

**UFRRJ  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS  
EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**DISSERTAÇÃO**

**Áreas suscetíveis a desertificação no Brasil e projeções para cenários de  
mudanças climáticas**

**Jessica Barreto de Moraes**

**2021**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM  
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESERTIFICAÇÃO NO BRASIL E  
PROJEÇÕES PARA CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

**JESSICA BARRETO DE MORAES**

*Sob a Orientação do Professor*  
**Henderson Silva Wanderley**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável, Área de Meio Ambiente, Sustentabilidade e Conservação dos Recursos Naturais.

Seropédica, RJ  
Junho de 2021

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M827 Moraes, Jessica Barreto de, 1994-  
Áreas suscetíveis à desertificação no Brasil e  
projeções para cenários de mudanças climáticas /  
Jessica Barreto de Moraes. - Rio de Janeiro, 2021.  
58 f. : il.

Orientador: Henderson Silva Wanderley.  
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural  
do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em  
Práticas em Desenvolvimento Sustentável, 2021.

1. Índice de aridez. 2. Temperatura do ar. 3.  
Precipitação. I. Wanderley, Henderson Silva, 1981-,  
orient. II Universidade Federal Rural do Rio de  
Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Práticas em  
Desenvolvimento Sustentável III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL**

**JESSICA BARRETO DE MORAES**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável da UFRRJ.

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 09/06/2021**

---

**Henderson Silva Wanderley, Prof. Dr. – UFRRJ  
(Orientador)**

---

**Flávio Barbosa Justino, Prof. Dr. – UFV  
(Membro externo)**

---

**Rafael Coll Delgado, Prof. Dr. – UFRRJ  
(Membro externo)**

*(Assinado digitalmente em 23/06/2021 15:35 )*  
HENDERSON SILVA WANDERLEY  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptCAmb (12.28.01.00.00.00.00.29)  
Matrícula: 2086234

*(Assinado digitalmente em 23/06/2021 15:42 )*  
RAFAEL COLL DELGADO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptCAmb (12.28.01.00.00.00.00.29)  
Matrícula: 1872560

*(Assinado digitalmente em 02/07/2021 15:53 )*  
FLAVIO BARBOSA JUSTINO  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 738.693.764-49

Para verificar a autenticidade deste documento entre em  
<https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **751**, ano:  
**2021**, tipo: **PARECER**, data de emissão: **23/06/2021** e o código de verificação: **ed2a7b14bb**

## **DEDICATÓRIA**

*Ao meu avô*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu avô, minha maior inspiração para seguir estudando nesse tema como sonho de criança em ajudar o Nordeste. Vô, você é a minha força.

À minha mãe, obrigada por todo apoio, carinho e exemplo. Você é minha base e está sempre me fortalecendo e guiando nessa jornada da vida.

À minha tia por toda sabedoria e orientação no meu autoconhecimento. Obrigada tia por sempre me ensinar a enfrentar minhas inseguranças e estar em constante evolução.

Ao meu orientador, Henderson, por todo conhecimento, e confiança depositada para o desempenho deste trabalho. Sua gentileza e paciência tornaram essa jornada do mestrado mais leve, muito obrigada.

Ao meu namorado Raphael, por todo carinho, companheirismo, apoio e suporte. Obrigada por estar comigo nessa caminhada.

À Luciene Pedrosa, profissional de excelência que me inspira e me faz sempre querer crescer e melhorar. Obrigada por acreditar em mim e ser incentivadora do meu trabalho.

À Tabita Loureiro, minha mentora, muito obrigada por todo apoio e conhecimento, por fortalecer minha identidade e mostrar quem eu sou e quem posso ser. Que honra a ter como minha mentora, me orientando no meu crescimento pessoal e profissional.

A todos os meus amigos pelo acolhimento, apoio e motivação em todos os momentos. Agradeço em especial Jéssica, Thaís e Carol que estão sempre ao meu lado.

A todas as pessoas nas empresas que estagiei e na ANP que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento. Em especial Mariana Espécie que plantou a sementinha para que eu fizesse esse mestrado, e Lívia e Alexandre, meu sincero agradecimento.

Ao PPGPDS e Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela oportunidade de fazer este esse mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

E a todos que de alguma forma colaboraram com a realização deste trabalho.

## RESUMO

MORAES, Jessica Barreto de. **Áreas suscetíveis a desertificação no Brasil e projeções para cenários de mudanças climáticas**. 2021. 58p. Dissertação (Mestrado em Práticas em Desenvolvimento Sustentável). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

A desertificação é o processo de degradação do solo a partir de causas naturais e/ou antrópicas em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas. Além da sua abrangência mundial, a desertificação tem sido considerada um dos mais graves problemas que atinge as vertentes social, econômica e ambiental. Identificar essas regiões pode subsidiar o planejamento do uso racional da água visto que essas áreas apresentam restrições hídricas e são afetadas pelas variabilidades climáticas. Uma das formas de avaliar a desertificação é a partir do índice de aridez (IA), que permite classificar as áreas quanto às suas características climáticas. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo identificar as áreas suscetíveis à desertificação no Brasil, a partir do índice de aridez, e suas alterações para cenários futuros de mudanças climáticas. A pesquisa foi realizada para todo território brasileiro, com a utilização de dados de temperatura do ar e precipitação para o período climatológico atual 1990 a 2018 e cenários futuros de mudanças climáticas (CFMC) de 2021 a 2100. Para os CFMC foram utilizadas projeções futuras de oito modelos, adotando as projeções do CMIP-6 para os cenários de mudanças intermediário SSP 4.5 e pessimista SSP 8.5. O IA foi calculado a partir da metodologia de Thornthwaite (1948) e complementada por Penman (1953). Os resultados indicaram, para o período atual, temperatura acima de 24°C cobrindo a maior parte do país, com os maiores valores na Região Norte que atingiu até 28°C, e os menores na região Sul, em torno de 11°C. A precipitação variou desde 500 mm/ano no interior do Nordeste até acima de 3.500 mm/ano na região Norte. Em relação ao IA as regiões mais úmidas do país são Norte e Sul, enquanto o Nordeste é a região mais árida. Para o cenário intermediário SSP 4.5 as projeções dos modelos apontam aumento médio da temperatura em torno de 3 °C e variação da precipitação média em torno de -4,5 a 6,0% até o final do século para o Brasil. Os modelos indicam aumento do clima subúmido seco e tendência de alta e moderada suscetibilidade à desertificação até o final do século para o Brasil. Para o cenário pessimista SSP 8.5 projeta-se aumento médio da temperatura em torno de 6 °C e variação da precipitação em torno de -10,0 a 4,5%, além de aumento expressivo do clima semiárido e tendência de alta suscetibilidade à desertificação. As regiões Centro-Oeste e Sudeste apresentam tendência de aumento de áreas com clima semiárido. A região Sul obteve menor variação, apresentando clima úmido. No Nordeste há indicativo de aumento do clima árido, enquanto no Norte prevalece o clima subúmido seco. Logo, a maior parte do Brasil apresenta projeção de alta suscetibilidade à desertificação. Destaca-se que a região Norte foi a que obteve maior aumento de temperatura e intensificação da aridez, representando um desafio na gestão brasileira dos recursos hídricos e sua capacidade de suprimento.

**Palavras-chave:** Temperatura do ar, Precipitação, índice de aridez.

## ABSTRACT

MORAES, Jessica Barreto de. **Susceptible areas to desertification in Brazil and projections for climate change**. 2021. 58p. Dissertation (Master in Sustainable Development Practices) Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropedica, RJ, 2021.

Desertification is the process of soil degradation from natural and/or anthropic causes in arid, semi-arid and sub-humid dry areas. In addition to its worldwide phenomenon, desertification has been considered one of the most serious problems affecting social, economic and environmental aspects. Identifying these regions can support the planning of the rational use of water since these areas present water restrictions and are affected by climatic variability. One of the ways to assess desertification is from the aridity index (AI), which allows the classification of areas according to their climatic conditions. Therefore, the present work aims to identify susceptible areas to desertification in Brazil, based on the aridity index, and their changes to future climate change scenarios. The methodology was conducted for the entire Brazilian territory, using air temperature and precipitation data for the current climatological period 1990 to 2018 and future climate change scenarios (FCCS) from 2021 to 2100. For the FCCS, future projections of eight models were used, with CMIP-6 projections for the intermediate SSP 4.5 and pessimistic SSP 8.5 scenarios. The AI was calculated using the methodology of Thornthwaite (1948) and complemented by Penman (1953). The results indicated, for the current period, temperature above 24°C covering most of the country, with the highest values in the North Region reaching up to 28°C, and the lowest in the South region, around 11°C. Precipitation ranged from 500 mm/year in the interior of the Northeast to over 3.500 mm/year in the North region. Regarding AI, the most humid regions of the country are North and South, while the Northeast is the most arid one. For the intermediate scenario SSP 4.5 the projections point to an average increase in temperature around 3°C and average precipitation around -4,5 a 6,0% towards the end of the century for Brazil. The models indicate an increase in the dry sub-humid climate and a trend of high and moderate susceptibility to desertification by the end of the century in Brazil. For the pessimistic scenario SSP 8.5, an increase in average temperature around 6°C and precipitation around -10,0 a 4,5% are projected, in addition to an increase in the semi-arid climate and a trend of high susceptibility to desertification. The Midwest and Southeast regions tend to increase areas with a semi-arid climate. The South region had the lower variation, with a humid climate. In the Northeast there is an indication of an increase in the arid climate, while in the North the dry sub-humid climate prevails. Therefore, most of Brazil is projected to be highly susceptible to desertification. Moreover, the North region was the one with the highest increase in temperature and intensification of aridity, representing a challenge in the Brazilian management of water resources and their supply capacity.

**Key words:** Air temperature, precipitation, aridity index.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Distribuição global das terras baseadas no índice de aridez. Fonte: Adaptado de Cherlet <i>et al.</i> , 2018. ....	3
<b>Figura 2:</b> Emissões futuras de CO <sub>2</sub> para os cenários do CMIP6. Fonte: Carbon Brief (CMIP6, 2020). ....	9
<b>Figura 3:</b> Localização da área de estudo. ....	11
<b>Figura 4:</b> Temperatura do ar média (°C) e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 e SSP 8.5. ....	14
<b>Figura 5:</b> Distribuição espacial da temperatura do ar média (°C) e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 (B, C, D e E) e SSP 8.5 (F, G, H, e I). ....	15
<b>Figura 6:</b> Precipitação média anual (mm) e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 (B, C, D e E) e SSP 8.5 (F, G, H, e I). ....	18
<b>Figura 7:</b> Distribuição espacial da precipitação média anual (mm) e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 (B, C, D, E) e SSP 8.5 (F, G, H, I). ....	19
<b>Figura 8:</b> Índice de aridez e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 e SSP 8.5. ....	21
<b>Figura 9:</b> Distribuição espacial do índice de aridez e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 (B, C, D e E) e SSP 8.5 (F, G, H, e I). ....	22

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Classificação climática de acordo com o índice de aridez. ....	7
<b>Tabela 2:</b> Suscetibilidade à desertificação em função do nível de aridez. ....	8
<b>Tabela 3:</b> Modelos climáticos utilizados para a projeção futura. ....	12

## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ASD	Áreas suscetíveis à desertificação
CCD	Convenção de Combate à Desertificação
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
CRU-TS	<i>Climatic Research Unit Gridded Time Series</i>
DIS4ME	Desertificação para o Mediterrâneo e Europa
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETP	Evapotranspiração potencial
GCM	<i>Global Climate Model</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
IA	Índice de aridez
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
mm	Milímetros
PACD	Plano de Ação de Combate à Desertificação
PAN	Plano Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca
SAP	Sistema de Alerta Precoce contra Seca e Desertificação
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
UNCCD	<i>United Nations Convention to Combat Desertification</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>2</b>
2.1	Conceito de desertificação .....	2
2.2	Desertificação no mundo .....	2
2.3	Desertificação no Brasil.....	4
2.4	Índice de aridez no estudo da desertificação .....	6
2.5	Cenários de mudanças climáticas .....	8
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>11</b>
3.1	Área de estudo .....	11
3.2	Dados climáticos.....	12
3.3	Método .....	12
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>14</b>
4.1	Análise das variáveis climáticas .....	14
4.1.1	Análise da temperatura do ar média.....	14
4.1.2	Análise da precipitação .....	17
4.2	Análise do índice de aridez .....	20
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>26</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A desertificação é o processo de degradação das áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, desencadeado por ações naturais e/ou antrópicas (DOURADO, 2017; ARAÚJO e SOUZA, 2017). Além de transformar terras agricultáveis em terras improdutivas, a desertificação vem sendo um desafio para as vertentes socioeconômicas, climáticas e ambientais (SCHENKEL e MATALLO JÚNIOR, 1999; DOURADO, 2017; WU *et al.*, 2018).

Esse fenômeno pode ser determinado a partir do nível de aridez da região, caracterizado pela redução da disponibilidade hídrica. Este fator está associado às mudanças climáticas, capaz de provocar alterações no ciclo hidrológico, a partir de mudanças como aumento da temperatura do ar e solo, mudança na distribuição da precipitação e aumento da evapotranspiração (EPE, 2018). Consequentemente, a desertificação pode exercer pressão na disponibilidade hídrica do sistema brasileiro (FERNANDES *et al.*, 2017), provocando impactos no abastecimento humano, nos recursos energéticos e produção agrícola (EPE, 2018).

O Brasil se destaca mundialmente por possuir matriz energética com grande participação de fontes renováveis, cerca de 46,1% em 2019 (EPE, 2020). No entanto, as principais fontes renováveis, biomassa da cana-de-açúcar e hidráulica, dependem das condições climáticas. Além de afetar o setor energético, as mudanças climáticas também influenciam no setor agrícola, atividade econômica dependente das condições climáticas.

Há uma tendência de aumento da demanda de água de irrigação a fim de aumentar a oferta de alimentos para suprir a crescente demanda mundial (GUIMARÃES e LANDAU, 2020). Esse aumento da demanda de água pode reduzir a segurança alimentar além de promover maior vulnerabilidade aos produtores rurais. Os impactos das mudanças climáticas na produção agrícola repercutem sobre diversos setores econômicos. Por exemplo, o aumento do custo da produção agrícola e pecuária eleva o custo do insumo para o setor de alimentos e consequentemente, para o consumo das famílias (DOMINGUES, MAGALHÃES, RUIZ, 2011).

Dessa forma, o conhecimento da aridez torna-se essencial para analisar como a mudança do clima pode impactar no avanço ou regresso da desertificação no Brasil. Por conseguinte, pode oferecer suporte na elaboração de políticas públicas voltadas para a gestão eficiente dos recursos hídricos, auxiliando na recuperação das regiões afetadas, conservando os recursos naturais e promovendo o desenvolvimento social das regiões.

Para melhor avaliação da desertificação tem-se o Índice de Aridez (IA), que relaciona a quantidade de água advinda pela precipitação e a perda de água pela evapotranspiração (SCHENKEL e MATALLO JÚNIOR, 1999). Este índice é relevante nos estudos da desertificação, pois permite classificar as áreas quanto à sua condição climática, identificando a deficiência hídrica (MATALLO JÚNIOR, 2009), e consequentemente à suscetibilidade de ocorrência desse processo (SANTOS *et al.*, 2016; LOPES *et al.*, 2017). Visto que a desertificação está relacionada com a qualidade de vida e integra fatores ambientais, socioeconômicos e climáticos, o presente trabalho analisou a desertificação apenas pelo fator climático, considerado como o fator principal (LOPES *et al.*, 2017). Este trabalho tem como objetivo identificar áreas suscetíveis à desertificação no Brasil, a partir do índice de aridez, e suas alterações para os cenários futuros de mudanças climáticas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Conceito de desertificação

De acordo com a Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação (do inglês UNCCD), a desertificação é definida como a degradação do solo nas áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, decorrente de variações climáticas e atividades antrópicas (BRASIL, 1994).

Por ser um fenômeno transdisciplinar, integrando os fatores socioeconômico e ambiental, e pela amplitude conceitual por conta da associação com a seca, o conceito de desertificação apresenta uma fragilidade no entendimento teórico (MATALLO JÚNIOR, 2001). Dessa forma, a falta de conhecimento pode passar a ideia de que é um fenômeno natural e localizado, restringindo o investimento e a priorização do problema (MATALLO JÚNIOR, 2001; RÊGO, 2012).

