do relatório do Mapa quanto de estudos acadêmicos relevantes na área (Bacchi, 1985; Teodoro *et al.*, 2011), oferecendo um quadro abrangente para a avaliação da viabilidade agroclimática da cana-de-açúcar em diferentes regiões.

**Tabela 1** – Chave de classificação climática para a cana-de-açúcar

TAIR (°C)	DEF (MM)	ISNA	CLASSES
<19	>400	<0.6	Completamente Inapto
19-24	>400	<0.6	Completamente Apto
19-24	200-400	<0.6	Insuficiência hídrica
19-24	>400	>0.6	Insuficiência hídrica
19-24	200-400	>0.6	Apto com Irrigação suplementar
<19	>400	>0.6	Apto com Irrigação suplementar
19-24	200-400	<0.6	Insuficiência térmica
<19	>400	>0.6	Insuficiência térmica
>24	>400	>0.6	Excesso térmico
<19	>400	>0.6	Insuficiência térmica e hídrica
<19	200-400	>0.6	Insuficiência térmica e hídrica
19-24	>400	>0.6	Insuficiência térmica e hídrica
>24	200-400	>0.6	Excesso térmico e insuficiência hídrica
>24	>400	>0.6	Excesso térmico e insuficiência hídrica

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

### 3 Resultados e Discussão

No Estado do Mato Grosso do Sul, a análise climática revela um espectro variado de condições térmicas e hídricas que influenciam significativamente a ecologia regional e a prática agrícola (Figura 2). A temperatura média do ar oscila entre 21,3°C e 26,3°C, registrando uma

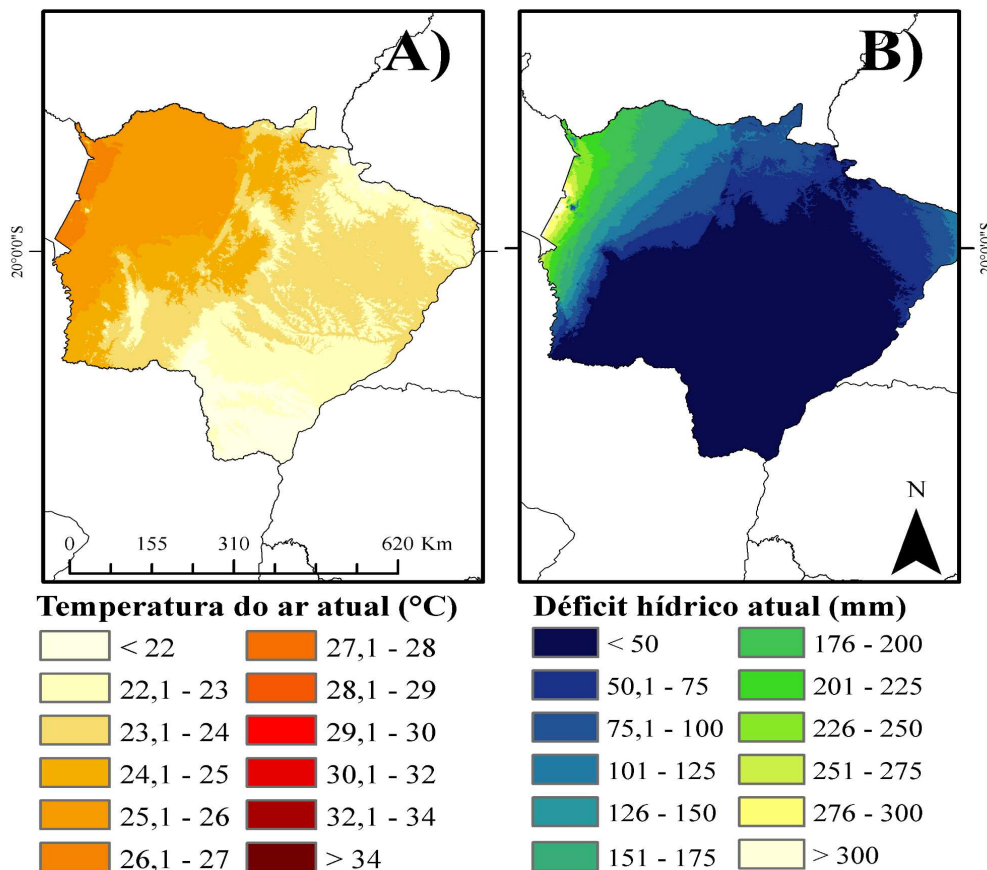


média geral de 23,7°C (Figura 2A). Essa variação é particularmente notável entre a Região Sul, com uma média mais amena de 22,1°C, e a Região Noroeste, onde as temperaturas atingem uma média mais elevada de 25,3°C. Tal diferenciação térmica sugere uma diversidade de microclimas, o que, por sua vez, afeta diretamente a distribuição das espécies vegetais e a escolha das culturas agrícolas mais adequadas para cada região.

Em termos de déficit hídrico, a Região Noroeste apresenta uma variação de 0 a 356 mm (Figura 2B), com o bioma do Pantanal destacando-se por experimentar grande escassez hídrica. Esse fato coloca em evidência a vulnerabilidade do Pantanal em períodos de seca, com implicações significativas para a biodiversidade local e as comunidades que dependem desses recursos hídricos. Em contrapartida, o centro e o sul do Estado são caracterizados por um regime hídrico mais favorável, facilitando a prática de agricultura e sustentando uma maior diversidade de culturas.

