

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**LUCAS AUGUSTO PEREIRA DA SILVA**

**Mudanças climáticas no Semiárido Brasileiro: impactos da  
intensificação da aridez no vigor da vegetação**

Uberlândia

2024

**LUCAS AUGUSTO PEREIRA DA SILVA**

**Mudanças climáticas no Semiárido Brasileiro: impactos da  
intensificação da aridez no vigor da vegetação**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de mestre ou doutor em Geografia.

**Área de concentração:** Dinâmicas Territoriais e Estudos Ambientais

**Linha de pesquisa:** Estudos Ambientais e Geotecnologias

**Orientador:** Prof. Dr. Claudionor Ribeiro da Silva.

**Coorientador:** Prof. Dr. Marcos Esdras Leite.

Uberlândia

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 Silva, Lucas Augusto Pereira da, 1997-  
Mudanças climáticas no Semiárido Brasileiro:  
impactos da intensificação da aridez no vigor da vegetação  
[recurso eletrônico] / Lucas Augusto Pereira da Silva. -  
2024.

Orientador: Claudionor Ribeiro da Silva.

Coorientador: Marcos Esdras Leite.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Geografia.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.765>

Inclui bibliografia.

1. Geografia. I. Silva, Claudionor Ribeiro da, 1975-,  
(Orient.). II. Leite, Marcos Esdras, 1981-, (Coorient.).

III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-  
graduação em Geografia. IV. Título.

CDU: 910.1

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091 Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geografia  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1H, Sala 1H35 - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4381/3291-6304 - www.ppgeo.ig.ufu.br - posgeo@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	GEOGRAFIA				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, Número 277, PPGGEO				
Data:	2 de dezembro de 2024	Hora de início:	14h:00min.	Hora de encerramento:	16h:30min.
Matrícula do Discente:	12113GEO010				
Nome do Discente:	LUCAS AUGUSTO PEREIRA DA SILVA				
Título do Trabalho:	MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SEMINÁRIO BRASILEIRO: IMPACTOS DA INTENSIFICAÇÃO DA ARIDEZ NO VIGOR DA VEGETAÇÃO				
Área de concentração:	DINÂMICAS TERRITORIAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS				
Linha de pesquisa:	ESTUDOS AMBIENTAIS E GEOTECNOLOGIAS				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Geotecnologias Aplicadas Ao Estudo Dos Sistemas Ambientais				

Reuniu-se no Campus Santa Mônica (Online - [conferenciaweb.rnp.br](http://conferenciaweb.rnp.br)), no Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva (IGESC) da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em GEOGRAFIA, assim composta: Professores Doutores: Luis Ricardo Fernandes da Costa - UNIMONTES - MG; Gabriel Alves Veloso - UFPA-PA; Vanderlei de Oliveira Ferreira - IGESC-UFU; Alan Silveira - IGESC-UFU e Claudionor Ribeiro da Silva - IGESC-UFU (orientador do candidato). Os membros participaram de forma remota.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Professor Claudionor Ribeiro da Silva - IGESC-UFU, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta ocorreram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Última a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente Ata que após lida foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Claudionor Ribeiro da Silva, Coordenador(a)**, em 02/12/2024, às 16:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Ricardo Fernandes da Costa, Usuário Externo**, em 02/12/2024, às 16:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alan Silveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/12/2024, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vanderlei de Oliveira Ferreira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/12/2024, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Alves Veloso, Usuário Externo**, em 02/12/2024, às 16:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5874921** e o código CRC **039A44D2**.



Dedico este trabalho aos meus pais, e aos “meninos” (Geovanna, Giorge, Kaio e as gêmeas).

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais (Geralda (Sé) e Geraldão) por me apoiarem em tudo. Sem vocês, nada seria possível em minha vida. Estendo aos meninos (Geovanna, Giorge, Kaio e as gêmeas), pois tudo que faço é motivado por vocês.

Ao meu orientador, Prof. Claudionor, por me auxiliar de forma ímpar na construção dessa tese, bem como no meu crescimento profissional.

Em adição, ao Prof. Marcos Esdras, não somente pelo apoio e auxílio na tese, mas por tudo nesses últimos seis anos. Um grande amigo e mentor.

Aos pesquisadores que me auxiliaram na construção dos capítulos dessa tese: Cristiano Marcelo Pereira de Souza, João Paulo Sena-Souza, Roberto Filgueiras e o Édson Luís Bolfe.

À minha companheira, Carolina Cabral, por estar ao meu lado em todos os momentos.

À minha grande amiga Taya Parreiras, pelas discussões acadêmicas e sobre as mais variadas coisas da vida.

**“O limite é uma fronteira criada só pela mente”.** Racionais MC's.

## RESUMO

O Semiárido Brasileiro (SAB), é uma das zonas semiáridas mais populosas, altamente dependente dos recursos hídricos para atividades socioeconômicas e uma das regiões mais biodiversas do mundo, com predomínio do bioma Caatinga e enclaves de Cerrado e Mata Atlântica. As condições hídricas, por meio da aridez sob perspectiva de mudanças climáticas, podem afetar o vigor das vegetações no SAB. Entender os efeitos das mudanças futuras no clima nessa região é crucial para o planejamento ambiental. O objetivo dessa tese é entender a influência das condições de aridez em perspectivas futuras (2061 – 2080) no vigor das vegetações do SAB. Para cumprir essa proposta, I) foram estabelecidos cenários futuros para o comportamento da ETo, e II) os níveis de aridez e suas implicações em classes climáticas e zonas com susceptibilidade à desertificação no SAB considerando cenários do IPCC, isto é, os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP). Foram usados dois SSPs, o 126, que representa um cenário otimista sobre as mudanças no clima, e o 585, que compreende condições pessimistas para o final do século. No mapeamento da ETo, foram aplicados cinco algoritmos de *machine learning* (BRNN, *Cubist*, *Earth*, Regressão Linear e *Random Forest (RF)*) considerando o cenário atual e os SSPs 126 e 585. O *Cubist* mostrou as melhores métricas entre os algoritmos testados ( $R^2 = 0,98$  e  $RMSE = 0,07$  mm dia<sup>-1</sup>). Até o final do século (2061 – 2080), projeta-se aumento nas taxas de ETo (+ 3 a + 15% nos SSPs 126 e 585). Algumas regiões do SAB podem apresentar aumento de > 600 mm ano<sup>-1</sup>. Esse aumento na ETo, conduzirá à intensificação da aridez, o que tornará o SAB significativamente ( $p$ -value <0,05) mais seco, uma vez que as terras mais áridas irão expandir 46.000 km<sup>2</sup> no SSP 126 e 125.600 km<sup>2</sup> no SSP 585 em relação ao cenário atual. Essas condições áridas poderão alterar os tipos climáticos da região. O clima semiárido deverá expandir 56.500 a 140.400 km<sup>2</sup> sobre climas úmidos. Enquanto os climas áridos terão expansão de 4100 a 21.500 km<sup>2</sup>. Essas terras secas serão mais susceptíveis a processos de desertificação. As zonas de “alta” susceptibilidade podem avançar em 622.400 a 706.300 km<sup>2</sup>, enquanto áreas com susceptibilidade “muito alta” deve expandir entre 4400 e 21.700 km<sup>2</sup> nos SSPs 126 e 585, respectivamente. As áreas mais afetadas serão a parte Central (Bahia e Pernambuco) e Sul (norte de Minas Gerais) do SAB. Para compreender os efeitos da aridez no vigor da vegetação (representado pelo *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI), treinamos novamente os mesmos algoritmos previamente usados no segundo capítulo, nesse caso, o RF obteve melhor performance ( $R^2 = 0,72$ ). Os resultados

mostraram que a aridez induzirá a mudanças significativas no vigor das vegetações do SAB. As caatingas, florestas tropicais úmidas e secas e as zonas ecotonais devem sofrer perdas significativas no vigor vegetativo nas próximas décadas. Enquanto as savanas são preditas para sofrerem acentuado esverdeamento. Nossos resultados revelam que as mudanças climáticas devem imprimir alterações severas nos domínios de vegetação do SAB.

**Palavras-Chave:** modelagem, predição espacial, intensificação de aridez, zonas semiáridas, evapotranspiração potencial, NDVI e cenários IPCC.

## ABSTRACT

The Brazilian semiarid (BSR) is one of the most populous semi-arid zones, highly dependent on water resources for socioeconomic activities, and one of the most biodiverse regions in the world, with a predominance of the Caatinga biome and enclaves of Cerrado and Atlantic Forest. Water conditions, through aridity from the perspective of climate change, can affect the vigor of vegetation in the SAB. Understanding the effects of future climate changes in this region is crucial for environmental planning. This thesis aims to understand the influence of arid conditions in future perspectives (2061 – 2080) on the vigor of SAB vegetation. To fulfill this proposal, I) future scenarios were established for the behavior of ETo, and II) the aridity levels and their implications on climatic classes and zones with susceptibility to desertification in the SAB considering IPCC scenarios, that is, the Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Two SSPs were used, 126, representing an optimistic scenario about climate change, and 585, comprising pessimistic conditions for the end of the century. In mapping ETo, five machine learning algorithms were applied (BRNN, Cubist, Earth, Linear Regression, and Random Forest (RF)) considering the current scenario and SSPs 126 and 585. Cubist showed the best metrics among the algorithms tested ( $R^2 = 0.98$  and  $RMSE = 0.07 \text{ mm day}^{-1}$ ). By the end of the century (2061 – 2080), ETo rates are projected to increase (+3 to +15% in SSPs 126 and 585). Some regions of the SAB may experience an increase of  $> 600 \text{ mm year}^{-1}$ . This increase in ETo will lead to the intensification of aridity, which will make the SAB significantly ( $p\text{-value} < 0.05$ ) drier since the most arid lands will expand by  $46,000 \text{ km}^2$  in SSP 126 and  $125,600 \text{ km}^2$  in SSP 585 concerning the current scenario. These arid conditions could change the region's climate types. The semi-arid climate is expected to expand  $56,500$  to  $140,400 \text{ km}^2$  over humid climates. While arid climates will expand from  $4100$  to  $21,500 \text{ km}^2$ . These dry lands will be more susceptible to desertification processes. Zones of "high" susceptibility could expand by  $622,400$  to  $706,300 \text{ km}^2$ , while areas with "very high" susceptibility should expand to between  $4400$  and  $21,700 \text{ km}^2$  in SSPs 126 and 585, respectively. The most affected areas will be the Central (Bahia and Pernambuco) and Southern (northern Minas Gerais) parts of the SAB. To understand the effects of aridity on vegetation vigor (represented by the Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), we retrained the same algorithms previously used in the second chapter, in this case, RF achieved better performance ( $R^2 = 0.72$ ). The results showed that aridity will induce significant changes in the vigor of SAB vegetation. The

caatingas, humid and dry tropical forests, and ecotonal zones are expected to suffer significant losses in vegetative vigor in the coming decades. Meanwhile, savannas are predicted to undergo marked greening. Our results reveal that climate change is expected to affect SAB vegetation domains severely.

**Keywords:** modeling, spatial prediction, aridity intensification, semi-arid zones, potential evapotranspiration, NDVI, and IPCC scenarios.

# Sumário

I. Introdução Geral.....	14
II. Objetivos e Estrutura da Tese .....	17
II. Hipótese Geral da Tese.....	18
IV. Referências.....	19
<b>CAPÍTULO 1: Caracterização Ambiental do Semiárido Brasileiro (SAB) .....</b>	<b>21</b>
1.1. Climatologia .....	23
1.2. Geologia e Geomorfologia .....	26
1.3. Pedologia.....	28
1.4. Biogeografia.....	32
Referências .....	36
<b>CAPÍTULO 2: Increase in Reference Evapotranspiration in Future Climate Change Scenarios in the Brazilian Semiarid - South America.....</b>	<b>40</b>
1. Introduction .....	40
2. Material and methods .....	42
2.1. Study area.....	42
2.2. Methodological steps .....	43
2.3. Database .....	44
2.4. Sampling, pre-processing and tested models.....	46
2.5. Calibration, training and validation .....	47
2.6. Comparative Analysis between Spatial Prediction of Scenarios .....	48
3. Results.....	48
3.1. Models performance for ETo prediction .....	48
3.2. Spatial Distribution of ETo - Current (1970 - 2000) and Future Scenarios (2061- 2080) .....	51
4. Discussion .....	55
4.1. Model performance .....	55
4.2. Influence of Climate Change Scenarios on ETo .....	56
Data availability.....	58
References .....	58
<b>CAPÍTULO 3: Expansão da aridez e implicações nas classes climáticas e desertificação em cenários futuros no Semiárido Brasileiro .....</b>	<b>63</b>
1. Introdução.....	63
2. Materiais e métodos.....	65



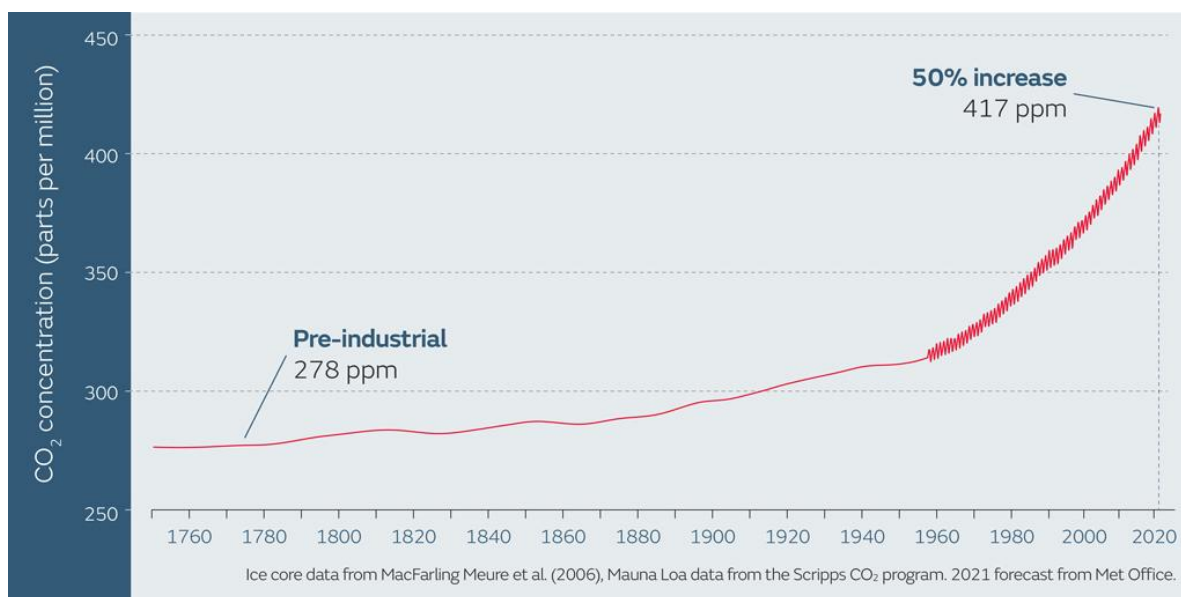
2.1. Área de estudo.....	65
2.2. Etapas metodológicas e operacionais .....	67
2.3. Índice de Aridez para os cenários atual e futuros.....	67
2.4. Classificação Climática e áreas susceptíveis à desertificação .....	68
2.5. Análises estatísticas.....	68
3. Resultados .....	69
3.1 Índice de Aridez (IA) no cenário atual (1970 – 2000) e futuros (2061 – 2080) .....	69
3.2. Classificação climática e áreas susceptíveis à desertificação .....	71
4. Discussão .....	75
Referências .....	77
<b>CAPÍTULO 4: Influência da aridez sob condições de mudanças climáticas no vigor da vegetação do Semiárido Brasileiro – América do Sul.....</b>	<b>81</b>
1. Introdução .....	82
2. Área de estudo.....	84
3. Materiais e Métodos .....	85
3.1. Variável dependente (NDVI).....	86
3.2. Covariáveis.....	87
3.3. Amostragem, treinamento e validação.....	88
3.4. Predição espacial nos cenários futuros .....	88
3.5. Análises estatísticas.....	89
4. Resultados .....	89
4.1. Performance dos modelos e importância das covariáveis .....	89
4.2. Distribuição espacial do NDVI nos cenários atual (1970 – 2000) e futuros (2061 – 2080) a partir da variação do Índice de Aridez.....	90
4.3. Impactos da aridez no vigor por domínio de vegetação .....	92
5. Discussão .....	96
5.1. Performance dos modelos e impactos das covariáveis.....	96
5.2. Influência das condições de aridez no vigor da vegetação em perspectivas futuras....	96
Referências .....	98
Considerações Finais .....	103

## I. Introdução Geral

Historicamente, desde a instalação das primeiras sociedades humanas, as paisagens naturais têm sido impactadas, principalmente com as mudanças no uso e cobertura da terra, implicando em conversões sistemáticas da vegetação natural para inserções de pastagens e campos agrícolas para atender a demanda populacional (Ellis *et al.*, 2021). Dentre os marcos civilizatórios que imprimiram pressões sobre os recursos naturais, a Revolução Industrial, em todas as suas fases (século XVIII ao XX), foi um dos principais impulsionadores de mudanças no uso e cobertura da terra globalmente (Ellis *et al.*, 2010).

As taxas de remoção de vegetação impostas na Era Industrial certamente afetou diversos segmentos, dentre os mais sensíveis e cruciais para humanidade em diversas escalas temporais, estão as mudanças no clima (Pongratz; Caldeira, 2012). Nesse escopo, destaca-se as emissões dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>, que corresponde a 60% dos Gases do Efeito Estufa – GEEs) para atmosfera, devido à remoção da vegetação natural, um dos principais reservatórios de carbono do mundo (Hong *et al.*, 2021; Sha *et al.*, 2022). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), mostrou que houve uma crescente (~50%) nas emissões dos GEEs do período pré-industrial (1750 – 1800) até os dias atuais (Figura 0.1) (IPCC, 2021). Atualmente, a quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera supera os níveis registrados nos últimos 2 milhões de anos (IPCC, 2021).

**Figura 0.1** – Concentração global de CO<sub>2</sub> na atmosfera de 1700 a 2021.



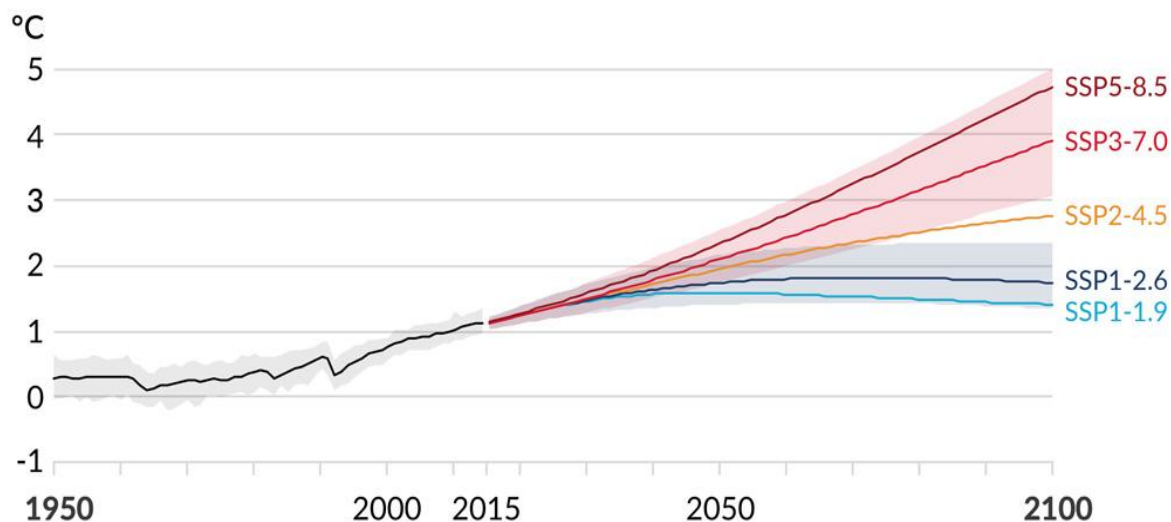
Disponível em: <https://www.carbonbrief.org/met-office-atmospheric-co2-now-hitting-50-higher-than-pre-industrial-levels/>

Existe uma relação direta entre CO<sub>2</sub> e alterações em variáveis climáticas (Brovkin *et al.*, 2004). Um forte consenso na comunidade científica, é o aumento da temperatura em função da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, pois o CO<sub>2</sub> possui capacidade de armazenamento de energia térmica, absorvendo mais calor termal, reduzindo a troca de fluxos térmicos entre atmosfera e espaço sideral. O IPCC tem enfatizado a intensificação da temperatura global desde o período pré-industrial, associada às emissões de CO<sub>2</sub>, registrando aumento de até 1.1 °C, chegando a 1.6 °C em algumas áreas continentais, enquanto nos oceanos foi de 0.9 °C (IPCC, 2021).

Esse aumento de temperatura na atualidade, comparado ao período pré-industrial, também segue uma tendência para cenários futuros. O IPCC tem se empenhado desde 1990 em realizar relatórios periódicos (chamados de AR 1, 2, 3, 4, 5 e 6) sobre as condições históricas, atuais e futuras do clima global, considerando as implicações das ações antrópicas na dinâmica climática (IPCC, 2021). Esses cenários levam em consideração possíveis caminhos conduzidos pela humanidade e, conseqüentemente, seus efeitos no clima. Os cenários são denominados de *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs, traduzido para o português: Caminhos Socioeconômicos Compartilhados), e classificados em otimistas (SSP1-1.9 e SSP1-2.6), intermediário (SSP2-4.5) e pessimistas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) (Figura 0.2). Os números finais de cada cenário representam as forçantes radiativas (em *watts* por metro quadrado) estabelecidas em cada um deles, isto é, a absorção de radiação na atmosfera em função dos GEEs.

Nos cenários otimistas, pressupõe que haverá adoção de medidas mitigadoras para controlar as mudanças no clima, assumindo que as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> serão zeradas até 2050 – 2080, mantendo o aumento da temperatura abaixo dos 2°C acima do nível pré-industrial, conforme a meta do acordo de Paris (Figura 0.2). No cenário intermediário (SSP2-4.5), o forçamento radiativo é de 4,5 W/m<sup>2</sup>, indicando que as medidas de proteção estão sendo tomadas, contudo, embora as emissões de CO<sub>2</sub> sejam reduzidas, não seria o suficiente para zerá-las até 2100. Enquanto nos cenários pessimistas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5), a temperatura global pode aumentar em 4.5 °C até o final do século, pois as emissões de GEEs e exploração dos combustíveis fósseis não serão controladas.

**Figura 0.2** - Mudanças na temperatura da superfície global em relação a 1850-1900, nos cinco principais cenários de emissões usados no AR6.



Fonte: IPCC (2021).

Com intuito de auxiliar a comunidade científica e os tomadores de decisões, o IPCC tem formulado modelos espaciais para todo globo terrestre, representando os cenários preditos para as condições futuras do clima. Geralmente, são organizados e estruturados em Modelos de Circulação Geral (GCMs), os quais representam os fenômenos físicos na atmosfera, oceanos e superfície, considerando as respostas dos sistemas climáticos frente à concentração dos GEEs (Tapiador *et al.*, 2020). Em geral, a tendência predita pelos GCMs é de aumento na média de temperatura do ar para o globo terrestre (IPCC, 2021). A partir disso, modelagens sugerem que deve ocorrer um processo de amplificação da evapotranspiração potencial e conseqüentemente a expansão das condições aridez (Zomer; Trabucco, 2024).

Essa intensificação da aridez é indicada como um dos principais responsáveis por alterações na estrutura e funcionamento dos ecossistemas vegetacionais pelo globo (Berdugo *et al.*, 2020; Bonannella *et al.*, 2023; Allen *et al.*, 2024). Isso pode ser mais amplificado nas zonas semiáridas, pois possuem ecossistemas prontamente vulneráveis ambientalmente devido à baixa disponibilidade hídrica (Huang *et al.*, 2016a).

O Semiárido brasileiro (SAB) entra nesse escopo, pois muitos estudos indicam uma tendência de aridificação para essa região nas próximas décadas, com pronunciados impactos nos ecossistemas vegetacionais. Em geral, os estudos para o SAB, sugerem que a intensificação da aridez sob condições de mudanças climáticas deve induzir a processos

de sucessão ecológica (Salazar; Nobre; Oyama, 2007; Oliveira *et al.*, 2021; Arruda *et al.*, 2024). Salazar, Nobre e Oyama (2007) em seus mapeamentos constataram que devido a aridificação prevista para as terras semiáridas, as caatingas podem ser substituídas por semidesertos até o final do século. De forma similar, Oliveira *et al.*, (2021) e Arruda *et al.*, (2024), sugerem que ecossistemas xerófilos devem expandir sobre as savanas e florestas tropicais. Ainda, Silva *et al.*, (2023) em modelagem paleoclimática indicou que ~6% das terras semiáridas no Brasil sofreram mudanças na cobertura vegetal desde o Último Máximo Glacial (~21 mil anos antes do presente).

Esses resultados são de grande relevância para contexto ecológico. No entanto, estudos sugerem a necessidade de compreender como estarão os níveis de vigor dos ecossistemas diante da amplificação da aridez (Kong *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2023). O vigor da vegetação é um *proxy* nas interrelações entre os ecossistemas e seus impactos em aspectos biofísicos na interface Terra-Atmosfera, tais como a redistribuição e trocas de calor e umidade. Considerando essa lacuna, é imperativo análises que avancem no conhecimento e compreendam os impactos da aridificação sobre o vigor da vegetação do SAB.

A relação entre as condições de aridez e o vigor vegetacional é complexa. Portanto, é necessário o uso de metodologias robustas como alternativa para capturem essa complexidade, a exemplo, algoritmos de aprendizagem de máquina (Kong *et al.*, 2023; Nguyen; Seeboonruang; Chen, 2023). Diversos estudos têm provado a eficiência dessa estrutura metodológica em modelagens considerando mudanças climáticas e seus impactos na dinâmica vegetacional (Hengl *et al.*, 2018; Bonannella *et al.*, 2023; Arruda *et al.*, 2024).

O entendimento adequado da influência da aridez sobre o vigor das vegetações no SAB pode fornecer importantes informações para um planejamento ambiental sustentável, com tomadas de decisões pautadas em orientações científicas. Diante do exposto, essa pesquisa buscou responder as seguintes questões:

- a) Como as mudanças climáticas afetarão as condições de aridez no SAB em perspectivas futuras?
- b) Como a vegetação responderá diante de possíveis mudanças na aridez?
- c) Quais as vegetações serão mais afetadas devido as mudanças na aridez?

## II. Objetivos e Estrutura da Tese

O objetivo dessa tese de doutorado foi entender a influência das condições de aridez em perspectivas futuras (2061 – 2080) no vigor das vegetações do SAB em função de mudanças climáticas. Foram propostos quatro capítulos para cumprir esse objetivo. O **primeiro capítulo** foi dedicado em fazer uma caracterização física regional do Semiárido Brasileiro, abarcando os aspectos climáticos, geomorfológicos, pedológicos e biogeográficos.

O **segundo capítulo** objetivou estabelecer cenários para a evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>) diante de mudanças climáticas por meio de algoritmos de *machine learning*. Enquanto o **terceiro**, utilizando o produto obtido no estudo anterior, elaborou um mapeamento da expansão das condições de aridez (por meio do índice de aridez de Thornthwaite (1948)), bem com suas implicações nos tipos climáticos e áreas possíveis de processo de desertificação em cenários futuros. Finalmente, no **quarto capítulo**, a partir das evidências mostradas nos estudos iniciais da tese, foram elaborados mapeamentos preditivos do vigor vegetativo no SAB considerando a influência da intensificação da aridez em perspectivas futuras.

## II. Hipótese Geral da Tese

Em cenários futuros de mudanças climáticas, a temperatura média do ar aumentará na ordem de 4.5° C até o final do século, com isso, espera-se alterações em variáveis hidrológicas cruciais, tal como a evapotranspiração potencial, que por sua vez, tende a intensificar os níveis de aridez na superfície. A aridez indica o grau de secura dos ambientes, sendo um elemento chave para a manutenção dos ecossistemas. A vegetação, por exemplo, responde rapidamente às flutuações das condições de aridez, principalmente com alterações em seu vigor vegetativo. Para as zonas semiáridas tem se encontrado diferentes respostas da vegetação pelo mundo, com algumas faixas sujeitas a queda no vigor da vegetação devido à amplificação da aridez, e outras preditas para sofrerem com o esverdeamento em função da fertilização por CO<sub>2</sub> (Higgins; Conradi; Muhoko, 2023; Zhang; Evans; Burrell, 2024). Em específico para o SAB, pouco se sabe os efeitos de mudanças futuras do clima no vigor dos domínios de vegetação. Estudos prévios têm se esforçado em entender os potenciais impactos de mudanças climáticas na distribuição da vegetação (Oliveira *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023). Embora de grande relevância, os estudos anteriormente realizados, dedicaram em entender as alterações nos limites da vegetação, essencialmente nas zonas de transições. Não há abordagens com intuito de

compreender os efeitos das mudanças climáticas no vigor da vegetação, isto é, que contemple o status vegetativo do domínio em geral. Investigando essa lacuna, nessa tese hipotetiza-se que: I) as florestas úmidas devem sofrer os declínios mais intensos no vigor. II) enquanto as caatingas, savanas e as florestas tropicais secas, mesmo diante da intensa aridez esperada não devem perder vigor significativamente.

#### IV. Referências

ALLEN, Bethany J. *et al.* Projected future climatic forcing on the global distribution of vegetation types. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [s. l.], v. 379, n. 1902, p. 20230011, 2024.

ARRUDA, Daniel M. *et al.* Amazonian vegetation types and indigenous lands threatened by upcoming climate change: Forecast impact for Brazilian biomes. **Austral Ecology**, [s. l.], v. 49, n. 1, p. e13369, 2024.

BERDUGO, Miguel *et al.* Global ecosystem thresholds driven by aridity. **Science**, [s. l.], v. 367, n. 6479, p. 787–790, 2020.

BONANNELLA, Carmelo *et al.* Biomes of the world under climate change scenarios: increasing aridity and higher temperatures lead to significant shifts in natural vegetation. **PeerJ**, [s. l.], v. 11, p. e15593, 2023.

BROVKIN, Victor *et al.* Role of land cover changes for atmospheric CO<sub>2</sub> increase and climate change during the last 150 years. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1253–1266, 2004.

ELLIS, Erle C. *et al.* Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. **Global Ecology and Biogeography**, [s. l.], v. 19, n. 5, p. 589–606, 2010.

ELLIS, Erle C. *et al.* People have shaped most of terrestrial nature for at least 12,000 years. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 118, n. 17, p. e2023483118, 2021.

HENGL, Tomislav *et al.* Global mapping of potential natural vegetation: an assessment of machine learning algorithms for estimating land potential. **PeerJ**, [s. l.], v. 6, p. e5457, 2018.

HIGGINS, Steven I.; CONRADI, Timo; MUHOKO, Edward. Shifts in vegetation activity of terrestrial ecosystems attributable to climate trends. **Nature Geoscience**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 147–153, 2023.

HONG, Chaopeng *et al.* Global and regional drivers of land-use emissions in 1961–2017. **Nature**, [s. l.], v. 589, n. 7843, p. 554–561, 2021.

HUANG, Jianping *et al.* Accelerated dryland expansion under climate change. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 166–171, 2016.

IPCC. **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book>. Acesso em: 26 nov. 2023.

KONG, Zijie *et al.* Past and projected future patterns of fractional vegetation coverage in China. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 902, p. 166133, 2023.

NGUYEN, Kieu Anh; SEEBOONRUANG, Uma; CHEN, Walter. Projected Climate Change Effects on Global Vegetation Growth: A Machine Learning Approach. **Environments**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 204, 2023.

OLIVEIRA, Guilherme de Castro *et al.* Soil predictors are crucial for modelling vegetation distribution and its responses to climate change. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 780, p. 146680, 2021.

PONGRATZ, Julia; CALDEIRA, Ken. Attribution of atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature increases to regions: importance of preindustrial land use change. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 034001, 2012.

SALAZAR, Luis F.; NOBRE, Carlos A.; OYAMA, Marcos D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 34, n. 9, 2007.

SHA, Zongyao *et al.* The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management. **Communications Earth & Environment**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 1–10, 2022.

SILVA, Rafael César *et al.* The Brazilian semiarid region over the past 21,000 years: Vegetation dynamics in small pulses of higher humidity. **Ecological Informatics**, [s. l.], v. 77, p. 102259, 2023.

SUN, Lu *et al.* Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI in the Qinghai-Tibet Plateau. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 587, 2023.