A desertificação e a seca são fenômenos de ocorrência global (RÊGO, 2012), no qual a seca meteorológica é definida como um fenômeno natural cíclico, resultante da precipitação inferior aos valores considerados normais (BRASIL, 1994). Também existe a seca agrícola definida como *déficit* de umidade no solo para as culturas (WMO, 1975).

Outro conceito que pode causar controvérsia com o tema é a desertização, caracterizado como o processo de formação de desertos (VASCONCELOS SOBRINHO, 1977). Em outras palavras, é a irreversibilidade das zonas áridas (RÊGO, 2012). A distinção entre desertização e desertificação é que os desertos são provenientes da evolução climática, enquanto desertificação é decorrente do manejo inadequado dos recursos naturais em regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas (MATALLO JÚNIOR, 2009).

O conceito de desertificação está relacionado com a degradação do meio ambiente e o aumento da aridez (RÊGO, 2012). Define-se como aridez a característica do clima de deficiência hídrica adequada para manter uma vegetação, proveniente da quantidade de água obtida pela precipitação e perdida pela evapotranspiração (ALVES *et al.*, 2012).

Outra forma de definir a desertificação é como o fenômeno decorrente tanto da ação antrópica sobre o meio ambiente, quanto natural, como a variabilidade climática, que leva ao declínio da produtividade econômica (JOHNSON, 2003).

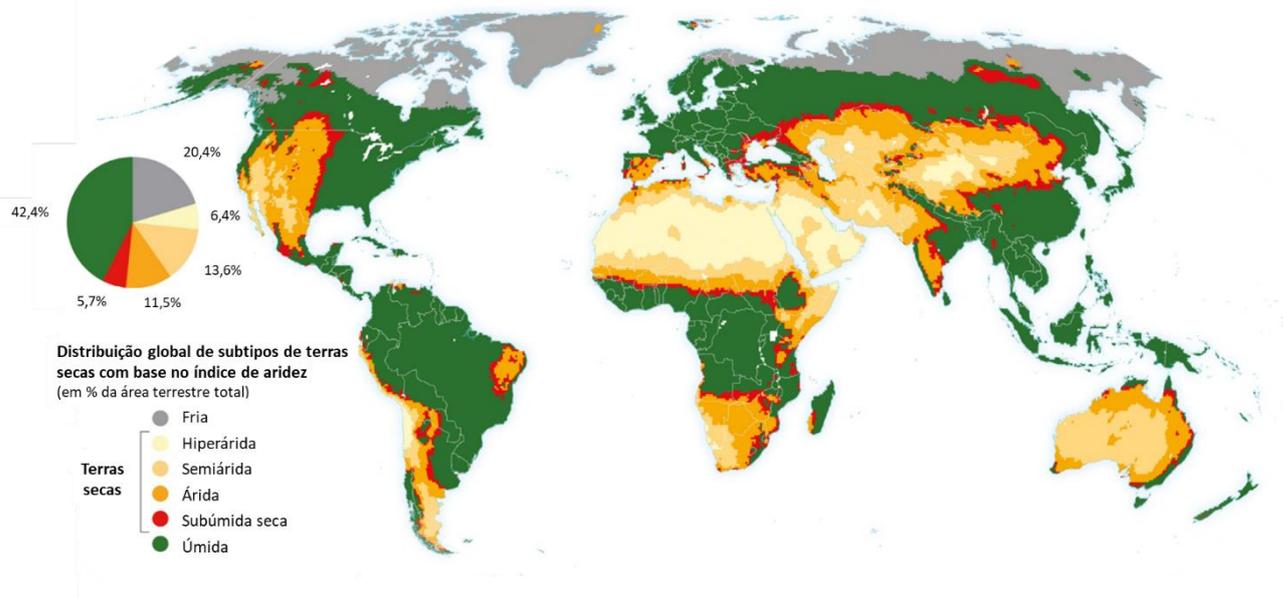
Entender como a variabilidade climática, definida como alteração das condições climáticas em torno de uma média climatológica (ANGELOCCI e SENTELHAS, 2007), influencia no processo de desertificação, é essencial para caracterizar a disponibilidade hídrica e subsidiar o planejamento racional para o uso (SOUZA *et al.*, 2014). Uma forma de calcular essas variações é a partir do índice de aridez definido por Thornthwaite (1948) e complementado por Penman (1953), que expressa a relação da precipitação anual e evapotranspiração potencial de uma determinada região.

O uso desse índice possibilita estabelecer limites geográficos para diferentes características climáticas (DA CUNHA e MARTINS, 2009). Consequentemente, permite determinar o quão provável desse fenômeno ocorrer, ou seja, a suscetibilidade das áreas à desertificação (LOPES *et al.*, 2017; GIRÃO, RABELO, ZANELLA, 2018).

### 2.2 Desertificação no mundo

A desertificação ocorre em todos os continentes, com exceção da Antártica, compreendendo mais de 30% da superfície terrestre (Cherlet *et al.*, 2018) (Figura 1) além de ter afetado cerca de 2 bilhões de habitantes, 1/3 da população mundial em 2000 (ADEEL *et al.*, 2005). As regiões de ocorrência da desertificação são responsáveis por 22% da produção

mundial de alimentos (RÊGO, 2012). Além disso, estima-se perda adicional de 200.000 km<sup>2</sup> de terra produtiva globalmente (ABAHUSSAIN *et al.*, 2002). Isto reflete economicamente em torno de 42 bilhões de dólares em prejuízo econômico global (RÊGO, 2012).



**Figura 1:** Distribuição global das terras baseadas no índice de aridez. Fonte: Adaptado de Cherlet *et al.*, 2018.

O processo de exploração dos recursos naturais está associado à desertificação desde o século XVI. Em 1750 iniciou-se a ocupação do Equador, marcada pela exploração da casca da Cinchona, conhecida pela sua ação contra malária. Sua exploração representou o processo de desertificação do sul do Equador, que sucedeu por mais de 50 anos de exploração pelos espanhóis (MATALLO JÚNIOR, 2001).

O primeiro processo de desertificação do período moderno motivado pelo uso inadequado dos recursos naturais e sua intensa exploração ocorreu na década de 1930 nos estados do oeste americano conhecido como Dust Bowl (SCHENKEL e MATALLO JÚNIOR, 1999; MATALLO JÚNIOR, 2009). As principais causas foram o desmatamento e a exploração do solo a partir da agricultura e pecuária, com destaque para uma forte seca entre os anos de 1929 e 1932 (SCHENKEL e MATALLO JÚNIOR, 1999). Essa área semiárida engloba mais de 300.000 km<sup>2</sup> tornando-se também razão para estudos na temática desertificação (MATALLO JÚNIOR, 2009).

Após esse evento, a desertificação ganhou visibilidade mundial com a seca que atingiu a região de Sahel, abaixo do deserto do Saara na África, no período entre 1967 e 1976 (BRASIL, 2004). A seca favoreceu a redução da produtividade, ocasionando baixa cobertura vegetal e, conseqüentemente aumento do albedo. Essa redução da cobertura vegetal também pode levar à erosão do solo, diminuindo a reciclagem da água e com isso reduzindo a precipitação. (BRASIL, 2004; ADEEL *et al.*, 2005).

Em 1977 ocorreu a primeira Conferência das Nações Unidas sobre a Desertificação, em Nairobi, Quênia, evento motivado pela seca que afetou a região do Sahel (SUERTEGARAY *et al.*, 2001). Nessa Conferência, a desertificação foi definida como a redução do potencial biológico do solo, podendo levar a condições de tipo desértico.

De acordo com UNCCD (2009a), cerca de 70% das regiões secas no mundo (exceto desertos hiperáridos) estão degradadas. A desertificação afeta com maior impacto na África, onde 2/3 do continente é composto de deserto ou terra seca (UNCCD, 2009b). Na Ásia,

continente com desertos em expansão, as regiões áridas, semiáridas e subúmida seca atingiram 1,7 bilhões de hectares (UNCCD, 2009c).

A região árabe, que se estende desde o Iraque no norte à Somália no sul e da Mauritânia no oeste até Omã no leste, representando 10% da área no mundo, possui cobertura de área extremamente árida, árida, semiárida e subúmida seca que atinge em torno de 90% da região (ABAHUSSAIN *et al.*, 2002). Condições climáticas instáveis e solo infértil torna o uso da terra para atividades como agricultura e silvicultura irrisório em qualquer país da região (ABAHUSSAIN *et al.*, 2002). Além das causas naturais como seca e erosão eólica e hídrica, a influência antrópica, por exemplo o rápido crescimento populacional humano e animal e práticas de uso da terra como desmatamento, agrava o cenário de desertificação (RÊGO, 2012).

A América Latina e Caribe contêm 1/4 de deserto e área seca, o equivalente a aproximadamente 20,5 milhões de km<sup>2</sup>, enquanto 3/4 apresentam sinais de degradação (CGEE, 2016). Em alguns países do Caribe também é possível observar regiões áridas, assim como no México, onde a maior parte é representado por regiões áridas e semiáridas. Aproximadamente 516 milhões de hectares na América Latina são afetados pela desertificação (FAO, 1998). Os desertos se estendem desde o sul do Equador até o norte do Chile. Uma extensa região árida parte do leste dos Andes e atinge do Paraguai até a Patagônia no sul da Argentina (UNCCD, 2020d).

Outros países da América do Sul como Venezuela e Colômbia encontram-se degradadas, no qual as causas da degradação do solo deste último são a perda da cobertura vegetal, criação de gado, queimadas, mineração e desenvolvimento urbano (RÊGO, 2012). Em relação ao Brasil, o Nordeste representa a maior porção da região semiárida do país (UNCCD, 2020d).

### **2.3 Desertificação no Brasil**

Os primeiros trabalhos sobre a temática desertificação foram conduzidos pelo professor João de Vasconcellos Sobrinho, da Universidade Federal de Pernambuco, por volta de 1971, pioneiro no conceito núcleos de desertificação (PEREZ-MARIN *et al.*, 2012; CGEE, 2016). As primeiras ideias sobre os núcleos de desertificação permitiram uma aproximação com o fenômeno, identificando os núcleos existentes no Brasil (CGEE, 2016).

O Brasil é signatário da UNCCD desde 1997, que utilizou o índice de aridez de Thornthwaite (1948) como critério para determinar as áreas áridas, semiáridas e subúmida seca. De acordo com a classificação dessas regiões, o Brasil possui áreas semiáridas e subúmida seca (SANTANA, 2007).

As áreas semiáridas e subúmida seca do Brasil abrangem porções territoriais dos estados do Nordeste e do norte de Minas Gerais (CGEE, 2016), no qual mais de 60% são caracterizados como semiárido (BRASIL, 2004). O semiárido brasileiro corresponde a aproximadamente 63% do Nordeste, 11,5% do Brasil e o total das áreas suscetíveis à desertificação (ASD) representa 15% do território do país, engloba 1.491 municípios e atinge mais de 31 milhões da população brasileira (CGEE, 2016).

Adicionalmente, 180.000 km<sup>2</sup> da área em referência já se encontra em processo grave e muito grave de desertificação, no qual o Nordeste se configura como o mais atingido, com 55,25% do seu território em deterioração ambiental (SANTANA, 2007). A irregularidade das chuvas no Nordeste brasileiro agrava os problemas de aridez na região (FEARNSIDE, 1979; CGEE, 2016).

Outrossim, Ab'Sáber (1977) destaca que, embora as áreas úmidas não possuam perigo latente de desertificação, já é possível observar quadros de degradação do solo em decorrência de exploração econômica, além de pequenas mudanças hidrológicas. Como exemplo, o autor cita a fragilidade na margem sul da Amazônia em decorrência da eliminação das florestas e

matas secundárias numa tentativa de formação de pastos. Dessa forma, os estudos sobre a desertificação devem ultrapassar as fronteiras da região Nordeste a fim de identificar a influência das ações antrópicas, direta ou indireta, que não apenas tendem a expandir a desertificação para outras regiões do Brasil, mas também agravam o processo nas regiões já existentes.

Santos *et al.* (2016) calcularam o índice de aridez (IA) nos municípios de Juazeiro, Casa Nova, Sobradinho e Curaçá no norte da Bahia, e observaram que das oito áreas de influência das estações meteorológicas em estudo, sete apresentaram suscetibilidade alta a desertificação, enquanto a última apresentou suscetibilidade moderada. Santos e Galvêncio (2013) também apresentaram resultados similares para os municípios de Pernambuco. O estudo indicou baixa suscetibilidade a desertificação para o cenário atual devido ao clima subúmido úmido. Ainda de acordo com o mesmo autor, a projeção para 2050 mostra tendência de aumento da suscetibilidade a desertificação em comparação ao cenário atual.

Lopes *et al.* (2017) investigaram a variação do IA ao longo do período de 1961 a 2015 na região semiárida do Nordeste brasileiro. Os resultados indicaram alteração na classificação climática a partir do aumento do índice de aridez nos Estados da Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí e Sergipe. Além disso, na Bahia, Dourado, Oliveira e Ávila (2015) observaram que das sete regiões estudadas, apenas duas não foram classificadas como áreas suscetíveis à desertificação, localizadas na costa litorânea e com alto índice pluviométrico. Das regiões afetadas, uma é responsável pelo polo da fruticultura do estado, representando 10% da produção da fruticultura nacional (DOURADO; OLIVEIRA; ÁVILA, 2015).

Além do aumento no índice de aridez, Santos *et al.* (2010) também identificaram tendência de aumento na temperatura do ar e evapotranspiração média, enquanto os índices de umidade e hídrico apresentaram redução na região Nordeste do Brasil. Da mesma forma, Salati *et al.* (2007) apresentaram tendências de aumento na temperatura do ar e evapotranspiração potencial e de redução na precipitação em quase toda região Nordeste.

Da Costa *et al.* (2018) avaliou a interferência das mudanças climáticas quanto ao índice de aridez no Brasil para projeção futura de 2010 até 2099. Os resultados indicaram climas mais áridos nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, migrando do clima subúmido úmido para subúmido seco a partir da segunda metade do século principalmente. Além disso, os autores apontam as regiões Nordeste e Centro-Oeste como as regiões com maior probabilidade de aumento das zonas semiáridas e áridas, respectivamente.

O estudo de Marengo e Valverde (2007) avaliou projeções para o clima futuro na América do Sul até 2100, abrangendo as regiões da Amazônia, região Nordeste do Brasil, Pantanal e Bacia do Prata. Os resultados mostraram que na Bacia do Prata a disponibilidade de água pode ser comprometida devido a um aumento previsto na evaporação ou evapotranspiração. Na Amazônia há uma tendência de redução de chuvas, em particular na Amazônia do Leste, assim como para o Nordeste com tendência de redução de chuvas acompanhada de aumento de temperatura para final do século XXI (MARENGO e VALVERDE, 2007).

Resultados similares também foram encontrados no estudo de Salviano, Groppo e Pelegrino (2016) que identificaram redução de chuva na Amazônia no período mais seco (junho a setembro). As tendências de evapotranspiração potencial apresentaram uma relação direta com o aumento da temperatura média na maior parte do Brasil, enquanto a umidade relativa apresentou tendência de redução no leste da Amazônia (SALVIANO; GROPPPO; PELEGRINO, 2016). Rocha, Correia e Gomes (2019) também observaram redução da precipitação associada principalmente à redução da umidade na bacia amazônica em seus setores norte e sul.

De acordo com o estudo de Salati *et al.* (2007), a análise da temperatura no período de 1991 a 2004, comparada com os dados do período de 1961 a 1990, indicou aumento para todas as regiões do Brasil (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul). Ainda de acordo com o

mesmo autor, para a precipitação os resultados indicaram redução nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, com destaque para o Nordeste com diminuição de 11,6%.

Ressalta-se que os resultados dos estudos mencionados anteriormente para o aumento da temperatura e evapotranspiração sugere um cenário de aumento das áreas suscetíveis à desertificação. Portanto, configura-se essencial analisar a influência do clima na suscetibilidade à desertificação, classificada pelo seu nível de aridez. Dessa forma, o estudo pode subsidiar investimentos em políticas públicas visando o uso racional dos recursos hídricos, além de estabelecer uma estratégia de resiliência quanto à influência da variabilidade climática na gestão ambiental brasileira.