A compreensão dessas dinâmicas climáticas é crucial para o planejamento agrícola e ambiental no Mato Grosso do Sul. A seleção de culturas adaptadas às condições locais pode minimizar os riscos associados às variações climáticas e melhorar a sustentabilidade da produção agrícola. Além disso, a implementação de práticas agrícolas resilientes, como sistemas de irrigação eficientes, uso de variedades de plantas tolerantes à seca e adoção de técnicas de conservação do solo, pode ajudar a mitigar os impactos do déficit hídrico nas áreas mais vulneráveis.

**Figura 2** – Distribuição espacial das condições climáticas no Estado do Mato Grosso do Sul com base no cenário atual do CMIP6: A) temperatura atual do ar; e B) déficit hídrico



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

A influência dos elementos climáticos na produtividade da cana-de-açúcar em Mato Grosso do Sul é significativa (Figura 3), refletindo a sensibilidade dessa cultura às condições ambientais.

A temperatura do ar ideal para o desenvolvimento da cana-de-açúcar varia ao longo de seu estágio fenológico. Durante o dia, a faixa de temperatura ideal está entre 19°C e 24°C para a fase que vai da emergência à floração. Essa faixa de temperatura é crucial para processos como a germinação e a emergência, em que temperaturas e umidade adequadas são fundamentais para um bom início de desenvolvimento da planta.

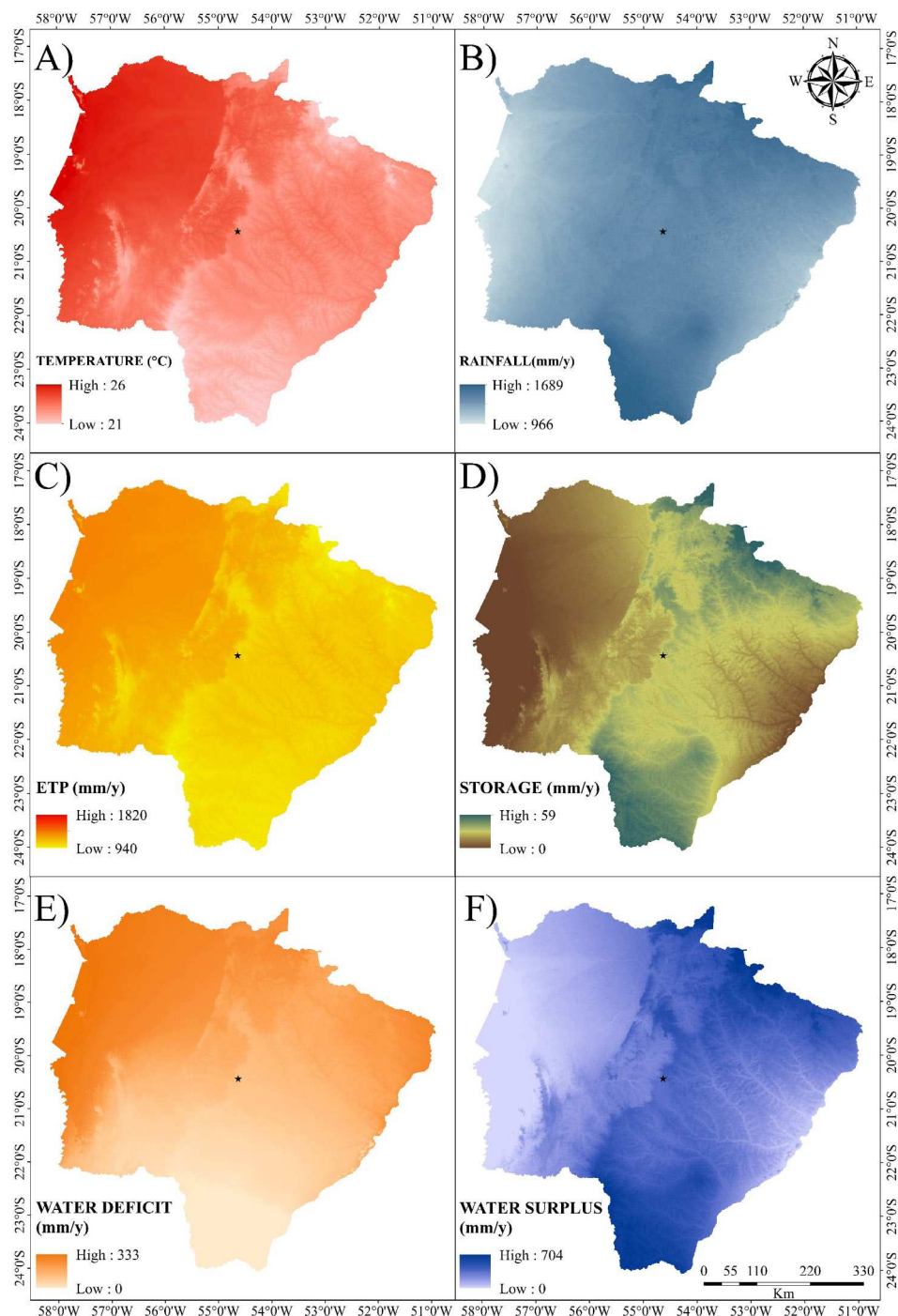
A temperatura média do ar varia entre 21°C e 26°C nas áreas mais altas do Estado do Mato Grosso do Sul, com o Pantanal e o Nordeste apresentando temperaturas mais elevadas do Estado (>25°C) (Dos Reis *et al.*, 2022). Essa variação térmica tem implicações diretas na fisiologia do milho. Temperaturas dentro dessa faixa podem ser ideais para o seu crescimento, no entanto, temperaturas mais elevadas, especialmente acima de 24°C, podem levar ao estresse térmico. Esse estresse pode causar redução na fotossíntese, afetar negativamente a formação de grãos e diminuir a eficiência do uso da água pela planta. Portanto, regiões com temperaturas médias mais altas podem experimentar reduções na produtividade do milho safrinha devido ao aumento do risco de estresse térmico durante fases críticas do desenvolvimento da planta.

