



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA REGIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E
MEIO AMBIENTE - PRODEMA

LUCAS PEIXOTO TEIXEIRA

MODELAGEM DE NICHOS AMBIENTAIS DE ESPÉCIES VEGETAIS DA CAATINGA
COMO FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS E DO PROGRESSO DAS ODS's 13 E 15 NO BIOMA SEMIÁRIDO
BRASILEIRO

FORTALEZA

2022

LUCAS PEIXOTO TEIXEIRA

MODELAGEM DE NICHOS AMBIENTAIS DE ESPÉCIES VEGETAIS DA CAATINGA
COMO FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS E DO PROGRESSO DAS ODS's 13 E 15 NO BIOMA SEMIÁRIDO
BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Proteção Ambiental e Gestão de recursos naturais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Freire Moro.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T267m Teixeira, Lucas Peixoto.

Modelagem de nicho ambiental de espécies vegetais da Caatinga como ferramenta para avaliação dos impactos das mudanças climáticas e do progresso das ODS's 13 e 15 no bioma semiárido brasileiro / Lucas Peixoto Teixeira. – 2022.

74 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo Freire Moro.

1. Caatinga. 2. Mudanças climáticas. 3. Objetivos do desenvolvimento sustentável. I. Título.

CDD 333.7

LUCAS PEIXOTO TEIXEIRA

MODELAGEM DE NICHOS AMBIENTAIS DE ESPÉCIES VEGETAIS DA CAATINGA
COMO FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS E DO PROGRESSO DAS ODS's 13 E 15 NO BIOMA SEMIÁRIDO
BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Proteção Ambiental e Gestão de recursos naturais.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Freire Moro (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Marta Celina Sales
Universidade Federal do Ceará (UFC)

PhD. Eimear M. Nic Lughadha
Senior Research Leader at Royal Botanic Gardens, KEW

Dra. Tainá Carreira da Rocha
Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro (JBRJ)

AGRADECIMENTOS

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio à pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Marcelo Freire Moro, pela idealização, orientação e ensinamentos que foram fundamentais para desenvolver essa pesquisa, como também para o meu amadurecimento profissional e acadêmico. O diálogo, ao longo desses anos de mestrado, foi uma ferramenta essencial para o alcance exitoso desse trabalho.

A todos os pesquisadores do Jardim Botânico Real Kew, em especial à PhD. Eimear Nic Lughadha e ao PhD. Justin Moat, por todo suporte, treinamento e orientações que ofereceram, e continuam a oferecer, mesmo distante ao longo de um cenário obscuro de pandemia. Ao mesmo tempo, agradeço ao suporte financeiro provido pela *Bentham-Moxon Trust*, em apoio à visita de pesquisa aos departamentos de Análise Espacial e Informática da Biodiversidade e de Conservação da Ciência, do Jardim Botânico Real da Inglaterra – *The Royal Botanic Gardens, Kew*.

Ao doutorando João Carlos Pires de Oliveira, que auxiliou no processamento dos dados deste trabalho, tanto com seu vasto e ímpar conhecimento acerca da modelagem, quanto com acesso aos equipamentos computacionais da UNEMAT.

Aos pesquisadores do Programa Cientista-chefe Meio Ambiente (SEMA/SEMACE/FUNCAP), por toda cooperação de trabalho e aprendizado que tem sido um diferencial no meu crescimento dentro da ciência. Em especial, agradeço: ao Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Soares, por nos instigar a todo momento em pensar além do executado; aos coordenadores de projeto, Dr. Renan Guerra e Dr. Eduardo Lacerda, por serem cruciais no desenvolvimento dos trabalhos e na articulação com órgãos públicos; à equipe SIG Ambiental, Vanessa e Pedro, por se tornarem amigos de trabalho e compartilharem a grandeza de seus conhecimentos; ao Prof. Jader Santos e à Prof.^a Adryane Gorayeb e sua equipe, por confiarem no meu trabalho nessa nova etapa.

Aos meus colegas de turma do PRODEMA e aos amigos que somaram forças para que todos pudessem atravessar o mestrado em meio ao caos. Aqui, faço menção aos amigos egressos de Ciências Ambientais, Vanessa, Luis, Rafael e Marie, que agregaram forças e, mesmo trilhando em caminhos diferentes, conseguiram ser alicerce da construção dessa fase acadêmica. Além deles, destaco a Sâmila Lima, que ao longo desses 3 anos se tornou uma parceira de vida acadêmica e de vida profissional. Com seu suporte e apoio diário, além de

mútuo, nós conseguimos atravessar barreiras pessoais e profissionais, fortalecendo nosso laço de amizade.

Aos meus familiares e ao meu parceiro de vida, Igor, por todo suporte e compreensão nesses últimos anos e ao longo dessa jornada.

The world is a complex, interconnected, finite, ecological - social - psychological - economic system. We treat it as if it were not, as if it were divisible, separable, simple, and infinite. Our persistent, intractable global problems arise directly from this mismatch. (Donella Meadows,1982).