## 2.4 Índice de aridez no estudo da desertificação

Estudar desertificação oferece uma base de compreensão sobre aridez e a efetiva gestão dos recursos hídricos, visto que este fenômeno pode ocorrer por causas naturais, antrópicas ou ambas (SANTANA, 2007; WU *et al.*, 2018). Além da dificuldade conceitual existente entre desertificação e seca, a desertificação afeta várias vertentes, como a social, econômica, política e ambiental (MATALLO JÚNIOR, 2001). Em função da sua complexidade e as diferentes causas, é importante utilizar um método de classificação de desertificação que seja representativo, expressando de forma quantitativa a relação entre aridez e desertificação (SANTANA, 2007; WU *et al.*, 2018).

Becker (1968) avaliou a delimitação de uma zona climática no Nordeste a partir do cálculo dos índices climáticos de Lang (1920), Capot-Rey (1951) e Birot (1945). Os resultados indicaram que o índice de Lang (1920) não especifica como as chuvas são distribuídas durante o ano, considerando apenas a relação média anual. Assim, utilizando como exemplo os municípios de Barra e São Caetano, o estudo apontou que o índice de Lang (1920) foi igual para ambos, embora o município de Barra apresente uma estação seca definida enquanto o município de São Caetano apresenta chuvas mais distribuídas ao longo do ano.

Ainda de acordo com o autor acima, mesmo o índice do Capot-Rey (1951) introduzindo a relação precipitação e evaporação no cálculo, continua a mascarar a estação seca de parte do sertão nordestino, pois o resultado não representa a distribuição de chuvas ao longo do ano, mas sim indica uma visão média da variação da umidade.

Amaral *et al.* (2014) calcularam o índice de aridez para o município de Petrolina (PE) propostos por De Martonne (1926), Lang (1920) e Meyer (1926). Os resultados indicaram que os índices de Lang (1920) e Meyer (1926) não obtiveram resultados satisfatórios. Resultados semelhantes foram identificados por Araújo *et al.* (2008), que calculou o índice de aridez a partir de cinco métodos, De Martonne (1926), Lang (1920), Meyer (1926), de acordo com a Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (CCD) e Xerotérmico (GAUSSEN, 1954), de forma a obter o que melhor representasse as variações meteorológicas mensais na região de São João do Cariri (PB). Os resultados indicaram que os modelos de Lang (1920) e Meyer (1926) não expressaram adequadamente as condições do clima do município São João do Cariri. O índice de aridez pelo método CCD foi o que melhor representou as variações mensais do tempo e conseqüentemente do clima da região. Ainda de acordo com o mesmo estudo, ressalta-se que dentre os modelos analisados, este índice é o único que considera a evapotranspiração potencial.

Outro índice climático utilizado para o cálculo da aridez é o índice de Lautensachmeyer (1960). Entretanto, de acordo com o estudo de Alves *et al.* (2012), este índice não representou adequadamente os Cariris Velhos (semiárido paraibano), classificando o clima dos municípios em sua maioria como árido.

Souza *et al.* (2019) avaliaram a escassez de água na área do reservatório Pereira de Miranda, no Estado do Ceará calculando os índices de aridez de Lang (1920), De Martonne

(1926) e de acordo com a metodologia Thornthwaite (1948). Os resultados indicaram que no período seco, o índice de Lang (1920) e De Martonne (1926) não apresentaram resultados satisfatórios, enquanto o índice de aridez de Thornthwaite (1948) representou melhor as variações meteorológicas do local no período de estudo.

O índice de aridez elaborado por Thornthwaite (1948) e complementado por Penman (1953) avalia a deficiência hídrica de um determinado local a partir da razão entre a precipitação e a evapotranspiração (SANTANA, 2007). Sua relevância nos estudos sobre desertificação deve-se ao fato de que este fenômeno está associado ao nível de aridez do local (BARROS, 2010).

Este índice foi aplicado no Plano de Ação de Combate à Desertificação (PACD) pela Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (CCD) em 1977 (UNEP, 1992; SCHENKEL e MATALLO JÚNIOR, 1999). Além disso, também foi utilizado para delimitar as áreas suscetíveis à desertificação e a delimitação do semiárido brasileiro (CGEE, 2016), ratificando sua importância e consenso mundial de aplicação.

O índice de aridez no estudo da desertificação é utilizado em escala global, sendo aplicado no estudo à desertificação em vários países como Portugal, Espanha, Itália e Grécia (BRANDT e GEESON, 2006). Ademais, está inserido na base de dados do Sistema Indicador da Desertificação para o Mediterrâneo e Europa (do inglês DIS4ME) (DIS4ME, 2020) e do Sistema de Alerta Precoce contra Seca e Desertificação (SAP) (BRUNINI *et al.*, 2002; VIEIRA *et al.*, 2015; SAP, 2020).

A importância do índice de aridez no estudo da desertificação está na delimitação onde esse processo ocorre. Assim, contribui para evitar generalização do processo, pois, sem esse elemento para delimitar a desertificação, qualquer área degradada poderia ser classificada como uma área desertificada (BARRETO, 2015).

Ademais, a autenticidade do índice de aridez para o cálculo da desertificação foi comprovada ao ser utilizado na elaboração do *World Atlas of Desertification*, parâmetro para estudos em escala global (SCHENKEL e MATALLO JÚNIOR, 1999). Sob o ponto de vista climático, este índice indica que a razão adimensional entre a precipitação anual e a evapotranspiração potencial nas regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas está entre 0,05 e 0,65 (CGEE, 2016). Além disso, a partir do valor do índice de aridez é possível caracterizar climaticamente a região de estudo em função da disponibilidade térmica e hídrica, e consequentemente, sua suscetibilidade à desertificação (SCHENKEL e MATALLO JÚNIOR, 1999).

A classificação climática de Thornthwaite (1948) é uma das mais utilizadas e tem a vantagem de ser mais sensível na definição dos limites climáticos resultando em dados mais eficientes (MATOS *et al.*, 2018; MARTINS *et al.*, 2018). Esse sistema de classificação (Tabela 1) foi desenvolvido com o objetivo de calcular a disponibilidade de umidade em escala regional e sub-regional (JÚNIOR *et al.*, 2017). Sua metodologia permite classificar geograficamente as diferentes características climáticas de acordo com o valor do índice de aridez (ROLIM *et al.*, 2007; TERASSI e TOMMASELLI, 2016).

**Tabela 1:** Classificação climática de acordo com o índice de aridez.

<b>Classificação</b>	<b>Índice de aridez (IA)</b>
Hiperárido	< 0,05
Árido	0,051 a 0,20
Semiárido	0,21 a 0,50
Subúmido seco	0,51 a 0,65
Subúmido úmido e úmido	> 0,65

Fonte: Adaptado de UNEP, 1992.

Conforme apresentado na tabela acima, de acordo com a denominação da UNCCD, as áreas suscetíveis à desertificação são aquelas com IA entre 0,051 e 0,65, classificadas como árida, semiárida e subúmida seca, no qual quanto menor o índice, maior a aridez, ou seja, quanto mais árido o local, mais propenso à desertificação (BRASIL, 1994; SCHENKEL e MATALLO JÚNIOR, 1999).

A suscetibilidade à desertificação em função do nível de aridez foi determinada a partir das categorias apresentadas no Plano de Ação Nacional de Combate à Desertificação (PAN) (BRASIL, 2004), conforme a Tabela 2.

**Tabela 2:** Suscetibilidade à desertificação em função do nível de aridez.

Suscetibilidade à desertificação	Índice de aridez (IA)
Superior a alta	< 0,05
Muito alta	0,051 a 0,20
Alta	0,21 a 0,50
Moderada	0,51 a 0,65
Inferior a moderada	> 0,65

Fonte: Adaptado de Schenkel e Matallo Júnior, 1999.

De acordo com a tabela acima, quanto menor o índice de aridez de uma determinada área, mais suscetível à desertificação. Ressalta-se que esse critério considera principalmente a aridez, e não o processo de desertificação, pois esse fenômeno também considera outros fatores além do climático (BRASIL, 2004).

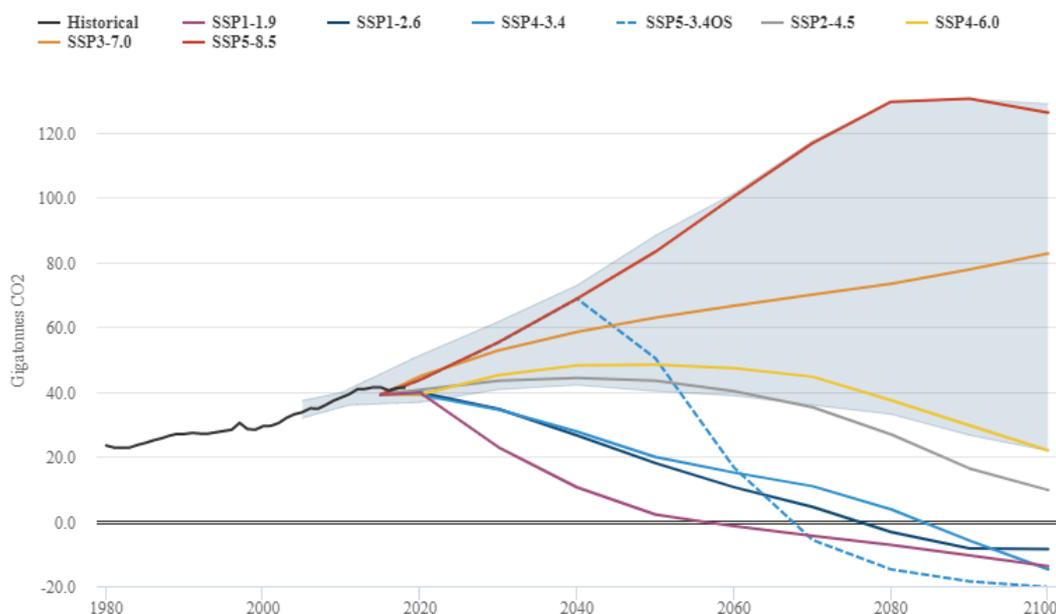
O cálculo do índice de aridez para uma série temporal possibilita identificar a evolução da desertificação a partir da criação de diferentes cenários futuros (ADEEL *et al.*, 2005). Esses cenários servem como base para apoiar tomada de decisão com menor incerteza, a fim de se preparar para a ocorrência de eventos e auxiliar em ações para evitar a ameaça da qualidade de vida da população (ADEEL *et al.*, 2005; NETO, 2020).

## 2.5 Cenários de mudanças climáticas

Os cenários de mudanças climáticas são simulados por modelos computacionais denominados Modelos Climáticos Globais (do inglês GCMs). Esses modelos utilizam o comportamento climático atual do planeta para projetar mudanças futuras, possibilitando estudar o impacto das alterações climáticas causadas por perturbações naturais e antrópicas (IPCC, 2014; FERNANDES *et al.*, 2017).

Um dos modelos é o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) (CMIP6, 2020), que atualmente está na sua sexta fase (CMIP6) e tem como objetivo entender as mudanças climáticas a partir de projeções baseadas em cenários alternativos, denominados SSPs (*Shared Socioeconomic Pathways*) (NETO, 2020) (Figura 2).

Esses cenários integram condições sociais, econômicas, ambientais e políticas que representam os desafios relativos à adaptação e à mitigação (O'NEIL *et al.*, 2014). São cinco cenários SSPs, com a nomenclatura SSP x – y, no qual x representa o número do cenário e y é a forçante radiativa (W/m<sup>2</sup>) (NETO, 2020), definida como uma variável que quantifica a variação do balanço energético do sistema Terra-atmosfera (CORREIA *et al.*, 2014). Ainda de acordo com o mesmo autor, valores positivos da forçante radiativa indicam tendência de aquecimento do planeta, enquanto valores negativos significam tendência de resfriamento.



**Figura 2:** Emissões futuras de CO<sub>2</sub> para os cenários do CMIP6. Fonte: Carbon Brief (CMIP6, 2020).

O SSP1 (cenário 1) considera o crescimento econômico a partir da adoção de práticas sustentáveis, redução da desigualdade, substituição na visão de metas para crescimento econômico por priorização do bem-estar da população (SAMIR e LUTZ, 2017), e maior uso de fontes de energias renováveis (NIKORLERIS; STRIPPLE; TENNGART, 2017).

O SSP2 (cenário 2) é considerado uma projeção mediana, como taxa de natalidade e mortalidade média, assim como migração e acesso à educação (SAMIR e LUTZ, 2017). Além disso, também mantém o uso de combustíveis fósseis (NIKORLERIS; STRIPPLE; TENNGART, 2017).

O SSP3 (cenário 3) refere-se à expansão do nacionalismo e competitividade com alto consumo material, dependência de combustível fóssil e lento avanço tecnológico (NIKORLERIS; STRIPPLE; TENNGART, 2017). Também considera alto crescimento populacional em países em desenvolvimento e menor em países desenvolvidos, alta mortalidade, baixo acesso à educação e baixa migração para todos os grupos de países (SAMIR e LUTZ, 2017).

O SSP4 (cenário 4) considera maior desigualdade tanto tecnológica quanto econômica (NIKORLERIS; STRIPPLE; TENNGART, 2017). Em relação à taxa de natalidade, continua alta para os países com altas taxas atualmente e vice-versa, além da taxa de migração média para todos os grupos de países (SAMIR e LUTZ, 2017).

O SSP5 (cenário 5) ressalta o progresso tecnológico estimulado por mercados globais integrados e forte investimento na saúde e educação (NIKORLERIS; STRIPPLE; TENNGART, 2017). Também considera baixa mortalidade em todos os grupos de países, maior natalidade para os países desenvolvidos e aumento da migração por conta da globalização (SAMIR e LUTZ, 2017).

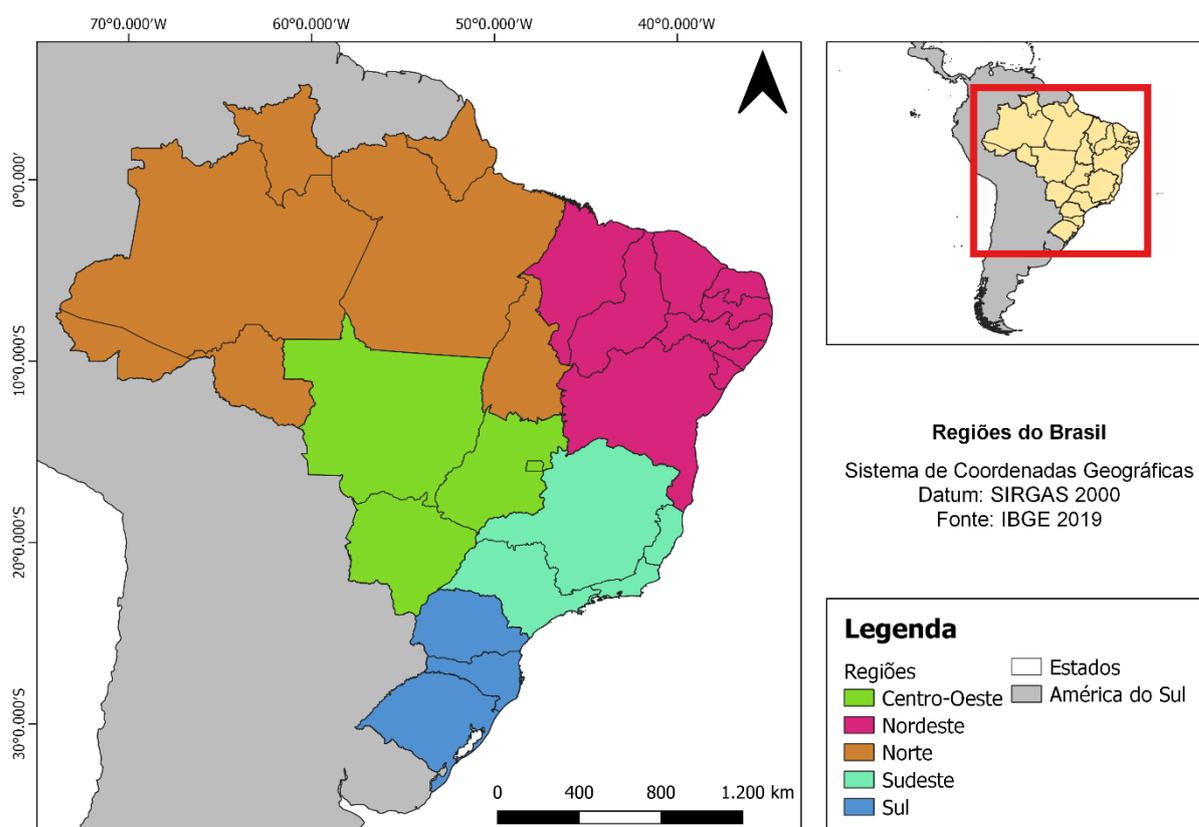
No presente trabalho foram considerados dois cenários, SSP2 4.5 e SSP5 8.5, a fim de representar um cenário intermediário e um cenário mais extremo de mudanças climáticas. O cenário SSP2 4.5, cenário 2 com nível de forçante radiativa 4,5 W/m<sup>2</sup>, representa o intervalo médio dos futuros cenários do CMIP6 com crescimento moderado da população e a geração de energia continua dependente de combustível fóssil na mesma taxa que atualmente (GIDDEN *et al.*, 2019). Além disso, a previsão até 2100 é de aumento de temperatura em torno de 2,8°C e aumento no nível do mar em torno de 0,66 m (MEINSHAUSEN *et al.*, 2019).