No caso do comportamento pluviométrico, os registros anuais podem chegar a 1.689 mm nas Regiões Sul, Centro e Norte, contrastando com até 966 mm anuais nas Regiões Leste e Oeste (Figura 3B), desempenhando um papel fundamental na disponibilidade de água para a cana-de-açúcar (Teodoro *et al.*, 2016). A água é essencial para a germinação de sementes, o crescimento de plantas e para a fase de enchimento de grãos, que é crítica para a determinação da produtividade final. A variação na quantidade de chuva pode levar a diferenças significativas na disponibilidade de água no solo, impactando diretamente a produtividade. Regiões com menor precipitação podem enfrentar desafios relacionados à deficiência hídrica, afetando adversamente o crescimento das plantas e potencialmente levando à necessidade de irrigação para manter a produtividade.

Além disso, a distribuição da precipitação ao longo do ciclo de cultivo é tão importante quanto a quantidade total. Chuvas excessivas durante a semeadura ou a colheita podem causar erosão do solo, perda de nutrientes e dificuldades na operação de máquinas agrícolas, enquanto uma distribuição inadequada da chuva durante o ciclo pode resultar em estresse hídrico em fases críticas, como a floração e o enchimento de grãos.

A irrigação do milho durante períodos de escassez hídrica é uma estratégia agronômica crucial para manter e potencialmente aumentar a produtividade em regiões afetadas por variações climáticas adversas. Essa prática pode compensar a deficiência pluvial, assegurando o suprimento de água necessário para as fases críticas do desenvolvimento da planta, como a germinação, o crescimento vegetativo, o florescimento e o enchimento de grãos.

**Figura 3** – Variabilidade espacial dos elementos climáticos: A) Temperatura do ar; e B) Precipitação acumulada



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

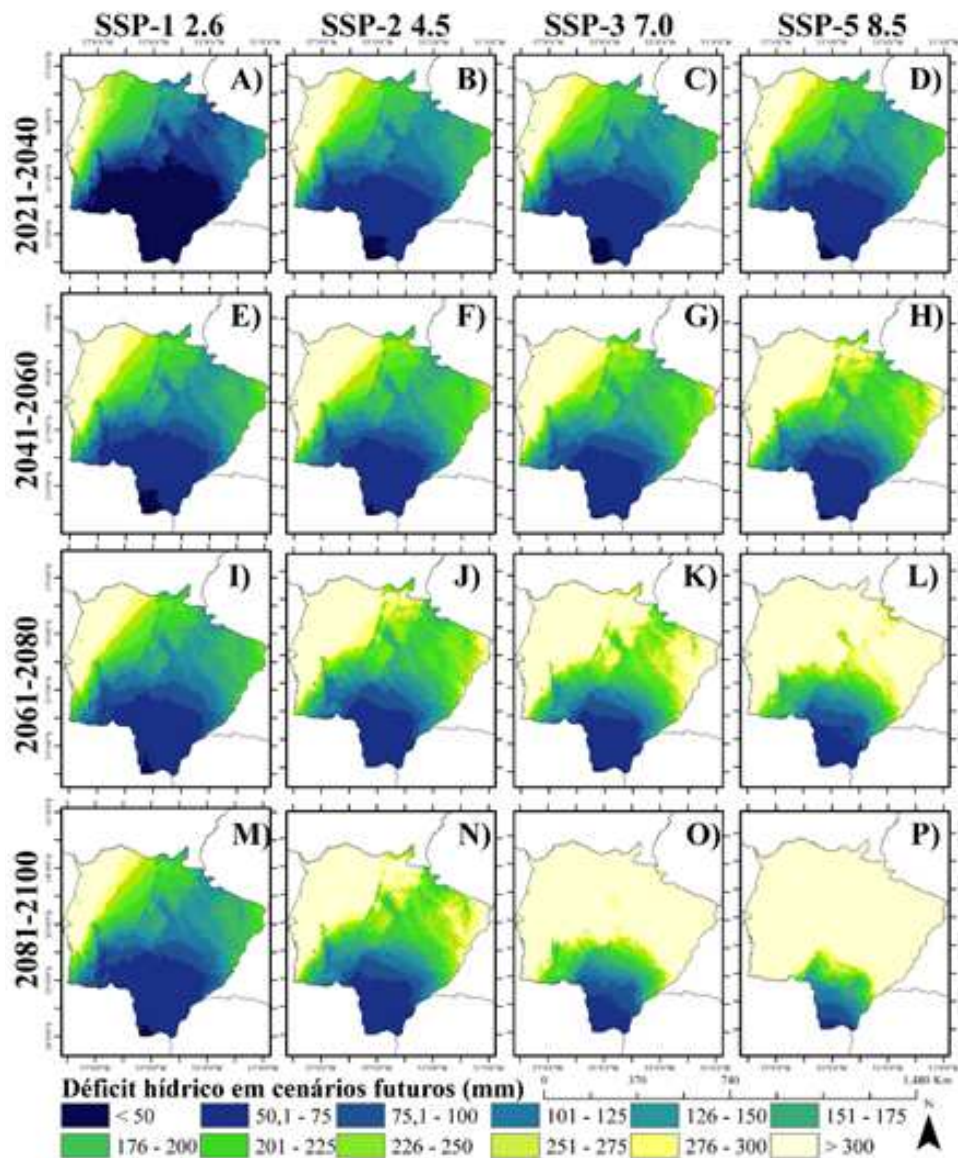
A análise dos mapas projetados revela uma tendência preocupante de agravamento das condições de seca ao longo do século XXI, variando significativamente de acordo com os diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa propostos pelo CMIP6 (Figura 4). No início do período de projeção, de 2021 a 2040 (Figuras 4A, 4B, 4C e 4D), já se percebe uma diferenciação entre os cenários de desenvolvimento sustentável e aqueles com altas emissões.