RESUMO

A Caatinga, uma região natural exclusivamente brasileira, é composta majoritariamente por uma floresta tropical sazonalmente seca, sendo a mais biodiversa e populosa do mundo. Sua diversidade é ameaçada pelas fortes alterações antrópicas a que foi submetida, como desmatamentos e queimadas, com impactos incertos diante às mudanças climáticas globais. O bioma possui uma variedade de espécies de fauna e flora endêmicos, as quais desenvolveram estratégias para se estabelecerem em uma região com déficit hídrico. O clima semiárido e escassez hídrica devido às chuvas concentradas em poucos meses do ano, transfigura fatores limitantes da Caatinga, sendo a seca, além de um desafio ecológico para as espécies nativas, é também um agente da vulnerabilidade social e econômica para a população humana. Teme-se que eventos climatológicos extremos, aumento das temperaturas e longos períodos de seca possam se agravar diante os cenários de aquecimento global estimados. Somado a isso, a Caatinga é um bioma que já apresenta elevada fragmentação da vegetação, existência de núcleos de desertificação e elevada desigualdade social, situações que podem ser intensificadas com as mudanças climáticas projetadas. A conservação da biodiversidade e a adoção de medidas para combater as mudanças climáticas estão entre os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, elaborados dentro da Agenda 2030 de desenvolvimento sustentável. Assim, o presente trabalho objetiva avaliar os impactos estimados das mudanças climáticas sobre parte representativa da flora da Caatinga, por meio de uma modelagem de nicho ambiental das espécies vegetais, contrastando a situação do cenário presente com os modelados previstos para o futuro. Além disso, pretende-se analisar as tendências das variáveis bioclimáticas para o bioma semiárido. Os produtos obtidos apontam para intensa perda de adequabilidade ambiental no bioma Caatinga, para os cenários intermediário e pessimista de mudanças climáticas, afetando negativamente a riqueza de espécies. Além disso, há risco de degradações generalizadas diante as projeções das variáveis bioclimáticas para o bioma, como secas prolongadas, aumentos de eventos climatológicos extremos e aumentos das temperaturas. E por fim, observa-se que a Caatinga encontra desafios profundos para alcançar as diretrizes das ODS 13 e 15.

Palavras-chaves: caatinga; mudanças climáticas; objetivos do desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Caatinga is an exclusive Brazilian ecosystem, which has a major extension of seasonal tropical dry forest (STDF). It is the STDF most biodiverse and densely populated in the world. Its biodiversity is threatened by anthropic pressure (as deforestation and fires) and has uncertain impacts by climatic changes. This ecosystem holds a variety of endemic fauna and flora species that has developed strategies to establish themselves in an environment with water deficit. The semi-arid climate and water scarcity are the main limiting factors to this ecosystem, where drought is an agent of social and economic vulnerability. Climatological extreme events, increase of temperatures, and long droughts are concern in scenarios of climate changes. Furthermore, Caatinga has elevate rates of fragmentation, desertification cores and social scourge, which could be increased with climate changes. Biodiversity conservation and climate changes battle are within sustainable development goals (SDG 13 and 15) for 2030 Agenda. Thus, the aim of this work is assess estimated impacts due climate changes over the Caatinga representative biome flora. To achieve this it used Environmental Niche Modelling for flora species, which allow compare the richness of species for the present conditions and for projected climate changes scenarios. Furthermore, it intends assess the tendency of bioclimatic variables for this semi-arid ecosystem. Results shows for intense loss of environmental suitability for intermediary and pessimist scenarios, which could affect negatively flora richness species on Caatinga biome. Also, the are risks for generalized degradation when analysed the projections of bioclimatic variables, as long droughts, increase of climatological events and temperature rise. In addition, can be observe that Caatinga will face deep challenges do reach the aims of SDGs 13 and 15.

Keywords: caatinga; climate changes; sustainable development goals

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Mudanças Climáticas.....	15
2.2	O Bioma Caatinga	19
2.2.1	<i>Diversidade Ambiental da Caatinga</i>	21
2.2.2	<i>Degradação Ambiental da Caatinga</i>	25
2.2.3	<i>Conservação Ambiental</i>	28
2.3	Modelagem de Nicho Ambiental (ENM).....	31
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	Banco de Dados	37
3.1.1	<i>Dados das Espécies Vegetais</i>	37
3.1.2	<i>Variáveis Bioclimáticas</i>	39
3.2	Análise de Tendências de Variáveis Bioclimáticas.....	42
3.3	Depuração de Dados.....	43
3.3.1	<i>Etapas da Depuração</i>	43
3.4	Modelagem de Nicho Ambiental.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	Tendências Climáticas.....	49
4.2	Qualidade dos Dados.....	52
4.3	Riqueza Estimada	54
4.3.1	<i>Impactos Sobre a População Humana</i>	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS	62
	ANEXO A – QUADRO DE ESPÉCIES VEGETAIS SORTEADAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais, com desafios complexos para a conservação da biodiversidade e para o desenvolvimento sustentável em suas diversas e contrastantes regiões (AB’SABER, 2003). A vasta diversidade de paisagens e tipos vegetacionais dos diferentes domínios de natureza do território brasileiro pode variar de florestas tropicais úmidas, florestas tropicais secas e savanas, até campos subtropicais (AB’SABER, 2003; IBGE, 2012). A diversidade de domínios de natureza do Brasil, conforme proposto por Ab’Saber (2003), foi organizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2019) na forma de seis ‘biomas’: Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Amazônia, Pampa e Pantanal. Dentre esses biomas, pode-se evidenciar a Caatinga, que apresenta distribuição exclusivamente nacional e recebe destaque desde o primeiro relatório da Convenção da Diversidade Biológica (CDB), em 1998, o qual pontuou que o domínio apresenta intensos processos de desertificação. Além disso, o relatório destaca a sobre-exploração dos recursos naturais, as graves secas e a dificuldade de fixação de populações entre os obstáculos a serem enfrentados na região semiárida brasileira (BRASIL, 1998).

Assim como outras florestas secas do mundo, a caatinga possui diversos problemas relativos à sua conservação, sendo um dos três biomas brasileiros mais afetados pelo desmatamento, expansão de núcleos urbanos e por atividades agropecuárias (MILES et al., 2006; BRASIL, 2008; HAUFF, 2010). Com a predominância de um clima semiárido e quente, além de período chuvoso concentrado em poucos meses do ano (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002), há, culturalmente, uma associação do bioma como uma região pouco desenvolvida e com marcantes problemas socioeconômicos, consequência do insuficiente conhecimento científico acerca da diversidade ecológica e geográfica da região (BRASIL, 1998; CASTELLETTI et al., 2003).