TAPIADOR, Francisco J. *et al.* Regional climate models: 30 years of dynamical downscaling. **Atmospheric Research**, [s. l.], v. 235, p. 104785, 2020.

ZHANG, Xinyue; EVANS, Jason P.; BURRELL, Arden L. Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. **Communications Earth & Environment**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 1–9, 2024.

ZOMER, Robert John; TRABUCCO, Antonio. **Future Global Aridity Index and PET Database (CMIP\_6)**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=11e920c1ee144fc2a691951096b96cbc>. Acesso em: 26 jun. 2024.



## **CAPÍTULO 1: Caracterização Ambiental do Semiárido Brasileiro (SAB)**

A região do SAB está localizada entre a Linha do Equador e Trópico de Capricórnio, em específico entre 0° e 20° de latitude, no Hemisfério Sul (Figura 0.3). O SAB ocupa 13% do território brasileiro (1.129.000 km<sup>2</sup>). A região se estende pelos nove estados da região Nordeste e parte norte de Minas Gerais, englobando 1262 municípios, com uma população de aproximadamente 28 milhões de habitantes, isto é, cerca de 24 pessoas a cada 1 km<sup>2</sup> (INSA, 2023). Em função de sua vasta extensão territorial, o SAB é uma das regiões mais complexas do Brasil em termos de configuração da paisagem, com elevada heterogeneidade climática, geológica, geomorfológica, pedológica e biogeográfica. Indubitavelmente, a interação dinâmica desses fatores físico-geográficos condiciona e configura a paisagem do SAB.

**Figura 0.3.** Localização do Semiárido Brasileiro (SAB), no contexto das unidades da federação e no globo terrestre.



Org: Lucas Augusto Pereira da Silva (2023).

## 1.1. Climatologia

Climaticamente, o SAB é caracterizado por uma precipitação média anual abaixo de 800 mm, umidade relativa de ~50%, evaporação anual entre 1.200 e 3.200 mm, e faixas de temperatura média do ar predominando em 24 °C e 28 °C (Brito; Moura; Gama, 2007). Esses elementos climáticos, além de serem controlados por fatores estáticos como a topografia e responder à variação astronômica, são impulsionados por sistemas atmosféricas que atuam no SAB, principalmente a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Frentes Frias (FF), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), e as Ondas de Leste (Tinôco *et al.*, 2018).

Como amplamente conhecido, a ZCIT é um dos principais sistemas geradores de precipitação nas regiões equatoriais sobre os oceanos Atlântico, Pacífico, Índico e os continentes nas proximidades. Esse sistema é formado pela convergência de ventos alísios (úmidos) dos Hemisférios Norte e Sul, na porção da linha do Equador, zona de maior incidência de radiação solar do globo, fator este que impulsiona a ascendência dos ventos, que se resfriam em altitude e condensam, originando extensas bandas de nuvens com elevados teores de precipitação (Schneider; Bischoff; Haug, 2014). A ZCIT oscila sazonalmente, sua posição na América do Sul é influenciada por variações na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (Ferreira; Mello, 2005). TSM mais aquecida na porção norte do oceano Atlântico influencia no deslocamento da ZCIT para 15°N (agosto-setembro), fator que limita as condições de precipitação no SAB. Quando o aquecimento ocorre mais ao sul, a ZCIT se estaciona a 5°S (março-abril), favorecendo altos níveis de precipitação para a faixa norte da região semiárida do Brasil (Ferreira; Mello, 2005; Teixeira; Machado, 2013).

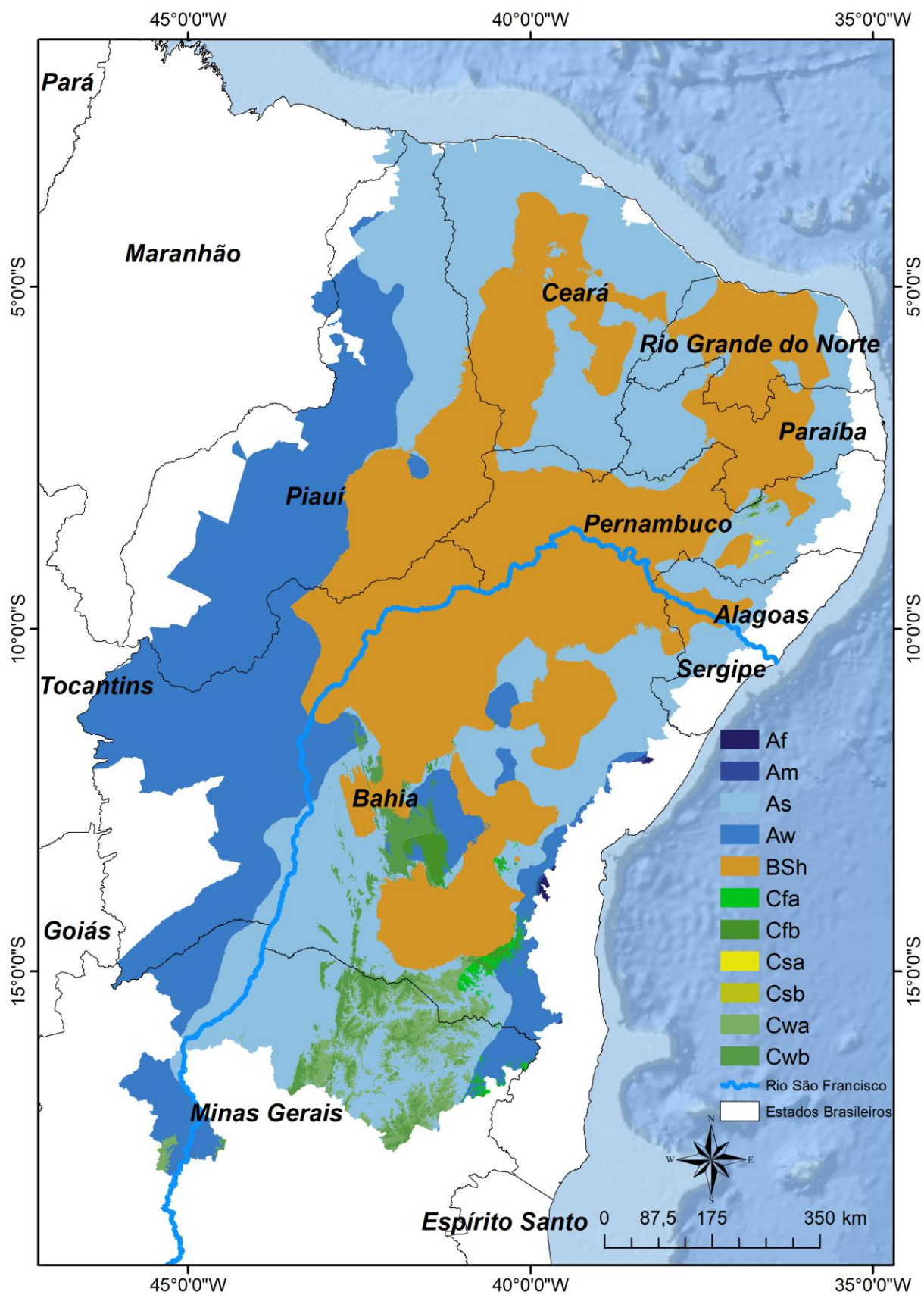
Entre os meses de novembro e fevereiro, outro importante sistema atmosférico que atua na dinâmica climática do SAB são as Frentes Frias (FF). As FF são caracterizadas por bandas de nuvens condensadas com elevados níveis de umidade, deslocando no sentido sudoeste/nordeste sobre o continente e oceano Atlântico (Monteiro, 2022). As FF alcançam (excepcionalmente) porções do Oeste da Amazônia e borda leste do SAB, interagindo com ar quente e úmido tropical, promovendo chuvas no interior do continente e litoral do SAB (Ferreira; Mello, 2005).

Atuando entre outubro e março, se tem o VCAN, um sistema meteorológico de baixa pressão, que se forma na alta troposfera. No centro do VCAN há predomínio de ventos frios em subsidência, enquanto na periferia, ele é marcado por ventos ascendentes

e extensas faixas de nebulosidade (Reboita *et al.*, 2017). O VCAN é formado no oceano Atlântico, em função de FF deslocadas das latitudes médias da América do Sul para os trópicos em associação com a Alta da Bolívia (AB) (Kousky; Gan, 1981). Em geral, o VCAN se desloca no sentido leste/oeste, favorecendo a incidência de precipitação no SAB. Também com deslocamento leste/oeste, há ocorrência de outro importante sistema meteorológico, as Ondas de Leste. Esse sistema de baixa pressão é formado devido à influência dos ventos alísios próximos à Linha do Equador, originando extensas nuvens com umidade, que se deslocam da África ao litoral do SAB, provocando chuvas especialmente na Zona da Mata.

Esses sistemas atmosféricos, juntamente dos fatores estáticos e oscilações astronômicas, são responsáveis pela caracterização dos tipos climáticos no SAB. Conforme classificação de Koppen elaborada por Alvares *et al.*, (2013) para o Brasil, os climas predominantes da região são: BSh (Semiárido) na porção central; As (Tropical quente e úmido) mais ao norte, borda litoral e sul; e Aw (Clima Tropical com inverno seco) predominantemente na faixa oeste (Figura 0.4).

**Figura 0.4.** Distribuição espacial dos climas zonais no Semiárido Brasileiro (SAB).



**Fonte:** Alvares *et al.*, (2013). **Org:** Lucas Augusto Pereira da Silva (2023). Af: Clima tropical úmido ou superúmido; Am: Clima tropical úmido ou subúmido; As: Clima tropical quente e úmido; Aw: Clima

tropical, com inverno seco; BSh: Clima Semiárido quente; Cfa: Clima subtropical, com verão quente; Cfb: Clima temperado, com verão ameno; Csa: clima temperado com verão quente e seco; Csb: clima temperado com verão seco e fresco; Cwa: Clima subtropical de inverno seco; Cwb: Clima subtropical de altitude

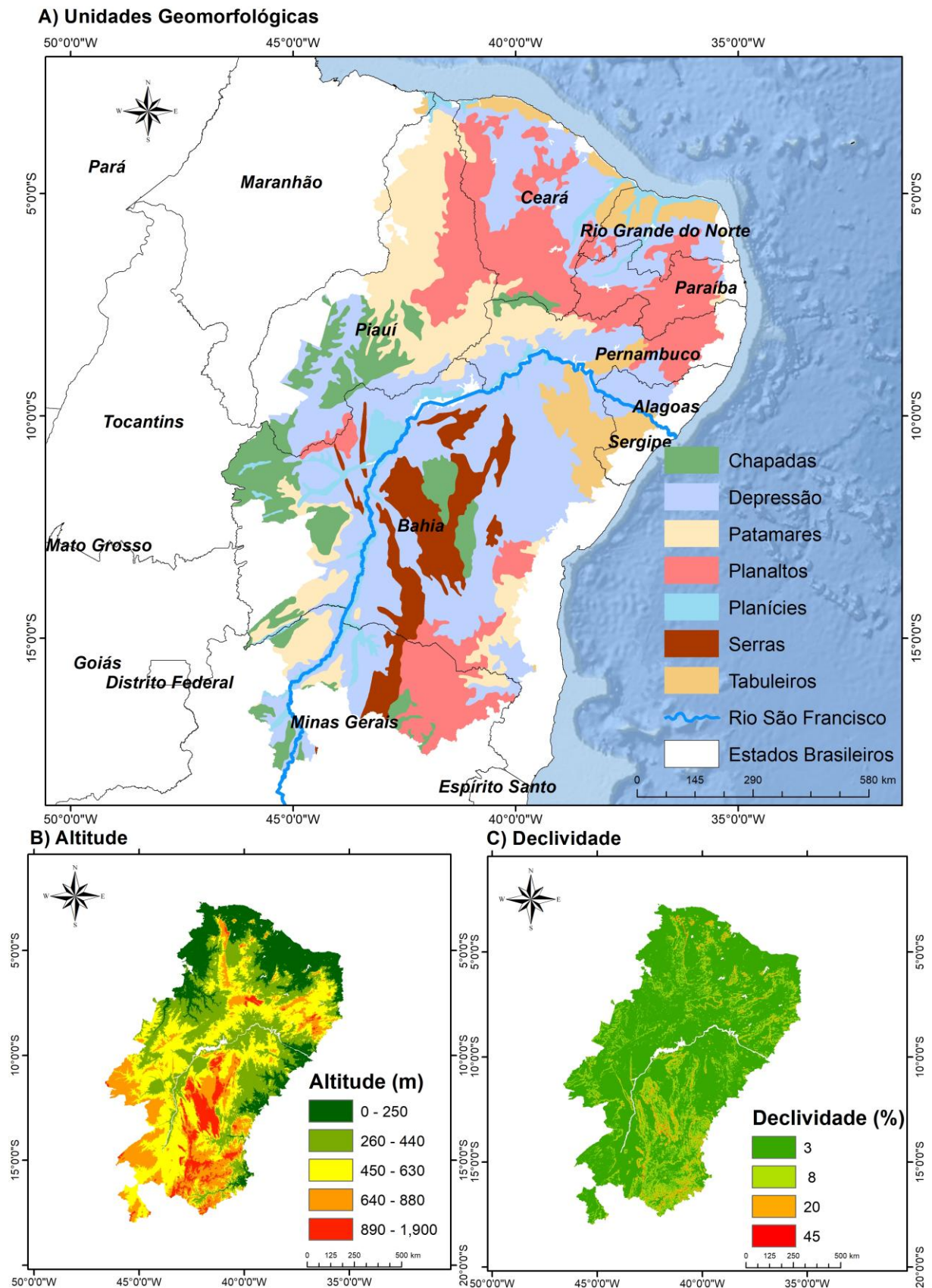
## 1.2. Geologia e Geomorfologia

No contexto morfoestrutural, o SAB está situado majoritariamente no Cráton São Francisco (CSF), oriundo dos eventos mais antigas da Tectônica Global (Claudino-Sales, 2018). Adicionalmente, ocorrem os Cinturões Móveis Neoproterozóicos, associados ao Ciclo Brasileiro, isto é, processo de aglutinação do Super Continente Gondwana (Brito Neves, 1999). Também, estão presentes as Bacias Sedimentares intra-cratônicas formadas por depósitos Fanerozóicos, além dos depósitos sedimentares recentes do Quaternário, constituindo vastas planícies (Campos; Dardenne, 1997). Essas morfoestruturas são responsáveis por formas de relevo extremamente diversificadas para a região semiárida do Brasil.

O relevo do SAB possui variações altimétricas de 0 a 1900 metros (m), com altitude média de 470 m (Figura 0.5b). O desvio padrão da altitude é de 240 metros, o que traduz a complexidade e heterogeneidade do relevo regional. Maior parte do SAB possui superfícies variando de 0 a 3% de declividade, isto é, ambientes planos, com variações de suavemente ondulados (3 a 8%) a zonas fortemente onduladas (> 20%) (Figura 0.5c). As menores cotas altimétricas, zonas de até 260 m, estão distribuídas na porção norte e em algumas extensões do litoral, englobando superfícies planas, isto é depressões, patamares e tabuleiros (Figura 0.5a), relevos de baixa energia. No interior do SAB, há predomínio de altitudes entre 270 e 460 m, caracterizando a depressão sertaneja e planície do Rio São Francisco. As porções centrais e sudeste são marcadas por elevadas cotas altimétricas, variando de 900 a 1.900 metros, sobretudo em áreas de Serras, zonas fortemente onduladas.



**Figura 0.5.** Aspectos geomorfológicos do Semiárido Brasileiro (SAB). A) Unidades Geomorfológicas. B) Altitude (metros). C) Declividade (%).



Fonte: (IBGE, 2019); (Van Zyl, 2001). Org: Lucas Augusto Pereira da Silva (2023).

A evolução das superfícies de aplainamento do SAB pode ser associada à teoria de Pediplanação (Ab'Saber; Bigarella, 1961). Nesse modelo teórico, o relevo é moldado em função da interação entre eventos tectônicos e alternâncias de ciclos climáticos (King, 1957). Nesse processo, ocorreria um soerguimento de escala subcontinental, estabelecendo novos níveis de base. Em sequência, desencadearia ciclos de erosão, formando vertentes, que submetidas a condições de aridez, são fornecidos materiais para serem erodidos. A erosão das vertentes ocorreria em forma de recuo paralelo, em que o material erodido, seria depositado nas encostas, formando extensas superfícies pedimentadas (pedimentos), com aspectos de aplainamentos.

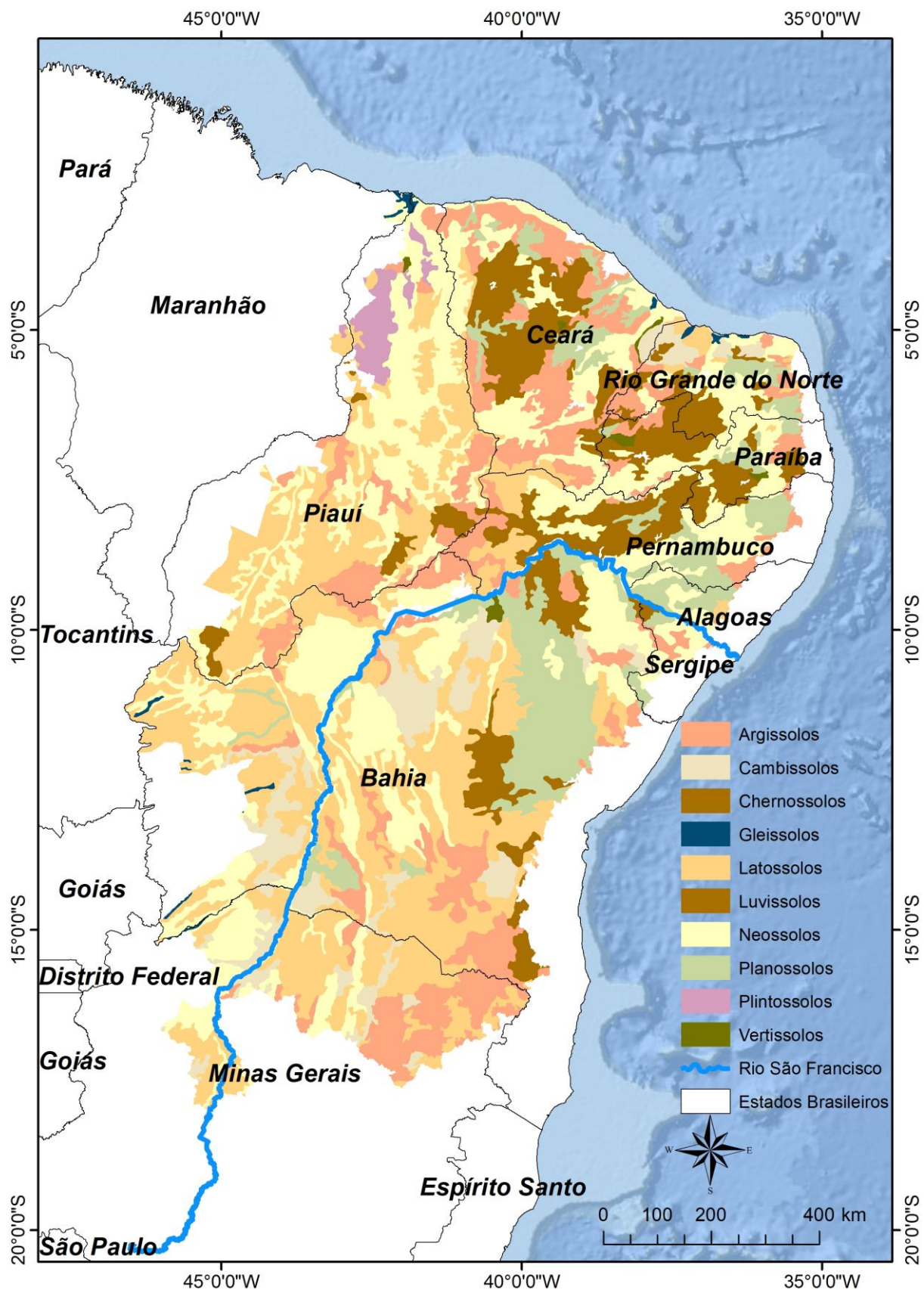
Contudo, o relevo do SAB não pode ser interpretado de forma generalizada por modelos teóricos de superfícies aplainadas, pois ocorreram eventos de ordem tectônica que originaram aspectos de controle estrutural no modelado da região (Maia; Bezerra, 2014). Os eventos de evolução tectônica controlam as formas de relevo essencialmente na porção leste do SAB. Entre os principais eventos tectônicos destaca-se: I) Orogênese Brasileira; II) fragmentação do Super Continente Gondwana (separação Brasil/África); III) reativações tectônicas Cenozóicas, com soerguimentos e movimentação de blocos rochosos (Maia; Bezerra, 2014).

### **1.3. Pedologia**

Os solos são elementos chave para a configuração e distribuição espacial das paisagens, pois podem fornecer diferentes condições físicas e químicas para o desenvolvimento da vegetação (Resende, 1995). Conforme levantamento realizado pela EMBRAPA (2013), o SAB possui uma ampla heterogeneidade pedológica, podendo ser encontrados 10 tipos de solos na região: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Planossolos, Plintossolos e Vertissolos (Figura 0.6).



**Figura 0.6.** Distribuição dos domínios pedológicos no Semiárido Brasileiro (SAB).



Fonte: EMBRAPA (2013). Org: Lucas Augusto Pereira da Silva (2023).

Os Argissolos ocupam cerca de 160.000 km<sup>2</sup> na região, distribuídos praticamente em todos os estados do SAB, sob declividades variando entre 0 a 34%, em altitudes de 0 a 1567 metros (m). Esses solos são caracterizados pelo acúmulo de argila, com horizonte B abaixo do A ou E (EMBRAPA, 2013). No SAB podem ser encontrados Argissolos com alta ou baixa atividade de argila (Araújo Filho *et al.*, 2023), o que pode definir aspectos de capacidade de retenção de íons, água e a estrutura física dos solos.

Em ambientes com altitudes até 1366, planos a fortemente ondulados, estão dispostos os Cambissolos, compreendendo ~60.000 km<sup>2</sup> em extensão, majoritariamente no estado da Bahia. São solos formados por material mineral, com horizonte B pouco desenvolvido (incipiente). Em geral, os Cambissolos possuem baixa atividade pedogenética, o que caracteriza o predomínio de material de origem no perfil.

Os Chernossolos compõem uma pequena porção do SAB (~8.000 km<sup>2</sup>), situados principalmente no sudeste da Bahia, centro do Ceará, e nos estados do Piauí e Rio Grande do Norte (Figura 0.8). Na região semiárida, esses solos estão localizados em altitudes até 1037 m, em declividades de 0 a 20%, essencialmente nos domínios geomorfológicos depressão, tabuleiros, planaltos e patamares (Figuras 0.5 e 0.6). Em geral, os Chernossolos são oriundos de rochas ricas em cálcio e magnésio, possuindo presença de argilominerais esmectíticos (2:1), com alta atividade da argila, implicando em alto teor de saturação por bases (EMBRAPA, 2013).

Também ocorrendo em pequena proporção (~3.000 km<sup>2</sup>) nos mesmos estados em que o Chernossolo, há presença dos Gleissolos (Figura 0.6). Em termos de paisagens, os Gleissolos se encontram em áreas de chapadas e predominantemente em planícies (depósitos sedimentares Quaternários), zonas planas a suavemente onduladas, com variação altimétrica de 0 a 924 m. Esses solos estão presentes em ambientes com forte presença de água, sendo periodicamente ou permanentemente saturados. Nessas condições ocorre o processo de gleização, isto é, a remoção e redução de ferro presente no mineral por ações químicas, implicando em aspecto acinzentado aos solos (EMBRAPA, 2013).

Se estendendo em mais de 294.000 km<sup>2</sup>, os Latossolos são distribuídos praticamente em toda faixa interiorana do SAB, predominantemente no norte de Minas Gerais, Bahia, Piauí e oeste de Pernambuco (Figura 0.6). Essa classe ocorre em diversificados contextos físico-geográficos, com altitudes variando de 0 a 1496 m, sob superfícies planas a fortemente onduladas. Em termos gerais, os Latossolos são

amplamente conhecidos como solos bem intemperizados e antigos, sobretudo em função de intensos processos de lixiviação, responsáveis pela remoção de elementos químicos ao longo do tempo, como o silício, promovendo a concentração de óxidos de ferro (Ker, 1997; Schaefer; Fabris; Ker, 2008). Quando dispostos em superfícies de aplainamento, são intensamente mais intemperizados, profundos e bem drenados, diferindo daqueles encontrados em ambientes de relevo mais movimentado, normalmente mais rasos e menos intemperizados (Ker, 1997).

Os Luvisolos também ocupam grandes extensões do SAB (~120.000 km<sup>2</sup>), distribuídos majoritariamente na porção norte, mas com algumas faixas na Bahia (Figura 0.6). Esses solos ocorrem em faixas entre 30 e 1140 m de altitude, com declividades variando de 0 a 28%. Os Luvisolos são rasos ou pouco profundos, com horizonte B marcado pela maior presença de argila do perfil, sobretudo em função de processos de iluviação, isto é, transporte vertical de argila de horizontes superiores para o inferior (Oliveira *et al.*, 2009). Portanto, no horizonte B encontra-se alta atividade de argila e elevada saturação por bases. Com o deslocamento da argila, o horizonte superficial apresenta pavimentos pedregosos, tornando-se altamente susceptível a processos erosivos.

Com uma área de 298.000 km<sup>2</sup>, os Neossolos possuem maior expressão espacial no SAB, com presença em praticamente todos os estados, em altitudes de 0 a 1877 m, em superfícies variando de planas a fortemente onduladas. Esses solos apresentam baixa atividade pedogenética, isto é, são novos e pouco desenvolvidos, com horizontes pouco espessos (EMBRAPA, 2013). Para a região semiárida do Brasil, há predomínio de Neossolos com aspectos pedregosos ou rochosos, com alta susceptibilidade à erosão, isto é, os litólicos e regolíticos (Araújo Filho *et al.*, 2023). Contudo, também se tem ocorrência de Neossolos arenoquartzosos, mais profundos, formados por depósitos sedimentares do Terciário e Quaternário, bem como os flúvicos, solos rasos, constituídos por camadas aluviais do Quaternário (Araújo Filho *et al.*, 2023).

Os Planossolos ocupam uma área de 106.000 km<sup>2</sup> no SAB, dispostos em altitudes até 1053 m, e declividades de 0 a 25%, predominantemente em depressões (Figuras 0.5 e 0.6), ambientes típicos para essa classe pedológica. Esses solos possuem um horizonte B plânico (abaixo do A ou E), caracterizado pelo elevado teor de argila, sobretudo com argilominerais 2:1, o que se traduz em alta capacidade de reter cátions, devido às cargas negativas presentes na argila, bem como o aspecto de má drenagem, favorecendo a formação de um lençol de água suspenso em períodos chuvosos (EMBRAPA, 2013). Esse

aspecto de solo alagado e baixa drenado, promove o processo de remoção do ferro por ações químicas, induzindo cores neuras, acinzentadas ou escurecidas aos Planossolos (EMBRAPA, 2013).

Ocorrendo em superfícies planas a onduladas com variação altimétrica de até 372 m, estão os Plintossolos. Esses solos estão distribuídos essencialmente sob os domínios de patamares no norte do Piauí, cobrindo cerca de 13.000 km<sup>2</sup> (Figura 0.6). As condições da paisagem caracterizam os Plintossolos, pois dispostos em zonas de baixada ou áreas que propiciem alagamento periódico, ocorrerá o processo de plintização, em que ferro presente na estrutura do solo é desestabilizado por atividade microbiana e se transloca verticalmente (Buringh; Buringh, 1979). Em zonas inferiores do perfil, livre de saturação e com a presença do oxigênio, o ferro é oxidado, formando mosqueados com colorações vermelhas, podendo evoluir para concreções e nódulos mais rígidos (Buringh; Buringh, 1979).

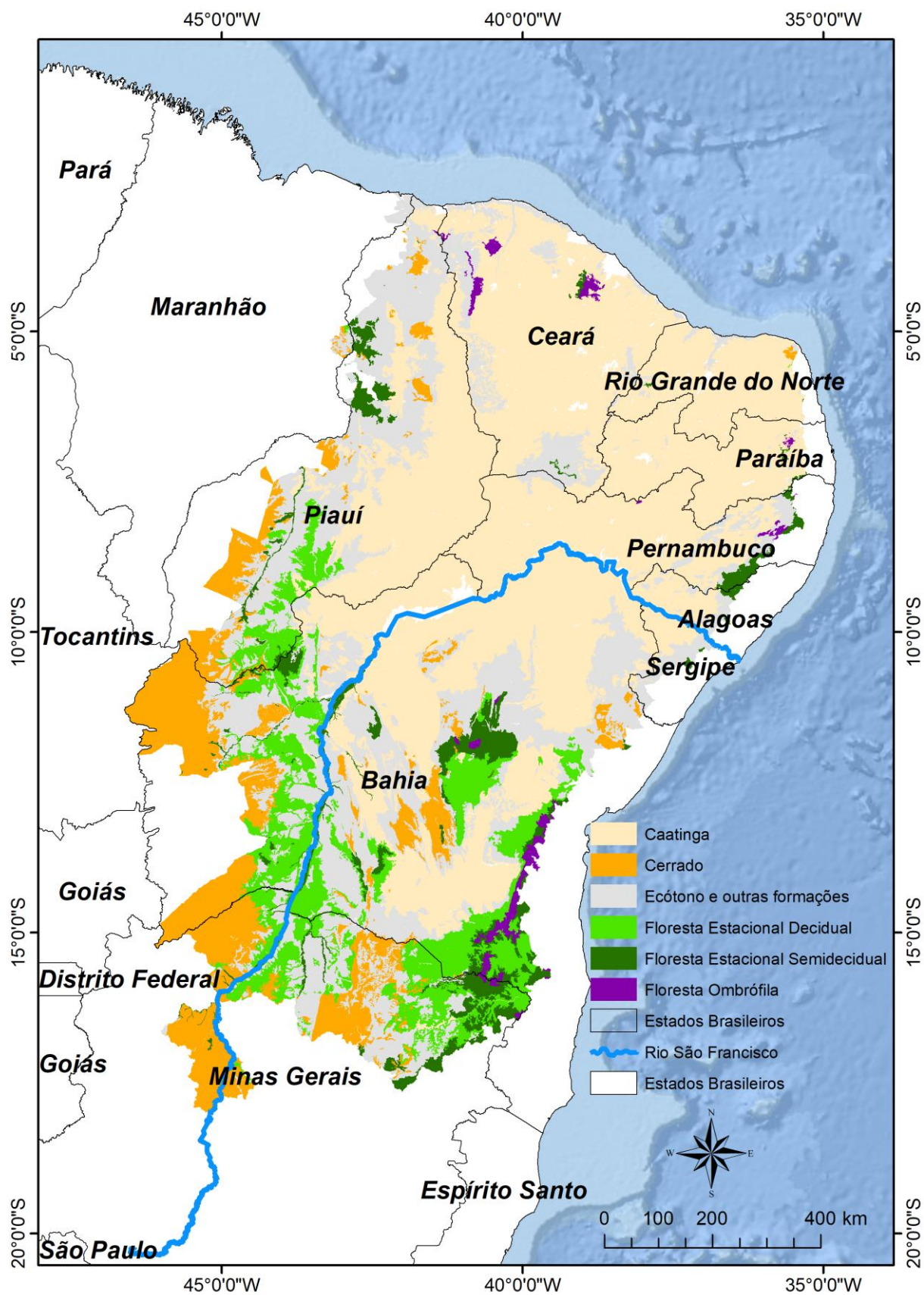
Em baixa expressão espacial (~3.300 km<sup>2</sup>), os Vertissolos estão dispostos em áreas de até 631 m, com aspectos planos a levemente ondulados, principalmente nos estados do Ceará, Piauí, Bahia, Pernambuco e Paraíba (Figuras 0.5 e 0.6). Esses solos possuem elevado teor de argila (2:1), com características expansivas (esmectitas), o que resulta em solos com: alta capacidade de retenção de cátions, mudanças no volume em função do teor de água, com fendas no período seco e aspecto de pegajosidade e pastoso em condições úmidas (EMBRAPA, 2013). Ainda, esse processo de retração e expansão do solo, proporciona a formação de relevos do tipo gilgai. No período seco, os solos são fendilhados, passando a receber materiais sólidos das superfícies superiores, preenchendo as fendas (Lira *et al.*, 2022). Em fases de umedecimento, esse material é incorporado à fenda, os quais são forçados para cima da superfície por expansão, formando feições de micro relevos, isto é, o gilgai (Lira *et al.*, 2022).