Embora os déficits sejam moderados em todos os cenários, o sul do Estado já apresenta sinais de estresse hídrico.

À medida que se avança para o período de 2041 a 2060 (Figuras 4E, 4F, 4G e 4H), a intensificação do déficit hídrico se torna mais evidente, particularmente nos cenários de alta emissão. Este agravamento continua e se torna ainda mais pronunciado nas décadas subsequentes. Em 2061 a 2080 (Figuras 4I, 4J, 4K e 4L), a paleta de cores dos mapas muda progressivamente, indicando um aumento substancial no déficit, com partes do Estado entrando em uma faixa crítica, acima de 275 mm.

**Figura 4** – Déficit hídrico em cenários futuros do clima e os cenários de mudanças climáticas do CMIP6



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

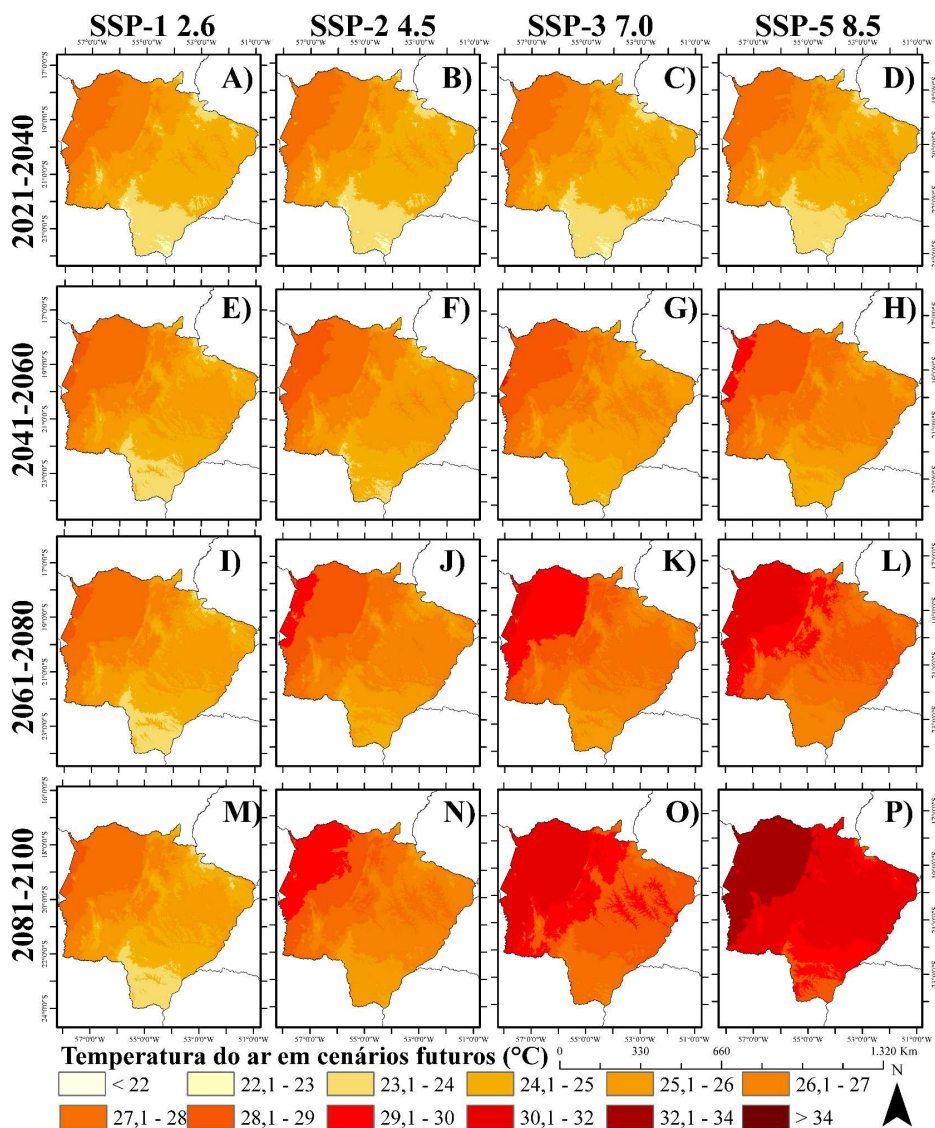
A fase final das projeções, de 2081 a 2100 (Figuras 4M, 4N, 4O e 4P), mostra a situação mais grave, com o cenário de alta emissão (SSP-5), apresentando vastas áreas do Estado em vermelho, sinalizando déficits superiores a 300 mm. Mesmo o cenário SSP-1, que reflete uma

abordagem mais sustentável e mitigadora, mostra um aumento no déficit hídrico, embora em uma escala muito menor.