De acordo com Miles et al. (2006), as florestas tropicais sazonalmente secas estão entre os ecossistemas mais ameaçados do planeta, com taxas aceleradas de desmatamento. Essa preocupação acentua-se quando busca se entender os efeitos das mudanças climáticas, onde os potenciais danos ainda são desconhecidos, podendo ser um agravante para perda da biodiversidade (WILLIS; BACHMAN, 2016), especialmente para a Caatinga, bioma que tem 94% do seu território com risco médio ou elevado de desertificação (SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017). Essa inquietação é maior quando se revela que uma ínfima parcela territorial da Caatinga está sob salvaguarda de unidades de conservação (UC), com cerca de 8%

legalmente protegida, sendo a maioria das áreas compostas por Áreas de Proteção Ambiental, e apenas 1,3% resguardada por UCs de Proteção Integral (BRAZIL, 2015; TEIXEIRA et al., 2021).

O enfrentamento das mudanças climáticas e a conservação da biodiversidade são alguns dos grandes desafios para se alcançar o desenvolvimento sustentável. Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) adotou novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os ODS se baseiam nos oito objetivos do desenvolvimento do milênio, como também aprovou, por unanimidade, a Agenda 2030, intitulada ‘Transformando o Nosso Mundo’, a qual se baseou em cinco eixos de atuação (Figura 1).

Figura 01 – Os cinco pilares da Agenda 2030 da ONU que sintetizam as metas de desenvolvimento sustentável aspiradas para 2030.



Fonte: < <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/post-2015.html> > Acessado em 14 dez 2020. Legenda: os cinco P's da Agenda 2030 – Pessoas: erradicar a pobreza e a fome de todas as maneiras e garantir a dignidade e a igualdade; Prosperidade: garantir vidas prósperas e plenas, em harmonia com a natureza; Paz: promover a sociedades pacíficas, justas e inclusivas; Parcerias: implementar a agenda por meio de uma parceria global sólida; Planeta: proteger os recursos naturais e o clima do nosso planeta para as gerações futuras.

Sendo assim, e diante das vulnerabilidades da Caatinga, a compreensão dos efeitos das mudanças climáticas na região sobre a flora se torna indispensável, já que a biodiversidade vegetal é fonte de diversos recursos para a população humana, incluindo madeira, recursos energéticos (lenha), forragem, alimento, além de serviços ecossistêmicos como proteção de solos e dos recursos hídricos. Esses temas são relevantes quando percebemos que o bioma já enfrenta forte perda de cobertura vegetal, elevada vulnerabilidade social e avanço de áreas

desertificadas (SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017). Essa compreensão merece atenção também diante das características ambientais do semiárido brasileiro, as quais reúnem condições climáticas que favorecem déficit hídrico na região. Agregado a esses fatores ambientais, as espécies de fauna e flora encontradas no bioma trazem atributos que refletem diretamente a adaptação e a resiliência biológica para as condições ambientais de estresse hídrico encontradas (SOUZA, 2020). Considerando a dependência que as sociedades humanas e a fauna possuem da vegetação para sua manutenção, é importante compreender como as mudanças climáticas podem afetar as espécies vegetais que estruturam a vegetação do semiárido brasileiro, o que pode permitir antever potenciais impactos como perda de biodiversidade, de recursos florestais e desertificação.

Isto posto, uma das possíveis abordagens a serem utilizadas para avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade de um ecossistema é o uso da modelagem de nicho ambiental (Environmental Niche Modelling – *ENM*) de espécies nativas (ARAÚJO et al., 2005; ELITH; LEATHWICK, 2009). Por meio de análises estatísticas e geoespaciais, a modelagem permite uma avaliação das áreas de maior adequabilidade de espécies encontradas em uma dada região de acordo com as respectivas características ambientais associadas às espécies (ELITH; LEATHWICK, 2009; PIRES-OLIVEIRA, 2019). Essa análise pode ser realizada paralelamente tanto com as variáveis bioclimáticas de paleoclimas, quanto de cenários futuros potenciais de aquecimento global, estimados de acordo com projeções do IPCC, tendo-se um prognóstico espacial da distribuição de espécies atrelada a essas variáveis bioclimáticas (ELITH; LEATHWICK, 2009; ZIMMERMANN et al., 2010; PIRES-OLIVEIRA, 2019).

Dessa forma, o presente trabalho pretende compreender o potencial impacto das mudanças climáticas no território da Caatinga sobre a riqueza e distribuição de espécies vegetais lenhosas nativas, avaliando possíveis impactos resultantes das mudanças climáticas sobre os ecossistemas da Caatinga. Para isso, aplica-se a modelagem de nicho ambiental potencial para uma seleção aleatória de espécies nativas da Caatinga, sob condições climáticas atuais, como também sob cenários futuro de aquecimento global. Ambiciona-se, assim, indicar a riqueza potencial de espécies vegetais na Caatinga e avaliar o comportamento dessas espécies sob diferentes cenários de mudanças climáticas, observando ganho ou perda de adequabilidade para a comunidade vegetal do bioma. Assim, procura-se obter respostas quanto aos possíveis impactos das mudanças climáticas sob a biodiversidade do bioma.

Além disso, pretende-se analisar as tendências de variáveis ambientais (variáveis bioclimáticas) importantes para diagnosticar os impactos das mudanças climáticas no bioma.

Tal análise, somada as respostas da modelagem de espécies vegetais da Caatinga, fomentarão uma avaliação quanto ao progresso do desenvolvimento sustentável na região, em especial sobre o alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável 13 e 15, firmados pela ONU em 2015. Tais respostas poderão, também, nortear estratégias para o planejamento e a implantação de políticas pública de preservação e conservação de *hotspots* de biodiversidade dentro da Caatinga, bem como o manejo de regiões com maior vulnerabilidade para perda de biodiversidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Mudanças Climáticas

O efeito estufa, fenômeno natural que ocorre na atmosfera terrestre, é resultado da interação dos componentes da Troposfera com a energia eletromagnética emitida e refletida pela Terra, bloqueando a perda dessa radiação para o espaço e garantindo a manutenção de uma faixa de temperatura que assegura a existência de vida no planeta (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019). Parte da energia eletromagnética emitida pelo sol que alcança a Terra é refletida, espalhada ou absorvida por esses componentes que constituem a atmosfera, sendo apenas uma porção reduzida dessa energia capaz de atingir a superfície do planeta (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008; ZANOTTA; FERREIRA; ZORTEA, 2019). Dessa forma, há um equilíbrio no balanço de energia no sistema terra-atmosfera, onde a energia que está entrando é igual à quantidade de energia que está saindo, regulando a temperatura da Terra que, em média, é de aproximadamente 15-16 °C (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019).