#### **1.4. Biogeografia**

O SAB é composto por três biomas, com predomínio da Caatinga, e distribuição de Cerrado e Mata Atlântica. Esses biomas configuram uma ampla heterogeneidade espacial a região semiárida brasileira, essencialmente com aspectos vegetacionais englobando contextos savânicos e florestais. Os principais domínios de vegetação do SAB são: Caatinga, Cerrado (Cerradão e Cerrado Típico) Floresta Estacional Decidual, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Ombrófila e zonas de Ecótono (Figura 0.7).



**Figura 0.7.** Distribuição espacial dos domínios de vegetação no Semiárido Brasileiro (SAB).



Fonte: Adaptado do BDIA- IBGE, disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/vegetacao>). Org: Lucas Augusto Pereira da Silva (2023).

As Caatingas são os maiores domínios de vegetação do SAB. A distribuição espacial e comportamento fenológico das Caatingas, possuem íntima relação com a dinâmica climática e aspectos pedo-litológicos da região (Fernandes *et al.*, 2022). No contexto climático, alguns sistemas de vegetação correspondem rapidamente à variação de precipitação, com florescimento diante de inputs pluviométrico e queda das folhas em períodos de escassez hídrica, característica de decidualidade (Queiroz *et al.*, 2017). As condições pedo-litológicas também são cruciais para o crescimento e desenvolvimento da vegetação, a exemplo, aqueles sistemas inseridos em terrenos cristalinos, com rochas graníticas (magmáticas) e gneisses (metamórficas) no SAB, apresentam aspecto decíduo, com árvores de pequeno porte e arbustos, enquanto aqueles dispostos em depósitos cársticos possuem estrutura mais arbórea, sobretudo devido aos níveis de nutrientes fornecidos nesses ambientes (Queiroz *et al.*, 2017; Fernandes *et al.*, 2022).

As Savanas ocorrem no domínio de Cerrado, na faixa sul e oeste do SAB, mas também estão dispostas em enclaves circundados por Caatingas, sobretudo na Chapada da Diamantina (Queiroz *et al.*, 2017). Embora esses enclaves ocorram em mesmas condições climáticas em que a Caatinga, sua disposição está associada a fatores edáficos, principalmente solos ácidos, com baixa disponibilidade de nutrientes, altas concentrações de alumínio e frequentes regimes de fogo (Oliveira-Filho *et al.*, 2013). As florestas mais úmidas, isto é, as Ombrófilas, estão associadas ao bioma Mata Atlântica na porção leste do SAB (Figura 0.7), no entanto, possuem resquícios em zonas interiores da região, a exemplo, áreas mais elevadas, com influência de chuvas orográficas na Chapada da Diamantina, e em algumas serras ao norte do SAB (Queiroz *et al.*, 2017).

Até o estabelecimento atual dessa relação edafoclimática entre a vegetação e condicionantes físico-geográficos no SAB, os domínios vegetacionais da região passaram por diversos eventos paleoclimáticos. Algumas teorias foram desenvolvidas para explicar o estabelecimento da vegetação no Brasil, sobretudo relacionando com as condições climáticas pretéritas. Dentre as mais conhecidas, estão a Teoria dos Refúgios (Haffer, 1969) e Arco do Pleistoceno (Prado; Gibbs, 1993), as quais foram elaboradas com base nas fases de glaciações globais, essencialmente no último período, conhecido como Último Máximo Glacial (UMG), iniciado há 120 ka AP (mil anos antes do presente), com duração de 100 mil anos.

Diversos estudos sugerem que o clima no UMG teria sido frio e seco (Haffer, 1969; Prado; Gibbs, 1993). Nessas condições, as paisagens seriam modeladas por processos físicos, com predomínio da ação mecânica no desgaste das rochas,

impulsionando maiores taxas de erosão e remoção dos solos em função de chuvas torrenciais (Arruda; Schaefer, 2020). Esses processos erosivos sob climas secos conduziriam ao aplainamento das superfícies, o que forneceria solos mais rasos, com riqueza nutricional, devido à proximidade com a rocha matriz e baixos níveis de lixiviação (Ab'Sáber, 2003). Essas condições ambientais são favoráveis para o estabelecimento de vegetação aberta, como o Cerrado e a Caatinga (Arruda; Schaefer, 2020). Portanto, a partir dessa lógica, Haffer (1969) propõe a Teoria dos Refúgios, em que a vegetação florestal não seria adaptada às condições secas, consequentemente sofreriam fragmentação e retração espacial, refugiando-se em zonas específicas, a exemplo, na Amazônia, sendo circundada por Caatinga e Cerrado. Paralelamente, Prado e Gibbs (1993), apontam que a atual configuração das vegetações sazonais, formando um arco compreendendo a Caatinga, florestas decíduas do Sudeste e Brasil-Central, em missões na Argentina, e vales secos dos Andes, são resquícios de extensos e contínuos domínios de vegetação sazonal (Caatingas e Cerrados) no UMG. Dessa forma, em condições frias e secas do UMG, as duas teorias se complementariam.

O avanço tecnológico proporcionou à climatologia instrumentos para analisar com maior precisão o passado climático global, a exemplo, o desenvolvimento de modelos espaço-temporais que levam em consideração forçamento radioativo, concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, dinâmica da temperatura dos oceanos e ciclo hidrológico. A partir desses modelos climáticos, estudos mostram que é inegável o passado frio do UMG, contudo, a maior complexidade estaria no *input* pluviométrico, pois os resultados dessas modelagens apontam um UMG frio e úmido (Arruda; Schaefer, 2020). Um clima úmido, ao invés de seco, sugere reformulação nas teorias de Refúgios e Arco Pleistocênico. Arruda *et al.*, (2018), mostraram que diante do maior *input* pluviométrico no UMG, os refúgios de florestas equatoriais na Amazônia não foram circundados por vegetações sazonais, mas sim por florestas tropicais úmidas, propondo uma teoria intermediária à elaborada por Haffer (1969). Por outro lado, diante de clima úmido, seria improvável a expansão de vegetações sazonais, a exemplo a Caatinga no SAB, refutando a teoria do Arco Pleistocênico (Arruda *et al.*, 2018). Portanto, a vegetação atual do SAB não foi estabelecida no UMG.

Diante da refutação da teoria do Arco Pleistocênico, estudos têm se empenhado em entender a dinâmica espacial das vegetações estacionais brasileiras (Werneck *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2023). Em específico para o SAB, modelagens espaciais mostraram que os domínios vegetacionais dessa região têm passado por diversos eventos climáticos

até a sua estabilidade (Silva *et al.*, 2023). Após um UMG (isto é, 21 ka AP) frio e úmido, o SAB foi influenciado pelo evento Heinrich Stadial 1 (HS1, 17 e 14,7 ka AP), em que houve desprendimento de geleiras do Atlântico Norte, afetando a circulação geral da atmosfera, sobretudo deslocando a ZCIT para a porção austral da América do Sul, intensificando a precipitação na região semiárida do Brasil (Stríkis *et al.*, 2018), induzindo a condições propícias para a expansão de vegetação úmida. Sequencialmente (14,9 a 12,9 ka AP), houve um aumento abrupto de 3 a 5 °C na temperatura, em função da intensificação de CO<sub>2</sub> na atmosfera e liberação de calor das águas profundas do oceano atlântico, evento conhecido como Bølling-Allerød (Thiagarajan *et al.*, 2014). O Bølling-Allerød provocou redução de ambientes florestados e expansão de Caatingas Hiperxerófilas no SAB. O aquecimento abrupto foi seguido pelo evento Younger Dryas, isto é, um novo deslocamento da ZCIT para o hemisfério sul com incremento de precipitação para o SAB, em função de quedas na temperatura no hemisfério norte devido a presença de extensas camadas de gelo no oceano, que bloqueou trocas de calor com a atmosfera, resfriando as águas (Rasmussen *et al.*, 2006). Este evento proporcionou condições para expansão de domínios vegetacionais mais densos, adaptados a elevados teores de umidade.

O Younger Dryas é o último período de resfriamento para a América do Sul, pois em sua sequência houve sucessivos estágios de aquecimento, isto é, as fases do Holoceno (11 ka AP até o presente). O Holoceno pode ser dividido em três momentos: Holoceno Inferior (HI, 11,7 a 8,32 ka AP), Holoceno Médio (HM, 8,32 a 4,2 ka AP) e Holoceno Superior (HS, 4,2 a 0,4 ka AP). Modelos espaciais indicam o HI foi responsável por alterações substanciais na vegetação do SAB, a exemplo, um aumento de florestas estacionais, adaptadas às condições de altas temperaturas, e um decréscimo de florestas mais úmidas, a exemplo, a Ombrófila (Silva *et al.*, 2023). Enquanto, a redução mais acentuada das precipitações e o aumento da temperatura no HM e HS, proporcionou ambientes potenciais para expansão da Caatinga e decréscimo das florestas, indicando estabilidade do atual padrão da vegetação no SAB (Figura 0.7), confirmando resultados de estudos que refutam a teoria do Arco Pleistocênico.

## Referências

AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. [S. l.]: Ateliê editorial, 2003. v. 1



AB'SABER, Aziz Nacib; BIGARELLA, João José. Superfícies aplainadas do primeiro planalto do Paraná. **Boletim Paranaense de Geografia**, [s. l.], n. 4/5, p. 116–125, 1961.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], p. 711–728, 2013.

ARAÚJO FILHO, José Coelho *et al.* Semi-arid Soils of the Caatinga Biome of Northeastern Brazil. *In: The Soils of Brazil*. Cham: Springer International Publishing, 2023. (World Soils Book Series).

ARRUDA, Daniel M. *et al.* Vegetation cover of Brazil in the last 21 ka: New insights into the Amazonian refugia and Pleistocenic arc hypotheses. **Global Ecology and Biogeography**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 47–56, 2018.

ARRUDA, Daniel Meira; SCHAEFER, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud. Dinâmica climática e biogeográfica do Brasil no Último Máximo Glacial: o estado da arte. **Estudos Avançados**, [s. l.], v. 34, p. 187–198, 2020.

BRITO, LT de L.; MOURA, M. S. B.; GAMA, G. F. B. **Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro**. [S. l.]: Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007., 2007.

BRITO NEVES, Benjamim Bley De. América do Sul: quatro fusões, quatro fissões e o processo acrescionário andino. **Revista Brasileira de Geociências**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 379–392, 1999.

BURINGH, Pieter; BURINGH, P. **Introduction to the study of soils in tropical and subtropical regions**. [S. l.]: Pudoc Wageningen, 1979. (, v. Edn 3).

CAMPOS, José Eloi Guimarães; DARDENNE, Marcel Auguste. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 283–264, 1997.

CLAUDINO-SALES, Vanda. Megageomorfologia do Nordeste Setentrional Brasileiro. **Revista de Geografia (Recife)**, [s. l.], v. 35, n. 4, 2018.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [S. l.: s. n.], 2013.

FERNANDES, Moabe F. *et al.* The Origins and Historical Assembly of the Brazilian Caatinga Seasonally Dry Tropical Forests. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 10, 2022.

FERREIRA, Antonio Geraldo; MELLO, Namir Giovanni Da Silva. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2005.

HAFFER, Jürgen. Speciation in Amazonian Forest Birds: Most species probably originated in forest refuges during dry climatic periods. **Science**, [s. l.], v. 165, n. 3889, p. 131–137, 1969.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Compartimentos de Relevo do Brasil (1:250.000)**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia/10870-geomorfologia.html>. Acesso em: 26 jun. 2024.

INSA. **O Semiárido Brasileiro**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br/semi-arido-brasileiro/o-semiarido-brasileiro>. Acesso em: 26 jun. 2024.

KER, João Carlos. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, [s. l.], 1997.

KING, Lester Charles. **A geomorfologia do Brasil Oriental**. [S. l.]: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Conselho Nacional de Geografia, 1957.

KOUSKY, Vernon E.; GAN, Manoel Alonso. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 538, 1981.

LIRA, Damião Isaac *et al.* Gilgai Microrelief Morphology in the Caicó–RN Region. **International Journal Semiarid**, [s. l.], v. 5, n. 5, 2022.

MAIA, Rubson P.; BEZERRA, Hilario H. R. Structural control of the relief in Northeastern Brazil. **Mercator**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 127–141, 2014.

MONTEIRO, Jander. A influência de teleconexões e sistemas meteorológicos produtores de precipitação no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 15, p. 312, 2022.

OLIVEIRA, Lindomário Barros de *et al.* Morfologia e classificação de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semiárido do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 33, p. 1333–1345, 2009.

OLIVEIRA-FILHO, A.T. *et al.* Stability structures tropical woody plant diversity more than seasonality: Insights into the ecology of high legume-succulent-plant biodiversity. **South African Journal of Botany**, [s. l.], v. 89, p. 42–57, 2013.

PRADO, Darien E.; GIBBS, Peter E. Patterns of Species Distributions in the Dry Seasonal Forests of South America. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, [s. l.], v. 80, n. 4, p. 902–927, 1993.

QUEIROZ, Luciano Paganucci *et al.* Diversity and Evolution of Flowering Plants of the Caatinga Domain. In: SILVA, José Maria Cardoso da; LEAL, Inara R.; TABARELLI, Marcelo (org.). **Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 23–63.

RASMUSSEN, S. O. *et al.* A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 111, n. D6, 2006.

REBOITA, Michelle S. *et al.* Synoptic and numerical analysis of a VCAN in the Brazilian Northeast. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 10, n. 1, 2017.

RESENDE, Mauro. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. [S. l.]: Neput, 1995.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, [s. l.], v. 43, n. 1, p. 137–154, 2008.

SCHNEIDER, Tapio; BISCHOFF, Tobias; HAUG, Gerald H. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. **Nature**, [s. l.], v. 513, n. 7516, p. 45–53, 2014.

SILVA, Rafael César *et al.* The Brazilian semiarid region over the past 21,000 years: Vegetation dynamics in small pulses of higher humidity. **Ecological Informatics**, [s. l.], v. 77, p. 102259, 2023.

STRÍKIS, Nicolás M. *et al.* South American monsoon response to iceberg discharge in the North Atlantic. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 115, n. 15, p. 3788–3793, 2018.

TEIXEIRA, Carlos E. P.; MACHADO, Gaia T. On the temporal variability of the Sea Surface Temperature on the Tropical Southwest Atlantic Continental Shelf. **Journal of Coastal Research**, [s. l.], v. 165, p. 2071–2076, 2013.

THIAGARAJAN, Nivedita *et al.* Abrupt pre-Bølling–Allerød warming and circulation changes in the deep ocean. **Nature**, [s. l.], v. 511, n. 7507, p. 75–78, 2014.

TINÔCO, I. C. M. *et al.* Characterization of Rainfall Patterns in the Semiarid Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [s. l.], v. 41, n. 2, p. 397–409, 2018.

VAN ZYL, Jakob J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta astronautica**, [s. l.], v. 48, n. 5–12, p. 559–565, 2001.

WERNECK, Fernanda P. *et al.* Revisiting the historical distribution of Seasonally Dry Tropical Forests: new insights based on palaeodistribution modelling and palynological evidence. Palaeodistributions of Seasonally Dry Tropical Forests. **Global Ecology and Biogeography**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 272–288, 2011.

## CAPÍTULO 2: Increase in Reference Evapotranspiration in Future Climate Change Scenarios in the Brazilian Semiarid - South America

### ABSTRACT

Brazil has the world's most populous semi-arid region and climate change represents significant ecological and socioeconomic challenges for this area. To better understand the impact of these changes, it is crucial to analyze the dynamics of climate variables and evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), a critical climate variable. This study aimed to model ET<sub>o</sub> rates considering climate change scenarios in the Brazilian Semi-arid region (BSR). The modeling was based on tests of five machine learning algorithms: Bayesian Regularized Neural Networks (BRNN), Cubist, Earth, Linear Regression (LM), and Random Forest (RF). A dataset with 20 covariates was used to represent the current scenario. In the future prediction, covariates from two shared socio-economic pathways were used (SSPs 126 and 585). The best statistical performance was achieved by Cubist ( $R^2 = 0.98$  and  $RMSE = 0.08 \text{ mm day}^{-1}$  in the holdout-test). The current daily average ET<sub>o</sub> is  $4.77 \text{ mm day}^{-1}$ , while in future scenarios, it can increase by 3.56% in SSP 126 and 15.51% in SSP 585. ET<sub>o</sub> rates are expected to expand territorially; ranges from  $> 0.60 \text{ mm day}^{-1}$  should increase 8% in SSP 126 and 40% in SSP 585. The applied model suggests that ET<sub>o</sub> may increase in future scenarios in the BSR, which could affect biodiversity levels and intensify social conflicts.

**Keywords:** Machine Learning; Spatial Prediction; Cubist; Semi-arid Zone; Climate changes.

### Aumento da Evapotranspiração de Referência em Cenários Futuros de Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro - América do Sul

#### RESUMO

O Brasil possui a região semiárida mais populosa do mundo e as mudanças climáticas impõem desafios ecológicos e socioeconômicos significativos para esta área. Para entender melhor o impacto dessas mudanças, é crucial analisar a dinâmica das variáveis climáticas e a evapotranspiração (ET<sub>o</sub>), uma importante variável do clima. Este estudo teve como objetivo modelar taxas de ET<sub>o</sub> considerando cenários de mudanças climáticas no Semiárido Brasileiro (BSR). A modelagem foi baseada em testes de cinco algoritmos de aprendizado de máquina: Bayesian Regularized Neural Networks (BRNN), Cubist, Earth, Linear Regression (LM) e Random Forest (RF). Um conjunto de dados com 20 covariáveis foi usado para representar o cenário atual. Na predição futura, foram usadas covariáveis de dados dos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs 126 e 585). Na modelagem, o melhor desempenho estatístico foi com modelo Cubist ( $R^2 = 0,98$  e  $RMSE = 0,08 \text{ mm dia}^{-1}$  no holdout-test). A média diária atual de ET<sub>o</sub> é de  $4,77 \text{ mm dia}^{-1}$ , enquanto em cenários futuros a média pode aumentar 3,56% no SSP 126 e 15,51% no SSP 585. As taxas de ET<sub>o</sub> devem se expandir territorialmente; intervalos de  $> 0,60 \text{ mm dia}^{-1}$  devem expandir 8% no SSP 126 e 40% no SSP 585. O modelo aplicado sugere que a ET<sub>o</sub> pode aumentar em cenários futuros na BSR, o que pode afetar os níveis de biodiversidade e intensificar os conflitos sociais.

**Palavras-Chave:** Aprendizado de máquina; Predição espacial; Cubist; Zona Semiárida; Mudanças climáticas.

#### 1. Introduction

Anthropogenic activities have boosted greenhouse gas emissions ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , etc.), leading to global warming. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has been projecting several climate change scenarios for future generations, pointing out the influence of human actions on climate dynamics (Kim *et al.*, 2013). These scenarios are called Shared Socioeconomic Pathways (SSP). The SSP is a set of concentrations and emissions of greenhouse gases modeled for the future to assist research on the impacts and effects of public policies on climate change (van Vuuren *et al.*, 2017). The SSPs are

divided into five scenarios (i.e., 1.9, 126, 245, 370, and 585), The SSPs are divided into five scenarios (i.e. 1.9, 126, 245, 370, and 585), which vary according to the intensity of radiation absorbed by greenhouse gas emissions into the atmosphere, represented by watts per square meter ( $\text{W/m}^2$ ) (Pielke Jr; Burgess; Ritchie, 2022). In these scenarios, a linear relationship is assumed between the increase in the concentration of greenhouse gases and air temperature.

Rising temperatures can cause geospatial changes in different regions of the world, potentially transforming semi-arid regions into fully arid (Chen *et al.*, 2017). This intensification directly affects the dynamics of components of the hydrological cycle, such as wind speed, air humidity, vapor pressure deficit, and evapotranspiration (Jiang *et al.*, 2021). Notably, reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) is a crucial component of the hydrological cycle, resulting from a complex interaction of several climatological variables.

In recent decades, ET<sub>o</sub> has followed an increasing trend in various parts globally (Fan *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2023). This uncontrolled increase in ET<sub>o</sub> can lead to excessive moisture loss in the soil, intensifying droughts (Yoo *et al.*, 2016; Nooni *et al.*, 2021; Shi *et al.*, 2020; Zhang; Gan; Su, 2022). The increase in ET<sub>o</sub> may be more dramatic for semi-arid regions of the world, which are already affected by a water deficit, and support 14% of the world population (Huang *et al.*, 2016).

The most densely populated semi-arid zone is in South America, specifically in the Brazilian territory, with 28 million inhabitants (Silva *et al.*, 2021). The region is called Brazilian semi-arid (BSR) and strongly depends on water resources for irrigated agricultural activity. Ecologically, it sustains an exclusively Brazilian biome (Caatinga biome). In the climate change context, the Caatinga biome can increase and expand over other biomes, resulting in a loss of biodiversity and affecting the dynamics of ecosystem services to maintain the economy of the BSR (Oliveira *et al.*, 2021). Therefore, monitoring and establishing scenarios for response variables to climate change, such as ET<sub>o</sub>, is an essential demand for the BSR to assist in formulating guidelines for management and planning.

There is an ongoing effort in ET<sub>o</sub> modeling for large areas, such as Brazil. Xavier *et al.* (2016) applied ET<sub>o</sub> prediction by interpolation and supported several climate studies nationally (Dias; Sentelhas, 2021; Santos *et al.*, 2021). However, interpolation can be problematic in studies of large areas due to spatial dependence requirements (Oliver; Webster, 1990), and variables strictly related to ET<sub>o</sub> can be neglected. Therefore, more

robust methods based on machine learning (ML) algorithms and covariate data sets have been evaluated in Brazil, which aligns with other studies worldwide (Gonzalez del Cerro *et al.*, 2021; Wu, Tianao *et al.*, 2021). Notably, the insertion of covariates represents a significant advantage in predicting ETo; for example, climate data from the Worldclim dataset has been widely used in studies of this scope (Dias *et al.*, 2021). In Brazil, several factors create an opportunity for studying ETo in the BSR under future scenarios: (i) previous studies with ETo (current scenario); (ii) availability of robust methods of prediction; (iii) freely available spatial environmental data (covariates). This study aimed to establish scenarios for ETo, using machine learning algorithms and a data set of covariates, to understand the spatial-temporal dynamics of ETo in the climate change context.

## 2. Material and methods

### 2.1. Study area

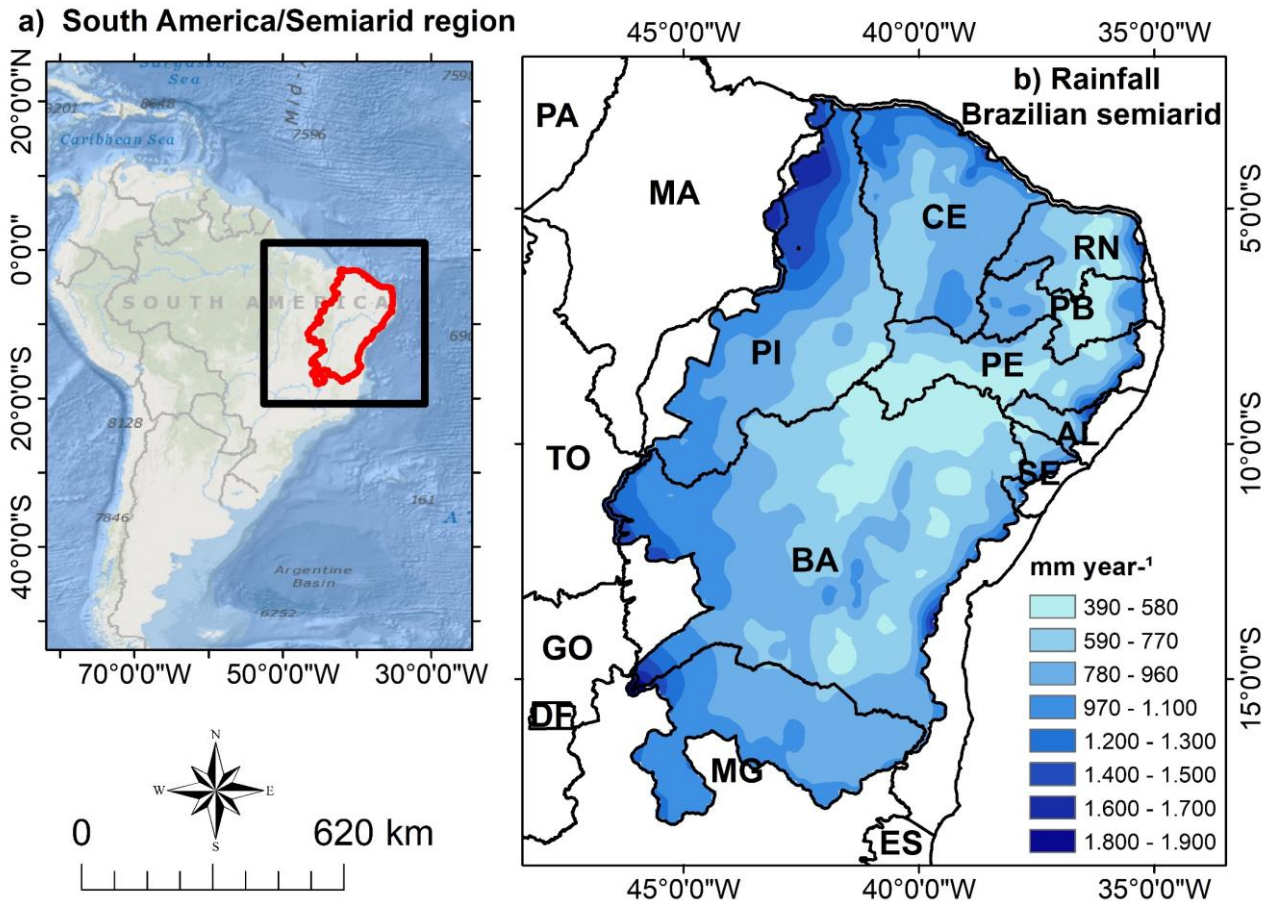
The Brazilian semi-arid is in the tropical zone between latitude 0° and 20° S and represents 13% of the Brazilian territory (Figure 1a). It comprises states in the Northeast region and part of the north of Minas Gerais State. In total, 1,262 municipalities are included in the semi-arid zone, which comprises ~28 million inhabitants. All municipalities included in the semi-arid zone followed specific climatic criteria, such as mean annual precipitation  $\leq 800$  mm, Aridity Index  $\leq 0.5$ , and daily percentage of water deficit  $\geq 60\%$  considering all days of the year (Oliveira *et al.*, 2021).

The semi-arid region is characterized by an irregular rainfall distribution throughout the year (CUNHA *et al.*, 2015). Rainfall ranges from 390 mm year<sup>-1</sup> to 1990 mm year<sup>-1</sup>, with an average of 840 mm  $\pm$  230 mm (1970 - 2000 period) (Figure 1b). In addition, the region is influenced by elements that drive its climatic dynamics, such as cold fronts originating in southern Brazil, the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), and the amplitudes between the ocean and coastal temperatures (Cunha *et al.*, 2015). This climatic context influences the composition of the vegetation of the semi-arid region, containing mainly vast and continuous Tropical Dry Forests.

The BSR has vegetation from the Caatinga (predominantly), Cerrado, and Atlantic Forest biomes. These three environments are sometimes in contact, forming ecotone zones (~ 22% of the territory) (Oliveira *et al.*, 2021). This condition was given in past contexts of climate change, mainly due to the displacement of the ITCZ towards the south

of the Brazilian Northeast region during the Heinrich Stadials in the northern hemisphere, which increased precipitation (Wendt *et al.*, 2019), favoring the expansion of areas from the Cerrado to the semi-arid. Therefore, we emphasize the importance of studies that analyze the influence of future climate change scenarios in the BSR.

**Figure 1 - A)** location of the semi-arid region in the context of south america; **b)** spatial distribution of rainfall in the semi-arid region (1970 – 2000).

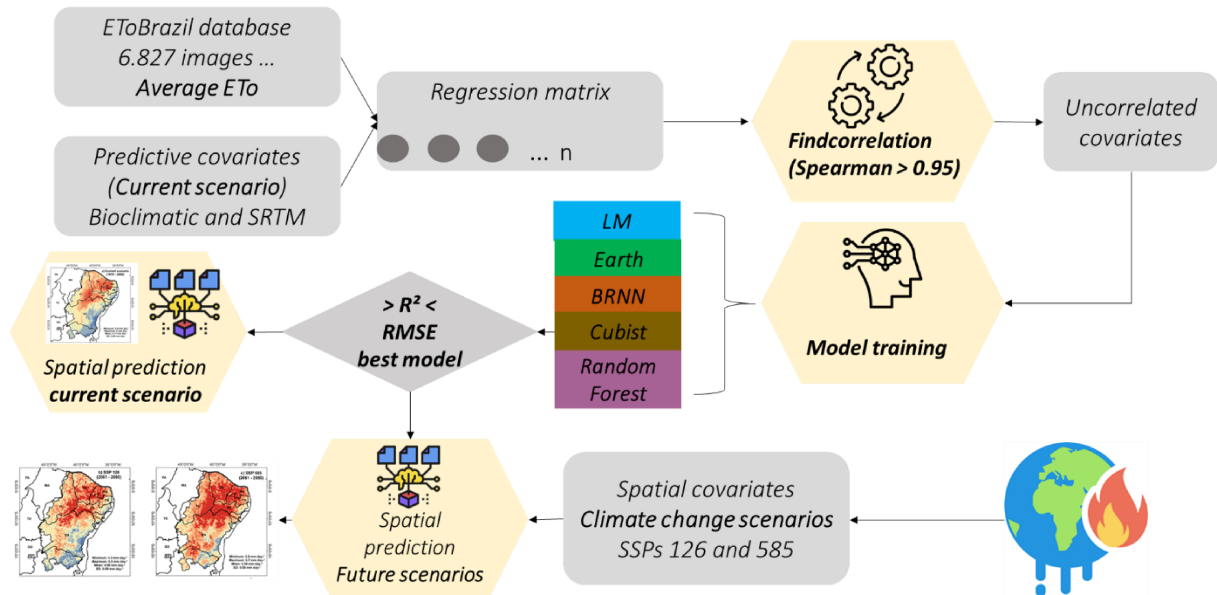


Source: (Fick; Hijmans, 2017).

## 2.2. Methodological steps

To predict the ETo in the current and future scenarios, the following steps were performed: i) obtaining reference images (variable  $y$ ), ii) selection of predictor covariates, iii) correlation analysis, iv) training of machine learning models, v) spatial prediction of future scenarios (Figure 2).

**Figure 2** - Methodological steps to predict ETo in current and future scenarios.



LM: Linear regression, BRNN: Bayesian Regularized Neural Networks.  $R^2$ : R-squared, RMSE: Root Mean Squared Error. SSP: Shared Socioeconomic Pathways.

### 2.3. Database

Due to the region's low coverage of weather stations, alternative methodologies are needed for modeling climate variables. We obtained the ETo variable from the data set ETo-Brazil (Althoff *et al.*, 2020), which was prepared for all of Brazil from a dense network of meteorological stations using a model of machine learning (Cubist). This dataset covers Brazil with ETo values showing low error rates (RMSE = 0.65 mm day<sup>-1</sup>) (available at: [data.mendeley.com/datasets/sstjw74ryh/1](https://data.mendeley.com/datasets/sstjw74ryh/1)). To cover the temporal range satisfactorily, we obtained 6.827 ETo products daily between 2000 and 2020.

We organized our methodological structure in two stages, i) training the models for the current scenario (1970 - 2000) and ii) spatial prediction for future scenarios (2061 - 2080). In both stages, we used bioclimatic (19) and topographic (1) covariates from Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017) (Table 1). We selected these variables because they influence the spatial behavior of ETo (Althoff *et al.*, 2020).



**Table 1** - covariates used for training the machine learning models and eto spatial prediction in current (1970 - 2000) and future (2061 - 2080) scenarios.