Atravessando esses cenários e períodos, é possível concluir que a ação climática tem um papel crucial na determinação do futuro hídrico do estado. A ausência de medidas efetivas de mitigação, conforme ilustrado pelos cenários SSP-3 e SSP-5, pode levar a um futuro de escassez de água significativa, afetando não apenas o abastecimento humano e a vida selvagem, mas também a economia local, dominada pela agricultura e pecuária. Em contraste, um caminho mais sustentável e com menor emissão de carbono pode moderar esses efeitos, mas ainda assim apresenta desafios que exigirão adaptação. Esses mapas servem como um chamado à ação, destacando a importância das decisões políticas atuais e futuras na gestão dos recursos hídricos e na luta contra a mudança climática.

A imagem apresentada é um conjunto de mapas de projeção climática (Figura 5), representando a temperatura do ar prevista em cenários futuros para o Estado do Mato Grosso do Sul, no Brasil, de acordo com diferentes SSPs do CMIP6.

**Figura 5** – Temperatura do ar atual e os cenários de mudanças climáticas do CMIP6



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

Analisando a imagem, percebe-se que ela ilustra um panorama preocupante sobre as projeções de temperatura do ar para o Mato Grosso do Sul em diferentes cenários de mudanças climáticas. O período abordado estende-se ao longo do século XXI, dividido em janelas de 20 anos, de 2021 até 2100.

No cenário mais otimista (SSP1-2.6), que pressupõe medidas eficazes de mitigação das mudanças climáticas, observa-se que o aumento da temperatura é moderado. Mesmo assim, há um gradiente visível de aquecimento ao longo do século. O cenário intermediário (SSP2-4.5) já revela um aquecimento mais acentuado, indicando que, sem reduções significativas nas emissões, a região de estudo enfrentará elevações mais substanciais.

Os cenários mais preocupantes são o SSP3-7.0 e o SSP5-8.5, que projetam um futuro com pouca ou nenhuma mitigação das emissões. Nota-se que haverá um aumento considerável nas temperaturas, especialmente na Região Norte, que se torna excepcionalmente mais quente. No final do século, sob o cenário SSP5-8.5, praticamente todo o Estado está sujeito a temperaturas acima de 30°C, com grandes áreas ultrapassando 34°C.

Essas projeções têm implicações sérias para a região, por exemplo, o aumento das temperaturas pode intensificar o estresse hídrico, alterar padrões de chuva e afetar negativamente a agricultura, uma vez que culturas típicas podem não se adaptar bem ao novo clima. Além disso, o Pantanal, um ecossistema-chave localizado no sul do estado, pode ser gravemente impactado, com efeitos adversos sobre a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos.

O mapa de zoneamento agrícola para a cultura da cana-de-açúcar no Estado do Mato Grosso do Sul (Figura 6) revela a diversidade geográfica e de aptidão agrícola da região.

As áreas marcadas em verde escuro, que predominam no mapa na Região Leste e Central do Estado, representam as áreas mais propícias para o cultivo da cana-de-açúcar sem a necessidade de irrigação adicional. Essas áreas são possivelmente planas e férteis, encontradas centralmente e ao norte do Estado, onde o clima é favorável para a agricultura.

Na Região Nordeste do Mato Grosso do Sul, a priorização da classificação relacionada ao estresse térmico é de fundamental importância. Essa área é marcada por um clima que impõe certos desafios ao cultivo da cana-de-açúcar, com temperaturas que, muitas vezes, excedem os limites ideais para o desenvolvimento saudável da cultura. As variações térmicas nessa região podem afetar significativamente o crescimento e a produtividade das plantações, tornando o monitoramento climático e a gestão agrícola mais críticos.