Dentre os componentes da atmosfera responsáveis pelo efeito estufa, estão metano, amônia, óxido nitroso, ozônio, clorofluorcarbonos, vapor de água e dióxido de carbono, sendo os dois últimos os principais componentes responsáveis por conservar o calor na baixa atmosfera terrestre (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019). Somado a esses gases, a nebulosidade e o material particulado em suspensão também são responsáveis no processo de aquecimento da Troposfera, pois atuam como uma barreira para transferência de energia emitida ou refletida pela superfície da Terra (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019).

O dióxido de carbono recebe papel de destaque dentre os gases do efeito estufa não somente pela sua relevância em reter a energia emitida e refletida, mas também porque sua concentração na atmosfera varia ao longo de eras geológicas, estando diretamente associada à variação de temperatura na Terra (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019). Assim, as atividades antropogênicas, como a queima de combustíveis fósseis (petróleo, gás, carvão) resultantes da industrialização e aumento da frota de veículos, as atividades agrícolas, as queimadas e o desmatamento, são os responsáveis pelo incremento de dióxido de carbono e elevação da temperatura do planeta (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019). A temperatura média da Terra foi elevada em 0,5 °C em menos de

um século, sendo algumas marcas recordes registradas ao final do século XX (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019).

Esse aumento da temperatura média global no planeta em decorrência da intervenção das atividades antropogênicas, também resultante do incremento das concentrações de dióxido de carbono e outros gases do efeito estufa, é chamado de Aquecimento Global (AG) (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019). O AG é uma intensificação do efeito estufa diante ao aumento da concentração dos Gases do Efeito Estufa (GEE), com destaque para o dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e clorofluorcarbonetos, além dos aerossóis (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008).

A inquietação diante de consequências potencialmente desastrosas quanto à intensificação das concentrações dos GEE's e o Aquecimento Global levaram à criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o qual é chancelado pela ONU e pela Organização Meteorológica Mundial, e reúne milhares de cientistas pelo mundo na busca de compreender as Mudanças Climáticas (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019). A expressão Mudanças Climáticas, entretanto, ainda pode ser abordada de forma equivocada, diante à existência de alterações naturais no clima da Terra, as quais intercorrem em uma frequência de milhões ou milhares de anos (Tabela 1). Apesar dessa indefinição em relação aos conceitos da expressão 'Mudanças Climáticas', ela é denominada como alterações nos diversos parâmetros climáticos pelo globo, conceito o qual não diminui a importância dos impactos do AG – fato já consolidado pelo IPCC (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019).

Tabela 1 – Hierarquização das modificações globais do clima.

Termo	Duração	Causas Prováveis
Revolução Climática	Superior a 10 milhões de anos	Atividades geotectônicas e possíveis variações polares
Mudança Climática	10 milhões a 100 mil anos	Mudança na órbita de translação e na inclinação do eixo terrestre
Flutuação climática	100 mil a 10 mil anos	Atividades vulcânicas e mudanças na emissão solar
Interação climática	Inferior a 10 anos	Interação atmosfera-oceano
Alteração climática	Muito curta	Atividades antrópicas, urbanização, desmatamento, armazenamento de água etc.

Fonte: Conti (1998). Retirado de Mendonça e Danni-Oliveira (2019), adaptado pelo autor.

Apesar da Terra passar por esses ciclos naturais de mudanças no clima – que podem ser induzidas pela deriva dos continentes, variações na quantidade de radiação solar que atinge a Terra, mudanças nos padrões orbitais do planeta, concentração de aerossóis naturais, erupções vulcânicas ou fenômenos climáticos distintos – as Mudanças Climáticas induzidas pelas atividades humanas foram responsáveis pelo aquecimento anormal do planeta na segunda metade do século XX (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008). Ainda assim, há certa dificuldade em separar o limiar das mudanças climáticas naturais das mudanças de causa antropogênica, sendo esse um obstáculo para as projeções dos potenciais efeitos das Mudanças Climáticas para o futuro (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008)

Desde 1988, o IPCC é responsável pelo levantamento e divulgação de estudos científicos que fomentam informações técnicas e atualizadas acerca das Mudanças Climáticas e potenciais consequências (MORAES, 2013; HAMADA; GHINI; OLIVEIRA, 2017). Por meio de uma revisão das publicações científicas, técnicas e socioeconômicas mais recentes, o painel tem como objetivo reunir esses dados atualizados e produzir um relatório acessível sobre as Mudanças Climáticas, tanto para o público em geral, quanto para tomadores de decisão (MORAES, 2013).

Embora o AG seja validado pelo IPCC como fato consolidado, a modelagem dos possíveis efeitos climáticos tem gerado diferentes cenários para alterações climáticas futuras, sem haver consenso de qual o cenário que se concretizará (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019). Isso ocorre porque os resultados das modelagens para os cenários futuros envolvem interações oceano-atmosfera complexas (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019), além da dependência de cenários sociais, políticos, tecnológicos e econômicos que ditarão as tendências de redução ou aumento das emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2021). Todavia, há boas estimativas quantitativas da mudança do clima futuro por meio de modelo climáticos embasados em princípios físicos bem estabelecidos e que retratam características do clima atual e alterações do clima passado, podendo ser utilizados para vislumbrar quais seriam os impactos de diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa sobre o clima global (RANDALL et al., 2007; HAMADA; GHINI; OLIVEIRA, 2017). Essas boas estimativas são possíveis diante ao aprimoramento das análises de dados, ampla análise da cobertura vegetal, maior capacidade de compreensão das incertezas e aumento das medições (IPCC, 2013).