Abbreviation	Covariates of current and future scenarios	Abbreviation	Covariates of current and future scenarios
Bio 01	Mean annual temperature	Bio 11	Mean temperature of coldest quarter
Bio 02	Mean diurnal range	Bio 12	Annual precipitation
Bio 03	Isothermality	Bio 13	Precipitation of wettest month
Bio 04	Temperature seasonality	Bio 14	Precipitation of driest month
Bio 05	Maximum temperature of warmest month	Bio 15	Precipitation seasonality
Bio 06	Minimum temperature of coldest month	Bio 16	Precipitation of wettest quarter
Bio 07	Temperature annual range	Bio 17	Precipitation of driest quarter
Bio 08	Mean temperature of wettest quarter	Bio 18	Precipitation of warmest quarter
Bio 09	Mean temperature of driest quarter	Bio 19	Precipitation of coldest quarter
Bio 10	Mean temperature of warmest quarter	SRTM	Altitude

**Source:** (Fick; Hijmans, 2017).

The bioclimatic covariates for the current scenario were elaborated by interpolating global meteorological stations (Fick; Hijmans, 2017). The altitude is interpolation to 10 km from the Shuttle Radar Topography Mission - SRTM digital elevation model.

For the future context, we selected covariates considering global climate change scenarios from the Intercompared Project 6 Coupled Model (CMIP6), specifically for The Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) 126 and 585, as they are two climatic extremes and socioeconomic. In the SSP 126 scenario, a substantial decline in carbon emissions is expected by 2050, with temperature stability at 1.8°C, considered an optimistic scenario. In SSP 585, considered a pessimistic scenario, the expected behavior is opposite to SSP

126, where CO<sub>2</sub> emission levels tend to rise until 2050 and the average temperature will increase by 4.4°C (Pielke Jr; Burgess; Ritchie, 2022).

The CMIP6 project provides a wide range of global climate models (GCM) with future simulations. For this study, we used five GCMs, namely INM-CM4-8, INM-CM5-0 developed by the Institute of Numerical Mathematics (INM); MIROC6, and MIROC-ES2L, formulated by the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) project; and GISS-E2-1-H, developed by NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS).

Studies suggest choosing models considering equilibrium climate sensitivity (ECS), that is, the expected warming given the doubling of CO<sub>2</sub> in the atmosphere (Hausfather *et al.*, 2022). The likely temperature increase according to the IPCC is 1.5 to 4.5°C. Therefore, we used this as a selection criterion, since the models are within this limit (Hausfather *et al.*, 2022; Boyles *et al.*, 2024). Furthermore, the chosen models have also been applied in South America (Assis *et al.*, 2019; Firpo *et al.*, 2022; Navarro *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2023; Collazo; Barrucand; Rusticucci, 2023; Ferreira *et al.*, 2023; Moraes; Wanderley; Delgado, 2023; Bazzanela *et al.*, 2024; Marques *et al.*, 2024).

Finally, as suggested in other studies, we work with the average of the GCMs to reduce uncertainties (Anjos *et al.*, 2021; Beigaitè *et al.*, 2022; Bonannella *et al.*, 2023). We emphasize that the GCMs obtained underwent bias correction and downscaling processes to provide more consistent data (for more details see: <https://www.worldclim.org/data/downscaling.html>).

#### **2.4. Sampling, pre-processing and tested models**

We calculated a daily average image from all 6,827 ETo images. We generated 2000 random points with a minimum spacing of 10 km to be compatible with the ETo image, covering ~20% of the study area. Finally, the values of the dependent and independent variables were extracted for each point to create the regression matrix.

Prioritizing the parsimony, we performed a correlation matrix (with the Spearman method) from the *findcorrelation* tool. We established a limit of 0.95 for correlations between pairs of covariates, that is, pairs with Spearman coefficient values greater than 0.95 were removed from the database. We use the *caret* R package for this process (Kuhn *et al.*, 2020).

We selected five machine learning models to predict the effects of climate change on ETo. i) Bayesian Regularized Neural Networks (BRNN) (Rodriguez; Gianola, 2016): is a model that provides a simple and usable form of neural network (Burden; Winkler, 2008). BRNN uses Bayes' Theorem, which calculates the probability of an event occurring from prior knowledge about that event (Burden; Winkler, 2008). In the case of ETo, BRNN calculates the possibility of the occurrence of high or low values considering previous records. The main adjusted hyperparameters are the neurons (Rodriguez; Gianola, 2016). ii) Cubist: a model based on the logic of decision tree rules, for each node of the tree a linear regression is generated (Kuhn; Quinlan, 2018). The main parameter of Cubist is the Committee, responsible for creating sequential iterative trees, in which the trees are created by adjusting the previous errors of the predictions. iii) Earth (Multivariate Adaptive Regression Spline): can create a linear model with intuitive block to non-linear relationships (Milborrow; Tibshirani, 2019). In general, Earth involves two steps, the forward step, which comprises the creation of an over-fitted model with various knots with candidate features, and the backward step, applying a pruning technique to remove redundant knots (Friedman, 2001). The main tuning hyperparameters are nprune, degree. iv) Linear regression (LM): simple model aims to calculate the linear relationships between a dependent variable and a set of independent data. v) Random Forest (RF) (Breiman, 2001): decision tree model with the bootstrap method, in which it creates several sets of uncorrelated trees with different covariates (Liaw; Wiener, 2002). The final prediction is given by averaging all trees. The adjusted hyperparameter is mtry. These models are recurrently used in spatial predictions of evapotranspiration in Brazil (Althoff *et al.*, 2020; Dias *et al.*, 2021).

## 2.5. Calibration, training and validation

We extracted the values from the covariates of the current scenario and altitude to train the models. The data set was randomly divided into 75% for training and 25% for holdout-test. We applied 10-fold Cross-Validation with 5 repetitions to obtain the training metrics and optimize the hyperparameters of each model (Kuhn; Johnson, 2013). Each training and holdout-test was performed 10 times to reduce prediction uncertainties. After the training process, we applied the *varImp* function to obtain the covariates that best explained the spatial distribution of ETo. The function calculates the percentage increase in the average standard error of each covariate. Sequentially, we performed an exploratory

analysis between the most explanatory covariates and the target variable (i.e., ETo). For this, we applied simple linear regressions to observe the trend (slope of the line) and the significance ( $p\text{-value} < 0.001$ ) of each covariate concerning the behavior of ETo.

The model's performance was by external validation (holdout-test). The validations provided RMSE (Root Mean Squared Error) and  $R^2$  (R-squared) as statistical metrics for comparing the models. For the final prediction, we selected the model with the best metrics in the holdout-test (25%). The same procedures were applied for predictions of future ETo scenarios, however, replacing current covariates with covariates of future scenarios. The SRTM covariate was inserted in all modeling (present and future).

## 2.6. Comparative Analysis between Spatial Prediction of Scenarios

From the spatial modeling of the prediction of climate change scenarios for the BSR, we performed a comparative analysis to observe the areas of ETo increases and decreases in the region. We apply Equation 01:

$$\Delta ETo = ETo_{FS} - ETo_{CS}$$

Where  $\Delta ETo$  represents the difference between the scenarios;  $ETo_{FS}$  is the future climate change scenarios (SSPs 126 and 585);  $ETo_{CS}$  is the current scenario of ETo (1970 – 2000). We obtained two  $\Delta ETo$  maps to observe the spatial variations of ETo considering climate change scenarios.

## 3. Results

### 3.1. Models performance for ETo prediction

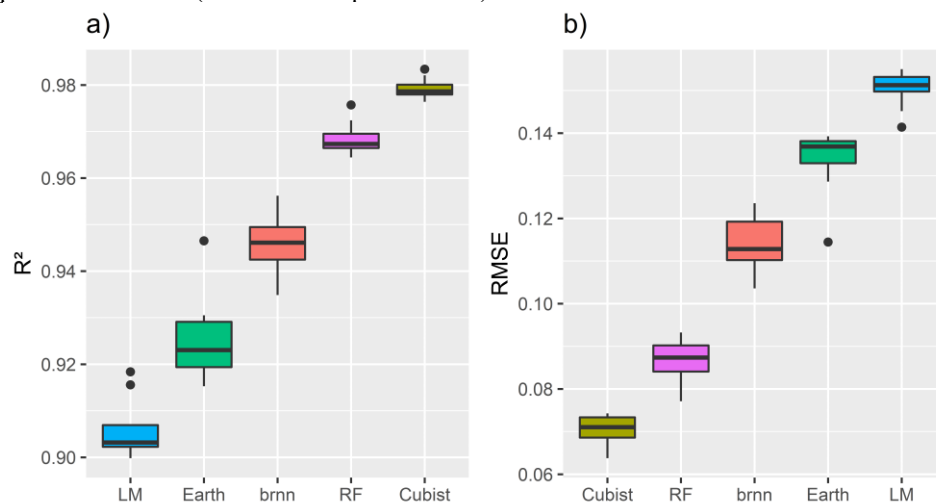
Among the 20 covariates selected to predict ETo in the semi-arid region, four were removed (Bio2: Mean diurnal range; Bio11: Mean temperature of coldest quarter; Bio16: Precipitation of wettest quarter; Bio17: Precipitation of driest quarter), as they had a coefficient of Spearman above 0.95. Therefore, we trained five ML models with 16 explanatory covariates.

In the model performance phase (holdout-test), Cubist and RF showed better performance for ETo spatialization with low errors (0.07 and 0.08 mm day<sup>1</sup>) and higher  $R^2$  (0.98 and 0.97) (Figure 3). The BRNN showed an intermediate behavior ( $R^2 = 0.95$

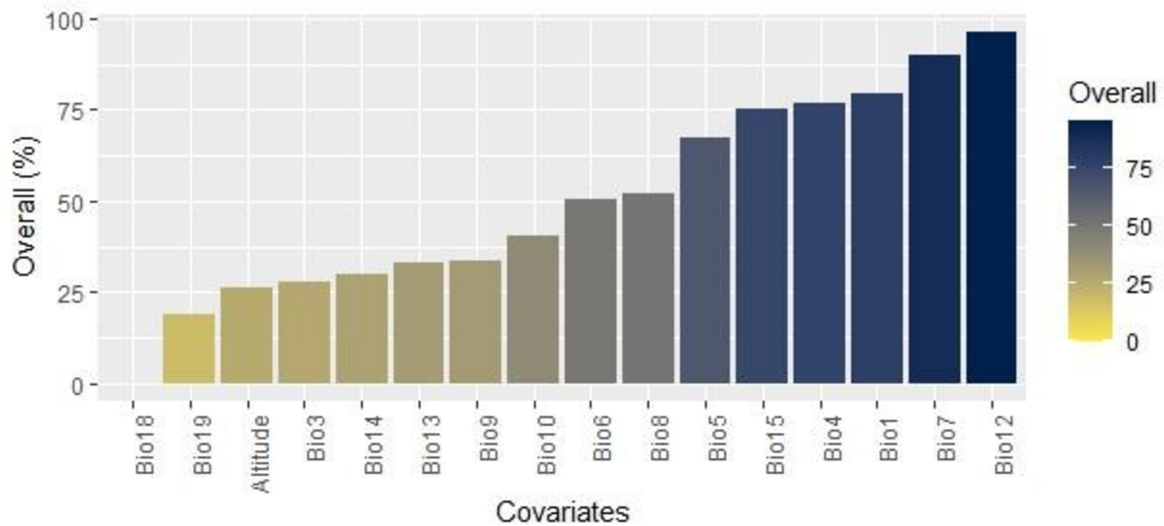
and  $RMSE = 0.11 \text{ mm day}^{-1}$ ). Earth and LM models presented the worst performances. We considered Cubist to predict ETo spatially as it was slightly superior to RF.

From the learning process of the Cubist model, we obtained a ranking of importance (Overall %) among the 16 covariates selected for the prediction of ETo: Annual Precipitation (Bio12), Temperature Annual Range (Bio7), Annual Mean Temperature (Bio1), Temperature Seasonality (Bio4) and Precipitation Seasonality (Bio15) (Figure 4).

**Figure 3** - Holdout-test for BRNN (Bayesian regularized neural networks) Cubist, Earth, LM (linear regression), and RF (Random Forest). Figure 2a) Boxplot of the  $R^2$  (R-Squared) of the models and Figure 2b) Boxplot of the RMSE (Root Mean Squared Error) for the models.

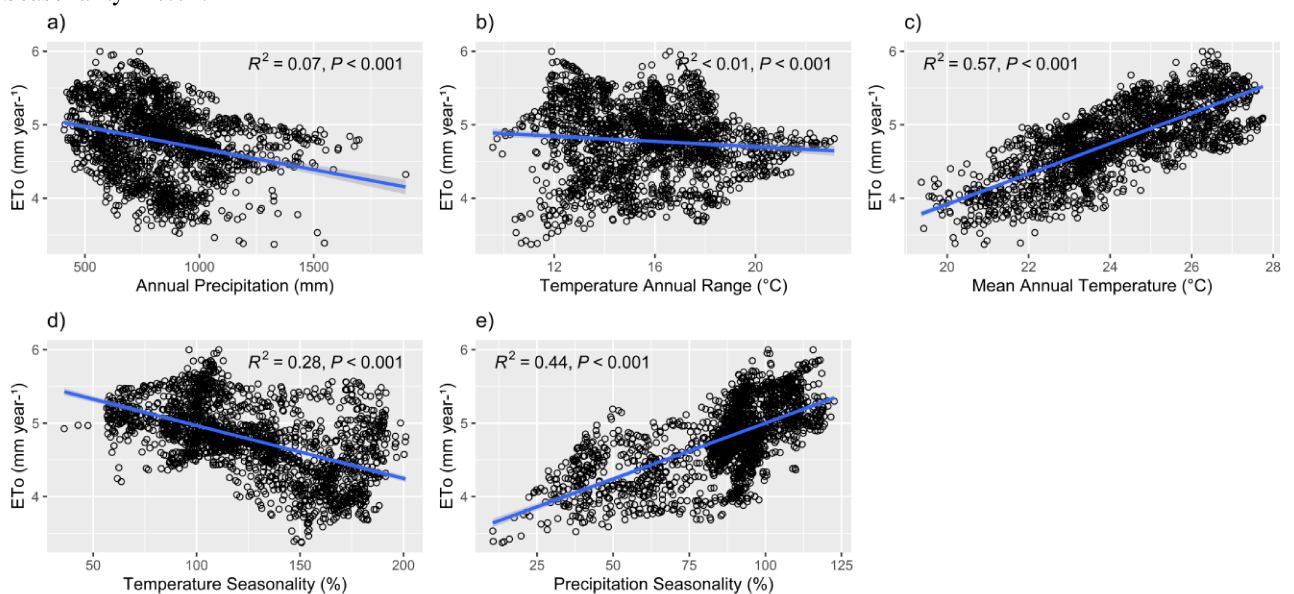


**Figure 4** - Importance ranking (overall %) for covariates of cubist model. Bio1: mean annual temperature; bioc3: isothermality; bio4: temperature seasonality; bio5: maximum temperature of the warmest month; bio6: minimum temperature of the coldest month; bio7: temperature annual range; bio8: mean temperature of wettest quarter; bio9: mean temperature of driest quarter; bioc12: annual precipitation; bioc13: precipitation of wettest month; bioc14: precipitation of driest month; bioc15: precipitation seasonality; bio18: precipitation of warmest quarter; bio19: precipitation of coldest quarter.



The main explanatory covariates selected in the ranking of importance showed significant effects ( $p$ -value  $< 0.001$ ) concerning the behavior of ETo (Figure 5). ETo has an inverse relationship with Annual Precipitation (Figure 5a). The Mean Annual Temperature presented a positive relationship with ETo rates (7% explanation). For the Annual Temperature Range there was no significant correlation ( $< 1\%$ ). Temperature seasonality is more intense in regions with low ETo (57%), while the seasonal intensity decreases in areas with high vapor flow ascendancy (28%). Seasonality and variation in rainfall distribution intensify ETo rates (44%).

**Figure 5** - Influence of the most important covariates to explain ETo. A simple linear regression was applied to the five covariates vs ETo, we obtained the R-squared ( $R^2$ ) p-value and slope. Slope for regressions: ETo vs Annual Precipitation = -0.0005; ETo vs Temperature Annual Range = -0.02; ETo vs Mean Annual Temperature = 0.21; ETo vs Temperature Seasonality = -0.007; ETo vs Precipitation Seasonality = 0.02.

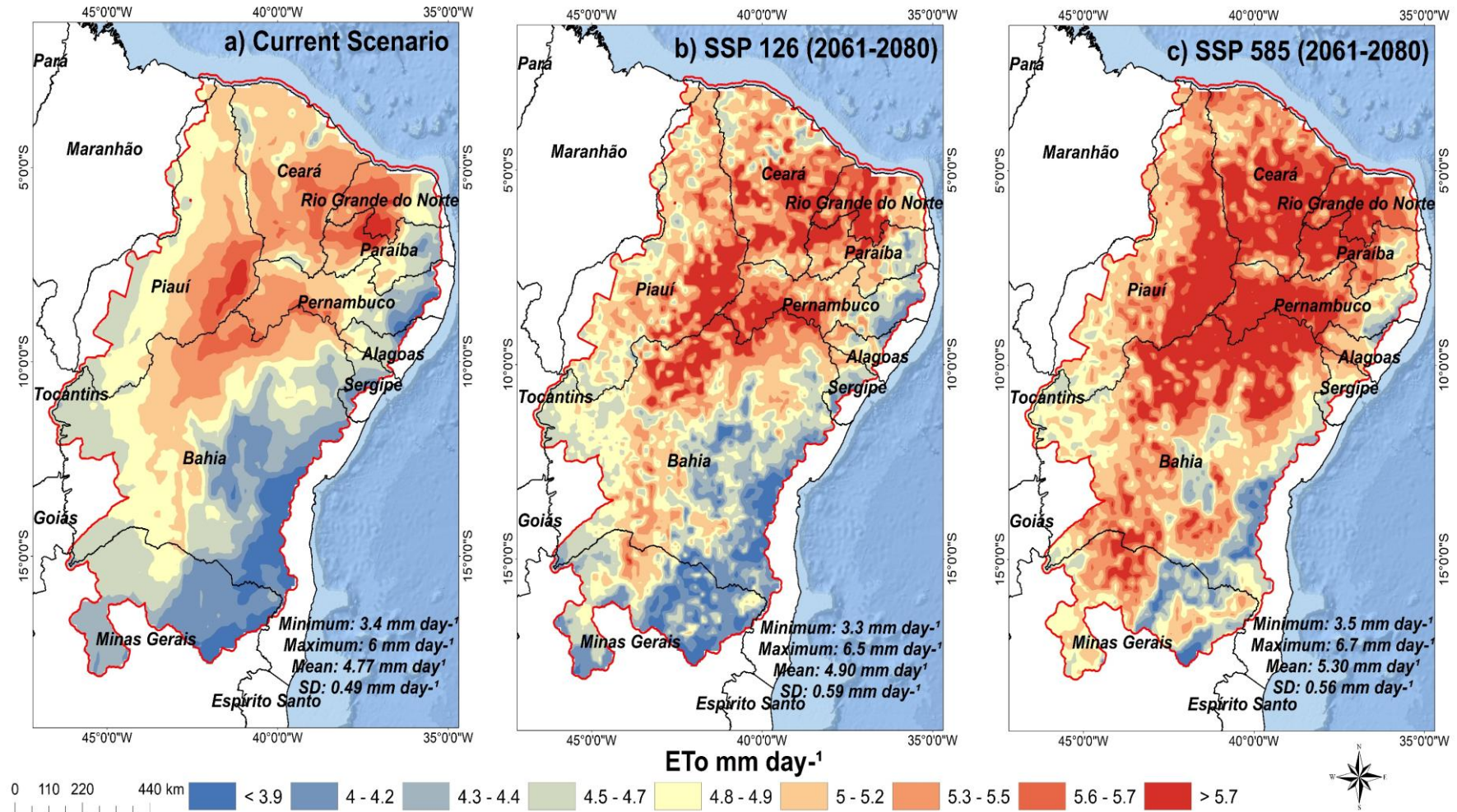


### 3.2. Spatial Distribution of ETo - Current (1970 - 2000) and Future Scenarios (2061-2080)

Under two future climate change scenarios ETo in the BSR will increase (Figure 6). The mean ETo in the current scenario is 4.77 mm day<sup>-1</sup>. However, it shows an increase of +0.17 mm day<sup>-1</sup> in the SSP 126 and +0.51 mm day<sup>-1</sup> on the SSP 585. These changes are also manifested through the configuration of spatial patterns. In the current scenario, the maximum value (6 mm day<sup>-1</sup>) comprises 1.09% of the region, while in the future scenarios (SSPs 126 and 585) represent 11.36% and 25.74%, respectively. ETo values > 5.71 mm day<sup>-1</sup> that predominate in the northern and central portion of the BSR should expand to the southern part, reaching latitudes of 15° S in future scenarios. We also noticed that the minimum values (< 4.2 mm day<sup>-1</sup>) in the current scenario were more expressive (13.61% of the territory), decreasing in the future scenarios (SSP 126 = 11%; SSP 585 = 2.85%).



**Figure 6** - Spatial Distribution of ETo (mean) in the Brazilian Semi-Arid region for the current and climate change scenario. Figure a) ETo prediction for the current scenario (1970 – 2000); Figure b) ETo prediction for the SSP 126 (2061-2080); Figure c) Spatial Prediction for the SSP 585 (2061-2080).

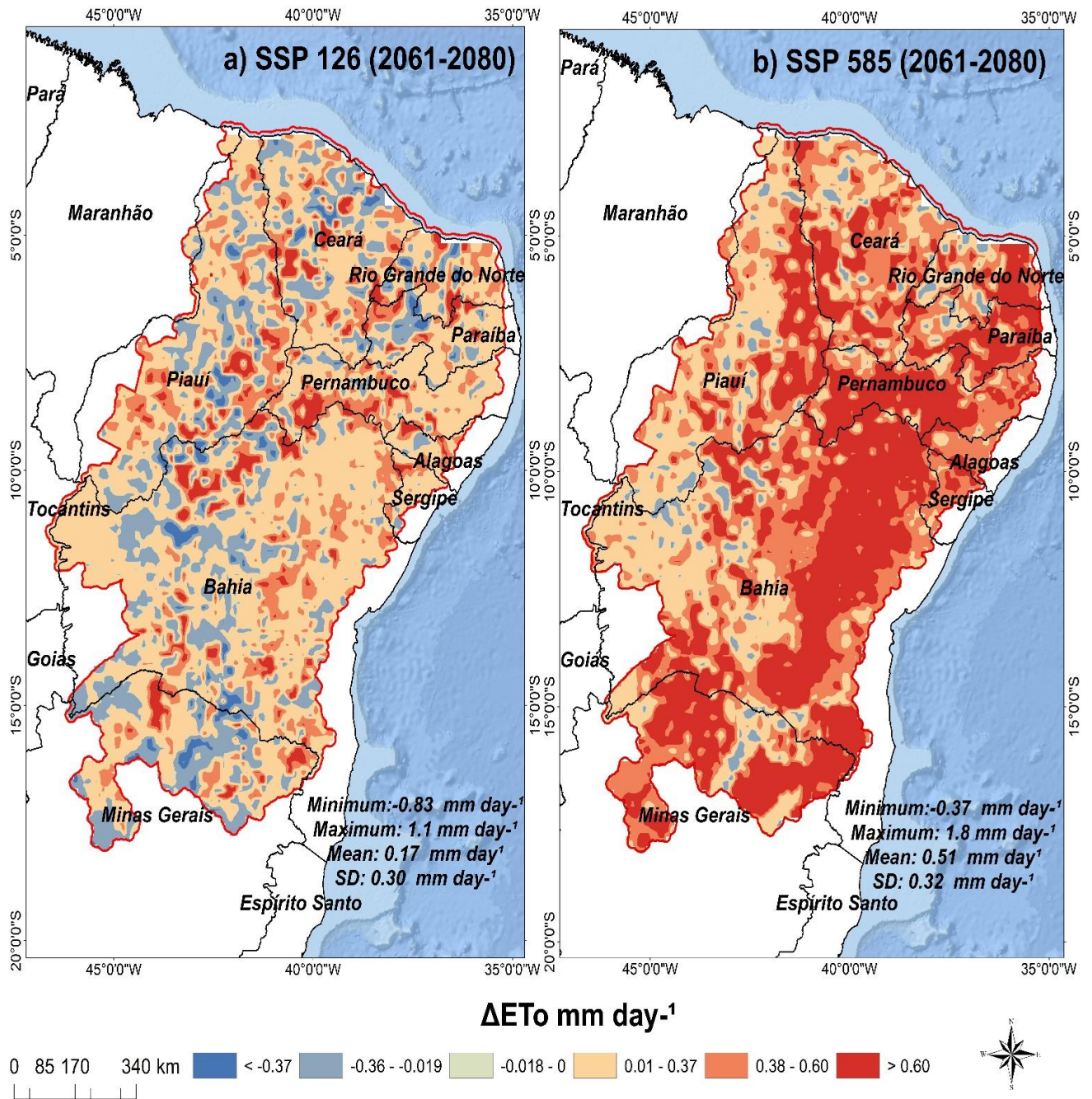




From the spatial patterns, the most extreme changes in ETo may occur in the worst climate change scenario, SSP 585 (Figure 7). Considering the  $\Delta ETo$  in SSP 126, by 2070 about 8% of the study area may experience an increase between 0.60 and 1 mm day<sup>-1</sup>. In SSP 585, ~40% of the semi-arid will increase ETo rates between 0.60 and 1.8 mm day<sup>-1</sup>, reaching ~650 mm-year<sup>1</sup> in some areas.

The changes in ETo in both scenarios reflect an increase in air temperature, an abrupt decrease in precipitation, and climatic seasonality variations compared to the present context (Table 2). The mean temperature in the current scenario is 24.16°C and will increase by 1.13 °C and 2.73°C in SSPs 126 and 585, respectively. The Annual Temperature Range also shows a boost in the face of climate change of 0.72 °C and 1.28 °C compared to the current mean (15.74 °C). Meanwhile, adversely, precipitation input is expected to decrease by 2070 (between 25 mm and 50 mm).

**Figure 7** – Eto difference maps between scenarios ( $\Delta ETo = ET_{ofs} - ET_{ocs}$ ). A) ETo difference for the SSP 126 scenario compared to the current one; b) ETo difference for the SSP 585 scenario compared to the current one. Statistical summary with maximum, minimum, mean, and standard deviation (SD).



**Table 2** - Mean values of the most important covariates to explain ETo in the current and future scenarios (SSPs 126 and 585). The table also shows the difference between the covariates in the future and current scenarios.

Covariates	Current	SSP 126	SSP 585	Difference SSP 126 to Current	Difference SSP 585 to Current
<b>Annual Precipitation (mm)</b>	839.10	814.01	788.97	-25.09	-50.13
<b>Temperature Annual Range (°C)</b>	15.74	16.46	17.02	+0.72	+1.28
<b>Mean Annual Temperature (°C)</b>	24.16	25.29	26.89	+1.13	+2.73
<b>Temperature Seasonality (%)</b>	126.27	134.67	143.94	+8.4	+17.67
<b>Precipitation Seasonality (%)</b>	85.54	86.93	87.22	+1.39	+1.68

## 4. Discussion

### 4.1. Model performance

Considering the statistical analyzes and our dataset, Cubist was the most suitable model for spatially predicting ETo variations in the Brazilian semi-arid region (Figure 3). Compared to our study, works highlighted the high capacity of Cubist in predicting ETo for Brazil (Althoff *et al.*, 2020; Dias *et al.*, 2021). Cubist is a model based on tree logic (as well as RF); models of this nature have shown superiority over others in environmental predictions (Gomes *et al.*, 2019; Althoff *et al.*, 2020). In this model, the predictions are performed in sequence; if the first prediction has low metrics, it is adjusted and improved in the second, and so on (Kuhn; Quinlan, 2018). The RF model presented the second-best performance, and several studies have pointed out this pattern for ETo prediction in regions of Brazil (Dias *et al.*, 2021). The BRNN had an intermediate performance, a similar behavior to studies of Dias *et al.* (2021) for Brazil. The two worst models (Earth and LM) are based on linear regression, and generally, due to their simplicity, they cannot capture ETo variations, as it is a complex phenomenon (Althoff *et al.*, 2020).

Our results suggest that for analysis of complex phenomena such as ETo, more robust models such as Cubist should be used. However, it is important to note that a model's efficacy may be influenced by its robustness, the complexity of the problem, and the quality of the data set utilized.

## 4.2. Influence of Climate Change Scenarios on ETo

Our results showed that in the BSR, under climate change scenarios (SSPs 126 and 585), ETo will increase on average (0.17 and 0.51 mm year<sup>-1</sup>). Under these conditions, some areas may experience water loss of 600 mm per year through increased ETo rates. Spatial change of ETo rates in the BSR is also expected with climate changes. Maximum values of the ETo (6 mm year<sup>-1</sup>) expand towards the southern portion of the BSR (Figure 6). Corroborating our study, the increase in ETo rates in climate change scenarios has been recurrent in several semi-arid zones worldwide (Yoo *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2020; Nooni *et al.*, 2021; Zhang; Gan; Su, 2022).

The main drivers that control the behavior of ETo in the BSR are Annual Precipitation, Air Temperature, and Climatic Seasonality (Figures 4 and 5). Annual Precipitation presented a negative relationship with ETo (Figure 4a), probably because areas with a higher concentration of clouds may inhibit radiation incidence to the surface (Althoff *et al.*, 2020). In future scenarios, precipitation will decrease by 3 to 6% (Table 2), which may decrease the cloud cover, leading to more significant radiation inputs and increasing water loss.

In the context of climate variability, we found that temperature seasonality has a negative relationship with ETo (Figure 4d). In regions with more significant thermal variation in the year, ETo decreases, while portions with temperature stability and homogeneity positively influence water loss. Although the seasonality of precipitation positively impacts ETo, regions with high precipitation variability experience increased evapotranspiration rates (Figure 4e).

The intensification of ETo translates into water deficiency, which has practical implications in the ecosystem, economic and social aspects. There is a direct link between water availability and ecosystem conditioning (Gao *et al.*, 2022). For example, vegetation quickly responds to variations in soil water content, especially considering its metabolic activities. With an abrupt decline in water, the vegetation loses levels of primary productivity, directly affecting the carbon fixation capacity (Kong *et al.*, 2023). As vegetation decreases carbon storage rates, it becomes an emitting source. In a global context, semi-arid zones are already becoming a source of carbon emissions, however, with the intensification of droughts, emissions in the future may increase, becoming a perpetual cycle as cited by the IPCC (Scott *et al.*, 2015).

In addition, the amplification of water deficit levels due to the increase in ETo can change the patterns of the spatial distribution of (Burrell; Evans; Kauwe, 2020; Grünzweig *et al.*, 2022). Modeling of future scenarios has shown that by the end of the century, vegetation

with xerophytic characteristics will extend into the BSR (Oliveira *et al.*, 2021), mainly on the southern edge (latitude 15° S), where maximum ETo values may extend (Figures 5 and 6). The expansion of maximum ETo values (6 mm day<sup>-1</sup>) may increase the frequency and intensity of droughts in the BSR, which historically is a phenomenon that has affected the socioeconomic context of the region (Marengo *et al.*, 2022).

In several parts of the globe, the intensification of droughts is one of the main concerns in the agricultural production sector (Salas-Martínez *et al.*, 2021; Orimoloye *et al.*, 2022). In addition to the drought, accompanied by the increase in ETo, there are high temperature values, with this, it is expected that pests can increase their ability to survive winters and attack agricultural crops (Schmidhuber; Tubiello, 2007). Therefore, increases in ETo rates may compromise the productive capacity of the agricultural sector of the BSR, affecting the economic dynamics of several municipalities, which may put several inhabitants at food risk.

Furthermore, water shortages in future scenarios can amplify the context of social conflicts. In the BSR, conflicts are due to the multiple uses of water, mainly due to the appropriation of large volumes of water for the production of large commodities in the agro-industrial sector, as well as the formulation of public policies aimed at large landowners (Silveira; Silva, 2019). Surveys indicate that in a five-year interval (2012 - 2017), there was a growth of +40% in conflicts involving ~13 thousand families in the semi-arid region (Silveira; Silva, 2019). However, conflicts over water use may intensify, as by the end of the century, the study region is expected to experience high levels of water insecurity due to climate change and anthropogenic pressures (Ballarin *et al.*, 2023).

Increased ETo rates can also intensify desertification processes in the BSR, a phenomenon that has historically affected the region (Bezerra *et al.*, 2020). The BSR has some consolidated desertification nuclei, for example, Irauçuba, Jaguaribe, Inhamun (state of Ceará), Seridó (Paraíba and Rio Grande do Norte) and Cabrobó (Pernambuco) (Bezerra *et al.*, 2020), which should be amplified in future climate change scenarios, as they are in zones that may experience ETo increases above 5.7 mm year<sup>-1</sup> by the end of the century (Figure 7). Furthermore, these high ETo rates found in our results may indicate the emergence of new desertification nuclei in the BSR.