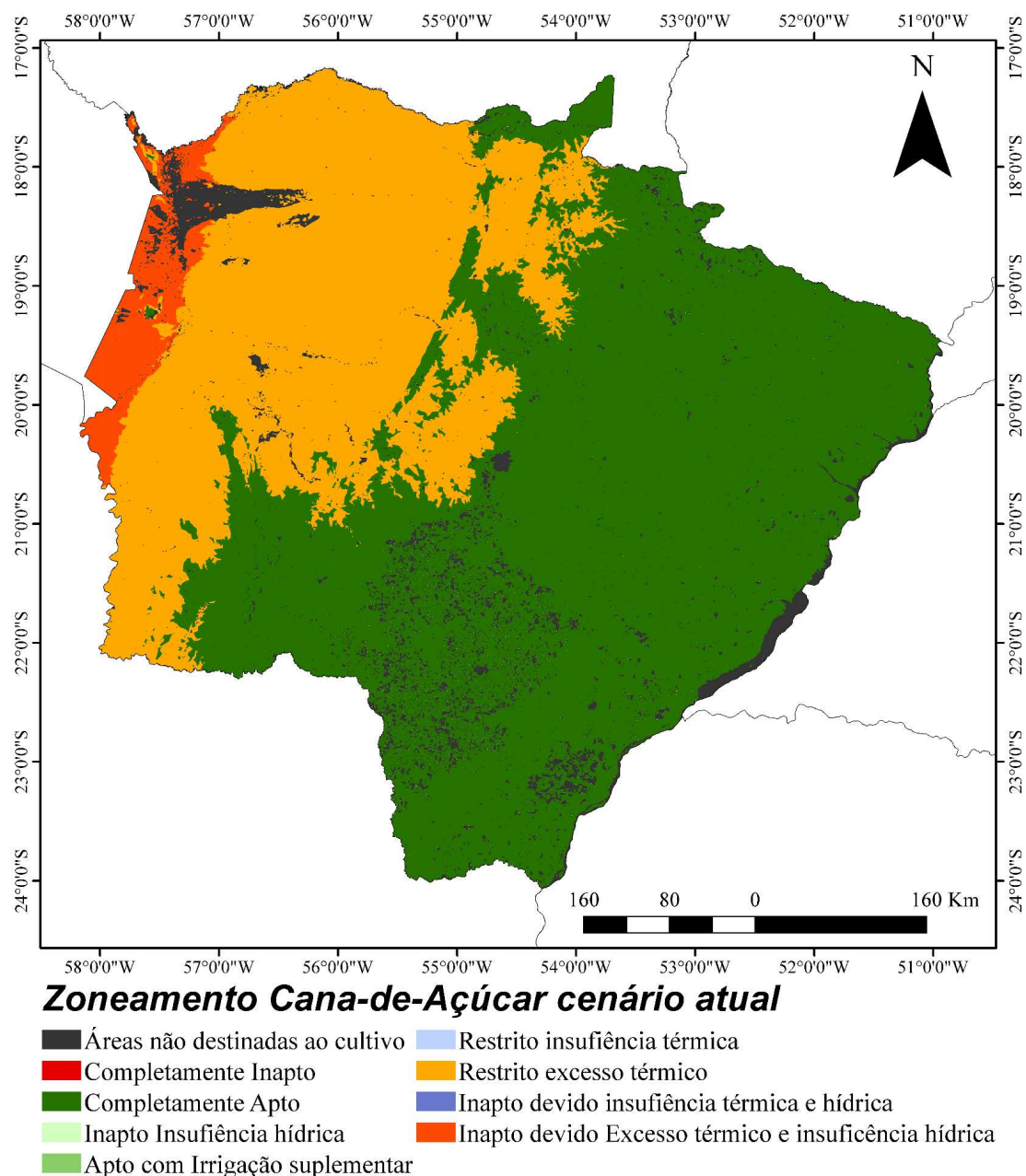
A cor laranja sinaliza áreas com restrições térmicas, que podem ser mais quentes provocando estresse térmico juntamente com a insuficiência hídrica, como as localizadas a oeste do estado, afetando negativamente o desenvolvimento da cultura.

O cinza marca as áreas que enfrentam o desafio de temperaturas altas e falta de água, sugerindo um clima mais árido, típico de regiões próximas ao cerrado.

Esse zoneamento é crucial para um planejamento agrícola eficiente e sustentável, permitindo aos produtores e ao governo tomar decisões baseadas em informações detalhadas sobre as condições de cultivo específicas de cada região do Mato Grosso do Sul.



**Figura 6** – Temperatura do ar atual e os cenários de mudanças climáticas do CMIP6



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

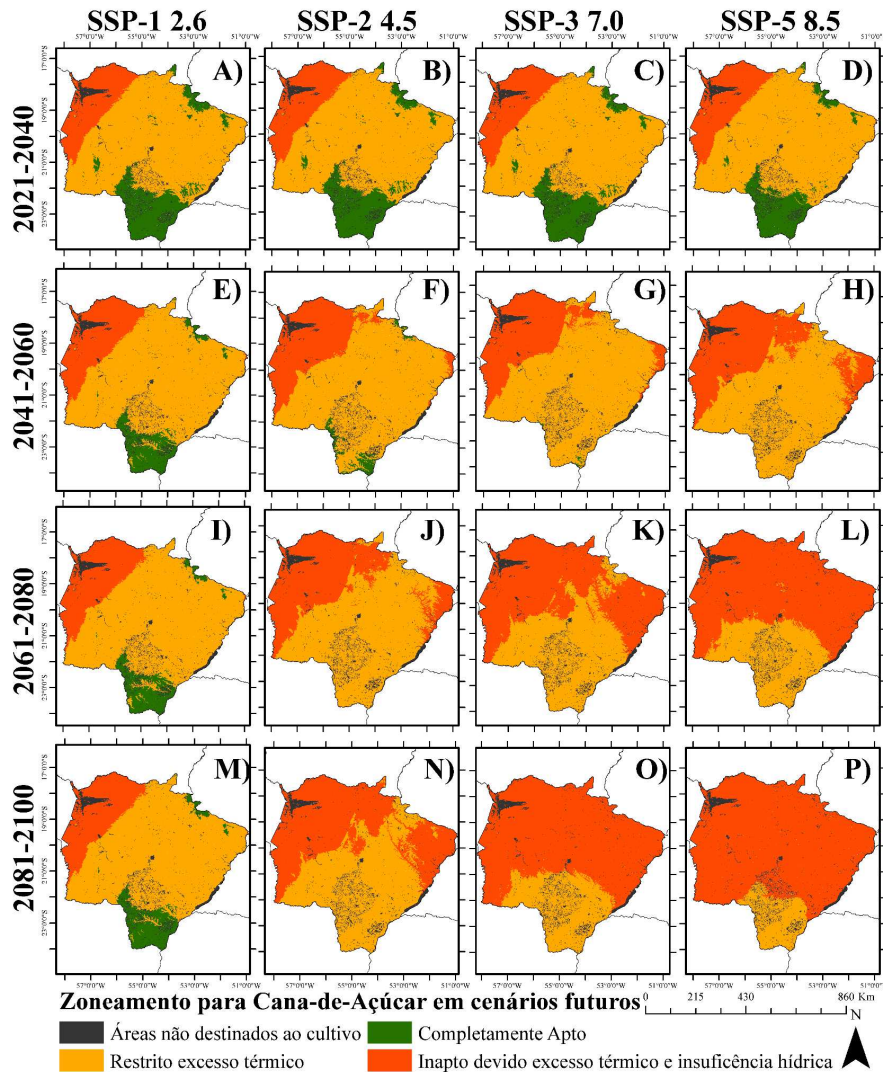
Ao notar o zoneamento para Cana-de-Açúcar em cenários futuros de mudança climática, observa-se que há uma tendência de redução nas áreas aptas para o cultivo no Mato Grosso do Sul (MS) em todos os cenários projetados (SSP-1 2.6, SSP-2 4.5, SSP-3 7.0, SSP-5 8.5), ao longo dos diferentes períodos analisados (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100) (Figura 7).