O cenário SSP5 8.5, cenário 5 com nível de forçante radiativa 8,5 W/m<sup>2</sup>, representa o maior cenário de emissão, com as maiores concentrações de CO<sub>2</sub> e predomínio do combustível fóssil (GIDDEN *et al.*, 2019). Além disso, a previsão até 2100 é de aumento de temperatura em torno de 5,8°C e aumento no nível do mar em torno de 0,94 m (MEINSHAUSEN *et al.*, 2019).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo compreende o Brasil, localizado na parte central da América do Sul, entre as latitudes 05°16'19" Norte e 33°45'07" Sul, e entre as longitudes 34°47'34" Leste e 73°59'26" Oeste (Figura 3). O país possui extensão territorial de 8.515.767,049 km<sup>2</sup>, o que equivale a 48% da área pertencente à América do Sul (IBGE, 2019). Além disso, é dividido em cinco regiões geográficas, Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, com população de aproximadamente 210,1 milhões de habitantes em 2019 (IBGE, 2020).



**Figura 3:** Localização da área de estudo.

Em relação ao clima, a região Norte do país é caracterizada pelo clima equatorial sem uma estação seca bem definida (PEREIRA *et al.*, 2013). A região Nordeste apresenta os menores registros de precipitação (ALVARES *et al.*, 2014), condições mais secas como o sertão do Ceará com valores em torno de 500 mm (SANTOS *et al.*, 2009) e faixa litorânea com precipitação anual superior a 1.500 mm (PEREIRA *et al.*, 2013).

Nas regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil o inverno é caracterizado por uma estação seca e o verão por uma estação chuvosa. De acordo com Da Silva Neves *et al.* (2011), a região sul do Mato Grosso apresenta precipitação em torno de 1.300 mm. No norte de Minas Gerais a precipitação é em torno de 1.185 mm (OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2018).

A região Sul possui clima temperado e sem uma estação seca bem definida, com precipitação entre 1.500 mm e 2.000 mm (PEREIRA *et al.*, 2013). Ainda de acordo com o mesmo autor, com exceção da região Sul que apresenta precipitação distribuída ao longo de

todo o ano, todas as outras regiões apresentam a maior parte da época chuvosa nos quatro primeiros meses do ano, e um período seco de maio a setembro. De acordo com Alvares *et al.* (2014), a precipitação anual do Brasil possui alta variabilidade espacial, com valores entre 387 mm até 4.003 mm nos anos 1990, com valores acima de 2.500 mm na região Norte do país.

### 3.2 Dados climáticos

O período de estudo foi dividido em período atual (1990 até 2018), considerado como referência, e as projeções futuras no período entre 2021 até 2100 dividido em quatro intervalos, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100, para dois cenários futuros de mudanças climáticas, SSP2 4.5 e SSP5 8.5. As variáveis climáticas utilizadas foram temperatura do ar máxima e mínima e precipitação total mensal.

Para o período atual foram utilizados dados do *Climatic Research Unit gridded Time Series* (CRU-TS), instituto ligado à *East Anglia University* (HARRIS *et al.*, 2020). O conjunto de dados do CRU-TS utilizado foi 4.03 lançado em maio de 2019, o qual usou as correções de viés do banco de dados climáticos global WorldClim 2.1 (WORLDCLIM, 2019) com resolução espacial de 2,5 minutos (~ 21 km<sup>2</sup>) (HARRIS *et al.*, 2020; CRU-TS, 2020; FICK e HIJMANS, 2017).

Os dados para a projeção futura foram obtidos a partir da média de oito modelos climáticos (Tabela 3). Os dados podem ser obtidos no sítio eletrônico [https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6\\_clim2.5m.html](https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_clim2.5m.html).

**Tabela 3:** Modelos climáticos utilizados para a projeção futura.

Modelos	Centro de Modelagem	País
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique	França
CNRM-ESM2-1	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique	França
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadá
IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace	França
MIROC-ES2L	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	Japão
MIROC6	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo). National Institute for Environment Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japão
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute of the Korea Meteorological Administration	Coreia

### 3.3 Método

Os dados de temperatura do ar máxima e mínima foram utilizados para calcular a média aritmética da temperatura utilizada para obter a evapotranspiração potencial mensal calculada pelo método de Thornthwaite (1948) (Equação 1).

$$ETP = 16,2 [10 \times T / I]^a \quad (1)$$

Em que,

ETP – Evapotranspiração potencial mensal (mm);

T – Temperatura média mensal do ar (°C);

I – Índice de calor anual (soma de 12 índices mensais);

a – Valor determinado em função do I.

$$I = \sum_{j=1}^{i=12} [T_j / 5]^{1,514} \quad (2)$$

$$a = 6,750 \times 10^{-8} I^3 - 7,711 \times 10^{-5} I^2 + 1,792 \times 10^{-2} I + 0,492 \quad (3)$$

A evapotranspiração fora da condição padrão de meses com 30 dias e 12 horas de brilho solar foi corrigida segundo Moura *et al.* (2013) (Equação 4).

$$C = \frac{N}{12} \cdot \frac{1}{30} \quad (4)$$

Em que,

C – Fator de correção;

N – Fotoperíodo de determinado dia (h).

O índice de aridez (IA) foi calculado a partir da fórmula definida por Thornthwaite (1948) e complementada por Penman (1953) (Equação 5).

$$IA = \frac{P}{ETP} \quad (5)$$

Em que,

P – Precipitação anual (mm);

ETP – Evapotranspiração potencial anual (mm).

Para o processamento dos dados foi utilizado o software estatístico R (R version 4.0.0 (2020-04-24) (DESSAU e PIPPER, 2008). Dessa forma, com o índice de aridez foi possível estabelecer as características climáticas (Tabela 1) segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 1992).

Além disso, determinou-se o nível de suscetibilidade à desertificação, segundo a classificação proposta por Schenkel e Matallo Júnior (1999) (Tabela 2).

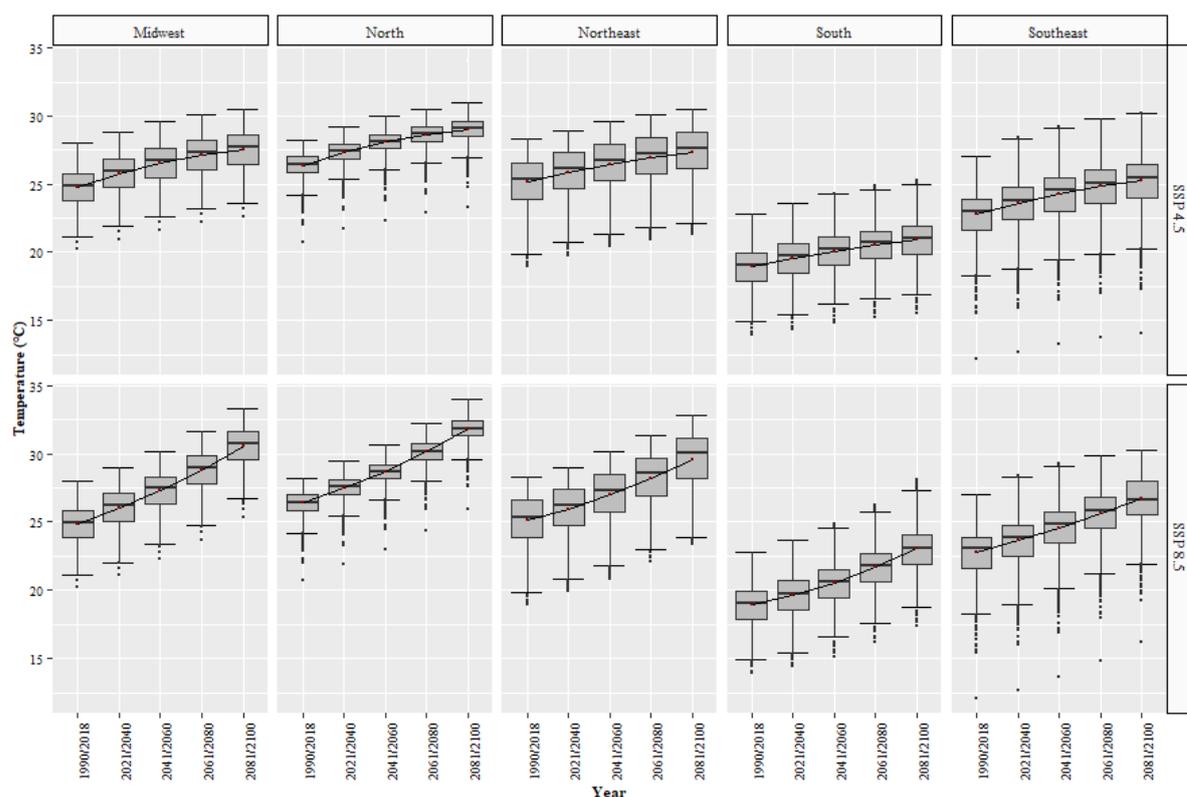
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise das variáveis climáticas

#### 4.1.1 Análise da temperatura do ar média

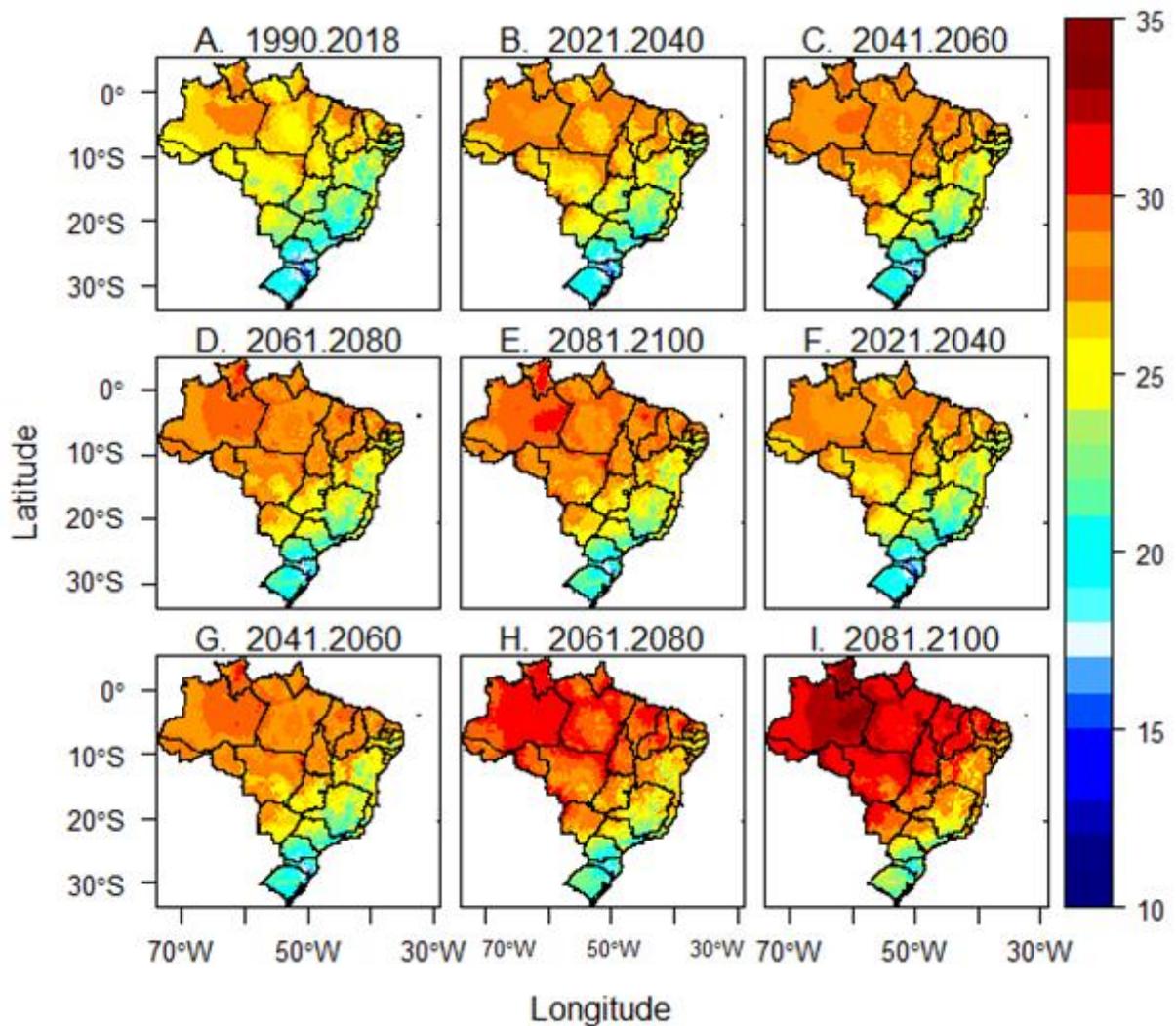
Os valores de temperatura do ar mostram uma tendência de aumento para todas as regiões do Brasil, e para ambos os cenários de mudanças climáticas (Figura 4). Esse aumento pode ser observado pelo deslocamento da mediana da temperatura na direção positiva do boxplot. Para o período de 1990-2018, a mediana da temperatura foi em torno de 25 °C para as regiões Centro-Oeste e Nordeste. Na região Norte o impacto dessa variável é mais intenso, com a mediana atingindo em torno de 26 °C, enquanto para o Sudeste 23 °C, e para o Sul a mediana é inferior às demais regiões, em torno de 19 °C.

As projeções futuras indicam aumento na temperatura para todas as regiões. Para o cenário SSP 4.5 o aumento é de até 3 °C até o final do século. Observa-se também que os efeitos na temperatura são maiores no cenário SSP 8.5, principalmente no período 2081-2100, no qual é projetado um aumento na temperatura em torno de 6 °C para o Brasil.



**Figura 4:** Temperatura do ar média (°C) e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 e SSP 8.5.

A temperatura do ar média, para o período de 1990-2018 (Figura 5A), apresentou os maiores valores na região Norte, atingindo até 27 °C com destaque para o Amazonas, e os menores na região Sul, atingindo até 11 °C na Serra Catarinense. A temperatura acima de 24 °C cobre a maior parte do país, predominante nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste.



**Figura 5:** Distribuição espacial da temperatura do ar média (°C) e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 (B, C, D e E) e SSP 8.5 (F, G, H, e I).

Os resultados corroboram com os valores encontrados por Alvares *et al.* (2013), que identificou temperatura média do ar para o Brasil em torno de 24 °C. Jesus (2015) obteve, para o município de Aracaju no estado de Sergipe, temperatura média anual em torno de 26 °C. O estudo de Souza *et al.* (2013) calculou o balanço hídrico para o estado do Mato Grosso e observou temperatura média anual entre 24 °C e 26 °C. Miranda e Dos Santos (2008) calculou o balanço hídrico para o município Duas Barras localizado na região serrana do Rio de Janeiro e identificou temperatura média anual de 19,4 °C. Oliveira e Oliveira (2018) observou temperatura média de 24,8 °C para o município de Arinos localizado ao norte do estado de Minas Gerais. Da Silva *et al.* (2020) calculou a temperatura do ar para o Brasil no período entre 1990 e 2017. Os resultados indicaram os menores valores na região Sul, com temperaturas de até 20,5 °C, e os maiores valores nas regiões Norte e Nordeste, atingindo até 28,5 °C.

As projeções futuras indicam que em ambos os cenários há um aumento da temperatura em todas as regiões brasileiras. Para o cenário SSP 4.5 há uma tendência de aumento de temperatura do ar média em todas as regiões até o final do século em torno de 3°C. Para o período 2021-2040 (Figura 5B) é observado aumento da temperatura na região Norte, principalmente no Amazonas, em torno de 1°C, estendendo-se pelas regiões Nordeste e Centro-Oeste.