De acordo com os relatórios do IPCC, a intensificação das Mudanças Climáticas são uma grande ameaça ao desenvolvimento sustentável, sendo os países em desenvolvimento os mais vulneráveis (IPCC, 2007; SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008). Tais mudanças podem afetar direta ou indiretamente a população mundial, dentro da sua diversidade, em

diferentes setores, alcançando desde florestas, biodiversidade, recursos hídricos, zonas costeiras, saúde e infraestrutura, à aspectos econômicos como a produção de energia, agricultura e indústrias (IPCC 2013; MARCOS JUNIOR et al., 2018).

A redução das calotas polares, o aumento do nível do mar, o aumento das temperaturas médias, a intensificação de eventos climáticos pelo planeta e o surgimento de epidemias, estão dentre as consequências mais conhecidas das mudanças climáticas (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019). Contudo, em âmbito nacional, identifica-se tanto o aumento do nível do mar nas zonas costeiras e das temperaturas médias, como também o registro de eventos climáticos extremos (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008), sendo as regiões Norte, Nordeste, noroeste de Minas Gerais e Centro-Oeste com maior exposição às consequências das possíveis Mudanças Climáticas (MARCOS JUNIOR et al., 2018). Sampaio, Marengo e Nobre (2008), apontam que há setores ecológicos e socioeconômicos mais vulneráveis a essas consequências, tais como: os ecossistemas naturais (alterações na cobertura vegetal e na biodiversidade); os agrossistemas; e os setores socioeconômicos, com efeitos na agricultura, recursos hídricos, saúde humana, entre outros.

Para o Nordeste brasileiro, as projeções de cenários de clima futuro apresentam aumento de temperatura e redução de chuvas, apontando uma grande tendência à estiagem e à seca, em frequência e intensidade, que podem resultar na aridificação da região (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017; MARCOS JUNIOR et al., 2018). Dessa forma, poderá haver aumento na sucessibilidade do solo à degradação induzida pelo homem, como também aumento da escassez de água diante à elevada evapotranspiração de um clima mais seco e quente, refletindo em impactos no desenvolvimento sustentável regional (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017).

Mais recentemente, no sexto relatório do IPCC (2021), lançado pelo *Work Group I – The Physical Science Basis*, destaca-se três principais projeções de mudanças para a região nordeste da América do Sul, onde está localizada a Caatinga: redução da precipitação média, aumento na intensidade e na frequência de precipitações extremas e enchentes (confiança média para cenário de aumento da temperatura maior ou igual a 2°C), e aumento dominante da duração das secas (com alta confiança na projeção). Essas mudanças principais são destacadas diante as projeções dos impulsionadores de impactos climáticos (Tabela 2) a partir do cenário intermediário de mudança climática (IPCC, 2021).

Tabela 2 – Síntese dos impulsores de impactos climáticos para o nordeste da América do Sul (IPCC, 2021), indicando se a tendência observada é previsível com média ou alta confiança de que deve ocorrer.

Impulsionadores de impactos climáticos	Média confiança de concretização do cenário	Alta confiança de concretização do cenário
Média da temperatura do ar		A – P
Calor extremo		A – P
Período de frio		R – P
Precipitação média		R
Forte precipitação e enchentes	A	
Aridez	A	
Seca ecológica e agrícola	A	
Clima de queimadas		A
Média da velocidade dos ventos	A	
Aumento relativo do nível do mar		A¹
Inundações costeiras		A
Erosão costeira		A²
Onda de calor marinha		A
Aridez oceânica		A¹
CO2 atmosférico na superfície		A – P
Radiação na superfície	A	

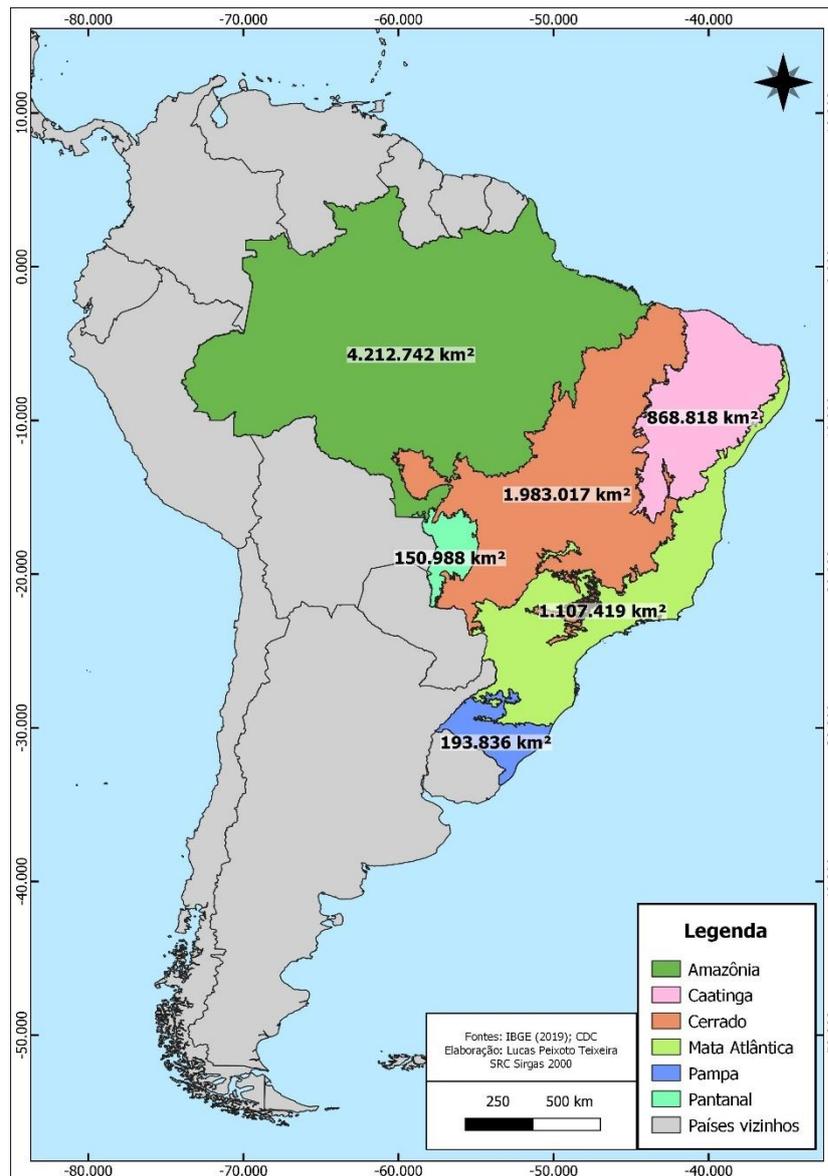
Fonte: IPCC, 2021 (adaptado e traduzido pelo autor). Legenda: **A** – indicação de tendência de Aumento; **R** – indicação de tendência de Redução; **P** – mudança já observada no Presente (já emergiu no período histórico); **1** – projetado a partir de 2050 em cenário mais pessimista de mudanças climáticas; **2** – ao longo de regiões costeiras arenosas e na falta de aporte sedimentar adicional ou qualquer barreira física para conter linha de costa. Dados de impulsores de impactos climáticos de baixa confiança ou não relevantes para o nordeste da América do Sul foram suprimidos.