Especificamente, é prevista uma diminuição significativa de 83,28% nas áreas aptas no período de 2041-2060. A redução na aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar é mais acentuada nos cenários extremos, como o SSP-5 8.5, no qual é possível que as áreas adequadas



apresentem reduções drásticas ou até se tornem inviáveis até o ano 2100. O cenário SSP-1 2.6 indica a menor redução nas áreas de cultivo, embora ainda expressiva.

**Figura 7** – Zoneamento agrícola da cana-de-açúcar em cenários futuros do CMIP6



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

Tais alterações climáticas, especialmente em cenários de elevada forçante radiativa como o SSP-5 8.5, podem provocar impactos negativos substanciais no setor sucroenergético de MS, com possíveis consequências adversas para a economia regional. É imperativo, portanto, que estratégias de adaptação e de mitigação sejam consideradas para enfrentar os desafios impostos às áreas de cultivo de cana-de-açúcar devido às mudanças climáticas.

## 4 Considerações Finais

Para o Estado do Mato Grosso do Sul, a análise dos cenários climáticos revela que o menor impacto é previsto sob o cenário SSP-1 2.6 para o período de 2021 a 2040, com uma temperatura média do ar estimada em 22,8 ( $\pm 1,8$ ) °C. Isso representa um aumento de 4,0% em comparação com as condições atuais. Em contraste, o cenário SSP-5 8.5, para as décadas

de 2081 a 2100, projeta as maiores temperaturas médias, atingindo 28,2 ( $\pm 2,0$ ) °C, ou um incremento de 28,4% em relação ao presente.

Quanto ao déficit hídrico, são detectadas variações significativas entre os cenários. O SSP-1 2.6 antecipa um crescimento médio de 65,02% , para o período de 2021 e 2040. Por outro lado, o cenário SSP-5 8.5, o mais extremo, projeta um aumento para 338,42 mm no período de 2081 a 2100. Isso sugere uma tendência de condições cada vez mais secas em todos os cenários analisados, com impactos mais pronunciados ao longo do tempo.

O estudo sobre o zoneamento da cana-de-açúcar identificou quatro categorias de aptidão agrícola. Atualmente, 58,88% do território estadual apresenta condições favoráveis ao cultivo. Contudo, projeções de mudanças climáticas apontam para uma redução da área apta sob todos os cenários futuros. O cenário SSP-2 4.5, por exemplo, indica uma possível diminuição de até 83,28% na área apta nas décadas de 2041 a 2060.

Em cenários extremos, como o SSP-5 8.5, as mudanças são ainda mais radicais, causando a eliminação completa das áreas antes consideradas aptas. O aumento das temperaturas e a redução da disponibilidade de água são fatores que expandem as áreas classificadas como inaptas, que podem chegar a 82,86% do estado no período de 2081 a 2100.

Especificamente, a Região Noroeste do estado, caracterizada por altas temperaturas, compreende 32,46% da área e sofre uma redução na qualidade da produção, apesar de não eliminar completamente a viabilidade do cultivo. O bioma Pantanal, especialmente vulnerável ao calor excessivo e à escassez de água, é classificado como “Completamente inapto” para o cultivo.

Em síntese, as projeções climáticas indicam um impacto negativo sobre o zoneamento da cana-de-açúcar. Essas mudanças representam um desafio significativo para o setor sucroalcooleiro do estado, sublinhando a necessidade de estratégias de adaptação e de práticas agrícolas que sejam resilientes às mudanças climáticas. A sustentabilidade e a conservação ambiental emergem como fundamentais para assegurar o futuro da sua produção.

## 5 Perspectivas Futuras

As perspectivas futuras para o projeto concentram-se em estratégias integradas que priorizam sistemas avançados de previsão climática e o estabelecimento de uma rede de monitoramento em tempo real, permitindo ajustes ágeis nas práticas agrícolas para melhor aproveitamento dos recursos naturais. A adoção de tecnologias de agricultura de precisão, como sensores, drones e sistemas GIS, contribuirá significativamente para a eficiência do plantio e o manejo das culturas. Além disso, a biotecnologia surge como um campo promissor para aumentar a resistência das plantas e a produtividade das culturas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS) e à Fundect pela colaboração e pelo suporte durante todo o processo de construção deste artigo.