We draw attention to the need for decision-making guided by robust scientific methods. Furthermore, we emphasize the critical scenario for the coming decades in the Brazilian semi-arid region with the increase in evapotranspiration because if they materialize, many segments can be altered, such as biodiversity patterns, changes in the spatial structure of biomes, provision of ecosystem services and agricultural production.

## Data availability

For applications in works in the Brazilian semi-arid region, we provide ETo data at: <https://github.com/lucasagus/Reference-evapotranspiration-data->. These data can be used in several approaches, such as the quantification of agricultural losses, models for aridity analysis, and implementation in vegetation distribution models, among others.

## References

- ALTHOFF, Daniel *et al.* ETo-Brazil: a daily gridded reference evapotranspiration data set for Brazil (2000–2018). **Water Resources Research**, [s. l.], v. 56, n. 7, p. e2020WR027562., 2020.
- ANJOS, Luciano J. S. *et al.* Future projections for terrestrial biomes indicate widespread warming and moisture reduction in forests up to 2100 in South America. **Global Ecology and Conservation**, [s. l.], v. 25, p. e01441, 2021.
- ASSIS, Érika A. *et al.* Modelos Acoplados do IPCC (CMIP3-CMIP5) e o Gradiente Meridional de Anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Oceano Atlântico Tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 217–226, 2019.
- BALLARIN, André S. *et al.* Brazilian Water Security Threatened by Climate Change and Human Behavior. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 59, n. 7, p. e2023WR034914, 2023.
- BAZZANELA, Anna Carolina *et al.* Performance of CMIP6 models over South America. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 62, n. 2, p. 1501–1516, 2024.
- BEIGAITÈ, Rita *et al.* Identifying climate thresholds for dominant natural vegetation types at the global scale using machine learning: Average climate versus extremes. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 28, n. 11, p. 3557–3579, 2022.
- BEZERRA, F. G. S. *et al.* Analysis of areas undergoing desertification, using EVI2 multi-temporal data based on MODIS imagery as indicator. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 117, p. 106579, 2020.
- BONANNELLA, Carmelo *et al.* Biomes of the world under climate change scenarios: increasing aridity and higher temperatures lead to significant shifts in natural vegetation. **PeerJ**, [s. l.], v. 11, p. e15593, 2023.
- BOYLES, Ryan *et al.* **Approaches for using CMIP projections in climate model ensembles to address the ‘hot model’ problem.** [S. l.]: US Geological Survey, 2024. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/publication/ofr20241008/full>. Acesso em: 27 jun. 2024.
- BREIMAN, Leo. Random forests. **Machine learning**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.
- BURDEN, Frank; WINKLER, Dave. Bayesian Regularization of Neural Networks. *In*: LIVINGSTONE, David J. (org.). **Artificial Neural Networks**. Totowa, NJ: Humana Press, 2008. (Methods in Molecular Biology™). v. 458, p. 23–42. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-1-60327-101-1\\_3](http://link.springer.com/10.1007/978-1-60327-101-1_3). Acesso em: 27 jun. 2024.

BURRELL, A. L.; EVANS, J. P.; DE KAUWE, M. G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km<sup>2</sup> of drylands towards desertification. **Nature Communications**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 3853, 2020.

CHEN, Zhongwang *et al.* Historical and future trends in wetting and drying in 291 catchments across China. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 2233–2248, 2017.

COLLAZO, Soledad; BARRUCAND, Mariana; RUSTICUCCI, Matilde. Hot and dry compound events in South America: present climate and future projections, and their association with the Pacific Ocean. **Natural Hazards**, [s. l.], v. 119, n. 1, p. 299–323, 2023.

CUNHA, A.P.M. *et al.* Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 214–215, p. 494–505, 2015.

DIAS, Santos Henrique Brant *et al.* Reference evapotranspiration of Brazil modeled with machine learning techniques and remote sensing. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. e0245834, 2021.

DIAS, Henrique Boriolo; SENTELHAS, Paulo Cesar. Assessing the performance of two gridded weather data for sugarcane crop simulations with a process-based model in Center-South Brazil. **International Journal of Biometeorology**, [s. l.], v. 65, n. 11, p. 1881–1893, 2021.

FAN, Junliang *et al.* Climate change effects on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of China during 1956–2015. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 542, p. 923–937, 2016.

FERREIRA, Glauber Willian de Souza *et al.* Assessment of Precipitation and Hydrological Droughts in South America through Statistically Downscaled CMIP6 Projections. **Climate**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 166, 2023.

FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 2017.

FIRPO, Mári Andrea Feldman *et al.* Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, [s. l.], v. 4, p. 948499, 2022.

FRIEDMAN, Jerome H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. **The Annals of Statistics**, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 1189–1232, 2001.

GAO, Wande *et al.* NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land, China. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 137, p. 108745, 2022.

GOMES, Lucas Carvalho *et al.* Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, [s. l.], v. 340, p. 337–350, 2019.

GONZALEZ DEL CERRO, Ramiro T. *et al.* Modelling the daily reference evapotranspiration in semi-arid region of South India: A case study comparing ANFIS and empirical models. **Information Processing in Agriculture**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 173–184, 2021.

GRÜNZWEIG, José M. *et al.* Dryland mechanisms could widely control ecosystem functioning in a drier and warmer world. **Nature Ecology & Evolution**, [s. l.], p. 1–13, 2022.

HAUSFATHER, Zeke *et al.* Climate simulations: Recognize the ‘hot model’ problem. [s. l.], 2022.

HUANG, Jianping *et al.* Global semi-arid climate change over last 60 years. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. 1131–1150, 2016.

JIANG, Fuxiao *et al.* Loess Plateau evapotranspiration intensified by land surface radiative forcing associated with ecological restoration. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 311, p. 108669, 2021.

KIM, Jinsoo *et al.* Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 452–453, p. 181–195, 2013.

KONG, Zijie *et al.* Past and projected future patterns of fractional vegetation coverage in China. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 902, p. 166133, 2023.

KUHN, Max *et al.* Package ‘caret’. **The R Journal**, [s. l.], v. 223, p. 7, 2020.

KUHN, Max; JOHNSON, Kjell. **Applied predictive modeling**. [S. l.]: Springer, 2013. v. 26

KUHN, Max; QUINLAN, R. Cubist: Rule-and instance-based regression modeling. R package version 0.2. 2. [s. l.], 2018.

LI, Meng *et al.* Correction: Li et al. How Has the Recent Climate Change Affected the Spatiotemporal Variation of Reference Evapotranspiration in a Climate Transitional Zone of Eastern China? **ISPRS Int. J. Geo-Inf.** 2022, 11, 300. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 114, 2023.

LIAW, Andy; WIENER, Matthew. Classification and regression by randomForest. **R news**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 18–22, 2002.

MARENGO, Jose A *et al.* Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. **Climate Resilience and Sustainability**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. e17, 2022.

MARQUES, Márcia Talita A. *et al.* **Data-driven discovery of mechanisms underlying present and near-future precipitation changes and variability in Brazil**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2024/egusphere-2024-48/>. Acesso em: 27 jun. 2024.

MILBORROW, S; TIBSHIRANI, R. Package ‘earth’: Multivariate Adaptive Regression Splines. [s. l.], 2019.

MORAES, Jessica B.; WANDERLEY, Henderson S.; DELGADO, Rafael C. Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios. **Natural Hazards**, [s. l.], v. 116, n. 2, p. 1463–1483, 2023.



NAVARRO, Andrés *et al.* Towards better characterization of global warming impacts in the environment through climate classifications with improved global models. **International Journal of Climatology**, [s. l.], 2022.

NOONI, Isaac Kwesi *et al.* Future Changes in Simulated Evapotranspiration across Continental Africa Based on CMIP6 CNRM-CM6. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 18, n. 13, p. 6760, 2021.

OLIVEIRA, Debora Martins *et al.* Performance dos modelos climáticos do CMIP6 em simular a precipitação em subdomínios da América do Sul no período histórico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 116–133, 2023.

OLIVEIRA, Guilherme de Castro *et al.* Soil predictors are crucial for modelling vegetation distribution and its responses to climate change. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 780, p. 146680, 2021.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. **International journal of geographical information systems**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 313–332, 1990.

ORIMOLOYE, Israel R *et al.* Drought: A common environmental disaster. **Atmosphere**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 111, 2022.

PIELKE JR, Roger; BURGESS, Matthew G; RITCHIE, Justin. Plausible 2005–2050 emissions scenarios project between 2° C and 3° C of warming by 2100. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 024027, 2022.

RODRIGUEZ, P Perez; GIANOLA, D. BRNN: Bayesian regularization for feed-forward neural networks. **R package version 0.6**, [s. l.], 2016.

SALAS-MARTÍNEZ, Fernando *et al.* Analysis of the Evolution of Drought through SPI and Its Relationship with the Agricultural Sector in the Central Zone of the State of Veracruz, Mexico. **Agronomy**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 2099, 2021.

SANTOS, Thaynara Garcia *et al.* Assessment of agricultural efficiency and yield gap for soybean in the Brazilian Central Cerrado biome. **Bragantia**, [s. l.], v. 80, p. e1821, 2021.

SCHMIDHUBER, Josef; TUBIELLO, Francesco N. Global food security under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 104, n. 50, p. 19703–19708, 2007.

SCOTT, Russell L *et al.* The carbon balance pivot point of southwestern US semiarid ecosystems: Insights from the 21st century drought. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, [s. l.], v. 120, n. 12, p. 2612–2624, 2015.

SHI, Lijie *et al.* Quantifying future drought change and associated uncertainty in southeastern Australia with multiple potential evapotranspiration models. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 590, p. 125394, 2020.

SILVA, Jorge Flávio Casé Braga da Costa *et al.* Analysis of the response of the Epitácio Pessoa reservoir (Brazilian semiarid region) to potential future drought, water transfer and LULC scenarios. **Natural Hazards**, [s. l.], v. 108, n. 1, p. 1347–1371, 2021.

SILVEIRA, Sandra Maria Batista; SILVA, Maria das Graças. Conflitos socioambientais por água no Nordeste brasileiro: expropriações contemporâneas e lutas sociais no campo. **Revista Katálysis**, [s. l.], v. 22, p. 342–352, 2019.

VAN VUUREN, Detlef P. *et al.* The Shared Socio-economic Pathways: Trajectories for human development and global environmental change. **Global Environmental Change**, [s. l.], v. 42, p. 148–152, 2017.

WENDT, Kathleen A. *et al.* Three-phased Heinrich Stadial 4 recorded in NE Brazil stalagmites. **Earth and Planetary Science Letters**, [s. l.], v. 510, p. 94–102, 2019.

WU, Tianao *et al.* Evaluation of stacking and blending ensemble learning methods for estimating daily reference evapotranspiration. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 184, p. 106039, 2021.

YOO, Jiyoung *et al.* Influence of evapotranspiration on future drought risk using bivariate drought frequency curves. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 5, p. 2059–2069, 2016.

ZHANG, Gengxi; GAN, Thian Yew; SU, Xiaoling. Twenty-first century drought analysis across China under climate change. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 59, n. 5, p. 1665–1685, 2022.

## **CAPÍTULO 3: Expansão da aridez e implicações nas classes climáticas e desertificação em cenários futuros no Semiárido Brasileiro**

### **RESUMO**

O Semiárido Brasileiro é umas das regiões mais populosas do mundo, com altos níveis de biodiversidade, no entanto, essa região tem sido ameaçada pelo surgimento de núcleos de aridez nas últimas décadas, e existe indicativos que isso se intensifique em cenários futuros de mudanças climáticas. Portanto, entender a distribuição espacial dos níveis de aridez no semiárido brasileiro (SAB) em perspectivas futuras é crucial para a gestão agroambiental territorial. Este estudo avaliou a distribuição espacial das condições de aridez e as implicações nas classes climáticas e zonas susceptíveis à desertificação considerando os efeitos dos cenários futuros de mudanças climáticas para o SAB. Elaborou-se o índice de aridez (IA) para os cenários atual (1970 – 2000) e futuro (2061 – 2080). Nos cenários futuros foram usadas projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), principalmente os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs) 126 e 585. Constatou-se que até o final do século o SAB deverá ficar significativamente (*Kruskal-Wallis* = *p-value* < 0.05) mais seco no SSP 585. Com isso, o clima semiárido deverá expandir na ordem de 56.500 (+ 10%) a 140.400 km<sup>2</sup> (+ 24%) sobre climas úmidos nos SSPs 126 e 585. Portanto, espera-se aumento das terras com susceptibilidade alta (622.400 km<sup>2</sup>/10% a 706.300 km<sup>2</sup>/39%) e muito alta (4.400 a 21.700 km<sup>2</sup>) à desertificação no SAB. Os resultados sugerem que a expansão de terras secas no SAB coloca em risco processos socioeconômicos e ecológicos.

**Palavras-chave:** índice de aridez, classes climáticas, modelagem espacial, zona semiárida, Brasil.

### **Expansion of aridity and implications on climate classes and desertification future scenarios in the Brazilian Semi-arid**

#### **ABSTRACT**

The Brazilian semi-arid region is one of the most populous regions in the world, with high levels of biodiversity, however, this region has been threatened by the emergence of arid areas in recent decades, and there are indications that this will intensify in future scenarios of climate change. Therefore, understanding the spatial distribution of aridity levels in the Brazilian semi-arid region (SAB) in future perspectives is crucial for territorial agro-environmental management. This study evaluated the spatial distribution of aridity conditions and the implications on climate classes and zones susceptible to desertification considering the effects of future climate change scenarios for the SAB. The aridity index (AI) was elaborated for the current (1970 – 2000) and future (2061 – 2080) scenarios. In the future scenarios, projections from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) were used, mainly the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) 126 and 585. It was found that by the end of the century the SAB should remain significantly (*Kruskal-Wallis* = *p-value* < 0.05) drier in SSP 585. As a result, the semi-arid climate is expected to expand in the order of 56,500 (+ 10%) to 140,400 km<sup>2</sup> (+ 24%) over humid climates in the SSPs 126 and 585. Therefore, land with high (622,400 km<sup>2</sup>/10% to 706,300 km<sup>2</sup>/39%) and very high (4,400 to 21,700 km<sup>2</sup>) susceptibility to desertification in the SAB is expected to increase. The results suggest that expansion of drylands in the SAB puts socioeconomic and ecological processes at risk.

**Keywords:** aridity index, climate classes, spatial modeling, semi-arid zone, Brazil.

### **1. Introdução**

As regiões semiáridas cobrem aproximadamente 40% do globo terrestre, abrigando mais de 14% da população mundial (Huang *et al.*, 2016), e são de larga importância socioeconômica e ecológica, pois fornecem diversos serviços ecossistêmicos ((Rao *et al.*, 2018; Wu, Yifan *et al.*, 2021). Contudo, embora possuam grande relevância, são áreas vulneráveis e ameaçadas em função dos efeitos das mudanças climáticas (Burrell; Evans; De Kauwe, 2020). Existe uma forte tendência para as zonas semiáridas, principalmente de decréscimo dos inputs pluviométricos,

aumento da temperatura do ar e intensificação da evapotranspiração potencial (Zhou *et al.*, 2021). Essas variáveis potencializam sistematicamente os níveis de aridez, isto é grau de secura das terras (Pour; Abd Wahab; Shahid, 2020).

Projeções baseadas em cenários futuros formulados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) têm apontado que regiões semiáridas ficarão mais secas até o final do século (Burrell; Evans; De Kauwe, 2020; Denissen *et al.*, 2022). Nesse contexto, espera-se que diante das condições de aridez em perspectivas futuras, tenham-se diversas implicações geoespaciais, a exemplos, nos tipos climáticos, pois geralmente, a aridez é utilizada para classificação de zonas climáticas, portanto, a intensificação dos níveis de aridez em cenários futuros pode conduzir a alterações nos climas (Fernandez *et al.*, 2017). Modelagens prévias têm mostrado padrões espaciais em que, climas úmidos são convertidos para classes com características mais secas e áridas, essencialmente em função da intensificação da aridez (Rao *et al.*, 2018; Navarro *et al.*, 2022).

Aas últimas décadas, modelagens espaço-temporais mostraram uma relação entre aridez e degradação ambiental das terras (Kimura; Moriyama, 2019; Carvalho *et al.*, 2022). Essa degradação geralmente é representada por processos de desertificação climática, que corresponde à perda de nutrientes e umidade no solo (Rivera-Marin; Dash; Ogutu, 2022). Em regiões moderadamente secas que foram convertidas em zonas mais intensas de aridez, observa-se aumento nas áreas potenciais ou susceptíveis à desertificação (Fernandez *et al.*, 2017; Fernandez; Franchito; Rao, 2019). Os processos de desertificação climática em zonas semiáridas são alarmantes, principalmente considerando seus impactos nos fluxos socioeconômicos, aumento do grau de pobreza, taxas migratórias (humanas e espécies animais), decréscimo da capacidade de produção das terras, perda de solos, elevação das taxas de CO<sub>2</sub> e declínio dos níveis de biodiversidade (D’Odorico *et al.*, 2013).

Dentre as zonas semiáridas, no Brasil encontra-se a mais populosa do mundo, com mais de 28 milhões de habitantes, conhecida como semiárido brasileiro (SAB), a qual é uma das regiões mais biodiversas e dinâmicas do mundo, pois abrange paisagens com alta atividade ecossistêmica, como os biomas Caatinga (com vegetação xerófila), enclaves de Cerrado (características semidecíduas) e Mata Atlântica (vegetação ombrófila), além da diversidade de usos antrópicos substanciais para a região (Oliveira *et al.*, 2021). Importantes estudos têm mostrado que no contexto atual, a aridez tem se intensificado no SAB (Vieira *et al.*, 2015; Marques da Silva *et al.*, 2018; Moura *et al.*, 2022), contudo, poucos têm focado na elaboração de cenários futuros (Vieira *et al.*, 2021). Portanto, elaborar mapeamentos com foco na dinâmica de condições de aridez para o SAB considerando os efeitos das mudanças no clima em

perspectivas futuras torna-se crucial para um planejamento ambiental mais adequado. Este estudo avaliou a distribuição espacial das áreas das condições de aridez e suas implicações nos tipos de climas e áreas susceptíveis à desertificação em cenários futuros de mudanças climáticas (2061 – 2080).

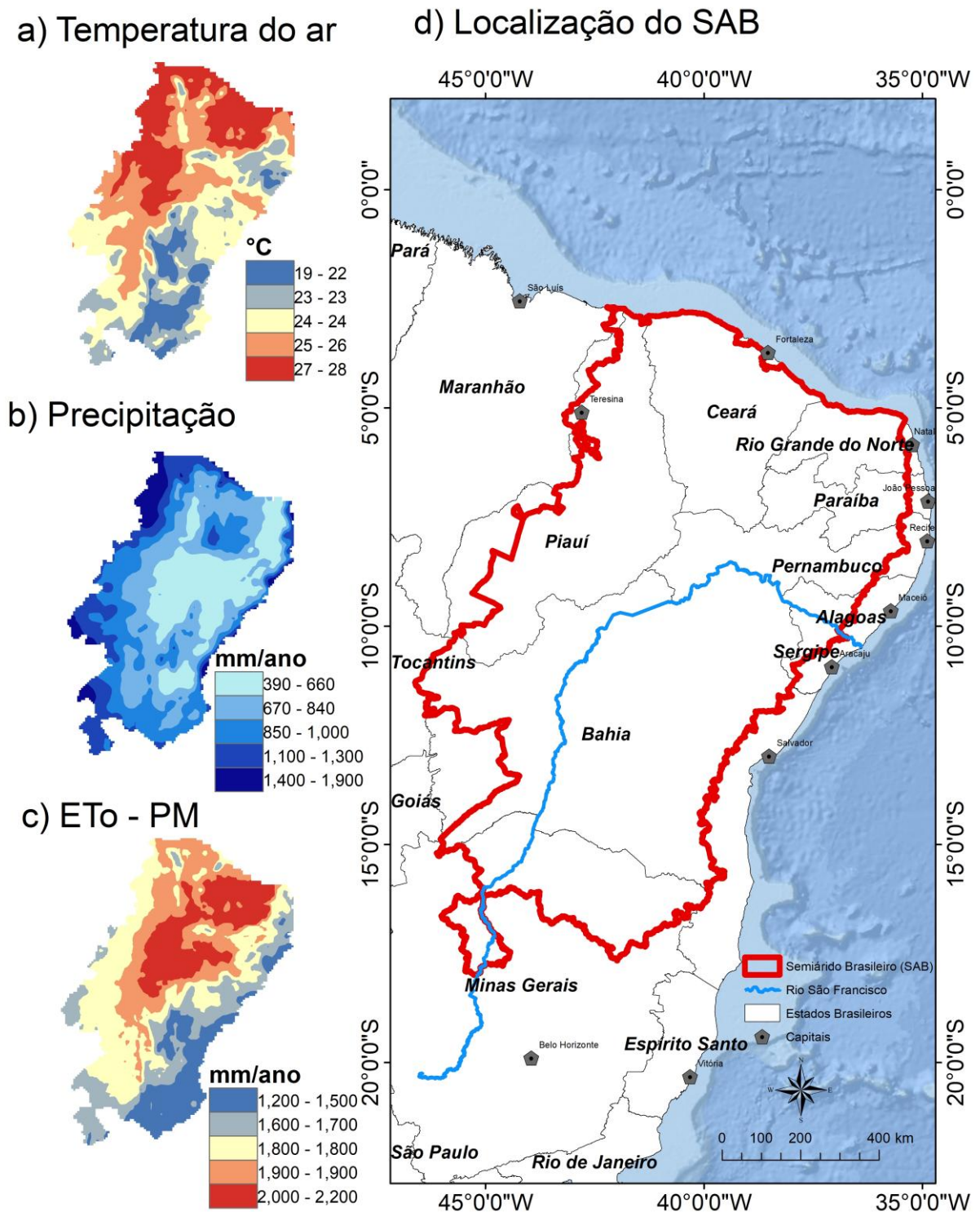
## **2. Materiais e métodos**

### **2.1. Área de estudo**

O SAB está localizado na porção nordeste da América do Sul, entre 0° e 20° S (Figura 1d). A região compreende 13% do território brasileiro, contemplando estados do nordeste e parte do norte de Minas Gerais. O SAB é influenciado por sistemas atmosféricos, como frentes frias vindas do sudeste brasileiro, variações sazonais da Zona de Convergência Intertropical, e amplitudes entre costa continental e oceano atlântico.

Essas características atmosféricas influenciam a dinâmica espacial de variáveis climáticas, em que, a temperatura do ar possui faixas elevadas (até 27°C) no sentido Leste-Oeste, com menores médias (19 – 21°C) na borda costeira (Figura 1 a). Além disso, a distribuição das chuvas é irregular, variando de 390 a 1900 mm, com evapotranspiração potencial entre 1200 e 2200 mm (Figuras 1 b – c).

**Figura 1** - Localização do Semiárido Brasileiro. A) Distribuição Espacial da Temperatura do Ar (1970 – 2000). B) Precipitação Anual. C) Evapotranspiração Potencial (Eto). D) Limite do Semiárido Brasileiro.



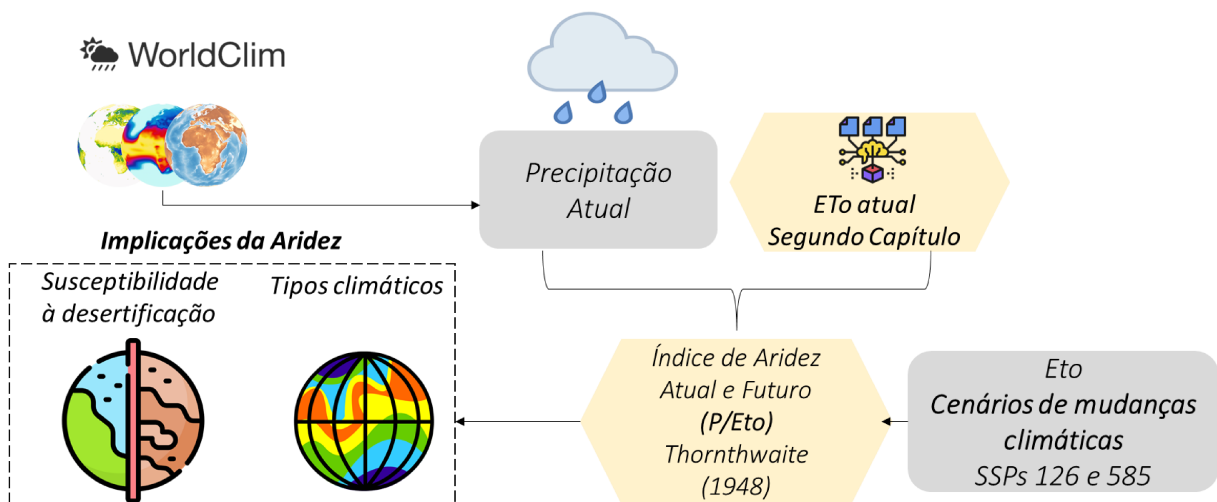
Os aspectos climáticos envolvendo temperatura, precipitação e evapotranspiração potencial são os principais vetores dos níveis de aridez do SAB, que se encontra na faixa de valores  $\leq 0.5$  (Marengo; Bernasconi, 2015). As condições de aridez, por sua vez, são

responsáveis pela configuração espacial da paisagem do SAB, principalmente no contexto de ecossistemas naturais e padrões de uso da terra.

## 2.2. Etapas metodológicas e operacionais

Para elaboração desse capítulo seguiu-se as etapas de: I) obtenção de bases espaciais para cenários atuais e futuros, II) elaboração do índice de aridez e III) mapeamento das classes climáticas e áreas susceptíveis à desertificação (Figura 2).

**Figura 2** – Etapas Metodológicas para execução do Trabalho. SSP: Shared Socioeconomic Pathways.



## 2.3. Índice de Aridez para os cenários atual e futuros

O índice de aridez (IA) foi obtido considerando Thornthwaite (1948). As condições de aridez são em função da razão entre precipitação e evapotranspiração potencial (Equação 01). Em termos de valores, quanto menor o IA mais secas são as terras, enquanto valores elevados representam ambientes mais úmidos.

$$IA = \frac{P}{ET_o} \quad (01)$$

Onde P e ETo representam precipitação e evapotranspiração potencial anual, respectivamente. Destaca-se que para cumprir o objetivo desse trabalho, o IA foi gerado em dois momentos: cenários atuais (1970 – 2000) e futuros (2061 – 2080). Portanto, obteve-se a ETo e precipitação para ambos contextos.

Para a ETo foram usados os produtos elaborados no segundo capítulo, também disponíveis em: <https://github.com/lucasagus/Reference-evapotranspiration-data>. Salienta-se, que para as condições futuras, a ETo predita no segundo capítulo dessa tese foi modelada por meio do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) considerando o sexto relatório de avaliação (AR6). O estudo utilizou dois cenários do IPCC AR6, conhecidos como *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), um otimista (SSP126) em que se espera mitigação e estabilização das emissões de CO<sub>2</sub> mantendo a temperatura do ar global entre 1,5°C e 2°C até 2100. E outro pessimista (SSP585), o qual indica aumento da temperatura do ar deve em até 4°C.

A precipitação anual para o cenário atual e futuros foi obtida no *worldclim* 2.1 (disponível em: <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>). É imperativo enfatizar que foram estabelecidos os mesmos cenários e modelos previamente usados para obter a ETo (capítulo 2).

#### 2.4. Classificação Climática e áreas susceptíveis à desertificação

A partir do IA modelado para o cenário atual e futuro, analisou-se suas implicações espaciais para o SAB. Seguindo a metodologia proposta pelo Atlas mundial da desertificação formulado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), foi obtida a classificação climática e a espacialização da distribuição de áreas susceptíveis à desertificação no SAB (Tabela 1).

**Tabela 1** – Classificação Climática e Níveis de Susceptibilidade à Desertificação em Função do Índice de Aridez de Thornthwaite (1948).

Classes climáticas	Susceptibilidade à desertificação	Índice de Aridez
Hiperárido		< 0,05
Árido	Muito Alta	0,05 < 0,20
Semiárido	Alta	0,21 < 0,50
Subúmido Seco	Moderada	0,51 < 0,65
Subúmido Úmido		> 0,65

Fonte: Thornthwaite (1948); UNEP (1992).

#### 2.5. Análises estatísticas

Inicialmente, com intuito de entender a influência da precipitação e ETo nos níveis de aridez nos cenários atual e futuros, foram aplicadas regressões lineares simples. Para verificar



se houve mudança significativa nos valores de IA diante dos cenários de mudanças no clima, aplicou-se o teste de *kruskal-wallis* (K-W).

Na sequência, para compreender os padrões espaciais e os efeitos das mudanças climáticas futuras nos tipos climáticos e áreas susceptíveis à desertificação, foram gerados gráficos de conversões (isto é, diagrama de *Sankey*). Com esse gráfico observou-se quais classes se estenderão e decrescerão espacialmente até o final do século. Este procedimento foi feito com o pacote *ggplot2 alluvial* (Brunson, 2020).

### 3. Resultados

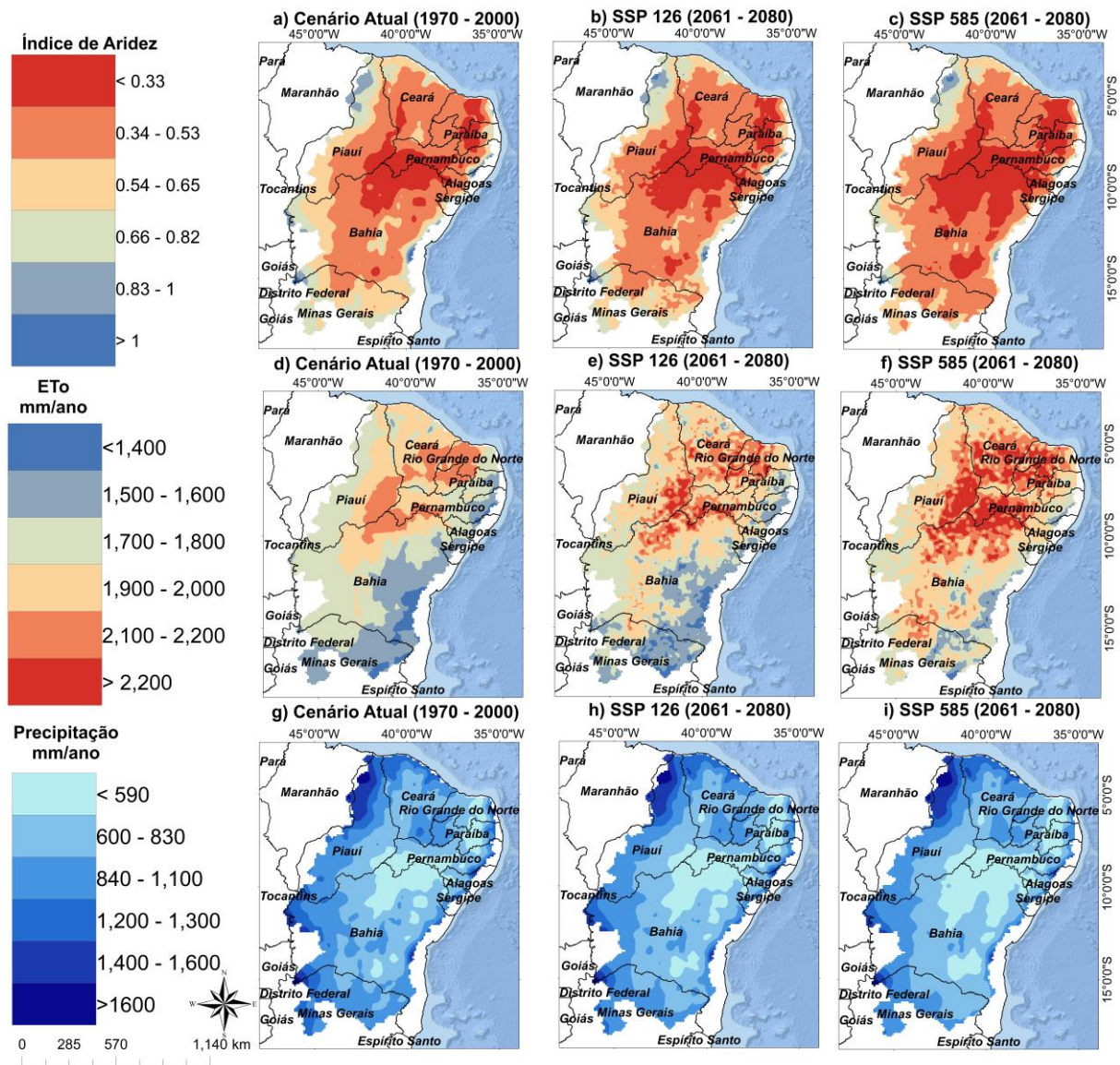
#### 3.1 Índice de Aridez (IA) no cenário atual (1970 – 2000) e futuros (2061 – 2080)

Os resultados indicaram que o SAB se tornará mais seco até o final do século. O índice de aridez (IA) apresentou um decréscimo significativo (K-W com *p-value* <0.05) nos cenários futuros em relação ao atual (Figura 3 a – c). A média do IA no cenário atual é de 0.49, e sofrerá decréscimo de 6% no cenário otimista (SSP 126) e 14% no pessimista (SSP 585), indicando intensificação da aridez.