Para os períodos de 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100 (Figura 5C-E), nas regiões Norte e Centro-Oeste o impacto dessa variável é mais intenso, com aumento em torno de 3 °C no leste de Mato Grosso, Amazonas e Roraima, atingindo temperatura a partir de 30 °C até o final do século. A região Sul apresenta aumento da temperatura do ar média inferior às demais regiões do país, com aumento de até 2 °C até 2100, enquanto para as regiões Nordeste e Sudeste o aumento é de até 3 °C.

Para o Nordeste, resultados similares foram encontrados por Marengo e Bernasconi (2015). No entanto, os autores observaram valores ainda maiores de temperatura, com aumento acima de 4 °C até 2100. Santos *et al.* (2010) identificou tendência de aumento de temperatura por quase toda região, com a temperatura média variando entre 27 °C e 31 °C para o cenário 2100, concordando com os valores encontrados.

Para o cenário SSP 8.5 a tendência de aumento de temperatura é maior do que o SSP 4.5, principalmente no final do século, onde o aumento de temperatura alcança 6 °C. Para o período 2021-2040 (Figura 5F) é observada anomalia da temperatura em torno de 1 °C. Para o período 2041-2060 (Figura 5G) esse aumento passou para 2 °C. Para o período 2061-2080 (Figura 5G) o aumento da temperatura foi em torno de 4 °C, com os maiores valores no Norte, Nordeste e extremos do Centro-Oeste. Até o final do século (Figura 5I) é possível observar o aumento da temperatura por todo o país em torno de 6 °C, no qual o Amazonas apresenta os maiores valores, com temperatura acima de 32 °C.

A tendência de aumento da temperatura pode afetar a produção agrícola, alterar o balanço hídrico, bem como aumentar a suscetibilidade dos ecossistemas brasileiros às mudanças climáticas, como observado por Nobre (2001).

Segundo Da Silva Neves *et al.* (2011), a temperatura pode ser um fator decisivo nas atividades agropecuárias, tanto para o conforto térmico dos animais quanto para a escolha do tipo de cultura a ser produzida. Portanto, o Mato Grosso, que se destaca pelas atividades agrícolas, pode ser impactado pelo indicativo de aumento expressivo de temperatura em todo o estado (Souza *et al.*, 2013). Além disso, segundo De Souza Dias *et al.* (2018), das seis hidrelétricas em construção, três estão localizadas no estado de Mato Grosso, e o aumento da temperatura na geração de energia hidrelétrica pode afetar os níveis de umidade do solo, interferir no escoamento e armazenamento de água nas barragens, além de influenciar na precipitação a partir de mudanças na pressão atmosférica e nos padrões de vento.

Salati *et al.* (2007) apresentou resultados similares, com tendência de aumento da temperatura do ar média em todas as regiões. Além disso, as projeções climáticas realizadas por Marengo e Valverde (2007) apontaram indicativo de aquecimento para o Brasil no século XXI, podendo comprometer disponibilidade de água para agricultura, consumo ou geração de energia devido ao aumento da evapotranspiração.

O estudo elaborado por Marcos Júnior *et al.* (2018) também identificou aumento da temperatura do ar média em todas as regiões brasileiras para os cenários de projeções climáticas. O estudo utilizou dados dos modelos globais do IPCC-AR5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5. Entretanto, a anomalia para o cenário mais extremo foi menor do que o presente estudo, em torno de 5,2 °C na região Norte até o final do século. Ainda de acordo com o mesmo autor, os modelos indicam tendência de redução da precipitação para as regiões Norte e Nordeste.

Observa-se que as ações antrópicas configuram como fator relevante nos processos de degradação da terra, como desmatamento e intensa prática agrícola, aumentando a suscetibilidade à desertificação (MARCOS JUNIOR *et al.*, 2018). Adicionalmente, esses núcleos de desertificação aliados as mudanças climáticas podem aumentar a aridez na região e desencadear novos processos de desertificação.

#### 4.1.2 Análise da precipitação

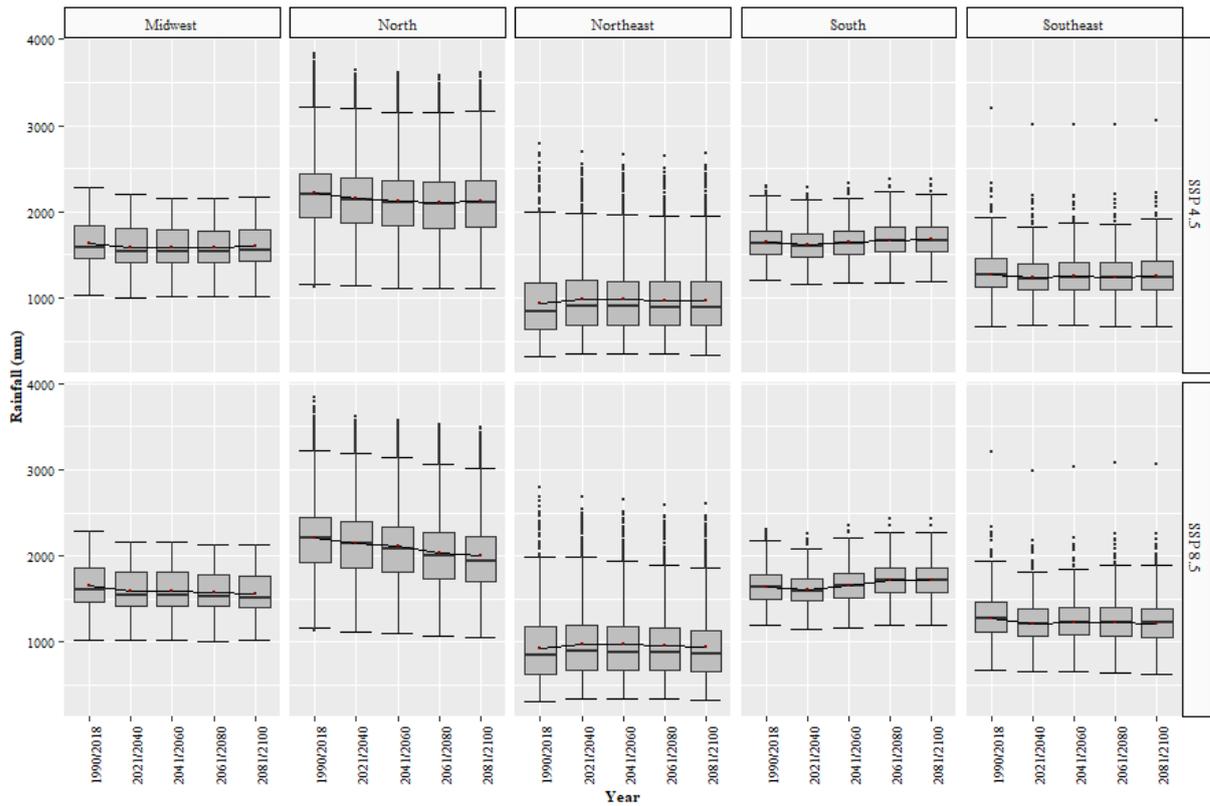
O total precipitado para o período climatológico de 1990-2018 apresenta valor médio em torno de 1.640 mm/ano para as regiões Centro-Oeste e Sul (Figura 6). Para o Sudeste o valor médio foi em torno de 1.270 mm, enquanto o Nordeste apresentou os menores valores, abaixo de 1.000 mm e a região Norte os maiores valores, acima de 2.200 mm.

As projeções futuras indicam mudanças na precipitação de -10,0 a 6,0% para o Brasil. Para o cenário SSP 4.5, os modelos apontam redução média da precipitação de até -4,5% e aumento de até 6,0%. Para a região Sudeste projeta-se redução de -2 a -3% na precipitação até o final do século. Para o Centro-Oeste a redução é de -2 a -3,5%. Na região Norte é observada redução média de -2 a -4,5%. A região Sul é a que apresenta a menor redução média na precipitação variando de -1 a -2%. O Nordeste é a única região que apresentará aumento das chuvas até 2100, em torno de 4 a 6% até o final do século.

Para o cenário SSP 8.5 os modelos indicam maior redução da precipitação para as regiões Norte, Centro Oeste e Sudeste do Brasil, e aumento para as regiões Nordeste e Sul.

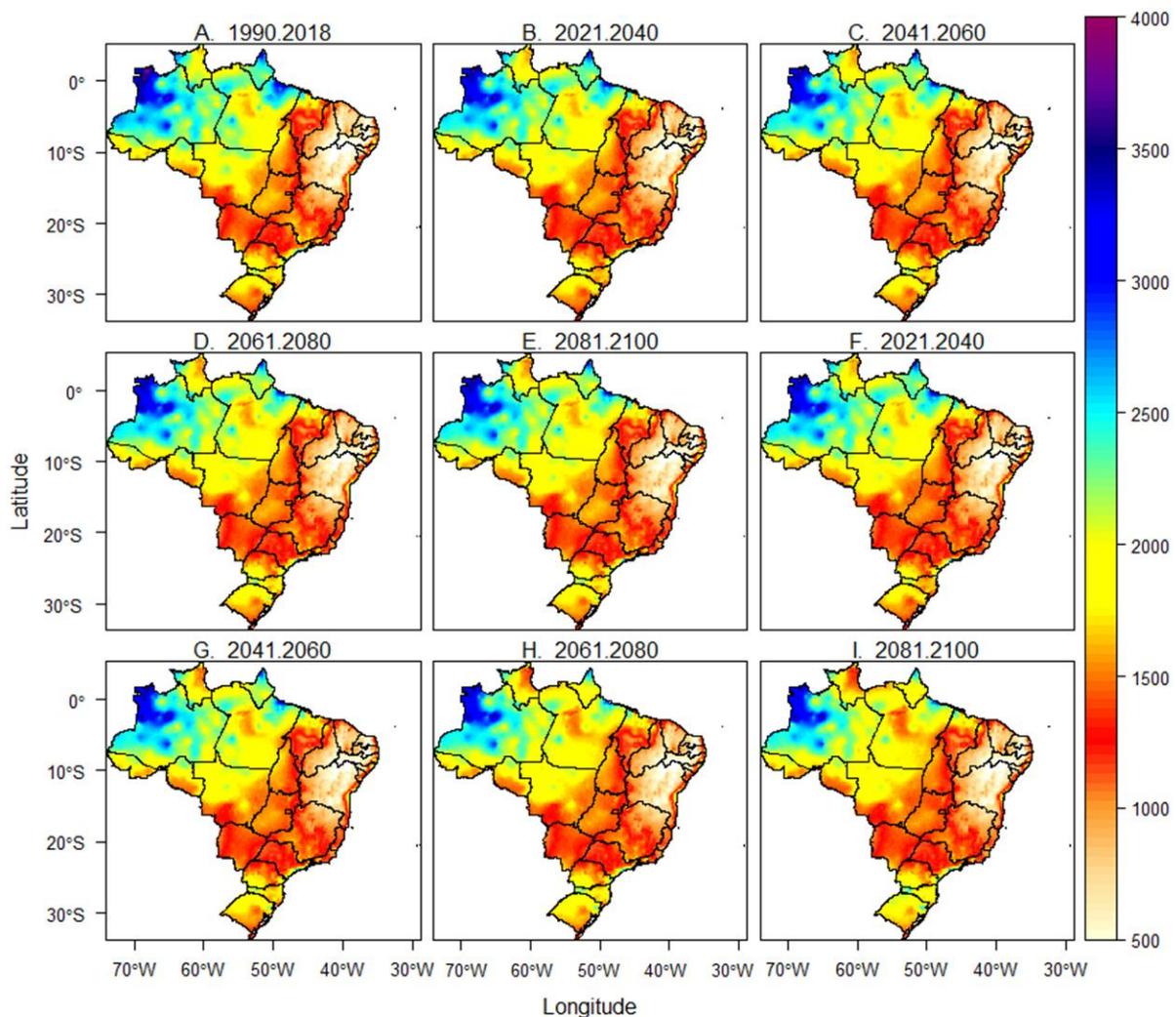
É possível observar redução média da precipitação para a região Centro-Oeste de -3 a -5,5% até o final do século, semelhante a região Sudeste, com redução de -3 a -5%. A redução mais expressiva é observada para a região Norte do país. Essa redução varia de -2,5 a até -10,0%. Resultados semelhantes foram projetados por Ukkola *et al.* (2020), a qual prevê redução na precipitação média de -7% para a região da Amazônia até o final do século para o cenário mais pessimista, e Dai *et al.* (2018) que projetou redução na frequência da precipitação na maior parte do país até o final do século. De acordo com o mesmo autor, os modelos mostram menor habilidade na projeção de períodos de seca para a região Amazônica. No entanto, as projeções indicam redução das chuvas para essa região.

As regiões Sul e Nordeste são as únicas regiões que apresentam aumento de precipitação até o fim do século nesse cenário. Para a região Nordeste o aumento da precipitação é de 4%, entre os anos de 2021-2040, com redução de aumento até o final do século, sendo esse de 0,13% entre 2080-2100. Na região Sul a mudança na precipitação é em torno de 7,5% até o final do século. O estudo de Dai *et al.* (2018) identificou redução da precipitação na América do Sul até o final do século, todavia, a região Sul do Brasil apresentava aumento em torno de 5%.



**Figura 6:** Precipitação média anual (mm) e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 (B, C, D e E) e SSP 8.5 (F, G, H, e I).

A precipitação anual, para o período de 1990-2018, apresentou os menores valores na região árida do Nordeste, com precipitação inferior a 500 mm/ano, e os maiores totais são observados na região Norte, acima de 3.500 mm/ano (Figura 7A). Na região Norte os valores mínimos de precipitação estão no Tocantins e Roraima, em torno de 1.200 mm/ano, e os maiores valores estão na porção noroeste do Amazonas, acima de 3.500 mm/ano, ratificado por Alvares *et al.* (2013). A maior parte da região Nordeste possui valores inferiores a 1.000 mm/ano, exceto o litoral atingindo 2.000 mm/ano, e a porção norte do Maranhão com valores de até 2.700 mm/ano.



**Figura 7:** Distribuição espacial da precipitação média anual (mm) e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 (B, C, D, E) e SSP 8.5 (F, G, H, I).

Os resultados foram corroborados por Santos *et al.* (2009) que obteve a distribuição espacial da precipitação anual para o estado do Ceará com valores em torno de 1.000 mm/ano no litoral e no interior em torno de 600 mm/ano. Souza *et al.* (2013) calculou o balanço hídrico para o estado do Mato Grosso e observou precipitação anual entre 1.200 mm/ano e 1.900 mm/ano principalmente da região central até o sul do estado. Para a região serrana do Rio de Janeiro, Miranda e Dos Santos (2008) identificaram valores da precipitação em torno de 1.300 mm/ano. Para o norte de Minas Gerais, Oliveira e Oliveira (2018) encontraram valores de precipitação em torno de 1.200 mm/ano.

A região Sudeste apresentou predominância de precipitação abaixo de 2.000 mm/ano, exceto o litoral de São Paulo com precipitação em torno de 2.500 mm/ano, ratificado por Miranda e Dos Santos (2008) e Oliveira e Oliveira (2018). Na região Sul foram encontrados valores de precipitação entre 1.500 mm/ano e 2.200 mm/ano, com maiores totais nas porções oeste de Santa Catarina e leste do Rio Grande do Sul. Resultados semelhantes foram encontrados por Pereira *et al.* (2013). Na região Centro-Oeste, a faixa de precipitação foi entre 1.200 mm/ano no Mato Grosso do Sul até 2.700 mm/ano na porção norte do Mato Grosso, corroborado por Da Silva Neves *et al.* (2011) e Souza *et al.* (2013).

As projeções futuras para o cenário SSP 4.5 indicam que no período 2021-2040 (Figura 7B), para a região Norte é observada redução da precipitação no sul do Acre, no norte de

Roraima, no oeste do Amazonas e nordeste do Pará. A região Sudeste se manteve com valores próximos aos observados no período atual, com redução em torno de -3%. Na região Sul os modelos indicam redução no estado de Santa Catarina. No Centro-Oeste há uma redução da precipitação no Mato Grosso estendendo-se até Goiás.