2.2 O Bioma Caatinga

A Caatinga é um dos seis biomas brasileiros, segundo IBGE (2019) (Figura 2). É uma área geográfica dominada pelo clima semiárido, com chuvas concentradas em poucos meses por ano, com vegetação decídua adaptada à imprevisibilidade climática (SOUZA, 2003; SOUZA, 2020). Essa vegetação decídua varia no seu porte, desde arbustais abertos, até florestas decíduas de maior porte (MORO et al., 2016; QUEIROZ et al., 2017), sendo classificada sobre diferentes nomes na literatura, como ‘savana-estépica’ (IBGE 2012), vegetação de caatinga (ANDRADE-LIMA, 1981; MORO et al., 2015), floresta tropical sazonalmente seca (PENNINGTON et al., 2000) e florestas e arbustais sazonalmente secos (FERNANDES; QUEIROZ, 2018).

Por sua vez, o nome Caatinga deriva da língua tupi-guarani, podendo significar ou ‘mata branca’ ou talvez ‘mata seca’. Ela abrange aproximadamente 10,14% do território nacional, com 862.818 km² de extensão, sendo o único bioma exclusivamente brasileiro, ocorrendo em oito dos nove estados nordestinos (exceção do Maranhão) e no norte de Minas Gerais (IBGE, 2019).

Figura 02 – Biomas do Brasil de acordo com o IBGE (2019).



Fonte: elaborado pelo autor. Observação: a camada vetorial da fonte do dado traz a área da Caatinga 868.818km² (atributo AREA_IBGE) e o texto referência apresenta área de 862.818km².

A Caatinga possui milhares de espécies nativas da fauna e flora, centenas delas endêmicas (SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017; FERNANDES; CARDOSO; QUEIROZ et al., 2020), relativa riqueza biológica e grande variedade de paisagens (VELLOSO; SAMPAIO;

PAREYN, 2002; IBGE, 2020). Mesmo tendo recebido baixa atenção científica ao longo do último século (MORO et al., 2015), o bioma majoritariamente nordestino tem sido objeto de crescente número de estudo nas últimas décadas (MORO et al., 2015), os quais revelam que há maior riqueza e endemismo quando comparado com dados anteriores (SAMPAIO et al., 2002; MORO et al., 2014; SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017; FERNANDES; CARDOSO; QUEIROZ et al., 2020).

Paralelamente, as florestas secas começaram a ter mais atenção científica, tornando-se relevante para estudos de conservação e biogeografia (PENNINGTON et al., 2000). Com isso, chama-se atenção para o fato de que florestas secas estão tendo taxas aceleradas de desflorestamento – do ponto de vista global – maiores até que de florestas tropicais úmidas (MILES et al., 2006). A Caatinga, por exemplo, já perdeu mais da metade de sua cobertura vegetal (ANTONGIOVANNI; VENTICINQUE; FONSECA, 2018).

2.2.1 Diversidade Ambiental da Caatinga

A Caatinga é um domínio fitogeográfico dominado por florestas e arbustais tropical sazonalmente secos (FERNANDES; QUEIROZ, 2018). Ela pode ser descrita como um sistema socioecológico rico e complexo que mantém um patrimônio natural e cultural único e de importância global (SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017). Velloso, Sampaio e Pareyn (2002, p. 7) apresentam a Caatinga com uma “[...] surpreendente diversidade de ambientes, proporcionados por um mosaico de tipos de vegetação, em geral caducifólia, xerófila e, por vezes, espinhosas, variando com o mosaico de solos e a disponibilidade de água.”.

70% do bioma está inserido sobre o embasamento cristalino, formação geológica a qual detém a paisagem mais típica da região: ampla planície baixa, com relevo predominante suave-ondulado e elevações residuais (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002; SOUZA, 2003; MORO et al., 2014; FERNANDES; QUEIROZ, 2018). Outra formação geológica expressiva no bioma são as bacias sedimentares, como planícies, chapadas e terras altas sedimentares que apresentam solos diferentes dos ambientes cristalinos, bem intemperizados, profundos e considerados mais agricultáveis (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002; SOUZA, 2003; MORO et al., 2014; SOUZA, 2020).

A distribuição espacial dos solos da região é complexa, podendo ter regiões de baixa e alta fertilidade, e variando de solos rasos e pedregosos, com caatinga arbustiva aberta, aos solos arenosos e profundos, com presença de caatingas de areia (VELLOSO; SAMPAIO;

PAREYN, 2002; MORO et al., 2015). Predominantemente, a região apresenta solos rasos e medianamente profundos, com frequência de chãos pedregosos e afloramentos rochosos (AB'SABER, 1974; SOUZA, 2003).