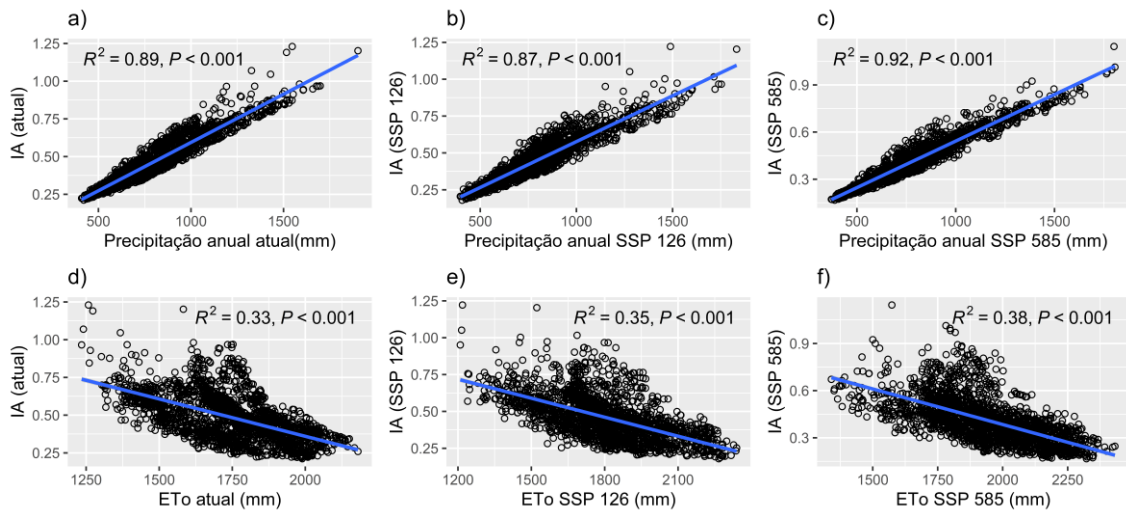
Os valores de IA até 0.33 deve expandir nas próximas décadas na ordem de 46.000 km<sup>2</sup> (+ 29%) no SSP 126 e 125.600 km<sup>2</sup> (+ 79%) no SSP 585 em relação ao cenário atual. Isso deve ocorrer principalmente na porção central do SAB, onde é predito um decréscimo da precipitação anual (< 590 mm) e aumento da ETo (> 2.300 mm) (Figura 3 d – i).

Esse comportamento é confirmado pelos resultados das regressões lineares, pois mostra que as faixas mais intensas de aridez ocorrem em porções com menores *inputs* pluviométricos e altas taxas de ETo (Figura 4 a – f). Também foi constatada a expansão de terras mais secas para o sul do SAB, ocupando principalmente ambientes úmidos do cenário atual. Nessa região, espera-se avanços de valores de ETo entre 1.900 a 2.200 mm e baixos *inputs* pluviométricos (600 – 830 mm) em perspectivas futuras.

**Figura 3** - Distribuição espacial do índice de aridez (IA), precipitação anual e evapotranspiração potencial (ETo) para o semiárido brasileiro nos cenários atual (1970 – 2000) e futuros (2061 – 2080).



**Figura 4** - Regressões lineares entre índice de aridez (IA), precipitação anual e a evapotranspiração potencial (ETo) nos cenários atual e futuros para o semiárido brasileiro.

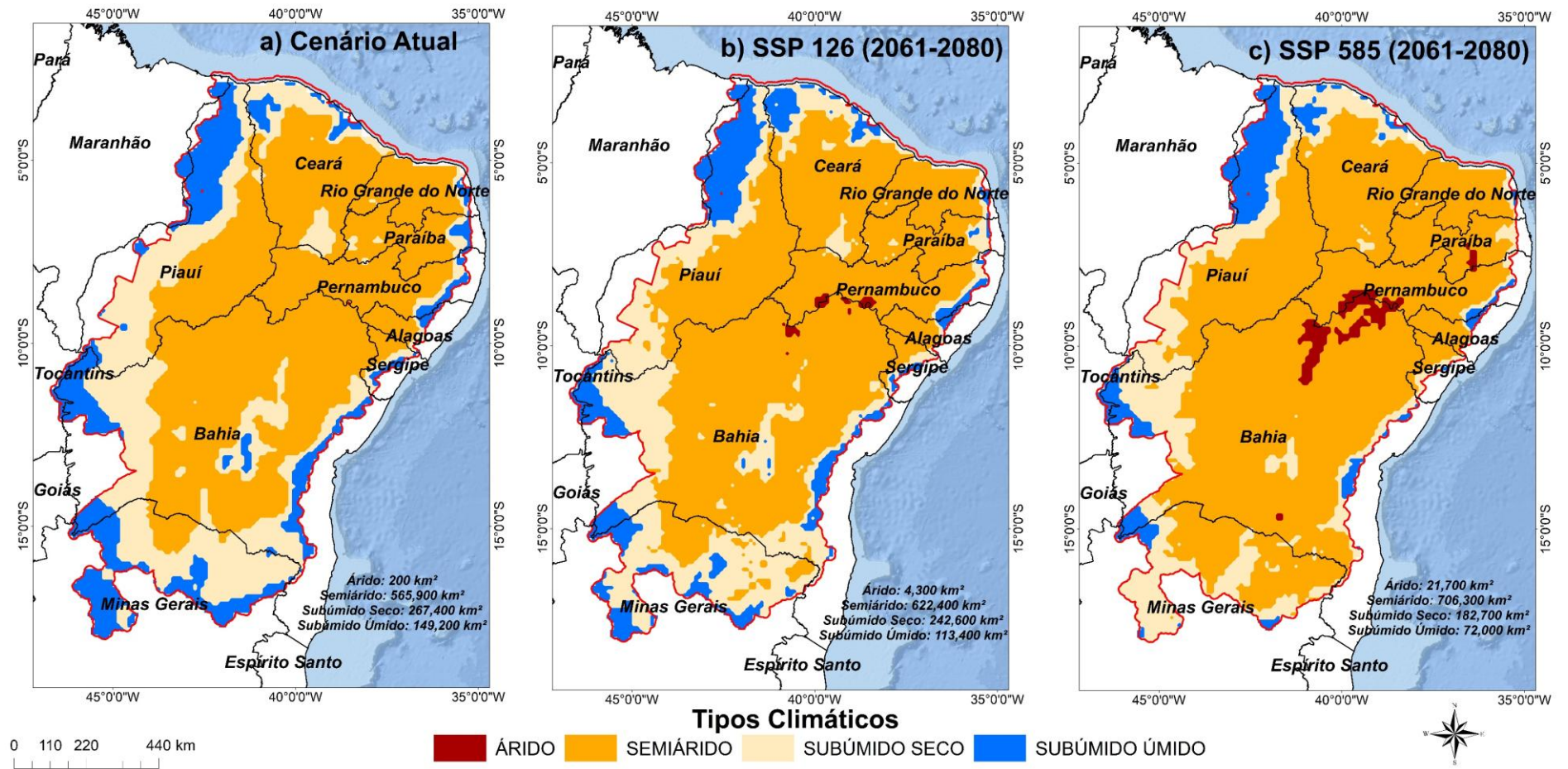


### 3.2. Classificação climática e áreas susceptíveis à desertificação

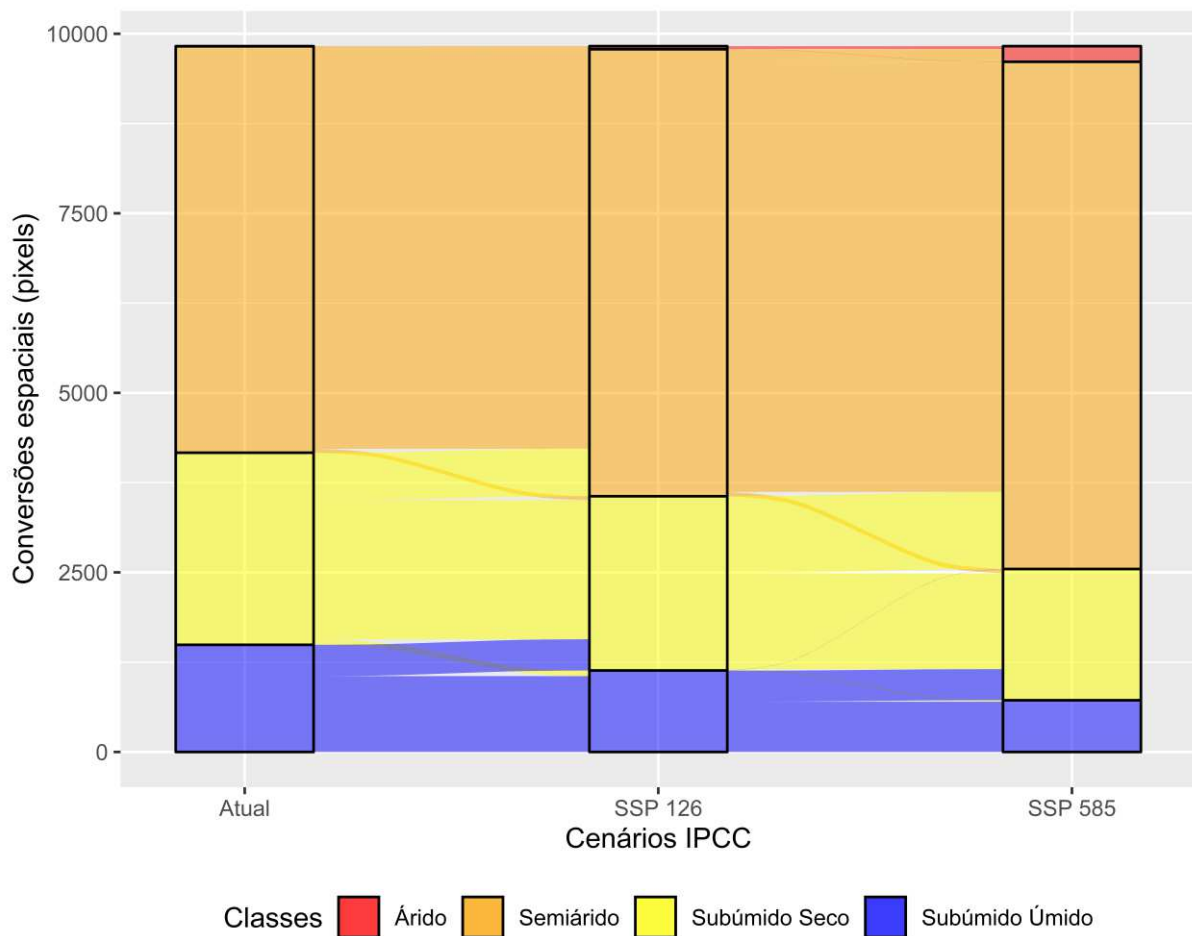
O SAB experienciará um aumento de climas com características secas, sobretudo em detrimento de classes mais úmidas (Figura 5). O clima árido, que correspondia a somente 200 km<sup>2</sup> no cenário atual, deve se estender na região em até 21.500 km<sup>2</sup> nas próximas décadas. Isso é esperado para ocorrer principalmente na porção central, sobre os estados da Bahia e Pernambuco, que no cenário atual apresentavam predomínio de clima semiárido (Figura 5 a – c). Embora as terras semiáridas tenham parte convertida para condições áridas, é esperado que esse tipo climático possa expandir em até 140.400 km<sup>2</sup> em cenários futuros, com avanços sobre o clima subúmido seco, que por sua vez, tende a substituir porções do subúmido úmido (Figura 6).



**Figura 5** - Distribuição Espacial das Classes Climáticas com base em Thornthwaite (1948) para o Semiárido Brasileiro nos cenários atual (1970 – 2000) e futuros (2061 – 2080).

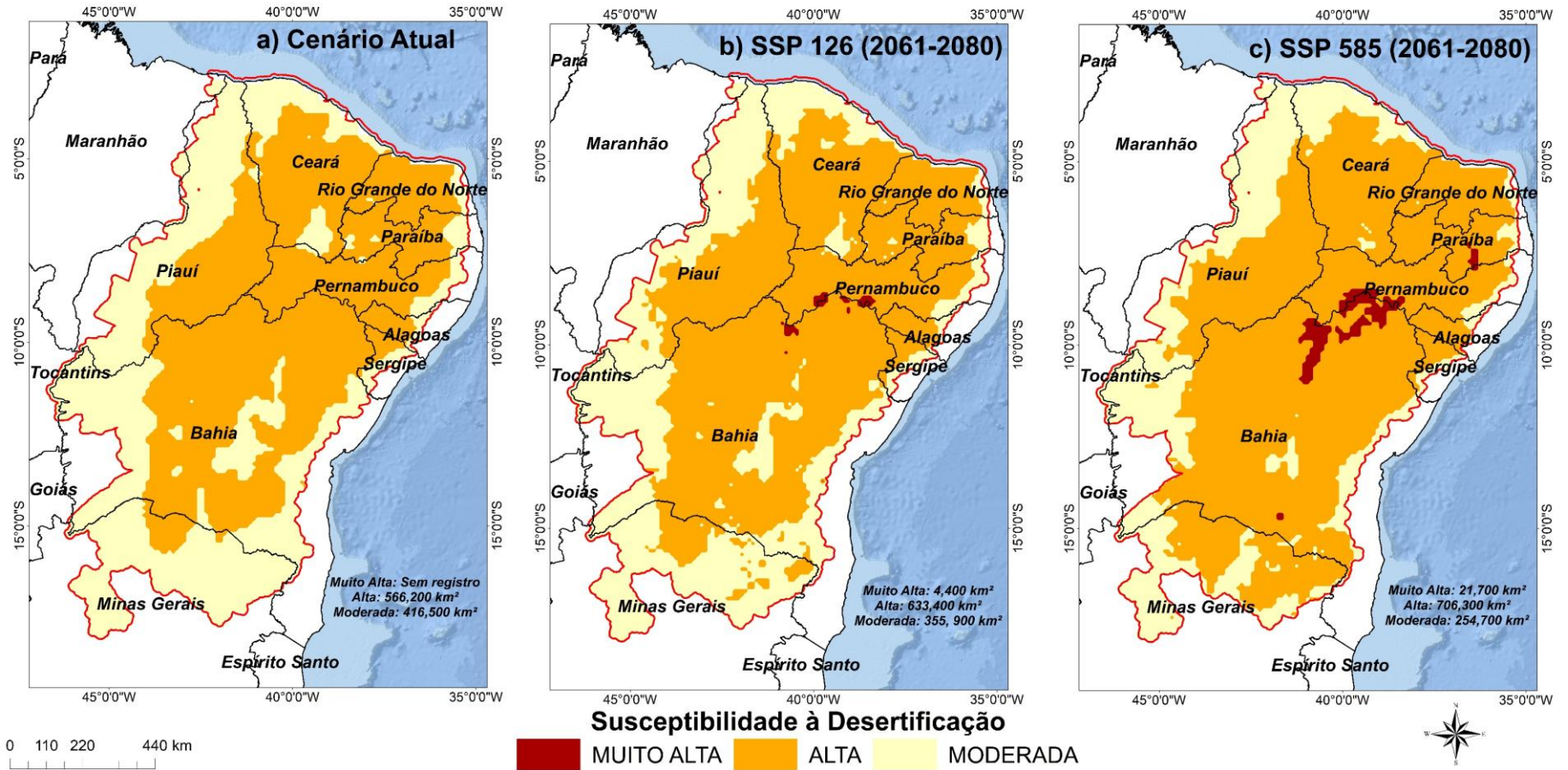


**Figura 6-** Gráfico de Sankey com as conversões dos tipos climáticos diante dos cenários de mudanças no clima.



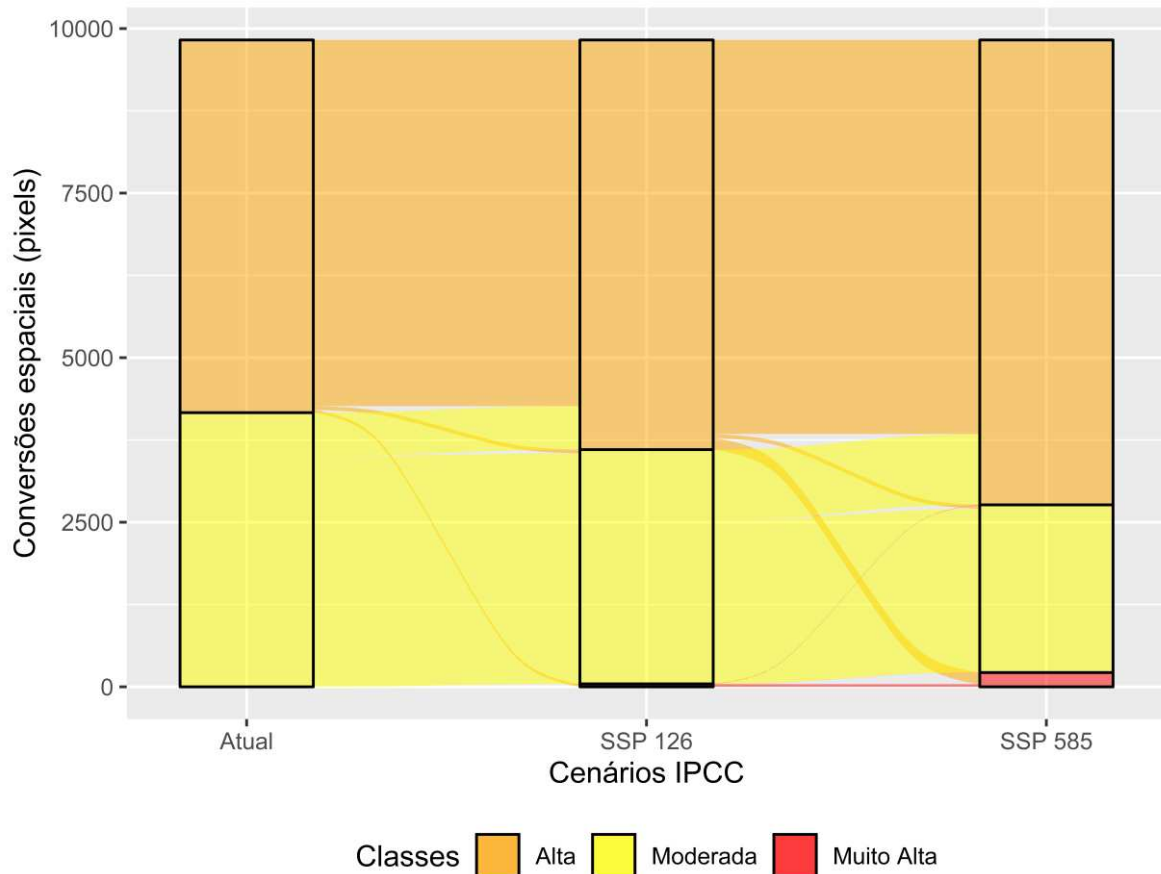
Em função da expansão de climas com condições mais secas, as áreas susceptíveis à desertificação são previstas para aumentarem nas próximas décadas (Figura 7 a – c). As terras com alta susceptibilidade à desertificação serão mais frequentes no SAB, com expansão de 622.400 a 706.300 km<sup>2</sup>. Essa classe mostrou-se mais propícia a avançar sobre terras previamente ocupadas com moderada susceptibilidade no cenário atual, sobretudo no sentido sul do SAB. Nesse caso, o semiárido norte mineiro (até a latitude 15° S) se tornará mais susceptível à desertificação (Figura 7). Enquanto na parte central do SAB, algumas extensões com predomínio de alta susceptibilidade no cenário atual devem experimentar susceptibilidade muito alta, coincidindo com o surgimento de clima árido, e os menores valores de IA para a área de estudo (< 0.33), sobretudo no norte da Bahia e sul de Pernambuco.

Figura 7 - Distribuição Espacial dos níveis de Susceptibilidade à Desertificação para o Semiárido Brasileiro nos cenários atual (1970 – 2000) e futuros (2061 – 2080).





**Figura 8** - Gráfico de sankey com as conversões das classes de Susceptibilidade à Desertificação diante dos cenários de mudanças no clima.



#### 4. Discussão

As mudanças climáticas intensificarão os níveis de aridez no SAB, impulsionando avanços de terras secas até o final do século. Essa evidência segue uma tendência global, pois diversas modelagens mostram que a aridez se intensificará em regiões semiáridas (Fernandez; Franchito; Rao, 2019; Burrell; Evans; De Kauwe, 2020; Denissen *et al.*, 2022). A intensificação e expansão de condições de aridez no SAB em cenários futuros será responsável por mudanças em características de tipos climáticos e consequentemente na susceptibilidade à desertificação na região (Fernandez; Franchito; Rao, 2019; Vieira *et al.*, 2021).

Estudos prévios também apontaram que diante de mudanças climáticas devido às condições de aridez, zonas de desertificação seguem tendência de amplificação. No contexto global, Kiruma e Moryama (2019), mostraram que as zonas áridas e hiper áridas aumentaram

cerca de 2.7%, tornando-se as terras mais secas e mais susceptíveis à desertificação. Enquanto na China, também considerando cenários de mudanças climáticas do IPCC, Ma *et al.*, (2019), mostraram que haverá retração de climas úmidos (até -12%) e expansão de zonas áridas (+ 0.54%) e semiáridas (+ 1.5%), conduzindo à processos de desertificação até o final do século. Em regiões mediterrâneas, modelagens espaciais evidenciam aumento de evapotranspiração potencial (+ 15 a 30%) e decréscimo de precipitação (- 20 a - 40%) em cenários futuros, influenciando na intensificação dos níveis de aridez, com áreas úmidas tornando-se mais secas e expansão de condições de desertificação (Carvalho *et al.*, 2022). Em escala nacional, estudo analisou as áreas susceptíveis à desertificação no Brasil, e mostrou que o SAB se destaca como a região mais seca do país, com surgimento de novos núcleos de desertificação nas próximas décadas (Moraes; Wanderley; Delgado, 2023).

Aproximadamente 23% das terras do SAB possuem núcleos em processos de desertificação em curso no contexto atual (Bezerra *et al.*, 2020). Esses núcleos preexistentes coincidem com as áreas projetadas para experienciar intensificação de desertificação em cenários futuros no nosso estudo. Duas regiões foram apontadas como *hotspots* de expansão de terras em processos de desertificação, isto é, as zonas central e o sul do SAB.

Na parte central, sobretudo nos estados da Bahia e Pernambuco, nossos resultados são consistentes com a tendência histórica, pois nas últimas décadas esses estados somaram aproximadamente 45.000 km<sup>2</sup> de terras convertidas em ambientes secos e susceptíveis à desertificação (Spinoni *et al.*, 2015). Em específico para Pernambuco, o Ministério do Meio Ambiente reconhece um núcleo de desertificação consolidado, Cabrobó, o qual certamente se amplificará diante das condições futuras do clima para o SAB.

Na parte sul do SAB, encontra-se o Norte de Minas Gerais, região apontada em diversos trabalhos como zona com alto potencial climático à desertificação (Santos *et al.*, 2022). Isso corrobora com os mapeamentos apresentados nesse estudo, especialmente os indicativos de expansão de zonas com alta susceptibilidade à desertificação. Essa porção é uma das mais pobres do estado de Minas Gerais (IDH 14% abaixo do nacional), com uma população de 1.6 milhões de habitantes (IBGE, 2010). Portanto, considerando que a expansão de zonas com alta susceptibilidade à desertificação pode afetar a produtividade das terras agrícolas e perdas econômicas (Cheng *et al.*, 2018), o norte de Minas Gerais pode se tornar altamente vulnerável às condições de mudanças climáticas esperadas até o final do século.

Estudos têm evidenciado que o decréscimo de precipitação, aumento da temperatura e condições áridas, possuem potencial para alterar os padrões de distribuição de ecossistemas vegetacionais no SAB. Fitofisionomias com características xerófilas podem ocupar a parte



central e expandir ao sul da região (Oliveira *et al.*, 2021; Arruda *et al.*, 2024), coincidindo em as áreas mapeadas com ‘‘alta’’ e ‘‘muito alta’’ susceptibilidade à desertificação nesse estudo. Portanto, caso esses cenários se concretizem, são esperadas consequências abruptas na dinâmica ecológica (D’Odorico *et al.*, 2013). Em estágios iniciais, as condições de aridez conduzem o deslocamento de uma vegetação com menores níveis de produtividade primária, que por sua vez, impulsiona mudanças no ambiente físico, isto é, perda de nutrientes e capacidade de armazenamento de água no solo (Adamo; Crews-Meyer, 2006), o que reforça a intensificação dos níveis de desertificação.

Este cenário de expansão das faixas de desertificação poderá também intensificar alterações em propriedades do solo. Os níveis de carbono poderão diminuir, pois haverá declínio da biomassa, conduzindo a decréscimo da agregação do solo, conseqüentemente esgotamento da matéria orgânica (Perez-Marin *et al.*, 2022), potencializando as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

A modelagem espacial da aridez, juntamente com as implicações nos tipos climáticos e zonas susceptíveis à desertificação é um importante instrumento para gestão e planejamento territorial e agroambiental da região semiárida, podendo auxiliar os tomadores de decisões. A presente pesquisa mostrou que em cenários futuros haverá intensificação das condições áridas e expansão de zonas susceptíveis à desertificação, isso é alarmante, sobretudo considerando os impactos desses processos para a população. A base de dados gerada nesse capítulo está disponível em: <https://zenodo.org/records/8061609>.

## Referências

ADAMO, Susana B; CREWS-MEYER, Kelley A. Aridity and desertification: exploring environmental hazards in Jáchal, Argentina. **Applied Geography**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 61–85, 2006.

ALLEN, Richard G *et al.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, [s. l.], v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALTHOFF, Daniel *et al.* ETo-Brazil: a daily gridded reference evapotranspiration data set for Brazil (2000–2018). **Water Resources Research**, [s. l.], v. 56, n. 7, p. e2020WR027562., 2020.

ARRUDA, Daniel M. *et al.* Amazonian vegetation types and indigenous lands threatened by upcoming climate change: Forecast impact for Brazilian biomes. **Austral Ecology**, [s. l.], v. 49, n. 1, p. e13369, 2024.

- BEZERRA, F. G. S. *et al.* Analysis of areas undergoing desertification, using EVI2 multi-temporal data based on MODIS imagery as indicator. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 117, p. 106579, 2020.
- BRUNSON, Jason Cory. Alluvial Plots in ggplot2. [s. l.], 2020.
- BURRELL, A. L.; EVANS, J. P.; DE KAUWE, M. G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km<sup>2</sup> of drylands towards desertification. **Nature Communications**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 3853, 2020.
- CARVALHO, D *et al.* Aridity and desertification in the Mediterranean under EURO-CORDEX future climate change scenarios. **Climatic Change**, [s. l.], v. 174, n. 3, p. 1–24, 2022.
- CHENG, Leilei *et al.* Estimation of the costs of desertification in China: a critical review. **Land Degradation & Development**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 975–983, 2018.
- DENISSEN, Jasper *et al.* Widespread shift from ecosystem energy to water limitation with climate change. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 12, n. 7, p. 677–684, 2022.
- D'ODORICO, Paolo *et al.* Global desertification: drivers and feedbacks. **Advances in water resources**, [s. l.], v. 51, p. 326–344, 2013.
- FERNANDEZ, Julio PR *et al.* Changes in Koppen–Trewartha climate classification over South America from RegCM4 projections. **Atmospheric Science Letters**, [s. l.], v. 18, n. 11, p. 427–434, 2017.
- FERNANDEZ, Julio PR; FRANCHITO, Sergio H; RAO, V Brahmananda. Future changes in the aridity of South America from regional climate model projections. **Pure and Applied Geophysics**, [s. l.], v. 176, n. 6, p. 2719–2728, 2019.
- FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 2017.
- HUANG, Jianping *et al.* Global semi-arid climate change over last 60 years. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. 1131–1150, 2016.
- IBGE. **Censo Demográfico**. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: Available at: <https://censo2010.ibge.gov.br/>. Accessed: 2023-11-27. Acesso em: 26 nov. 2023.
- KIMURA, Reiji; MORIYAMA, Masao. Recent trends of annual aridity indices and classification of arid regions with satellite-based aridity indices. **Remote Sensing in Earth Systems Sciences**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 88–95, 2019.
- KUHN, Max *et al.* Package ‘caret’. **The R Journal**, [s. l.], v. 223, p. 7, 2020.
- MA, Danyang *et al.* Sensitivity of arid/humid patterns in China to future climate change under a high-emissions scenario. **Journal of Geographical Sciences**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 29–48, 2019.

- MARENGO, Jose A.; BERNASCONI, Mauro. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, [s. l.], v. 129, n. 1, p. 103–115, 2015.
- MARQUES DA SILVA, Richarde *et al.* Geospatial assessment of eco-environmental changes in desertification area of the Brazilian semi-arid region. **Earth Sciences Research Journal**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 175–186, 2018.
- MORAES, Jessica B.; WANDERLEY, Henderson S.; DELGADO, Rafael C. Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios. **Natural Hazards**, [s. l.], v. 116, n. 2, p. 1463–1483, 2023.
- MOURA, Marks Melo *et al.* Temporal analysis of desertification vulnerability in Northeast Brazil using Google Earth Engine. **Transactions in GIS**, [s. l.], 2022.
- NAVARRO, Andrés *et al.* Towards better characterization of global warming impacts in the environment through climate classifications with improved global models. **International Journal of Climatology**, [s. l.], 2022.
- OLIVEIRA, Guilherme de Castro *et al.* Soil predictors are crucial for modelling vegetation distribution and its responses to climate change. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 780, p. 146680, 2021.
- PEREZ-MARIN, Aldrin Martin *et al.* Monitoring Desertification Using a Small Set of Biophysical Indicators in the Brazilian Semiarid Region. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 15, p. 9735, 2022.
- POUR, Sahar Hadi; ABD WAHAB, Ahmad Khairi; SHAHID, Shamsuddin. Spatiotemporal changes in aridity and the shift of drylands in Iran. **Atmospheric Research**, [s. l.], v. 233, p. 104704, 2020.
- RAO, Yingxue *et al.* Integrating ecosystem services value for sustainable land-use management in semi-arid region. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 186, p. 662–672, 2018.
- RIVERA-MARIN, Daniela; DASH, Jadunandan; OGUTU, Booker. The use of remote sensing for desertification studies: A review. **Journal of Arid Environments**, [s. l.], v. 206, p. 104829, 2022.
- SPINONI, Jonathan *et al.* Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen-Geiger classification and FAO aridity index. [s. l.], 2015.
- TEAM, R Core. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>, [s. l.], 2022.
- THORNTHWAITE, Charles Warren. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.
- VIEIRA, Rita Marcia DSP *et al.* Desertification risk assessment in Northeast Brazil: Current trends and future scenarios. **Land Degradation & Development**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 224–240, 2021.

VIEIRA, RM da Silva Pinto *et al.* Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 347–360, 2015.

WU, Yifan *et al.* Ecosystem service trade-offs and synergies under influence of climate and land cover change in an afforested semiarid basin, China. **Ecological Engineering**, [s. l.], v. 159, p. 106083, 2021.

ZHOU, Sha *et al.* Soil moisture–atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 38–44, 2021.