A região Nordeste apresenta projeção de aumento da precipitação média para os dois cenários. No entanto, o Nordeste é a região brasileira que apresenta os menores totais pluviométricos anuais. Embora sejam projetados aumento dos totais pluviométricos para essa região, os totais anuais ainda serão os menores do país, sendo inferiores a 1.000 mm/ano.

Para o cenário SSP 8.5 no período 2021-2040 (Figura 7F) verifica-se redução da precipitação na região Norte, avançando pelo Centro-Oeste. Na região Sul, os modelos indicam redução no leste de Santa Catarina e na região Sudeste redução em Minas Gerais. Já o Nordeste apresenta aumento da precipitação no sul do Ceará.

É possível observar aumento da precipitação nos períodos de 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100 em torno de 7,5% na região Sul (Figura 7G-I), principalmente nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No Nordeste há redução da precipitação no interior, estendendo-se até o norte de Minas Gerais, e a região Norte apresenta redução da precipitação no Amazonas. Para o Centro-Oeste, até o final do século, as projeções apontam redução da precipitação no norte de Mato Grosso, podendo impactar na ocorrência queimadas, corroborado por Cardoso *et al.* (2013), no qual o estado do Mato Grosso apresentou maior número de focos de calor da região Centro-Oeste entre 2006 e 2012.

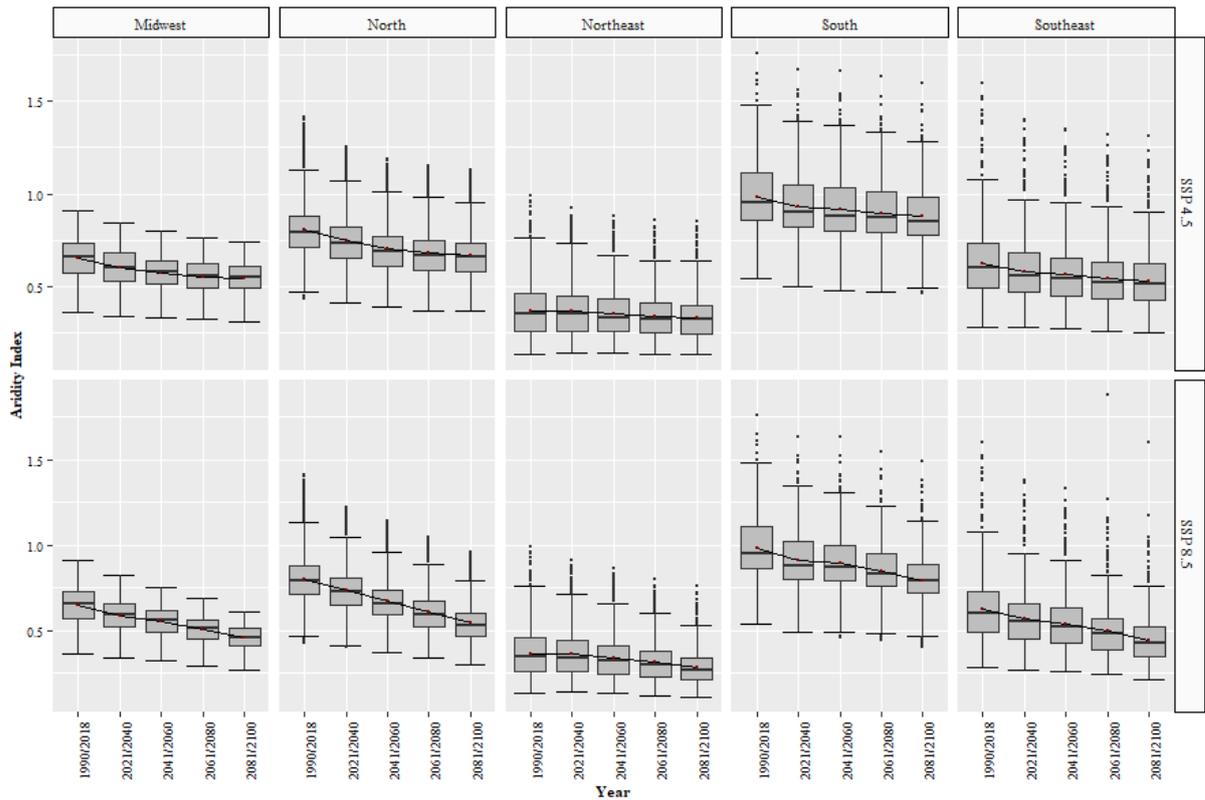
Os valores encontrados corroboram com o estudo elaborado por Marengo e Valverde (2007), no qual há uma tendência de redução da precipitação na Amazônia do leste, podendo afetar o balanço hidrológico regional e, conseqüentemente, comprometendo as atividades humanas. Ainda de acordo com o mesmo autor, no Nordeste a tendência é de redução da precipitação e aumento da temperatura até o final do século XXI. O estudo de Ukkola *et al.* (2020) corrobora com o resultado pois apresenta indicativo de redução da precipitação, além da intensificação na frequência e duração das secas na Amazônia para o período de 2051 a 2100.

Ademais, de acordo com Marengo e Bernasconi (2015), as áreas com maior sinalização de aumento de aridez geralmente estão localizadas onde os modelos projetam redução da precipitação. Os modelos climáticos sugerem para o Nordeste brasileiro redução das chuvas, aumento da temperatura, déficit hídrico e estiagens mais prolongadas, promovendo cenário mais intenso de aridez a partir da segunda metade do século XXI. No presente estudo, observa-se pequena variação da precipitação na região Nordeste, todavia, com o indicativo de aumento da temperatura e estabilidade da baixa precipitação, o cenário de intensificação da aridez na região concorda com os autores mencionados.

O estudo de Mbaye, Sylla e Tall (2019) ratifica que a precipitação anual tende a reduzir em cenários de aumento de temperatura de 1,5°C e 2°C. Além disso, de acordo com Collins *et al.* (2013), em relação às mudanças na precipitação, algumas regiões sofrerão aumento, outras terão redução e ainda outras não terão mudanças significativas.

## 4.2 Análise do índice de aridez

O índice de aridez (IA) no período de 1990-2018 apresenta mediana em torno de 0,30 na região Nordeste, classificada como clima semiárido (Figura 8). Destaca-se que as regiões Norte e Sul apresentam IA acima de 0,65, classificado como clima úmido. Enquanto as regiões Centro-Oeste e Sudeste apresentam IA na faixa entre 0,50 e 0,65 classificado como clima subúmido seco. As projeções futuras apontam redução do IA para ambos os cenários. Reiterando, quanto menor o valor do IA, maior a aridez e conseqüentemente, maior a suscetibilidade à desertificação.



**Figura 8:** Índice de aridez e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 e SSP 8.5.

Para o cenário SSP 4.5 os modelos apontam intensificação da aridez na região Centro-Oeste, prevalecendo o clima subúmido seco, porém com aumento do clima semiárido principalmente a partir de 2060. Na região Sudeste observa-se mediana abaixo de 0,60 e tendência de aumento do clima semiárido. Apesar da redução do IA na região Sul, ainda possui tendência de manutenção do clima úmido, assim como do clima subúmido seco na região Norte. No Nordeste foram encontrados os menores valores do país, abaixo de 0,20, classificado como árido.

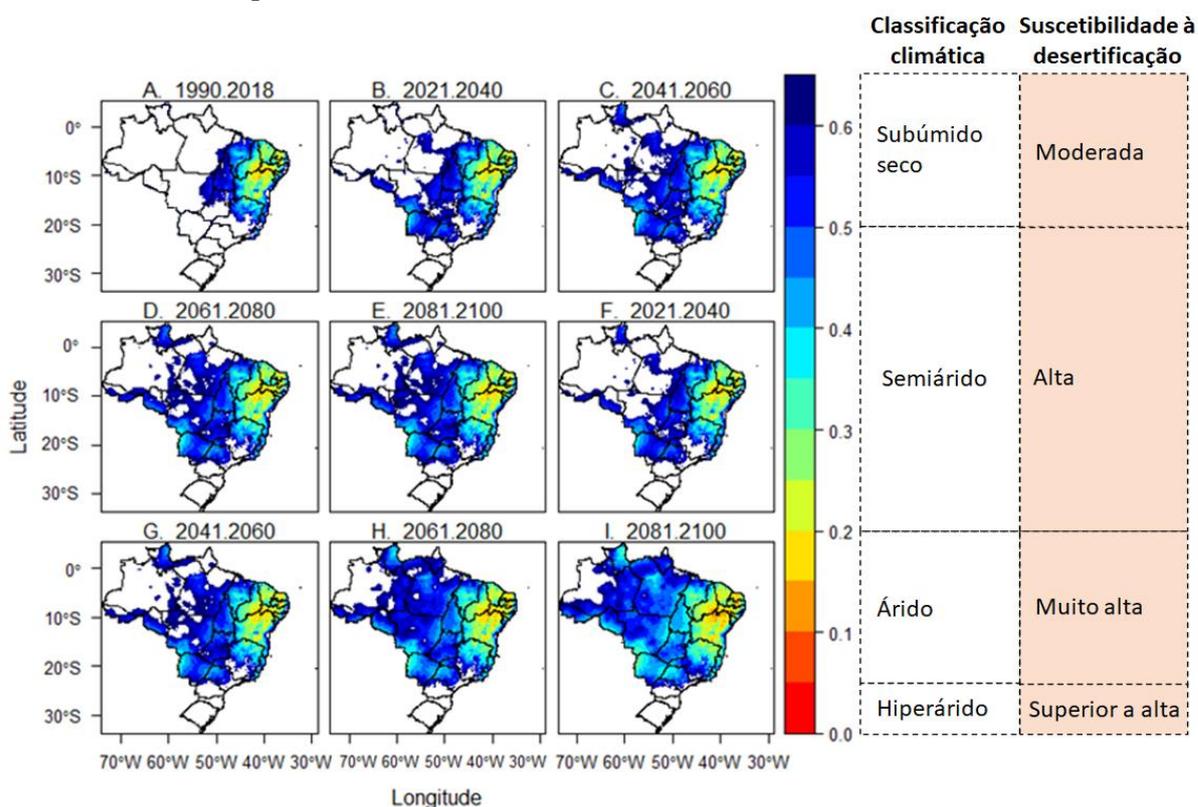
Para o cenário SSP 8.5 os efeitos da intensificação da aridez são maiores, principalmente no último período, 2081-2100, no qual prevalece o clima semiárido nas regiões Centro-Oeste e Sudeste. Para as regiões mais úmidas do país, o Sul prevalece com clima úmido enquanto a região Norte apresenta mediana em torno de 0,50 até o final do século, indicando ocorrência de áreas semiáridas. No Nordeste os valores abaixo de 0,20 é indicativo de aumento de áreas com clima árido.

De acordo com Fonseca *et al.* (2021), o semiárido brasileiro possui bons níveis de radiação ao longo do ano e, conseqüentemente, são regiões indicadas para instalação de usinas solares. Todavia, o estudo mostrou que as tendências climáticas de elevação da temperatura média do ar resultam na redução da produção fotovoltaica por afetar o funcionamento dos módulos. Portanto, verifica-se que a tendência de aumento da aridez no Brasil pode prejudicar o setor energético.

O estudo de De Souza Dias *et al.* (2018) ratifica a importância dos estudos de projeções climáticas a fim de propor medidas de adaptação para atender as futuras demandas de energia. De acordo com o mesmo autor, no caso das hidrelétricas, ainda que haja aumento da precipitação em algumas regiões, as previsões de aumento da temperatura podem elevar as taxas de evapotranspiração na bacia, gerando perda de água. Além disso, também há impacto de

outras variáveis como a demanda por irrigação e uso do solo que pode acarretar o assoreamento das margens dos rios e mudanças nas taxas de evapotranspiração.

A análise do Índice de Aridez (IA) por meio da distribuição espacial mostra tanto como é o clima atual e como poderá ser alterado no território brasileiro. De acordo com a Tabela 1 e Tabela 2, para o período de 1990-2018 (Figura 9A), o Nordeste é a região mais árida devido aos menores valores de IA do país. Além disso, prevalece o clima semiárido, no qual o interior apresenta tendência de aumento de aridez, avançando sobre o norte de Minas Gerais, como também observado pelo estudo CGEE (2016).



**Figura 9:** Distribuição espacial do índice de aridez e projeção futura para os cenários de mudanças climáticas SSP 4.5 (B, C, D e E) e SSP 8.5 (F, G, H, e I).

Áreas classificadas como subúmida úmida ( $0,65 < IA < 1,00$ ) e úmida ( $IA > 1,00$ ) não são suscetíveis à desertificação, correspondendo a maior parte das regiões Norte e Sul, indicadas na Figura 9 pela cor branca. Na região Nordeste foram encontrados valores de IA menores do que 0,60, com predominância abaixo de 0,40, estendendo-se até o norte de Minas Gerais, classificada como semiárida e “alta” suscetibilidade. A porção interior apresenta IA abaixo de 0,20, possui distribuição climática árida e suscetibilidade à desertificação “muito alta”. O litoral e o norte do Maranhão apresentam porções classificadas tanto como subúmida seca e “moderada” quanto não suscetível à desertificação.

Ao comparar estes resultados com a literatura observa-se que os valores condizem com a realidade observada, conforme o estudo realizado por Lopes e Leal (2015) que identificaram valores de IA nas cidades de Salvador e Recife em torno de 1,40 e 1,60, respectivamente. Scheff e Frierson (2015) observaram que para a Bacia Amazônica o IA é geralmente acima de 0,65, classificado como úmido para o período de 1981 a 1999.

Marengo e Bernasconi (2015) observaram para a região Nordeste áreas áridas localizadas no norte da Bahia, parte central da Paraíba e Pernambuco até o sul do Rio Grande do Norte, com aumento da cobertura semiárida, em áreas classificadas anteriormente como subúmida seca.

Além disso, os estudos sobre IA no Brasil são predominantes para o Nordeste brasileiro por esta ser a região mais árida do país e logo, a mais suscetível à desertificação. No estudo realizado por Spinoni *et al.* (2015), o Nordeste teve aumento de mais de 45 mil km<sup>2</sup> de extensão de clima subúmido seco para semiárido e maior suscetibilidade à desertificação nos estados da Bahia e Pernambuco. Santos *et al.* (2010) verificou que os menores valores do IA no Nordeste foram observados no sertão tanto para o cenário atual quanto para os cenários futuros até 2100.

Na região Norte, o clima subúmido seco e tendência “moderada” à desertificação é encontrada em pequenas porções no leste do Pará e em quase todo o estado do Tocantins, avançando pela região Centro-Oeste. Na região Sudeste, além de Minas Gerais, parte dos estados do Espírito Santo e norte do Rio de Janeiro apresentam clima semiárido e “alta” suscetibilidade, enquanto a região Sul apresenta prevalência de clima úmido.

Os resultados da classificação climática para o período atual apresentaram uma distribuição do clima semelhante aos da literatura como Da Costa *et al.* (2018) e Marcos Júnior *et al.* (2018). Portanto, essa análise demonstra que a metodologia utilizada consegue representar de forma eficaz as condições climáticas do período atual do território brasileiro e, desse modo, espera-se que represente adequadamente as condições futuras do clima.

As projeções indicam, para ambos os cenários, um avanço dos climas subúmido seco e semiárido pelo território brasileiro, com nível “moderado” e “alto” de suscetibilidade à desertificação, respectivamente. Para o cenário SSP 4.5 projeta-se aumento do clima subúmido seco e tendência “moderada” até o final do século pelo Brasil. Além disso, existe um indicativo para aumento do clima semiárido e “alta” tendência à desertificação nas regiões Centro-Oeste e Sudeste.

No período 2021-2040 (Figura 9B), para a região Norte é observada intensificação da aridez nos estados de Rondônia, Pará e pequenos pontos no Amazonas. A região Centro-Oeste apresenta aumento da aridez na faixa desde o Pantanal, cobrindo grande parte do Mato Grosso do Sul até o estado de São Paulo. Na região Sul observa-se pequena porção do clima semiárido localizado ao norte do Rio Grande do Sul. O interior da região Nordeste apresenta redução da aridez, porém ainda apresenta indicativo de classificação do clima árido e “muito alta” suscetibilidade à desertificação.

De acordo com Marengo *et al.* (2021), a prolongada seca que o Pantanal vem sofrendo desde 2019 provoca redução da umidade proveniente da região Amazônica. Além disso, o estudo mostrou que os incêndios causaram uma diminuição acentuada dos níveis hidrométricos em todo o rio Paraguai. Os autores verificaram que o Pantanal sofre pressão econômica imposta pelo agronegócio fora região, os níveis extremamente baixos dos rios restringem a mobilidade das pessoas e o transporte de soja e minerais para o Oceano Atlântico pela hidrovia Paraná-Paraguai.