Para Marcos José Nogueira de Souza (2003), dentro do contexto intertropical onde o Brasil se insere, a região Nordeste é a que possui maior diversidade de quadros ambientais, sendo uma grande parcela sob o domínio de áreas semiáridas, fator determinante na vulnerabilidade econômica regional. Em 2001, o Seminário de Planejamento Ecorregional da Caatinga delimitou oito “ecorregiões da Caatinga”, de acordo com a diversidade das unidades geográficas ecologicamente mais relevantes, na busca da melhor compreensão da biodiversidade distribuída na região (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002). Apesar da importância biogeográfica dessa delimitação, a qual influenciou diversos estudos da região, a categorização das ecorregiões divergiu do espaço geográfico do bioma Caatinga, estabelecido pelo IBGE. O mapa de ecorregiões identificou unidades geográficas delineadas por fatores biótico e abióticos que conduzem a estrutura e a função das comunidades presentes na região, apresentando de forma mais clara a heterogeneidade ambiental da Caatinga (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002).

Diante de tal diversidade, a Caatinga é caracterizada pela extrema irregularidade de chuvas no tempo e no espaço, diferenciando-se tanto de regiões com climas desérticos quanto de climas úmidos, as quais apresentam características climáticas dotadas de maior regularidade (SOUZA, 2003; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019; SOUZA, 2020). Grande parcela da Caatinga (68,8%) recebe chuvas anuais entre 600 mm e 1000 mm, enquanto 0,6% da região recebe menos de 400 mm; 21,9% entre 400 mm e 600 mm; 7,1% entre 1000 mm e 1200 mm; e 1,6% acima de 1200 mm (ANDRADE et al., 2017). Devido à influência marítima, as regiões litorâneas recebem maior quantidade de chuvas, assim como as porções de altitudes elevadas, as quais são afetadas pelos efeitos de chuvas orográficas, podendo ter até 1800 mm anuais (MOURA et al., 2007; SILVA et al., 2017).

Além da irregularidade e incerteza das precipitações e chuvas no geral abaixo de 1000 mm anuais, a região contém evapotranspiração potencial elevada, entre 1500 mm e 2000 mm por ano (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002), excedendo os valores de precipitação típicos do território, tendo 88% das chuvas convertidas em evapotranspiração (ANDRADE et al., 2017). Com um potencial hidrogeológico pequeno em função da acentuada preponderância de rochas do embasamento cristalino (SOUZA, 2003; ANDRADE et al., 2017), 9% das chuvas se tornam escoamento superficial e 3% se transformam em escoamento subterrâneo (ANDRADE et al., 2017). A rede de drenagem superficial da região é ramificada, de caráter

exorréico, aberto para o mar, e formada por rios intermitentes e alguns poucos perenes, sendo estes últimos mais raros (SOUZA, 2003). Desse modo, a Caatinga apresenta balanço hídrico negativo, onde a disponibilidade de água fica restrita à estação chuvosa, podendo-se ter até 11 meses de seca, fenômeno que influencia diretamente no aporte hídrico dos rios intermitentes da região (SOUZA, 2003; ANDRADE et al., 2017; SILVA et al., 2017; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019; SOUZA, 2020).

Além dessas características, o bioma apresenta fatores climatológicos típicos de um clima semiárido, com temperaturas média relativamente altas (de 25 °C a 30 °C) e umidade relativa do ar em torno de 50% (MOURA et al., 2007; ANDRADE et al., 2017; SILVA et al., 2017; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019). Tais características de evapotranspiração, temperatura e umidade são resultado dos altos índices de radiação solar diante a localização geográfica da região próxima a linha do equador (SOUZA, 2003; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019; SOUZA 2020). Somado a isso, os totais pluviométricos variam anualmente e, historicamente, o predomínio desses totais se situam abaixo do comportamento das normais pluviométricas, trazendo um fenômeno conhecido como seca (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002; SOUZA, 2003; ANDRADE et al., 2017; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019). Desse modo, a seca constitui o mais forte impacto negativo na região e, quando associada à sistemas de manejo rudimentares incompatíveis com o regime pluviométrico e com as condições naturais de solo, fauna e flora, caracteriza também um fator de vulnerabilidade social, econômica e ambiental (SOUZA, 2003). A seca afeta mais a população humana que qualquer outro risco ambiental, diante a larga escala e a natureza duradoura do fenômeno (MAREGNO; TORRES; ALVES, 2017)

A estiagem marcante no semiárido é, também, um fator ambiental condicionante para o estabelecimento de espécies vegetais e animais da região, pois a água é o recurso natural essencial para a manutenção dos ecossistemas (SOUZA, 2003; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019; SOUZA, 2020). Como exemplo, esse fator condicionante conduziu, ao longo do tempo, adaptações da fauna presente no bioma, como a aceleração do ciclo reprodutivo durante os períodos de chuva e o estado de dormência ao longo de secas (SOUZA 2020). Dentro da variedade de espécies animais, a fauna da região é composta por pelo menos 276 espécies de formigas, 386 de peixes, 98 de anfíbios, 79 de répteis, 548 de aves e 183 de mamíferos, distribuídas ao longo das 135 unidades geoambientais, sendo diversas delas endêmicas – variando o endemismo de 6% dos mamíferos à 52,9% dos peixes (SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017).