## CAPÍTULO 4: Influência da aridez sob condições de mudanças climáticas no vigor da vegetação do Semiárido Brasileiro – América do Sul

**Resumo:** a intensificação da aridez e a perda de vigor das vegetações em terras semiáridas são uma tendência. Para o Semiárido brasileiro (SAB), essa relação pode ser mais complexa, devido à diversidade de ecossistemas vegetacionais e suas diferentes características adaptativas, isto é, os domínios xerófilos (caatingas), os sazonais (savanas e florestas tropicais secas) e as florestas tropicais úmidas. Avaliamos a influência da aridez no vigor da vegetação do SAB considerando perspectivas de mudanças climáticas futuras. Hipóteses: i) a aridez reduzirá significativamente o vigor das florestas úmidas; enquanto as caatingas, savanas e as florestas tropicais secas não devem perder vigor de forma significativa. Empregamos cinco algoritmos de aprendizagem de máquina (BRNN, Cubist, Earth, RF e regressão linear) treinados com atributos climáticos, topográficos e pedológicos para prever o vigor vegetativo, representado pelo *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). As condições climáticas compreendem ao índice de aridez (IA – Thornthwaite) para o cenário atual (1970 – 2000) e futuro (2061 – 2080), baseado proposições do IPCC, isto é, SSP 126 e 585. A base de dados de solos foi obtida a partir da plataforma Soilgrids e a topográfica por meio do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). O RF obteve melhor performance para a predição do vigor vegetativo no SAB ( $R^2 = 0,72$  e erros entre 0,04 e 0,06). Confirmando a primeira hipótese, as florestas úmidas devem perder significativamente vigor vegetativo. Diferente do esperado, as caatingas e as florestas secas também irão perder vigor, enquanto as savanas terão acentuado esverdeamento. As zonas de coexistências (ecótonos) devem seguir o comportamento dos demais domínios e sofrer declínio no vigor vegetativo. Esses achados sugerem que as mudanças climáticas irão imprimir alterações severas nos ecossistemas vegetacionais do SAB.

**Palavras-Chave:** intensificação da aridez, ecossistemas, zona semiárida brasileira, modelagem, aprendizagem de máquina, cenários futuros.

### Influence of aridity under conditions of climate change on the vigor of vegetation in the Brazilian Semi-arid – South America

**Abstract:** the intensification of aridity and the loss of vegetation vigor in semi-arid lands are trends. For the Brazilian Semi-arid (SAB), this relationship may be more complex, due to the diversity of vegetation ecosystems and their different adaptive characteristics, that is, the xerophilic domains (caatingas), seasonal domains (savannas and dry tropical forests) and tropical forests moist. We evaluated the influence of aridity on the vegetation vigor of the SAB considering perspectives of future climate change. Hypotheses: i) aridity will significantly reduce the vigor of humid forests; while the caatingas, savannah, and tropical dry forests are not expected to lose strength significantly. We employed five machine learning algorithms (BRNN, Cubist, Earth, RF, and linear regression) trained with climatic, topographic, and pedological attributes to predict vegetative vigor, represented by the *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Climatic conditions include the aridity index (AI – Thornthwaite) for the current scenario (1970 – 2000) and future (2061 – 2080), based on IPCC propositions, that is, SSP 126 and 585. The soil database was obtained from the Soilgrids platform and the topographic database was obtained from the *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). RF performed better in predicting vegetative vigor in SAB ( $R^2 = 0.72$  and errors between 0.04 and 0.06). Confirming the first hypothesis, humid forests must significantly lose vegetative vigor. Different than expected, the caatingas and dry forests will lose vigor, while the savannas will have an accentuated greening. The coexistence zones (ecotones) must follow the behavior of the other domains and suffer a decline in vegetative vigor. These findings suggest climate change will severely change the SAB's vegetation ecosystems.

**Keywords:** intensification of aridity, ecosystems, Brazilian semi-arid zone, modeling, machine learning, future scenarios.

## 1. Introdução

O Brasil acomoda uma das zonas semiáridas mais biodiversas do mundo. Conhecida como Semiárido brasileiro (SAB), essa faixa localizada na porção nordeste da América do Sul desempenha importantes papéis ambientais no contexto global, especialmente quanto à prestação de serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono e regulação de fluxos de umidade e calor na interface superfície – atmosfera (Mendes *et al.*, 2020; Borges *et al.*, 2024; Santos e Silva *et al.*, 2024). Isso pode ser atribuído aos variados mosaicos de vegetações coexistentes no SAB, tais como os domínios xerófilos, as savanas sazonais e as florestas tropicais secas e úmidas (IBGE, 2004).

Os benefícios prestados pelos ecossistemas vegetacionais do SAB têm sido ameaçados nas últimas décadas. Historicamente, a região é marcada por secas severas que vêm imprimindo condições de estresse hídrico para as vegetações e afetando sua capacidade de resiliência (Barbosa, 2024). Estudos prévios mostraram que nas últimas décadas o SAB experienciou aumento na frequência e intensidade das secas severas (Costa *et al.*, 2020; Barbosa, 2024). Essa condição deve se agravar, pois simulações baseadas em cenários propostos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indicam que SAB deve seguir uma tendência global e experienciar uma intensificação da aridez em futuro próximo (Chou *et al.*, 2014; Vieira *et al.*, 2015; Marengo *et al.*, 2020; Zhang; Evans; Burrell, 2024).

A aridificação é um dos principais vetores de mudanças na estrutura e funcionamento dos ecossistemas, pois induz ao decréscimo de água na superfície, limitando as atividades metabólicas das vegetações (Berdugo *et al.*, 2020). Similar a projeções globais (Bonannella *et al.*, 2023; Allen *et al.*, 2024), os principais efeitos da aridificação prevista para o SAB são as alterações espaciais nos domínios de vegetação, sobretudo a invasão de ecossistemas xerófilos sobre florestas tropicais e savanas (Salazar; Nobre; Oyama, 2007; Oliveira *et al.*, 2021; Maksic *et al.*, 2022; Arruda *et al.*, 2024). Contudo, embora esses trabalhos indiquem importantes avanços na compreensão dos impactos da aridez na dinâmica vegetacional do SAB, ainda existe uma lacuna na investigação de como estarão os níveis de vigor dos ecossistemas sob intenso estresse hídrico. Pesquisas realizadas em algumas partes do globo terrestre sugerem que essa é uma medida crucial para um planejamento sustentável dos ecossistemas considerando os efeitos de mudanças climáticas (Kong *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2023).

Para a estimativa do vigor vegetativo o uso de dados de sensoriamento remoto é sugerido, especialmente devido à eficiência em cobertura espaço-temporal, bem como a facilidade de acesso a esses produtos (Jiang; Liu; Xu, 2023). O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), por exemplo, é um dos mais recomendados. Isso porque o NDVI é mais sensível às variações de área foliar e do conteúdo de clorofila, diferente de outros índices, como a produtividade primária bruta e líquida (GPP e NPP) e o índice de área foliar (IAF) (Higgins; Conradi; Muhoko, 2023).

Modelagens regionais e globais considerando a relação entre índice de aridez e o NDVI indicam uma tendência de declínio no vigor das vegetações (Zhao *et al.*, 2021; Kimura; Moriyama, 2024). Contudo, em nossa área de estudo, devido à coexistência de domínios vegetacionais com diferentes características fenológicas, essa relação pode ser mais complexa. Por exemplo, as caatingas, florestas tropicais secas e as savanas são vegetações que vêm desenvolvendo mecanismos de adaptação às condições de semiaridez ao longo do tempo (Rizzini, 1976; Fernandes *et al.*, 2022). Por outro lado, as florestas úmidas são adaptadas aos elevados aportes pluviométricos e umidade no solo proporcionados pela corrente do Brasil, no Oceano Atlântico Sul. Portanto, considerando a esperada intensificação da aridez para o SAB, levantamos as seguintes hipóteses: i) as florestas úmidas devem sofrer os declínios mais intensos no vigor, ii) enquanto as caatingas, savanas e as florestas tropicais secas, mesmo diante da intensa aridez esperada, não devem perder vigor significativamente.

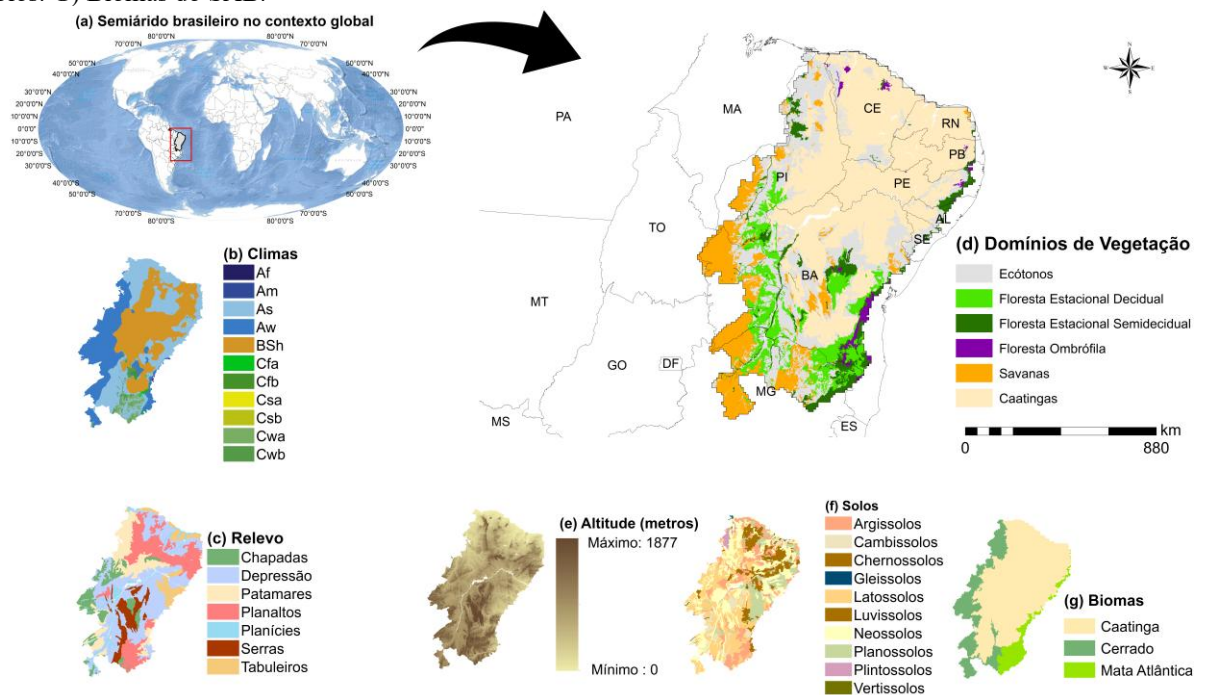
Para investigar essas hipóteses, além das condições de aridez (fator climático), devem ser considerados aspectos pedológicos e altimétricos, atributos fundamentais para a distribuição e funcionamento da vegetação (Oliveira *et al.*, 2021; Kong *et al.*, 2023; Arruda *et al.*, 2024). Considerando a complexidade da relação entre os atributos ambientais e o vigor da vegetação, estudos anteriores sugerem o uso de algoritmos de aprendizagem de máquina (*machine learning*) (Kong *et al.*, 2023; Nguyen; Seeboonruang; Chen, 2023). Essa estrutura metodológica permite a inserção de covariáveis com múltiplas características ambientais e compreende as interações complexas entre os fenômenos analisados (Reichstein *et al.*, 2019).

Dessa forma, avaliamos a influência das condições de aridez no vigor das vegetações do SAB considerando cenários futuros de mudanças climáticas (2061 – 2080) a partir de algoritmos de aprendizagem de máquina. Em nosso conhecimento, até o presente momento não existem estudos que abordaram essas questões para o SAB. Portanto, nosso trabalho pode fornecer informações valiosas para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis frente as ameaças climáticas que assolam a região semiárida do Brasil.

## 2. Área de estudo

A zona semiárida brasileira (SAB) está localizada na porção nordeste da América do Sul entre as latitudes 0° e 20° S (Figura 1a). A região é marcada pela coexistência de uma ampla variedade de mosaicos vegetacionais (Figura 1d). A distribuição desses ecossistemas vegetacionais é controlada por atributos da paisagem, tais como condições climáticas, relevo e os solos.

**Figura 1** - Mapa de localização e caracterização da área estudada. A) Semiárido brasileiro no contexto global. B) Distribuição dos climas no SAB, conforme classificação de Alvares *et al.*, (2013). Af: Clima tropical úmido ou superúmido; Am: Clima tropical úmido ou subúmido; As: Clima tropical quente e úmido; Aw: Clima tropical, com inverno seco; BSh: Clima Semiárido quente; Cfa: Clima subtropical, com verão quente; Cfb: Clima temperado, com verão ameno; Csa: clima temperado com verão quente e seco; Csb: clima temperado com verão seco e fresco; Cwa: Clima subtropical de inverno seco; Cwb: Clima subtropical de altitude. C) Unidades de relevo do SAB. D) Domínios de Vegetação analisados. E) Altitude (Modelo Digital de Elevação – MDE). F) Tipos de solos. G) Biomas do SAB.



O SAB é tipicamente marcado pela ocorrência do clima BSh, com intensas condições de aridez (Figura 1c). Em um contexto paleoclimático, o predomínio da aridez no SAB foi responsável pela estruturação de superfícies aplainadas (altitude entre 340 e 540 m) por meio de intemperismo físico, especialmente a depressão Sertaneja (Figura 1c, e). Devido à exumação do escudo cristalino, essas superfícies planas são caracterizadas pela presença predominantemente de solos rasos (Figura 1f). Essa junção de atributos condiciona a aptidão para ecossistemas xerófilos, como as caatingas (Fernandes *et al.*, 2022).



Climas tropicais com aspectos de sazonalidade também ocorrem no SAB (isto é, As e Aw) (Figura 1c). Nos setores norte/sul e leste, sobre a Mata Atlântica e parte do Cerrado, há predomínio de condições tropicais quentes e úmidas (As), características que governam a dinâmica dos ecossistemas nessa faixa, especialmente as florestas secas (deciduais e semideciduais). Essas Florestas são caracterizadas por sua adaptação à sazonalidade, isto é, a queda de 50 a 90% das folhas para evitar a perda excessiva de água por evapotranspiração na estação mais seca do ano (Murphy; Lugo, 1986).

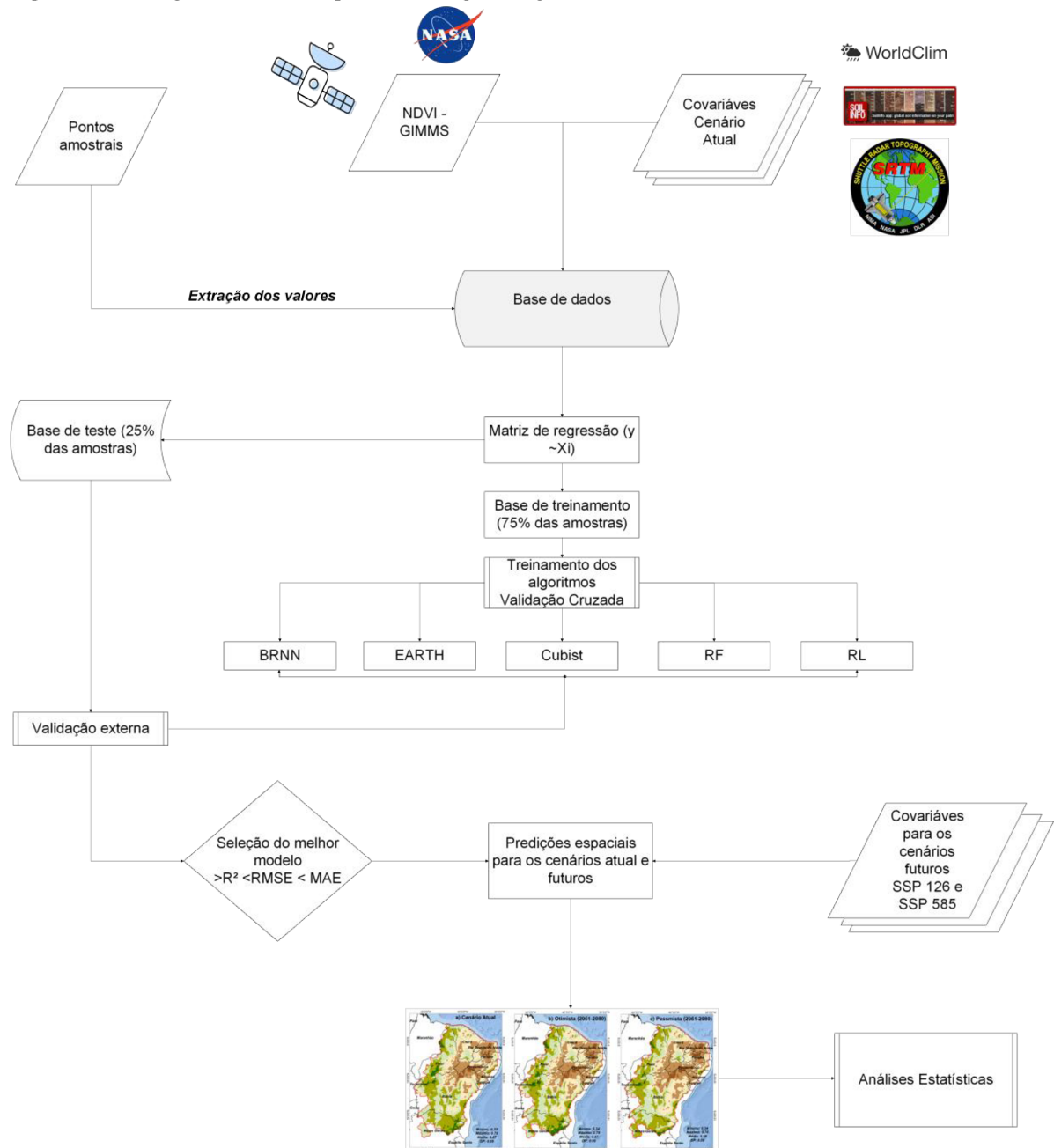
No setor oeste, a classificação climática de Alvares *et al.*, (2013) indica distribuição de condições tropicais quentes e secas (Aw). Essa classe climática coincide com os relevos característicos do bioma Cerrado, tais como os planaltos, patamares e as chapadas (Figura 1c, g). As superfícies planas influenciadas por climas tropicais, com características sub-úmidas (Figura 1b), proporcionam a formação de solos profundos e bem drenados (sobretudo os Latossolos; Figura 1f), ambientes propícios para a distribuição das savanas (Ribeiro; Walter, 2008).

Na borda sudeste do SAB, especificamente no bioma Mata Atlântica, são encontradas as florestas ombrófilas, as vegetações mais úmidas da região (Figura 1d, g). Esses ecossistemas são influenciados diretamente pelos aspectos climáticos de mesoescala, sobretudo o aporte pluviométrico oriundo do Oceano Atlântico Sul.

### **3. Materiais e Métodos**

A elaboração desse estudo consistiu nas seguintes etapas: i) obtenção da variável dependente (NDVI); ii) montagem da base de dados com as covariáveis independentes; iii) amostragem, treinamento e validação dos algoritmos; iv) predição espacial para os cenários atual e futuros; v) e finalmente, as análises estatísticas (Figura 2).

**Figura 2** – Fluxograma com as etapas metodológicas seguidas no estudo.



### 3.1. Variável dependente (NDVI)

A variável alvo foi o NDVI, um índice amplamente utilizado como proxy para compreender o vigor da vegetação (Nguyen; Seeboonruang; Chen, 2023; Teng *et al.*, 2023). Sua formulação, elaborada por Tucker (1979), é baseada na normalização dos espectros do infravermelho próximo, que compreende a alta reflectância da vegetação, e do vermelho visível, canal do espectro em que as superfícies vegetadas absorvem mais radiação devido à interação com a clorofila.

O NDVI é oriundo do *Global Inventory Monitoring and Modeling System* (GIMMS 3g), via sensor *The Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) com uma resolução espacial de 10 km. Esse produto é amplamente usado em estudos sobre monitoramento da vegetação (Zhao et al., 2021), especialmente considerando seus padrões de qualidade, pois em sua formulação foi submetido a processamentos de calibração para minimizar os efeitos atmosféricos (Pinzon; Tucker, 2014).

Os dados foram obtidos por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE). Os produtos compreendem a mediana anual para o intervalo entre 1981 e 2000, isto é, 19 tempos. Este período foi utilizado para compatibilizar com a disponibilidade de dados climáticos do contexto atual (1970 – 2000). Finalmente, os 19 tempos foram compilados em uma única imagem mediana. O uso da mediana é justificado por ser uma medida de tendência central que não é influenciada por valores atípicos na série temporal.

### 3.2. Covariáveis

Selecionamos cinco covariáveis ambientais, que refletem o contexto climático, pedológico e topográfico da região. Os dados climáticos correspondem ao índice de aridez (IA – Thornthwaite) para o cenário atual (1970 – 2000) e perspectivas futuras (2061 – 2080). O IA é uma medida que considera o grau de secura das terras. Quanto menor o IA, mais secos são os ambientes, enquanto zonas com altos valores possuem terras mais úmidas. Esses dados foram obtidos em Silva *et al.*, (2023 – capítulo 3, disponível em: <https://zenodo.org/records/8061609>) com resolução espacial de 10 km.

No estudo de Silva *et al.*, (2023) o IA foi modelado para os cenários futuros com base em projeções do IPCC por meio do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) considerando o sexto relatório de avaliação (AR6). O estudo utilizou dois cenários do IPCC AR6, chamados de *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP). Um otimista (SSP126), que se enquadra nos objetivos do Acordo de Paris, isto é, mitigação e estabilização das emissões de CO<sub>2</sub> mantendo a temperatura do ar global entre 1,5°C e 2°C até 2100. Enquanto o pessimista (SSP585), indica que a temperatura do ar deve se elevar em 4°C, essencialmente devido à intensificação das emissões de CO<sub>2</sub> em função das atividades antropogênicas.

Usamos o Modelo Digital de Elevação (MDE-SRTM) (Van Zyl, 2001) para representar o aspecto topográfico (altitude), uma covariável essencial para a distribuição da vegetação. As covariáveis pedológicas foram obtidas na plataforma *Soilgrids* (Poggio *et al.*, 2021), e compreendem à características químicas do solo em profundidade entre 0 e 5 cm, sendo:

Capacidade de Troca Catiônica (CTC), conteúdo de argila e estoque de carbono no solo (CCOS). A partir do método de interpolação bilinear reamostramos as covariáveis topográficas e pedológicas para a mesma resolução do IA (10 km).

### 3.3. Amostragem, treinamento e validação

Distribuímos 2000 pontos amostrais aleatórios sobre o SAB (os mesmos usados nos capítulos anteriores), cobrindo significativamente a área de estudo. A partir desses pontos montamos uma matriz de regressão ( $y \sim x_i$ ), com os valores extraídos da variável dependente ( $y$  = mediana do NDVI entre 1981 e 2000) e das covariáveis ambientais selecionadas ( $x_i$ ) para o cenário atual (1970 – 2000).

Separamos o conjunto de amostras em 75% para treinamento e 25% para validação (teste) dos algoritmos de *machine learning*. Os algoritmos usados foram: *Bayesian Regularized Neural Networks* (BRNN) (Rodriguez; Gianola, 2016), *Cubist* (Kuhn; Quinlan, 2018), *Multivariate Adaptive Regression Spline* (Earth) (Milborrow; Tibshirani, 2019), regressão linear e *Random Forest* (RF) (Breiman, 2001).

Treinamos os algoritmos por meio da técnica de validação cruzada (*Cross-Validation*). Neste método, a base de treino é dividida em 10 partes e treinada de forma iterativa em cinco rodadas. A partir da validação cruzada obtivemos o desempenho dos algoritmos na fase de treino. Ainda nessa fase, o RF forneceu o *ranking* com as covariáveis mais explicativas, com grau de importância (*overall%*) variando de 0 a 100.

Com os 25% dos dados não vistos (teste) pelos algoritmos durante o treino, realizamos a validação externa (*hold-out-test*). A performance dos modelos no treino e validação externa foi mensurada a partir das métricas estatísticas  $R^2$ , RMSE e MAE. Na predição espacial, usamos o melhor modelo ( $> R^2$  e  $< RMSE$  e MAE) associado com os *rasters* do cenário atual.

### 3.4. Predição espacial nos cenários futuros

Predizemos o NDVI para os cenários futuros a partir do mesmo modelo usado no cenário atual. Como feito em estudos prévios (Oliveira *et al.*, 2021; Arruda *et al.*, 2024), mantivemos os *rasters* do MDE e os dados de solos, assumindo que não haverá mudanças significativas até 2080. Os dados mutáveis para os cenários futuros compreendem ao contexto climático. Portanto, usamos os IAs para as perspectivas otimista (SSP 126) e pessimista (SSP 585).

### 3.5. Análises estatísticas

Aplicamos o teste t de *Student* para verificar se as mudanças climáticas induzirão alterações significativas na distribuição espacial do NDVI no SAB. O teste foi realizado considerando cenário atual comparado aos futuros. A mudança foi significativa quando o valor-p se manteve inferior a 0,05.

Para compreender os efeitos das mudanças no clima sobre os domínios de vegetação do SAB, obtivemos uma base cartográfica no Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA) elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na escala de 1:250.000. Selecionamos os domínios de vegetação mais expressivos territorialmente, isto é, a caatingas (Caa), ecótonos (Eco), floresta estacional decidual (FED), floresta estacional semi-decidual (FES), floresta ombrófila (OMB) e as savanas (Sav) (Figura 1).

Para a análise estatística, convertemos os polígonos das vegetações em *raster*, posteriormente em pontos. Isso permitiu uma cobertura significativa das extensões dos domínios vegetacionais do SAB. A partir dos pontos, extraímos os valores de NDVI para os cenários atual e futuros. Usamos o teste de *Kruskal-Wallis* (KW) seguido do teste de *Dunn* para verificar quais domínios de vegetação serão afetados significativamente (valor-p <0,05) com perda ou ganho de vigor diante das mudanças no clima até o final do século.

Adicionalmente, avaliamos as diferenças ( $\Delta$ NDVI) entre o NDVI dos cenários atual e futuros para cada domínio de vegetação (Equação 01):

$$\Delta\text{NDVI} = \text{CF} - \text{CA} \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde CF são os cenários futuros (otimista e pessimista) e CA é o cenário atual.

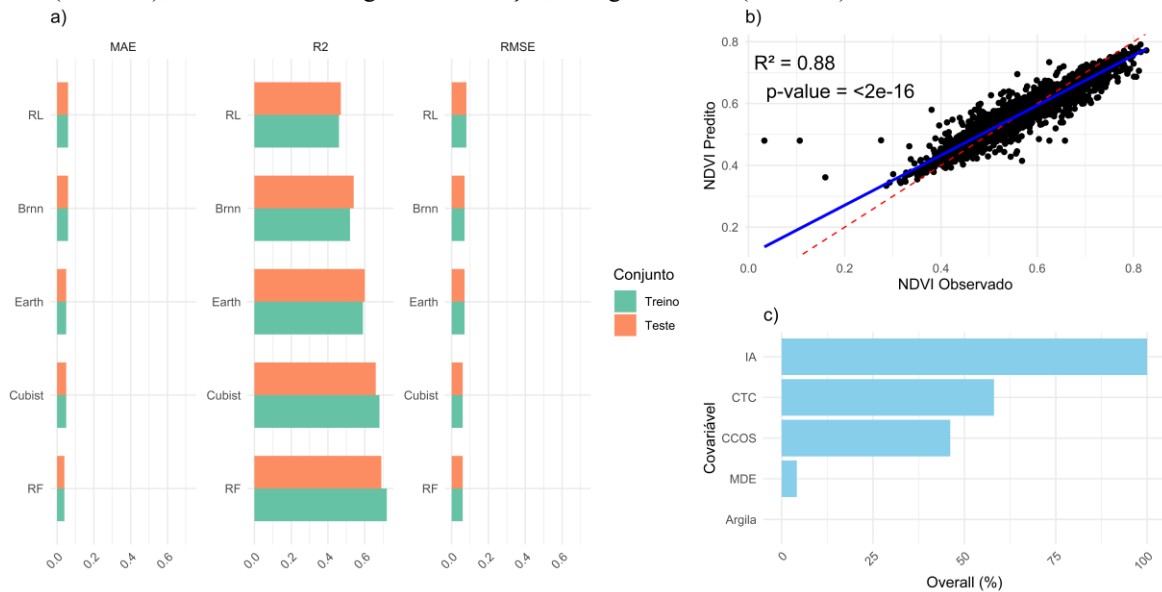
## 4. Resultados

### 4.1. Performance dos modelos e importância das covariáveis

A validação-cruzada e a validação externa mostraram que embora não tenha diferença significativa (K-W = valor-p > 0,05) entre as métricas dos modelos avaliados, o RF obteve melhor performance para a predição espacial do NDVI no SAB (Figura 3a). O modelo elaborado a partir do RF capturou entre 69% e 72% da variação do NDVI, com baixos erros estimados (0,04 a 0,06). Os valores de NDVI preditos pelo RF mostraram um ajuste de 88% ( $R^2 = 0.88$ ) com os dados observados (Figura 3b), reforçando o potencial do modelo.

Ainda, com base no RF obtivemos o *ranking* de importância entre as covariáveis (Figura 3c). O IA é indicado como a covariável mais importante para explicar a distribuição do NDVI no SAB (*Overall%* = 100%), seguido de CEC (58%) e CCOS (46%).

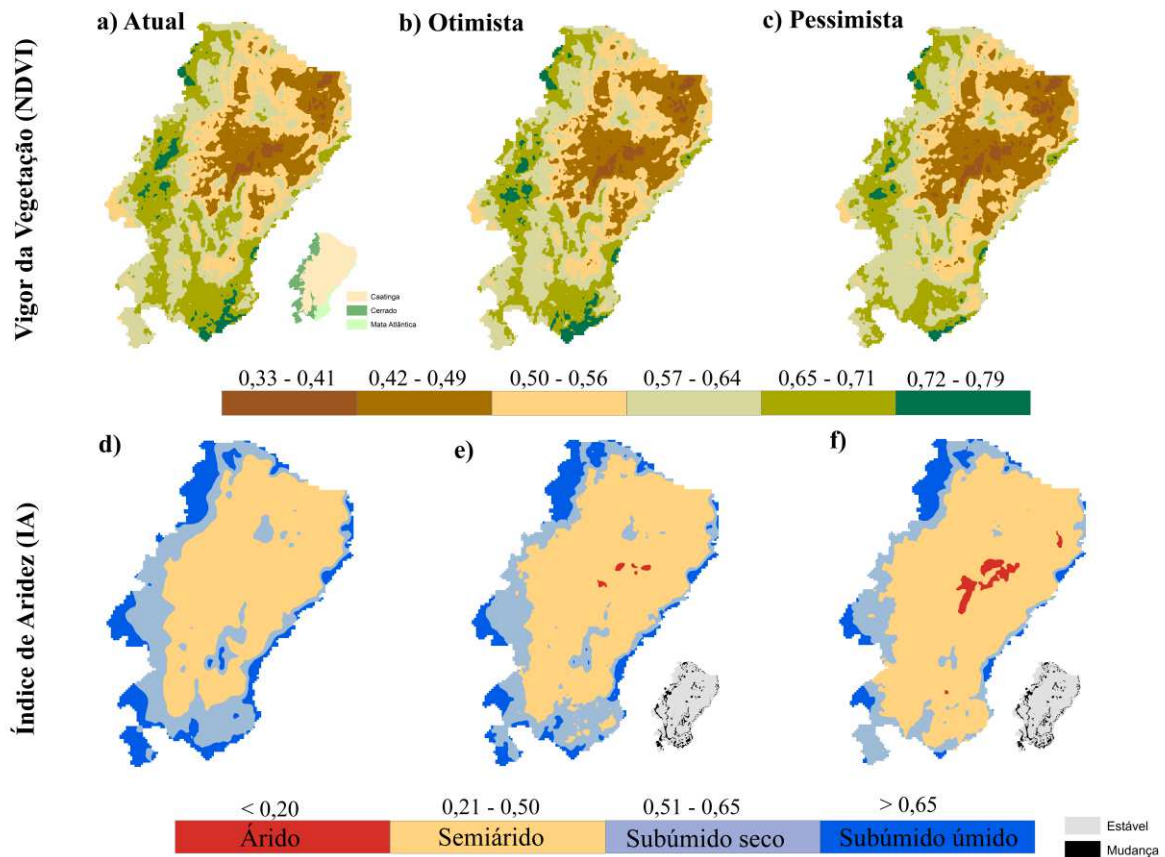
**Figura 3** - A) Métricas de desempenho dos algoritmos avaliados. BRNN: *Bayesian Regularized Neural Networks*; Earth: *Multivariate Adaptive Regression Spline*; RF: *Random Forest*. RL: modelo de regressão linear. B) Regressão linear entre o melhor modelo (RF) e os dados reais. C) Ranking das covariáveis mais explicativas do modelo. IA: índice de aridez; CTC: Capacidade de Troca Catiônica (0 a 5cm); CCOS: Conteúdo de carbono no solo (0 a 5 cm), MDE: Modelo Digital de Elevação; e Argila no solo (0 a 5 cm).