Até o final do século os modelos indicam intensificação da aridez por todas as regiões do Brasil. A região Sul apresenta a menor variação do IA, com pequeno aumento no norte do Rio Grande do Sul. O Sudeste é a região de transição entre o clima mais árido do Brasil, no Nordeste, e o mais úmido, no Sul. Além disso, apresenta avanço do clima semiárido e “alta” suscetibilidade à desertificação em todos os estados, com destaque para o norte de Minas Gerais.

A região Centro-Oeste apresenta indicativo de aumento do clima semiárido e “alta” na maior parte do seu território, com destaque para o Pantanal e divisa com São Paulo. Para o Nordeste, o interior é classificado como árido e “muito alta” suscetibilidade, o entorno como semiárido e “alta” e o litoral e o norte do Maranhão subúmido seco e “moderada” suscetibilidade à desertificação.

Na região Norte, projeta-se tendência de avanço do clima subúmido seco e “moderado”. O estado do Amazonas teve a menor variação, prevalecendo o clima úmido ao longo do seu território. Todavia, os modelos apontam para aumento do clima semiárido e “alta” tendência à

desertificação em porções localizadas em Roraima, Rondônia e grande parte do Tocantins. Ressalta-se que o aumento da aridez na região que possui a maior reserva de recursos hídricos do país pode dificultar a manutenção do ecossistema na Amazônia (NOBRE, 2001), assim como prejudicar o setor hidrelétrico.

Vasquez-Arroyo *et al.* (2020) identificaram impactos de eventos meteorológicos que influenciaram o sistema energético brasileiro. O estudo identificou impacto na geração de energia hidráulica devido a anomalias negativas de precipitação que levaram à diminuição do nível dos reservatórios.

Ainda de acordo com o estudo acima, a falta de chuvas também afetou a produtividade dos canaviais, principalmente em São Paulo, maior estado produtor de cana-de-açúcar do Brasil. Em relação a soja, os autores verificaram que as altas temperaturas associadas a seca que ocorreu durante a safra de 2015/2016 sobretudo no Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) causou redução de 37% até 62% comparada à máxima produtividade média já observada na região.

Além de afetar o setor energético, a intensificação da aridez também pode prejudicar a agricultura. Segundo Guimarães e Landau (2020), os estados que apresentam mais de 10.000 ha de área irrigada são Minas Gerais, Goiás, Bahia, São Paulo, Mato Grosso e Rio Grande do Sul, respectivamente. No entanto, com exceção do Rio Grande do Sul que não sofreu variações do IA, os resultados do presente estudo apontam tendência de aumento do clima semiárido em todos os outros estados.

Resultados similares foram encontrados por Da Costa *et al.* (2018), que analisou a distribuição climática no Brasil mediante o IA, e verificou o aumento da aridez principalmente nas regiões Nordeste e Centro-Oeste. Marcos Júnior *et al.* (2018) também identificou maior possibilidade de aumento do clima árido no Nordeste e semiárido nas regiões Norte e Centro-Oeste para cenários futuros até o final do século.

Ressalta-se que a tendência de redução do IA na região Nordeste pode estar associada à baixa precipitação e aumento de temperatura. Além disso, o indicativo de redução do IA no Centro-Oeste pode prejudicar a produção de soja por atingir dois dos três maiores estados produtores, Mato Grosso e Goiás (EMBRAPA SOJA, 2021). De acordo com os resultados encontrados e semelhantes a Assad *et al.* (2004), a produção de café mundial também pode ser prejudicada, visto que o Brasil é o maior produtor, e está concentrado na região Sudeste, nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Espírito Santo, respectivamente (MAPA, 2020).

Para o cenário SSP 8.5 (Figura 9F-I) os modelos indicam aumento expressivo do clima semiárido e tendência de “alta” suscetibilidade principalmente nas regiões Norte, Sudeste e Centro-Oeste. Até o final do século, com exceção da região Sul, os modelos indicam aumento do clima semiárido em todas as outras regiões do Brasil. No Nordeste, o interior e uma pequena porção ao sul da Bahia apresentam classificação árida e “muito alta” suscetibilidade à desertificação. Todo o entorno é classificado como semiárido e “alta”, e, apenas o litoral e norte do Maranhão é classificado como subúmido seco e “moderado”.

No Sudeste, todos os estados apresentam indicativo de clima semiárido e “alta” suscetibilidade, avançando pelo Centro-Oeste na faixa do Mato Grosso do Sul. Também há tendência de classificação semiárida e “alta” na divisa entre o Mato Grosso, Goiás e Tocantins e na região do Pantanal. Na região Norte, todo o estado do Tocantins e pequenas áreas pelos outros estados são classificadas como semiárida e “alta”. As áreas não suscetíveis à desertificação ( $IA > 0,65$ ) tornam-se mais restritas, concentradas nas regiões Norte e Sul, caracterizadas pelos elevados valores de precipitação.

Esses resultados podem ser interpretados pela baixa variação da precipitação e anomalia expressiva da temperatura do ar, levando ao aumento da evapotranspiração e logo, a condições mais secas, representadas pelos baixos valores de IA. Ademais, o uso do IA em estudos de mudanças climáticas possibilita obter uma estimativa do balanço hídrico e a disponibilidade de

água. O aumento das áreas semiáridas combinada com a degradação do solo pode aumentar a suscetibilidade à desertificação.

Essa tendência de aumento do semiárido nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste combinado com o indicativo de anomalias mais extremas no cenário SSP 8.5 sugere que é preciso adotar medidas para reduzir a emissão de gases do efeito estufa a fim de amenizar a vulnerabilidade do sistema hídrico do país e, conseqüentemente, reduzir os conflitos de uso da água.

Ressalta-se que os padrões das projeções climáticas do presente estudo concordam com os resultados de outros estudos como Da Costa *et al.* (2018) e Marcos Júnior *et al.* (2018) que avaliaram a aridez para todo o Brasil, e Santos *et al.* (2010) e Marengo e Bernasconi (2015) que avaliaram a aridez para o Nordeste brasileiro. Além dos resultados dos cenários SSP 4.5 e SSP 8.5 convergirem para o aumento da aridez, a magnitude para o cenário SSP 8.5 varia de forma mais acentuada devido a maior concentração de gases de efeito estufa projetada.

Embora o Brasil apresente grande disponibilidade de água, essa capacidade está distribuída de forma distinta pelo território (ANA, 2019). Além das suas dimensões continentais e diversidade climática, a garantia hídrica vem sendo ameaçada devido ao crescimento populacional aliado a degradação dos recursos naturais (ANA, 2010). O uso do IA em projeções de mudanças climáticas possibilita obter uma estimativa do balanço hídrico e a disponibilidade de água (MARENGO e BERNASCONI, 2015).

A região Nordeste, predominantemente semiárida, é a região com menor disponibilidade hídrica do país (RODRIGUES e BATISTELA, 2013). O aumento das áreas semiáridas combinado com a degradação do solo pode aumentar a suscetibilidade à desertificação, reduzindo a disponibilidade hídrica e possivelmente aumentando ainda mais os conflitos pelo uso da água.

Como exemplo, o indicativo de aumento da suscetibilidade à desertificação na região do Matopiba pode prejudicar a produção agrícola na região devido ao aumento da necessidade de irrigação na agricultura, conforme o estudo de Santos *et al.* (2020). Além disso, Vieira *et al.* (2015) constatou que ainda que as áreas úmidas e subúmidas sejam consideradas de baixa suscetibilidade à desertificação, quando submetidas ao mau uso e manejo inadequado do solo, podem se tornar suscetíveis à desertificação. Dessa forma, as mudanças climáticas aliadas ao aumento da demanda de água configura um desafio na gestão brasileira dos recursos hídricos e sua capacidade de suprimento.

## 5 CONCLUSÕES

A pesquisa identificou para o cenário atual temperatura acima de 24°C cobrindo a maior parte do país, com os maiores valores na Região Norte que atingiu até 28°C, e os menores na região Sul, em torno de 11°C. A precipitação variou desde 500 mm/ano no interior do Nordeste até acima de 3.500 mm/ano na região Norte. Em relação ao índice de aridez (IA), observa-se que a maior parte do Brasil é classificada como úmida, com valores de IA acima de 0,65, com exceção do Nordeste e norte da região Sudeste com clima predominantemente semiárido, extremo do Centro-Oeste e Tocantins com clima subúmido seco. Com o passar dos anos, essas áreas foram avançando pelas terras úmidas, mudando gradualmente para zonas de clima subúmido seco e semiárido. Ressalta-se o indicativo de intensificação da aridez pode estar associado a estabilidade ou redução da precipitação com aumento da temperatura.

As projeções futuras para os cenários de mudanças climáticas apontam para aumento dos climas semiárido e subúmido seco em todo o território brasileiro, contribuindo no avanço do processo de desertificação.

Para o cenário SSP 4.5 projeta-se aumento da temperatura do ar média em torno de 3 °C e variação da precipitação em torno -4,5 a 6,0% até o final do século. Observa-se que há uma tendência de aumento do clima subúmido seco na região Norte, aumento do clima semiárido no Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste e prevalência do clima úmido na região Sul. Portanto, a maior parte do Brasil apresenta tendência de “alta” e “moderada” suscetibilidade a desertificação.

Para o cenário SSP 8.5 os modelos indicam resultados que se assemelham aos do SSP 4.5, porém gerou cenários mais extremos. A anomalia de temperatura do ar média foi em torno de 6 °C e variação da precipitação em torno de -10,0 a 4,5% até o final do século. Há uma sinalização de aumento das áreas áridas e semiáridas na região Nordeste e redução expressiva das áreas não suscetíveis à desertificação. Ademais, observa-se indicativo de aumento do semiárido no Centro-Oeste e Sudeste, prevalência do clima subúmido seco no Norte e manutenção do clima úmido na região Sul. Logo, a maior parte do Brasil apresenta projeção de “alta” suscetibilidade à desertificação.

Diante do indicativo de aumento da aridez pelo território brasileiro e da vulnerabilidade da população a esse cenário, é fundamental considerar medidas de gestão de risco para implementar medidas de adaptação. Ademais, é possível perceber a relevância do monitoramento contínuo das mudanças climáticas e sua influência no processo de desertificação, a fim de prover estratégias para minimizar os impactos nos sistemas hídricos brasileiros e sua capacidade de oferta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAHUSSAIN, A. A.; ABDU, A. S. L.; AL-ZUBARI, W. K.; EL-DEEN, N. A.; ABDUL-RAHEEM, M. Desertification in the Arab Region: analysis of current stats and trend. **Journal of Arid Environments**, v. 51, p. 521-545, 2002.
- AB'SÁBER, N. S. Problemática na desertificação e da savanização no Brasil intertropical. **Geomorfologia**, v. 53, p. 1-19, 1977.
- ADEEL, Z.; SAFRIEL, U.; NIEMEIJER, D.; WHITE, R.; KALBERMATTEN, G.; GLANTZ, M.; SALEM, B.; SCHOLLES, B.; NIAMIR-FULLER, M.; EHUI, S.; YAPI-GNAORE, V. Ecosystems and human well-being: Desertification Synthesis - A Report of the Millennium Ecosystem Assessment. Washington: **World Resources Institute**, 2005.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, n. 3-4, p. 407-427, 2013.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- ALVES, J. J. A.; DA SILVA, M. C.; SILVA, V. S.; CARVALHO, V. C. Indicadores climáticos das áreas de desertificação nos cariris velhos da Paraíba. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, v. 1, n. 5, p. 585-597, 2012.
- AMARAL, V. P. do; MORAES, J. R. S. C. de; COSTA, J. F.; SANTIAGO, A. V. Estimativa de suscetibilidade à desertificação por meio dos índices de aridez aplicados no município de Petrolina-PE. In: Embrapa Amazônia Oriental. Artigo em anais de congresso (ALICE). In: Seminário de Iniciação Científica, 18.; Seminário de pós-graduação da Embrapa Amazônia Oriental, 2., 2014, Belém, PA. **Anais [...]**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 75 p., 2019.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: Panorama Nacional. Brasília: ANA, 2010.
- ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Variabilidade, anomalia e mudança climática. **Material didático**. ESAL/USP, 2007.
- ARAÚJO, K. D.; ANDRADE, A. P.; RAPOSO, R. W. C.; ROSA, P. R. O.; PAZERA JÚNIOR, E. Índices de aridez aplicados ao semi-árido paraibano: de Martonne, Lang, Meyer, CCD e Xerotérmico (Gaussen). **Geoambiente On-line**, n. 10, 2008.
- ARAÚJO, J. A.; SOUZA, R. F. Abordagens sobre o processo de desertificação: Uma revisão das evidências no Rio Grande do Norte. **Geosul**, v. 32, n. 65, p. 122-143, 2017.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; JUNIOR, J. Z.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.

BARRETO, L. L. **Suscetibilidade ao processo de desertificação no núcleo dos Sertões dos Inhamuns: O caso da sub-bacia do riacho do Urubu – Mucuíim – Arneiroz – CE**. 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação de Geografia, Fortaleza, 2015.

BARROS, K. de O. **Índice de aridez como indicador da susceptibilidade à desertificação na mesorregião norte de Minas**. 2010. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Geografia). Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2010.

BECKER, BERTHA K. Aplicação de índices climáticos ao nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 30, n. 4, p. 3-21, 1968.

BIROT, B. Sur une nouvelle fonction d'aridité appliquée au Portugal. **An. Fac. Cienc. Pôrto**, v. 30, p. 1-16, 1945.

BRANDT, J.; GEESON, N. Desertificação e Indicadores. Land Care in Desertification Affected Areas. **Lucinda**, n. 2, 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Convenção Internacional de Combate à Desertificação nos países afetados por seca e/ou desertificação. Brasília, 1994. Disponível em: [https://www.mma.gov.br/estruturas/sedr\\_desertif/\\_arquivos/unccd\\_portugues.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/_arquivos/unccd_portugues.pdf). Acesso em: 23 jan. 2020.

BRASIL. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca: PAN BRASIL. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente/ Secretaria de Recursos Hídricos, 214 p., 2004.

BRUNINI, O.; BLAIN, G. C.; BRUNINI, A. P.; SANTOS, R. L.; BRIGANTE, R. S.; ALMEIDA, E. L. Avaliação do índice de severidade de Seca de Palmer para a quantificação da seca agrícola no Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia, p. 1140-1147, 2002.

CAPOT-REY, R. Une carte de l'indice d'aridité au Sahara français. **Bulletin de l'Association de géographes français**, v. 28, n. 216, p. 73-76, 1951.

CARDOSO, V. C.; SOUZA, S. A.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G. Focos de calor na região Centro-Oeste no período de 2006 até 2012. In: **Congresso de Gestão Ambiental**, p. 1-3, 2013. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/IV-008.pdf>. Acesso em 19 fev. 2021.

CGEE. Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Ed: Brasília, 2016.

CHERLET, M.; HUTCHINSON, C.; REYNOLDS, J.; HILL, J.; SOMMER, S.; VON MALTITZ, G. (Eds.). World Atlas of Desertification, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2018.

CMIP6: the next generation of climate models explained. Disponível em: <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained>. Acesso em: 27 jul. 2020.

CORREIA, A. L. *et al.* Capítulo 7: Forçante radiativa natural e antrópica, 2014. Disponível em: [http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2012/06.21.19.10/doc/P%c3%a1ginas%20139\\_160%20de%20BMC-VOLUME1-RAN1.pdf](http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2012/06.21.19.10/doc/P%c3%a1ginas%20139_160%20de%20BMC-VOLUME1-RAN1.pdf). Acesso em: 04 set. 2020.

CRU-TS. Climatic Research Unit gridded Time Series. Disponível em: <http://www.cru.uea.ac.uk/data>. Acesso em: 04 abr. 2020.

DA COSTA, J. M. F.; JUNIOR, A. D. M.; SILVEIRA, C. S.; JÚNIOR, F. C. V. Influência das mudanças climáticas projetadas pelo IPCC, na aridez do Brasil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 11, n. 3, p. 429-442, 2018.

DA CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009.

DA SILVA, H. S.; SILVA, J. R. S.; STOSIC, T. Multifractal analysis of air temperature in Brazil. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 549, p. 124333, 2020.