## Referências

- BACCHI, O. O. S. **Ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Piracicaba: IAA-Planalsucar, 1985. 20p.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos – safra 2021/22**: sexto levantamento. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/safra-graos/boletim-da-safra-de-graos?start=20>. Acesso em: 15 set. 2024.
- DOS REIS, C. J. *et al.* Modeling of the air temperature using the Extreme Value Theory for selected biomes in Mato Grosso do Sul (Brazil). **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, [s.l.], v. 36, n. 10, p. 3.499-3.516, 2022.
- FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, [s.l.], v. 37, n. 12, p. 4.302-4.315, 2017.
- GUSAIN, A.; GHOSH, S.; KARMAKAR, S. Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. **Atmospheric Research**, [s.l.], v. 232, p. 104680, 2020.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola Estatística da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.
- KRIEGLER, E. *et al.* Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century. **Global Environmental Change**, [s.l.], v. 42, p. 297-315, 2017.
- LOPES, A. S. **Desenvolvimento regional**. [S.l.]: Fundação Calouste Gulbenkian, Serviço de Educação, 1980.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Projeções do agronegócio**: Brasil 2016/17 a 2026/27. [S.l.] Mapa, 2017.
- MARIN, F.; NASSIF, D. S. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 17, p. 232-239, 2013.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Potential and Actual Sugarcane Yields in Southern Brazil as a Function of Climate Conditions and Crop Management. **Sugar Tech**, [s.l.], v. 16, n. 3, p. 264-276, set. 2014.
- MOSS, R. H. *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, [s.l.], v. 463, n. 7.282, p. 747-756, 2010.
- O'NEILL, B. C. *et al.* The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, [s.l.], v. 9, n. 9, p. 3.461-3.482, 2016.
- PRETEL, A. F. **Análise da percepção dos gestores no uso da biomassa de cana-de-açúcar para a produção de bioenergia em MS**. Dourados: UFGD, 2023.
- RIAHI, K. *et al.* The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, [s.l.], v. 42, p. 153-168, 2017.
- ROLIM, G. de S.; ESCOBEDO, J. F.; OLIVEIRA, A. P. Validation of the Deardorff model for estimating energy balance components for a sugarcane crop. **Scientia Agrícola**, [s.l.], v. 65, p. 325-334, 2008.

SAMUELS, R. *et al.* Evaluation and projection of extreme precipitation indices in the Eastern Mediterranean based on CMIP5 multi-model ensemble. **International Journal of Climatology**, [s.l.], v. 38, n. 5, p. 2.280-2.297, abr. 2018.

SERRA, R. A.; FERREIRA, A. M.; MAGALHÃES, J. P. R. Caracterização das atividades coletivas com a população idosa no estado de Mato Grosso do Sul: Ciclo 2019 a 2022. **RBONE – Revista Brasileira de Obesidade, Nutrição e Emagrecimento**, [s.l.], v. 18, n. 113, p. 370-377, 2024.

SILVA, W. K. D. M. *et al.* Sugarcane production and climate trends in Paraíba state (Brazil). **Environmental Monitoring and Assessment**, [s.l.], v. 192, n. 6, p. 392, jun. de 2020.

SILVA, Marcelo de A. *et al.* Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 18, p. 241-249, 2014.

TEODORO, P. E. *et al.* Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Mato Grosso do Sul State, Brazil. **Meteorology and Atmospheric Physics**, [s.l.], v. 128, n. 2, p. 197-209, abr. de 2016.

TEODORO, R. E. F. *et al.* Balanço hídrico climatológico, armazenamento efetivo da água no solo e transpiração na cultura de café. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 221-229, 2011.

THORHNWAITE, C.; MATTER, J. **The water balance, publication in climatology**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955.

VAN VUUREN, D. P. *et al.* Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. **Global Environmental Change**, [s.l.], v. 42, p. 237-250, 2017.

VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P. C. Simulation of the water deficit risk in sugarcane-crop expansion regions in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 49, p. 237-246, 2014.

## Sobre os Autores

### Guilherme Botega Torsoni

E-mail: [guilherme.torsoni@ifms.edu.br](mailto:guilherme.torsoni@ifms.edu.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7178-2191>

Doutor em Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho em 2012.

Endereço profissional: Rua Taquarí, n. 831, Santo Antonio, Campo Grande, MS. CEP: 79100-510.

### Lucas Eduardo de Oliveira Aparecido

E-mail: [lucas.aparecido@muz.ifsuldeminas.edu.br](mailto:lucas.aparecido@muz.ifsuldeminas.edu.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4561-6760>

Doutor em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho em 2018.

Endereço profissional: Estrada de Muzambinho, Bairro Morro Preto, Muzambinho, MG. CEP: 37890-000.



### **João Antônio Lorençone**

*E-mail:* joao.lorencone@estudante.ifms.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1950-4853>

Técnico agrícola e graduando de Engenharia Agrônômica no Instituto Federal de Mato Grosso do Sul em 2019.

Endereço profissional: Rua Taquarí, n. 831, Santo Antonio, Campo Grande, MS. CEP: 79100-510.

### **Viviane Lima Catelan Moreira**

*E-mail:* vmoreira@iagro.ms.gov.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8516-9941>

Especialista em Educação Sanitária e Comunicação em Defesa Agropecuária pelo Instituto Federal de Mato Grosso do Sul em 2023.

Endereço profissional: Rua Taquarí, n. 831, Santo Antonio, Campo Grande, MS. CEP: 79100-510.