#### 4.2. Distribuição espacial do NDVI nos cenários atual (1970 – 2000) e futuros (2061 – 2080) a partir da variação do Índice de Aridez

Nossos resultados mostraram que as variações espaciais do IA em perspectivas futuras serão responsáveis por mudanças significativas (teste t com valor-p < 0,05) na distribuição do vigor vegetacional no SAB (Figura 4).

**Figura 4** – Distribuição espacial do vigor da vegetação (NDVI) e índice de aridez para os cenários atual (1970 – 2000) e futuros (2061 – 2080). No frame ‘a’ está disposto também o mapa de biomas do SAB. Nos frames ‘e’ e ‘f’ tem-se mapas de estabilidade (cinza) e mudança (preto) do IA comparando os cenários futuros com o atual.



As terras com maior vigor vegetacional no cenário atual (NDVI = 0,72 a 0,79) se estendem em 33.600 km<sup>2</sup> do SAB, sobretudo em porções do bioma Cerrado (oeste) e Mata Atlântica (sudeste), sobre condições subúmidas (IA = 0,51 a > 65) (Figura 4a). Em projeções pessimistas, é esperado que os maiores níveis de vigor correspondam a somente 18.700 km<sup>2</sup> da região, indicando uma queda de 44% em sua extensão. Esse declínio coincide com a expansão de faixas semiáridas (IA = 0,21 a 0,50), que representavam 58% (~ 566.000 km<sup>2</sup>) do território no cenário atual e devem aumentar em +24% em perspectivas mais pessimistas (Figura 4c).

Além disso, os resultados também sugerem uma estabilidade dos valores de NDVI entre 0,65 a 0,71 no SAB (segundo maior intervalo), com leve declínio de 1 a 4% nos cenários otimista e pessimista. Isso ocorrerá sobretudo na porção oeste, sobre o bioma Cerrado, zona em que haverá manutenção das condições subúmidas nas próximas décadas (Figuras 4b, c).

Por outro lado, as zonas com os menores níveis de vigor (NDVI < 0,41) se estendem em 20.000 km<sup>2</sup> do SAB, concentrando-se sobre o bioma Caatinga (parte central), compreendendo terras com elevada aridez (IA < 0,50) (Figura 4a, d). Em condições pessimistas,

essas terras com menores níveis de vigor devem aumentar em +72% (14.000 km<sup>2</sup>), acompanhando a expansão da aridez na região, essencialmente sobre os biomas Caatinga e Mata Atlântica (Figura 4f, e). Mesmo em perspectivas otimistas, as terras com menor vigor vegetacional são esperadas para expandir em +28% (aproximadamente 5700 km<sup>2</sup>) do território do SAB.

### 4.3. Impactos da aridez no vigor por domínio de vegetação

Quase todos os domínios de vegetação do SAB devem perder significativamente vigor vegetacional (isto é, queda no NDVI) nas próximas décadas (Tabela 1 e Figura 5). As Savanas são uma exceção, pois apresentarão ganho em seus níveis de vigor.

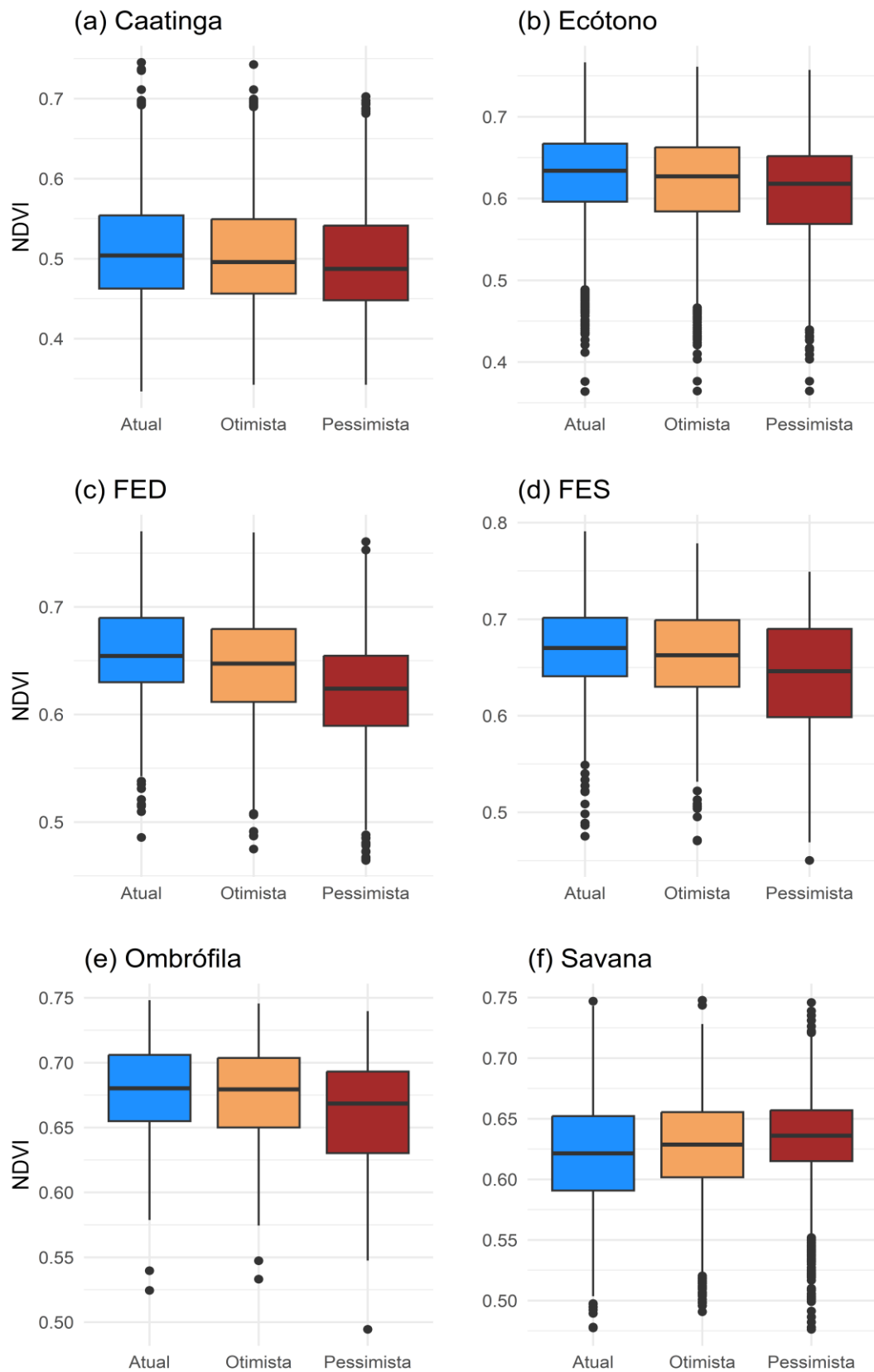
**Tabela 1** – Estatísticas indicando se houve mudanças significativas no vigor vegetativo dos domínios de vegetação no semiárido brasileiro comparando o cenário atual e os futuros (otimista e pessimista).

	Valores-Z	p-não ajustado	p-ajustado
<b>Caatinga</b>			
Atual vs Otimista	4,64	0,00	0,00
Atual vs Pessimista	10,74	0,00	0,00
<b>Ecótono</b>			
Atual vs Otimista	4,31	0,00	0,00
Atual vs Pessimista	10,31	0,00	0,00
<b>Floresta Estacional Decidual</b>			
Atual vs Otimista	4,97	0,00	0,00
Atual vs Pessimista	14,86	0,00	0,00
<b>Floresta Estacional Semidecidual</b>			
Atual vs Otimista	1,96	0,05	0,15
Atual vs Pessimista	7,24	0,00	0,00
<b>Floresta Ombrófila</b>			
Atual vs Otimista	0,42	0,68	1,00
Atual vs Pessimista	2,93	0,00	0,01
<b>Savana</b>			
Atual vs Otimista	-3,90	0,00	0,00
Atual vs Pessimista	-7,93	0,00	0,00

**Nota:** valores de p abaixo de 0,05 indicam que houve mudança significativa. Os valores-Z indicam o quanto as diferenças entre os grupos analisados são distantes das médias em termos de desvios padrão (quanto mais distante de 0, para mais ou menos, indica diferença significativa). Quando positivo, sugere que a média do cenário atual é maior em relação aos cenários otimista e pessimista. Em contrapartida, quando são negativos, a média do cenário atual tende a ser menor se comparado aos cenários futuros (otimista e pessimista).



**Figura 5** - Boxplots mostrando a distribuição do NDVI dos domínios de vegetação no SAB nos cenários atual e futuros.



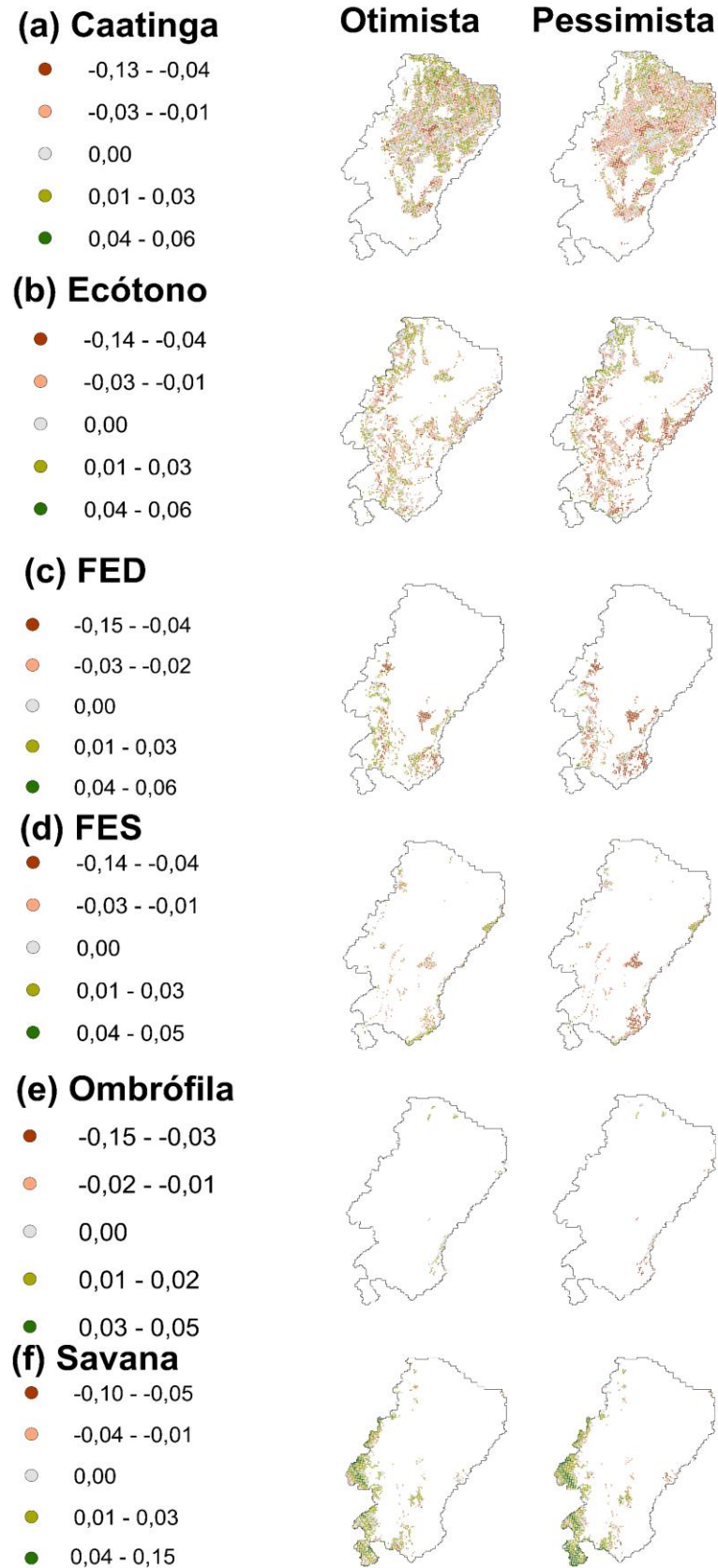
Entre os domínios de vegetação do SAB afetados pela intensificação da aridez em perspectivas futuras, as florestas tropicais (úmidas e secas) estão sujeitas aos declínios mais intensos no vigor vegetacional (Figura 5). As florestas ombrófilas, por exemplo, apresentavam os maiores níveis de vigor da região no cenário atual (NDVI médio = 0,68). Entretanto, diante das condições climáticas pessimistas, é esperada uma queda de até -0,15 no NDVI para esse domínio nas próximas décadas. Similarmente, as FEDs e FES que tinham no cenário atual NDVI de 0,66 e 0,67 (respectivamente), devem apresentar quedas extremas no vigor entre -0,10 e -0,15 em perspectivas climáticas futuras.

Tipicamente conhecidas como ecossistemas adaptados às condições de aridez, as caatingas correspondiam ao menor vigor vegetativo entre os domínios de vegetação (NDVI = 0,51) no contexto climático atual. Isso deve se agravar nas próximas décadas, uma vez que esse ecossistema está sujeito a experimentar uma perda substancial no vigor vegetativo, com uma queda de até -0,13 no NDVI para o cenário pessimista. Essa queda acentuada de vigor, até mesmo em domínios xerófilos, evidencia os desafios que o SAB enfrentará diante das mudanças climáticas futuras.

De forma antagônica, a Savana é o único domínio de vegetação que deve responder com acréscimo no vigor vegetacional diante das mudanças climáticas futuras. No cenário climático atual, as savanas apresentavam um NDVI médio de 0,62. Em perspectivas futuras é esperado um aumento de até 0,15 no NDVI desse domínio (Figura 5). Nossos resultados relevam que essas zonas de aumento de vigor vegetacional coincidem espacialmente com áreas de estabilidade climática na faixa oeste do SAB, essencialmente em porções de manutenção dos climas sub-úmidos nos cenários futuros (Figura 5).

As zonas de ecótono, isto é, ambientes de transição entre dois ou mais domínios de vegetação, apresentavam um vigor vegetativo na ordem de 0,63 no cenário atual. Com a amplificação da aridez em cenários futuros, as faixas ecotonais sofrerão declínio nos níveis de vigor, com perdas máximas chegando a -0,14 no NDVI.

**Figura 6** – Diferença do NDVI ( $\Delta\text{NDVI} = \text{Cenário futuro} - \text{Cenário atual}$ ) por domínio de vegetação considerando a influência das mudanças climáticas no vigor vegetacional.



## 5. Discussão

### 5.1. Performance dos modelos e impactos das covariáveis

Testamos cinco algoritmos de *machine learning* para mapear o vigor da vegetação (NDVI) no semiárido brasileiro (SAB). Entre os algoritmos usados, o RF obteve a melhor performance para prever o vigor vegetativo. Nossos resultados são consistentes com outros estudos que provaram a eficácia do RF em modelagens aplicadas à dinâmica vegetacional pelo globo terrestre (Liang *et al.*, 2016; Hengl *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2023).

Nosso modelo mostrou que a variação do vigor vegetativo no cenário atual para o SAB foi explicada pelo IA, CTC e CCOS. O IA corresponde à disponibilidade hídrica na superfície, refletindo diretamente no desenvolvimento da vegetação (Berdugo *et al.*, 2020). As terras com elevada aridez são sujeitas a restrições hídricas, o que conduz ao decréscimo do vigor vegetativo (Zhao *et al.*, 2021). Por outro lado, zonas com condições menos áridas, possibilitam a manutenção de altos níveis de vigor da vegetação (Berdugo *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021; Kimura; Moriyama, 2024).

A CTC auxiliou na explicação do vigor vegetativo pois compreende a capacidade dos solos de absorver nutrientes essenciais para o desenvolvimento das vegetações (Araújo Filho *et al.*, 2023). Enquanto o CCOS se mostrou importante devido a sua influência na retenção de água nos solos, característica fundamental no contexto de vegetações em condições semiáridas (Araújo Filho *et al.*, 2023). Estudos prévios (Oliveira *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2024) também provaram o potencial de covariáveis pedológicas em representar a predisposição espacial das vegetações no SAB.

### 5.2. Influência das condições de aridez no vigor da vegetação em perspectivas futuras

A intensificação da aridez esperada para o SAB deve induzir mudanças significativas na distribuição espacial do vigor vegetativo na região, refletindo diretamente nos domínios de vegetação. Nesse sentido, nossa primeira hipótese foi confirmada, pois concordando com estudos pelo globo terrestre (Yin; Ma; Wu, 2018; Lu *et al.*, 2024), estimamos que as florestas tropicais úmidas (OMB) devem sofrer as quedas mais intensas de vigor vegetativo nas próximas décadas. No entanto, diferindo do que esperávamos, as florestas tropicais secas (FED e FES) mesmo com suas adaptações à sazonalidade, também perderão significativamente vigor frente as mudanças no clima.

Em um contexto geral, a queda de vigor para as florestas está associada à limitação hídrica exacerbada que será imprimida a esses ecossistemas frente à intensificação da aridez (Aragão; Zuidema; Groenendijk, 2022). Uma condição que deve diminuir a atividade fotossintética dos ecossistemas florestais induzindo ao decréscimo no vigor vegetativo (McDowell *et al.*, 2008; Phillips *et al.*, 2010; Williams *et al.*, 2010). Essa queda no vigor das florestas pode afetar os serviços ecossistêmicos prestados por esses domínios no SAB, conduzindo, por exemplo, ao declínio na distribuição de umidade do ar e sequestro de carbono atmosférico.

Também diferente do que esperávamos, a intensificação da aridez deve impactar significativamente o vigor vegetativo das caatingas, um domínio xerófilo prontamente adaptado a secas prolongadas e severas (Fernandes *et al.*, 2022). Isso pode ser explicado considerando a amplificação de aridez, pois sob essas condições, possivelmente prevalecerão espécies mais especializadas da Caatinga, com menor biomassa, refletindo em baixos níveis de vigor vegetativo (Rizzini, 1976; Oliveira *et al.*, 2022). Este declínio predito para o vigor vegetativo dos ecossistemas xerófilos é consistente com análises sobre sensibilidade da vegetação realizada por Seddon *et al.*, (2016), que indicaram as caatingas como zonas altamente sensíveis frente às condições climáticas nos últimos anos. Adicionalmente, isso pode ser um indicativo de implicações irreversíveis para as terras semiáridas brasileiras nas próximas décadas. Um exemplo são os pronunciados processos de degradação de terras, sobretudo considerando os resultados de modelagens prévias para o Brasil, indicando o avanço de semidesertos sobre as caatingas em futuro próximo (Maksic *et al.*, 2022).

Para as savanas, nossa hipótese foi parcialmente confirmada. Este é o único domínio de vegetação no SAB que deve corresponder com acréscimo significativo no vigor vegetacional diante das mudanças climáticas futuras. Esses achados são similares a uma tendência histórica previamente constatada por Pereira *et al.*, (2024). Os autores mostraram um esverdeamento das savanas na porção sudoeste e noroeste do SAB nos últimos 22 anos, associando principalmente com a complexa relação entre solo e vegetação. No mesmo sentido, Silva *et al.*, (2024) a partir de projeções baseadas em condições climáticas e atributos da paisagem como solos e altitude, indicaram que o sul do SAB encontrará maior aptidão ambiental para as savanas, o que reforça o esverdeamento constatado em nosso estudo. Em geral, os ambientes de aptidão das savanas comportam solos profundos, bem drenados e eficientes para o suprimento hídrico das vegetações (Schaefer *et al.*, 2023). Portanto, assim como no contexto histórico (Pereira *et al.*, 2024), essas características pedológicas possivelmente contribuirão para o aumento de vigor em perspectivas futuras, sobretudo considerando a estabilidade de condições mais úmidas

(clima subúmido) sobre esse domínio nas próximas décadas. Entretanto, destacamos que ações antrópicas (não avaliadas nesse estudo) podem impedir esse aumento no vigor vegetativo projetado para as savanas, especialmente se as tendências históricas de intensos desmatamentos e incêndios (Souza *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2024) persistirem sobre esses ecossistemas.

Os resultados indicaram que as zonas ecotonais seguirão a tendência da maioria dos domínios do SAB, pois estão sujeitas a perdas substanciais no vigor vegetativo, sobretudo nas transições entre os domínios de vegetação inseridos na Caatinga e Mata Atlântica, os biomas mais afetados frente a intensificação da aridez. Pesquisas anteriores também mostraram que as mudanças climáticas devem inferir em alterações severas dos ecótonos, especialmente na configuração espacial, pois é predita uma expansão de as caatingas sobre as florestas, diminuindo a coexistência entre esses domínios (Oliveira *et al.*, 2021). Contudo, embora os ecótonos sejam ambientes com alta importância para a manutenção da biodiversidade, não existem leis específicas para sua proteção. Portanto, considerando as intensas alterações esperadas para os ecótonos em cenários futuros, Oliveira *et al.*, (2021) sugerem a necessidade da ampliação de instrumentos legais (como a lei da Mata Atlântica) para a proteção desses ambientes no SAB. Outra alternativa pode ser a criação de unidades de conservação para as zonas ecotonais. Essas estratégias além de preservar a biodiversidade, podem aumentar a resiliência dos ecossistemas frente às mudanças no clima (Acosta Salvatierra *et al.*, 2017; Arruda *et al.*, 2024).

Nosso estudo fornece informações geoespaciais para um planejamento ambiental mais sustentável das terras semiáridas do Brasil diante das mudanças climáticas. Em adição, destacamos que a nossa metodologia pode ser facilmente reproduzida em outras partes do globo terrestre, sobretudo considerando que usamos dados de acesso livre.

## Referências

ACOSTA SALVATIERRA, Luis H. *et al.* Protected areas buffer the Brazilian semi-arid biome from climate change. **Biotropica**, [s. l.], v. 49, n. 5, p. 753–760, 2017.

ALLEN, Bethany J. *et al.* Projected future climatic forcing on the global distribution of vegetation types. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [s. l.], v. 379, n. 1902, p. 20230011, 2024.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], p. 711–728, 2013.

ARAGÃO, José Roberto V.; ZUIDEMA, Pieter A.; GROENENDIJK, Peter. Climate-growth relations of congeneric tree species vary across a tropical vegetation gradient in Brazil. **Dendrochronologia**, [s. l.], v. 71, p. 125913, 2022.

ARAÚJO FILHO, José Coelho *et al.* Semi-arid Soils of the Caatinga Biome of Northeastern Brazil. *In: THE SOILS OF BRAZIL*. Cham: Springer International Publishing, 2023. (World Soils Book Series).

ARRUDA, Daniel M. *et al.* Amazonian vegetation types and indigenous lands threatened by upcoming climate change: Forecast impact for Brazilian biomes. **Austral Ecology**, [s. l.], v. 49, n. 1, p. e13369, 2024.

BARBOSA, H. A. Understanding the rapid increase in drought stress and its connections with climate desertification since the early 1990s over the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, [s. l.], v. 222, p. 105142, 2024.

BERDUGO, Miguel *et al.* Global ecosystem thresholds driven by aridity. **Science**, [s. l.], v. 367, n. 6479, p. 787–790, 2020.

BONANNELLA, Carmelo *et al.* Biomes of the world under climate change scenarios: increasing aridity and higher temperatures lead to significant shifts in natural vegetation. **PeerJ**, [s. l.], v. 11, p. e15593, 2023.

BORGES, Camilla K. *et al.* Partitioning of water vapor and CO<sub>2</sub> fluxes and underlying water use efficiency evaluation in a Brazilian seasonally dry tropical forest (Caatinga) using the Fluxpart model. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 142, p. 104963, 2024.

BREIMAN, Leo. Random Forests. **Machine Learning**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.

CHOU, Sin Chan *et al.* Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, [s. l.], v. 3, n. 05, p. 512, 2014.

COSTA, Rafaela Lisboa *et al.* Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, [s. l.], v. 28, p. 100254, 2020.

FERNANDES, Moabe F. *et al.* The Origins and Historical Assembly of the Brazilian Caatinga Seasonally Dry Tropical Forests. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 10, 2022.

GUAN, Kaiyu *et al.* Terrestrial hydrological controls on land surface phenology of African savannas and woodlands. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, [s. l.], v. 119, n. 8, p. 1652–1669, 2014.

HENGL, Tomislav *et al.* Global mapping of potential natural vegetation: an assessment of machine learning algorithms for estimating land potential. **PeerJ**, [s. l.], v. 6, p. e5457, 2018.

HIGGINS, Steven I.; CONRADI, Timo; MUHOKO, Edward. Shifts in vegetation activity of terrestrial ecosystems attributable to climate trends. **Nature Geoscience**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 147–153, 2023.

IBGE, 2004. **Mapa de Vegetação do Brasil**. [https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf)

. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/mapas\\_murais/vegetacao.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/mapas_murais/vegetacao.pdf).

JIANG, Luguang; LIU, Ye; XU, Haixia. Variation in Vegetation Quality of Terrestrial Ecosystems in China: Coupling Analysis Based on Remote Sensing and Typical Stations Monitoring Data. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 15, n. 9, p. 2276, 2023.

KIMURA, Reiji; MORIYAMA, Masao. Recent Global Distribution of Aridity Index and Land Use in Arid Regions. **Sola**, [s. l.], v. 20, p. 79–85, 2024.

KONG, Zijie *et al.* Past and projected future patterns of fractional vegetation coverage in China. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 902, p. 166133, 2023.

KUHN, Max; QUINLAN, R. Cubist: Rule-and instance-based regression modeling. R package version 0.2. 2. [s. l.], 2018.

LIANG, Jingjing *et al.* Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. **Science**, [s. l.], v. 354, n. 6309, p. aaf8957, 2016.

LU, Qikai *et al.* Global prediction of gross primary productivity under future climate change. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 912, p. 169239, 2024.

MAKSIC, J. *et al.* Brazilian biomes distribution: Past and future. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, [s. l.], v. 585, p. 110717, 2022.

MARENGO, Jose A. *et al.* Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Natural Hazards**, [s. l.], v. 103, n. 2, p. 2589–2611, 2020.

MCDOWELL, Nate *et al.* Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. **New Phytologist**, [s. l.], v. 178, n. 4, p. 719–739, 2008.

MENDES, Keila R. *et al.* Seasonal variation in net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 9454, 2020.

MILBORROW, S; TIBSHIRANI, R. Package ‘earth’: Multivariate Adaptive Regression Splines. [s. l.], 2019.

MURPHY, P. G.; LUGO, A. E. ECOLOGY OF TROPICAL DRY FOREST. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, [s. l.], v. 17, n. Volume 17, p. 67–88, 1986.

NGUYEN, Kieu Anh; SEEBOONRUANG, Uma; CHEN, Walter. Projected Climate Change Effects on Global Vegetation Growth: A Machine Learning Approach. **Environments**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 204, 2023.

OLIVEIRA, Ana Cláudia Pereira *et al.* How Do Taxonomic and Functional Diversity Metrics Change Along an Aridity Gradient in a Tropical Dry Forest?. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 13, p. 923219, 2022.

OLIVEIRA, Guilherme de Castro *et al.* Soil predictors are crucial for modelling vegetation distribution and its responses to climate change. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 780, p. 146680, 2021.



- PHILLIPS, Oliver L. *et al.* Drought–mortality relationships for tropical forests. **New Phytologist**, [s. l.], v. 187, n. 3, p. 631–646, 2010.
- PINZON, Jorge E.; TUCKER, Compton J. A non-stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g time series. **Remote sensing**, [s. l.], v. 6, n. 8, p. 6929–6960, 2014.
- POGGIO, Laura *et al.* SoilGrids 2.0 : Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. **SOIL**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 217–240, 2021.
- REICHSTEIN, Markus *et al.* Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. **Nature**, [s. l.], v. 566, n. 7743, p. 195–204, 2019.
- RIBEIRO, José Felipe; WALTER, Bruno Machado Teles. Fitofisionomias do bioma cerrado. Pp. 152-212. In: S.M. Sano & S.P. Almeida (eds.). **Cerrado Ecologia e Flora, Planaltina.**, [s. l.], 2008.
- RIZZINI, Carlos Toledo. **Tratado de fitogeografia do Brasil**. [S. l.]: Editora de Humanismo, Ciência e Tecnologia, 1976. v. 2
- RODRIGUEZ, P Perez; GIANOLA, D. BRNN: Bayesian regularization for feed-forward neural networks. **R package version 0.6**, [s. l.], 2016.
- SALAZAR, Luis F.; NOBRE, Carlos A.; OYAMA, Marcos D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 34, n. 9, 2007.
- SANTOS e SILVA, Cláudio M. *et al.* Rainfall and rain pulse role on energy, water vapor and CO2 exchanges in a tropical semiarid environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 345, p. 109829, 2024.
- SCHAEFER, Carlos. E.G.R *et al.* The Soil Regions: A Framework for Stratifying the Brazilian Soils. pp. 71–84, 2023.
- SEDDON, Alistair W. R. *et al.* Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. **Nature**, [s. l.], v. 531, n. 7593, p. 229–232, 2016.
- SILVA, L. A. P *et al.* Mapping of aridity and its connections with climate classes and climate desertification in future scenarios - Brazilian semi-arid region. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 35, p. e67666, 2023.
- SILVA, L. A. P. *et al.* Climate Change Effects on Land Use and Land Cover Suitability in the Southern Brazilian Semiarid Region. **Land**, [s. l.], v. 13, n. 12, p. 2008, 2024.
- SILVA, P. S. *et al.* Climate Change and Fire: The Case of Cerrado, the Brazilian Savanna. In: MISHRA, M.; DE LUCENA, A. J.; MAHARAJ, B. (org.). **Climate Change and Regional Socio-Economic Systems in the Global South: Resilience Strategies for Sustainable Development**. Singapore: Springer Nature, 2024. p. 87–105.
- SOUZA, C. M. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 12, n. 17, p. 2735, 2020.

SUN, Lu *et al.* Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI in the Qinghai-Tibet Plateau. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 587, 2023.

TENG, Hongfen *et al.* Future changes and driving factors of global peak vegetation growth based on CMIP6 simulations. **Ecological Informatics**, [s. l.], v. 75, p. 102031, 2023.

TUCKER, Compton J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 127–150, 1979.

VAN ZYL, Jakob J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta astronautica**, [s. l.], v. 48, n. 5–12, p. 559–565, 2001.

VIEIRA, RM da Silva Pinto *et al.* Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 347–360, 2015.

WILLIAMS, A. Park *et al.* Forest responses to increasing aridity and warmth in the southwestern United States. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 107, n. 50, p. 21289–21294, 2010.

WU, Yangyang *et al.* NDVI-Based Vegetation Dynamics and Their Responses to Climate Change and Human Activities from 2000 to 2020 in Miaoling Karst Mountain Area, SW China. **Land**, [s. l.], v. 12, n. 7, p. 1267, 2023.

YIN, Yunhe; MA, Danyang; WU, Shaohong. Climate change risk to forests in China associated with warming. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 493, 2018.

ZHANG, Sen *et al.* Natural Vegetation Succession Under Climate Change and the Combined Effects on Net Primary Productivity. **Earth's Future**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. e2023EF003903, 2023.

ZHANG, Xinyue; EVANS, Jason P.; BURRELL, Arden L. Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. **Communications Earth & Environment**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 1–9, 2024.

ZHAO, Wei *et al.* Distinct vegetation response to drying and wetting trends across an aridity threshold. **Environmental Research Communications**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 025002, 2021.

## Considerações Finais

Este estudo representa um grande avanço na compreensão dos efeitos das mudanças climáticas no Semiárido brasileiro (SAB). A elaboração de modelos de *machine learning* reforçou o potencial dessa estrutura metodológica em prever atributos climáticos em larga escala, como a evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>). A partir disso, nosso estudo revelou que o SAB se tornará mais seco nas próximas décadas, seguindo uma tendência global.

O principal avanço dessa tese foi mostrar as implicações da amplificação da aridez sobre os domínios de vegetação na região semiárida do Brasil. Os domínios de vegetação do SAB são prontamente ameaçados devido à escassez hídrica, e nossos resultados revelaram que essa situação deve se agravar nas próximas décadas.

Os achados dessa tese serão úteis para futuros estudos no SAB, sobretudo auxiliando em propostas para a conservação das vegetações na região, tais como: ampliação de unidades de proteção ambiental, cumprimento do código florestal, lei da vegetação nativa e lei da Mata Atlântica, bem como medidas promoção de regeneração das vegetações.

Adicionalmente, encorajamos estudos subsequentes a avançarem em limitações constatadas em nossa abordagem, a exemplos: i) aumento na resolução dos produtos cartográficos, ii) inserção de fontes primárias, iii) e a obtenção de dados de validação em campo, considerando, sobretudo, o refinamento da escala de análise.