DA SILVA NEVES, S. M. A.; NUNES, M. C. M.; NEVES, R. J. Caracterização das condições climáticas de Cáceres/MT-Brasil, no período de 1971 a 2009: subsídio às atividades agropecuárias e turísticas municipais. **Boletim goiano de geografia**, v. 31, n. 2, p. 55-68, 2011.

DAI, A.; ZHAO, T.; CHEN, J. Climate change and drought: A precipitation and evaporation perspective. **Current Climate Change Reports**, v. 4, n. 3, p. 301-312, 2018.

DESSAU, R. B.; PIPPER, C. B. "R"--project for statistical computing. Ugeskrift for laeger, v. 170, n. 5, p. 328-330, 2008.

DE MARTONNE, E. Aréisme et indice aridite. **Comptes Rendus de L'Académie des Sciences**, Paris, v. 182, p.1396-1398, 1926.

DE SOUZA DIAS, V.; LUZ, M. P.; MEDERO, G. M.; NASCIMENTO, D. T. F. An overview of hydropower reservoirs in Brazil: Current situation, future perspectives and impacts of climate change. **Water**, v. 10, n. 5, p. 592, 2018.

DIS4ME. Desertification Indicator System for Mediterranean Europe. Disponível em: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/dis4me>. Acesso em: 10 set. 2020.

DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S.; RUIZ, R. M. Cenários de Mudanças Climáticas e Agricultura no Brasil: Impactos Econômicos na Região Nordeste. **Documentos Técnico-Científico**, v. 42, n. 2, 2011.

DOURADO, C. da S.; OLIVEIRA, S. R de M.; AVILA, A. M. H. Indicadores climáticos das áreas com potencial de risco de desertificação no Estado da Bahia. **In: Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em anais de congresso (ALICE)** In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 19., 2015, Lavras. Agrometeorologia no século 21: o desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros: anais. Lavras: UFLA, 2015.

DOURADO, S. C. **Áreas de risco de desertificação: cenários atuais e futuros frente às mudanças climáticas**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2017.

EMBRAPA SOJA. Soja em números (safra 2019/20). Disponível em: <http://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 19 fev. 2021.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Mudanças Climáticas e Desdobramentos sobre os Estudos de Planejamento Energético: Considerações Iniciais. Rio de Janeiro. 2018.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2020. Relatório Síntese / Ano base 2019. Rio de Janeiro, 2020.

FAO. A new framework for conservation-effective land management and desertification control in Latin America and the Caribbean. 1998. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/W9298E/W9298E00.htm>. Acesso em: 06 mar. 2020.

FEARNSIDE, P. M. O processo de desertificação e os riscos de sua ocorrência no Brasil. **Acta Amazônica**, v. 9, n. 2, p. 393-400, 1979.

FERNANDES, R. O.; SILVEIRA, C. S.; STUDART, T. M. C.; SOUZA-FILHO, F. A. Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, p. 1-2, 2017.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

GAUSSEN, H. Théorie et classification des climats et microclimats. C.R. **VIIème Congrès International de Botanique**, Paris, p. 125–130, 1954.

GIDDEN, M. J.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; FUJIMORI, S.; LUDERER, G. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 4, p. 1443–1475, 2019.

GIRÃO, I. R. F.; RABELO, D. R.; ZANELLA, M. E. Análise teórica dos conceitos: Riscos Socioambientais, Vulnerabilidade e Suscetibilidade. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 71-83, 2018.

GUIMARAES, D. P.; LANDAU, E. C. Georreferenciamento dos pivôs centrais de irrigação no Brasil: ano base 2020. **Embrapa Milho e Sorgo-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2020.

HARRIS, I.; OSBORN, T. J.; JONES, P.; LISTER, D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 109, 2020.

IBGE. Estimativas da população com referência a 1º de julho de 2019. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-detalle-de-midia.html?view=mediaibge&catid=2103&id=3098>. Acesso em: 12 out. 2019.

IBGE. Território: Dados geográficos. Disponível em: <https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio/dados-geograficos.html>. Acesso em: 08 mar. 2020.

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.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p., 2014.

JESUS, J. B. Estimativa do balanço hídrico climatológico e classificação climática pelo método de Thornthwaite e Mather para o município de Aracaju-SE. **Scientia Plena**, v. 11, 2015.

JOHNSON, M. D. **Agricultural sustainability and conflict in the Middle East: The question of desertification and its institutional arrangements for the region**. 2003. Dissertação (Mestrado em Relações Internacionais). Faculty of the School of International Service of American University. Washington. 2003.

LANG, R. Verwitterung and Bodenbildung als Einführung der Bodenkunde. Stuttgart, p. 107-123, 1920.

LAUTENSACH, H.; MAYER, E.; Humiditat und Ariditat insbesondere auf der Iberischen Halbinsel. **Petermanns Mitteilungen**, n. 4, p. 249-270, 1960.

LOPES, I.; LEAL, B. G. Índice de aridez e tendência a desertificação para estações meteorológicas nos estados da Bahia e Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015.

LOPES, I.; SANTOS, S. M. dos; LEAL, B. G.; MELO, J. M. M. Variação do índice de aridez e tendência climática à desertificação para a região semiárida do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, p. 81-96, 2017.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Secretaria de Política Agrícola. Sumário Executivo Café. 2020. Disponível em: [http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/informe\\_estatistico/Sumario\\_Cafe\\_Marco\\_2020.pdf](http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/informe_estatistico/Sumario_Cafe_Marco_2020.pdf). Acesso em: 19 fev. 2021.

MARCOS JUNIOR, A. D.; SILVEIRA, C. S.; JÚNIOR, F. C. V.; GUIMARÃES, S. O.; DA COSTA, J. M. F. Classificação Climática de Thornthwaite para o Brasil com Base em Cenários de Mudanças Climáticas do IPCC-AR5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 647-664, 2018.

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, n. 1, p. 103-115, 2015.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; CUARTAS, L. A.; LEAL, K. R. D.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M. E.; MICHELIN, C. M.; BAIÃO, C. F. P.; ÂNGULO, E. C.; ALMEIDA, E. K.; KAZMIERCZAK, M. L.; MATEUS, M. P. A.; SILVA, R. C.; BENDER, F. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. **Frontiers in Water**, v. 3, p. 13, 2021.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, p. 5-28, 2007.

MARTINS, F. B.; GONZAGA, G.; SANTOS, D. F.; REBOITA, M. S. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.14, p. 129-156, 2018.

MATALLO JÚNIOR, H. Indicadores de desertificação: histórico e perspectivas. Brasília: UNESCO. Cadernos UNESCO Brasil. Série Meio Ambiente e Desenvolvimento, ed. 2, 2001.

MATALLO JÚNIOR, H. Glossário de termos e conceitos usados no contexto da UNCCD. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 154 p., 2009.

MATOS, R. M.; SILVA, P. F.; BORGES, V. E.; SOBRINHO, T. G.; SABOYA, L. M. F.; NETO, J. D. Uso de sistemas de classificação climática para o município de Barbalha-CE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 3, p. 877-885, 2018.

MBAYE, M. L.; SYLLA, M. B.; TALL, M. Impacts of 1.5 and 2.0 C global warming on water balance components over Senegal in West Africa. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, p. 712, 2019.

MEINSHAUSEN, M., NICHOLLS, Z., LEWIS, J., GIDDEN, M. J., VOGEL, E., FREUND, M., BEYERLE, U., GESSNER, C., NAUELS, A., BAUER, N., CANADELL, J. G., DANIEL, J. S., JOHN, A., KRUMMEL, P., LUDERER, G., MEINSHAUSEN, N., MONTZKA, S. A., RAYNER, P., REIMANN, S., SMITH, S. J., VAN DEN BERG, M., VELDERS, G. J. M., VOLLMER, M., AND WANG, H. J. The SSP greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. **Geoscientific Model Development Discussions**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-222>.

MEYER, A. Über einige Zusammenhänge zwischen Klima and Boden in Europa. *Chemie der Erde* 2, 209-347, 1926.

MIRANDA, R. A. C.; DOS SANTOS, A. S. Balanço hídrico e classificação climática de Thornthwaite em Duas Barras (RJ). **Geo UERJ**, v. 1, n. 18, 11 p., 2008.

MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M. M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco - Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 28 (2), p. 181-191, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000200007>.

NETO, J. B. L. **Planejamento da segurança hídrica em cenário de mudança climática considerando avaliação de custos de múltiplos mananciais**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2020.

NOBRE, C. A. Amazônia: fonte ou sumidouro de carbono?. Em: Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia. **Ministério do Meio Ambiente**, p. 197-224, 2001.

OLIVEIRA, J. A. M.; OLIVEIRA, C. M. M. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Arinos – MG. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 6, p. 3021-3027, 2018.

O'NEILL, B. C.; KRIEGLER, E.; RIAHI, K.; EBI, K. L.; HALLEGATTE, S.; CARTER, T. R.; MATHUR, R.; VAN VUUREN, D. P. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. **Climatic change**, v. 122, n. 3, p. 387-400, 2014.

PENMAN, H. L. The physical bases of irrigation control. **International Horticultural Congress**, 13. London: Royal Horticultural Society, p. 913-924, 1953.

PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 139-148, 2013.

PEREZ-MARIN, A. M.; CAVALCANTE, A. M. B.; MEDEIROS, S. S.; TINOCO, L. B. M.; SALCEDO, I. H. Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro: Ocorrência natural ou antrópica? **Parcerias Estratégicas**, v. 17, p. 87-106, 2012.

RÊGO, A. H. Os sertões e os desertos: o combate à desertificação e a política externa brasileira. Brasília: FUNAG, 2012.

ROCHA, V. M.; CORREIA, F. W. S.; GOMES, W. B. Avaliação dos Impactos da Mudança do Clima na Precipitação da Amazônia Utilizando o Modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 6, p. 2051-2065, 2019.

RODRIGUES, S. A.; BATISTELA, G. C. Uma revisão sobre a disponibilidade hídrica brasileira para geração de energia elétrica. **Geoambiente on-line**, n. 21, 2013.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. **Revista Bragantia**, v. 66, p. 711-720, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052007000400022>.

SALATI, E.; SALATI, E.; CAMPANHOL, T.; VILLA NOVA, N. Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Relatório 4. Tendências de Variações Climáticas para o Brasil no Século XX e Balanços Hídricos para Cenários Climáticos para o Século XXI. 182p., 2007.

SALVIANO, M. F.; GROPPA, J. D.; PELEGRINO, G. Q. Análise de Tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786201500032016>.

SAMIR, K. C.; LUTZ, W. The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 181-192, 2017.

SANTANA, M. O. Atlas das áreas susceptíveis a desertificação do Brasil /MMA. Secretaria de Recursos Hídricos, Brasília, MMA, 2007.

SANTOS, A. M.; GALVÍNIO, J. D. Mudanças climáticas e cenários de susceptibilidade ambiental à desertificação em municípios do Estado de Pernambuco. **Revista Eletrônica de Geografia**, v. 5, n. 13, p. 66-83, 2013.

SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B.; RAO, T. V. R.; MENEZES, H. E. A. Tendências dos índices de precipitação no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 39-47, 2009.

SANTOS, D. N.; SILVA V. P. R.; SOUSA, F. A. S.; SILVA, R. A. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 5, p. 492-500, 2010.

SANTOS, J. F. S.; NAVAL, L. P.; LEITE, D. F. C.; BARBACENA, D. R.; SEVERO, F. A. S. Pegada hídrica da soja em cenários de mudanças climáticas na última fronteira agrícola do Cerrado nas regiões Norte e Nordeste. **Agrometeoros**, v. 27, n. 1, 2020.

SANTOS, S. M. dos; LEAL, B. G.; TAURA, T. A. Determinação da suscetibilidade climática à desertificação para os municípios baianos de Juazeiro, Casa Nova, Sobradinho e Curaçá. **Okara: Geografia em Debate**, v. 10, n. 1, p. 171-184, 2016.

SAP. Sistema de Alerta Precoce contra Seca e Desertificação. Disponível em: <http://sap.ccst.inpe.br/>. Acesso em 10 set. 2020.

SCHEFF, J.; FRIERSON, D. M. W. Terrestrial aridity and its response to greenhouse warming across CMIP5 climate models. **Journal of Climate**, v. 28, n. 14, p. 5583-5600, 2015.

SCHENKEL, C. S.; MATALLO JÚNIOR, H. Desertificação. Brasília: UNESCO, 1999.

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico No estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013.

SOUZA, S. O.; CÔRREA, W.; FILETI, R.; VALE, C. C. Balanço Hídrico da Bacia do Rio Caravelas (BA) como Subsídio ao Planejamento Agrícola. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 1, 2014.

SOUZA, S. O.; NOBRE, A. C. O.; LIMA, G. R. R.; ALENCAR, F. K. M.; SILVA, F. J. A. Variação temporal de índices de aridez na área de reservatório do trópico semiárido. In: **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, v. 10, 2019.

SPINONI, J.; VOGT, J.; NAUMANN, G.; CARRAO, H.; BARBOSA, P. Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen–Geiger classification and FAO aridity index. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 9, p. 2210-2222, 2015.

SUERTEGARAY, D. M.; GUASSELLI, L. A.; VERDUM, R.; BASSO, L. A.; MEDEIROS, R. M. V.; BELLANCA, E. T.; BERTÊ, A. M. A. Projeto Arenização no Rio Grande do Sul, Brasil: gênese, dinâmica e espacialização. **Revista Bibliográfica de Geografia y Ciencias Sociales**. Barcelona. v. 6, n. 287, 2001. Disponível em: <http://www.ub.es/geocrit/b3w-287.htm>. Acesso em: 22 fev. 2020.

TERASSI, P. M. B.; TOMMASELLI, J. T. G. Avaliação de sistemas de classificação climática para a vertente paranaense da bacia hidrográfica do rio Itararé. **Caderno de Geografia**, v. 26, p. 877-896, 2016. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26n47p877>.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, p. 55-94, 1948.

UKKOLA, A. M.; KAUWE, M. G.; RODERICK, M. L.; ABRAMOWITZ, G.; PITMAN, A. Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 11, 2020.

UNCCD (a). United Nations Convention to Combat Desertification. Ficha Informativa, 11. 2009. Disponível em: <https://library.unccd.int/Details/fullCatalogue/600000030>. Acesso em: 22 fev. 2020.

UNCCD (b). United Nations Convention to Combat Desertification. Ficha Informativa, 11. 2009. Disponível em: <https://library.unccd.int/Details/fullCatalogue/600000030>. Acesso em: 22 fev. 2020.

UNCCD (c). United Nations Convention to Combat Desertification. Ficha Informativa, 12. 2009. Disponível em: <https://library.unccd.int/Details/fullCatalogue/600000030>. Acesso em: 22 fev. 2020.

UNCCD (d). United Nations Convention to Combat Desertification. Ficha Informativa, 13. 2009. Disponível em: <https://library.unccd.int/Details/fullCatalogue/600000030>. Acesso em: 22 fev. 2020.

UNEP. World Atlas of Desertification. **Edward Arnold**, London, 69p., 1992.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. O deserto brasileiro. **Recife: Universidade Rural de Pernambuco**, p. 73-78, 1977.

VASQUEZ-ARROYO, E.; SILVA, F.; SANTOS, A.; CORDEIRO, D.; MARENGO, J. A.; LUCENA, A. F. P. Impactos climáticos na segurança energética no Brasil: análise de eventos observados e opções de adaptação. **Sustabilidade em debate**. Brasília, v. 11, n.3, p. 177-196, 2020.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. S. B.; CALIL, P. M.; CARVALHO, M. A.; VALERIANO, D. M.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian Northeast. **Solid Earth**, v. 6, p. 347-360, 2015. Disponível em: [www.solid-earth.net/6/347/2015/se-6-347-2015.html](http://www.solid-earth.net/6/347/2015/se-6-347-2015.html). Acesso em: 08 mar. 2020.

WMO. Drought and Agriculture. WMO Technical Note n° 138. Report of the CAgM Working Group on the Assessment of Drought. Geneva, 1975.

WORLDCLIM - Global Climate Data. Free climate data for ecological modeling and GIS. Disponível em: [https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6\\_clim2.5m.html](https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_clim2.5m.html). Acesso em: 12 out. 2019.

WU, Z.; XU, H.; LI, Y.; WEN, L.; LI, J.; LU, G.; LI, X. Climate and drought risk regionalisation in China based on probabilistic aridity and drought index. **Science of the Total Environment**, v. 612, p. 513-521, 2018.