Para a vegetação, Souza (2020) elenca em sua obra o seguinte trecho:

“Para minimizar os danos causados pelo estresse hídrico, as plantas desenvolveram estratégias adaptativas, de modo a preservar suas funções vitais de crescimento e desenvolvimento. Assim, muitas plantas da Caatinga apresentam resistência genética à seca, com características adaptativas associadas às condições ambientais, destacando a caducifolia, a presença de xilopódios, a suculência, a presença de espinhos, o ajuste osmótico, o alongamento radicular, a dormência em sementes, plantas herbáceas de ciclo anual (escape a seca), entre outras características. Em prol da economia hídrica, as plantas podem então combinar mecanismos adaptativos intimamente relacionados, com o objetivo de minimizar a perda de água para a atmosfera e tolerar a desidratação.” SOUZA (2020)

Além disso, as plantas da Caatinga apresentam elevada plasticidade fenotípica, reagindo rapidamente às alterações ambientais em curto prazo, como modificações na área foliar, ajuste estomático, potencial osmótico, entre outros (SOUZA, 2020). Assim, a plasticidade fenotípica e as adaptações genéticas contribuem com a capacidade de sobrevivência e de desenvolvimento das espécies encontradas na Caatinga diante às condições ambientais de déficit hídrico (MICKELBART; HASEGAWA; SALT, 2010 *apud* SOUZA, 2020).

Em face de tais características adaptativas, a Caatinga possui elevada diversidade de espécies e endemismos na flora, mesmo com a sua riqueza de espécies subestimada diante da limitação de conhecimento sobre sua biodiversidade (MORO et al., 2014; FERNANDES; CARDOSO; QUEIROZ et al., 2020). Os diferentes habitats encontrados na Caatinga, resultantes das variações de clima e relevo (como dunas, depressões e chapadas), propiciam a formação de microclimas regionais constituídos por elementos climáticos que possibilitam a formação de diferentes tipos vegetacionais na região, além da vegetação típica de caatinga (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002; SOUZA, 2003; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019; SOUZA, 2020).

Ademais, a Caatinga possui menor riqueza de espécies vegetais em números absolutos que outros biomas brasileiros: 3.347 espécies nativas na Caatinga (FERNANDES; CARDOSO; QUEIROZ, 2020) versus 15.001 na Mata Atlântica e 11.896 na Amazônia brasileira (BFG, 2015), sendo, aproximadamente 14.000 na Amazônia continental (FERNANDES; CARDOSO; QUEIROZ, 2020). Assim, a Caatinga abriga um quarto da diversidade vegetal da Amazônia em uma área seis vezes menor, resultando em uma densidade de espécies de $2,5 \times 10^{-3}$ espécie/km² na Amazônia e $4,0 \times 10^{-3}$ espécie/km² na Caatinga (FERNANDES; CARDOSO; QUEIROZ, 2020). Nesse contexto, apesar de não ser uma relação linear, a Caatinga apresenta densidade florística mais elevada que a Amazônia dentro da proporção espécie por área (FERNANDES; CARDOSO; QUEIROZ, 2020), sendo a floresta sazonalmente seca de maior biodiversidade e riqueza do planeta (FERNANDES; QUEIROZ,

2018; SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017), e tendo na sua heterogeneidade florística o reflexo das adaptações às condições de solo e de clima (SOUZA, 2020).

Ainda nesse contexto, a relação da população sertaneja com as plantas da Caatinga é significativamente influenciada pela sazonalidade climática da região, sendo a extração de produtos vegetais de grande importância socioeconômica para a população regional (ALBUQUERQUE; ANDRADE, 2002; PIO et al., 2019). Somado a isso, a matriz energética da região continua fortemente atrelada ao uso indiscriminado de plantas do bioma (CGEE, 2016). Na Caatinga, uma mesma espécie (como a jurema-preta – *Mimosa tenuiflora*) pode ser considerada sagrada por indígenas e, simultaneamente, a qualidade de sua madeira ser apreciada e útil para confecção de cercas e fabrico de carvão (ALBUQUERQUE; ANDRADE, 2002).

Albuquerque e Andrade (2002) destacam:

[...] os grupos humanos que vivem em regiões de caatinga tendem a conceber os recursos vegetais dentro de um significado muito amplo de utilidade, que necessariamente não tem que ver com a compreensão dos cientistas. O significado de útil varia culturalmente (e intraculturalmente) e isso determina a forma com que as pessoas se relacionam com os recursos do ambiente. Para o sertanejo, todas as plantas da caatinga são consideradas úteis, sem que obrigatoriamente tenham uma utilização direta das pessoas. Todavia, essa percepção está relacionada com a visão de mundo e o próprio conhecimento do recurso por quem dele se utiliza, o que dita normas e padrões de conduta com relação a esses recursos.

Além de apresentar plantas forrageiras e uma quantidade expressiva de recursos vegetais comestíveis (frutos, raízes e folhas), há também o uso com propósitos diversos, como medicinal, extração de madeira, uso doméstico (tecnologia), repelente de insetos, ornamentação, sombra e uso místico (ALBUQUERQUE; ANDRADE, 2002). O conhecimento tradicional acerca do uso medicinal de espécies da Caatinga, que são usadas nas formas de chá, xarope ou banho, resulta em forte pressão do extrativismo pelo uso local e pela existência de mercado consumidor de espécies, como ocorre com a aroeira (*Astronium urundeuva*), o mulungu (*Erythrina velutina*), a baraúna (*Schinopsis brasiliensis*), o angico (*Anadenanthera colubrina*) e o cumaru (*Amburana cearensis*) (ALBUQUERQUE; ANDRADE, 2002; PIO et al., 2019). A coleta do caule e de cascas é o método mais comum de extração para uso medicinal, diante a disponibilidade contínua desses recursos, os quais são minimamente afetados pela deficiência hídrica (PIO et al., 2019). Dessa forma, destaca-se o quanto a flora é essencial para a qualidade de vida e sobrevivência humana na Caatinga, fornecendo madeira, lenha, alimentos e remédios, importantes para a subsistência da população rural.

2.2.2 Degradação Ambiental da Caatinga

Desde o primeiro relatório da Convenção sobre a Diversidade Biológica, a Caatinga recebe destaque diante aos problemas enfrentados pela estiagem, erosão do solo, salinização e desertificação, além de ter forte perda da sua cobertura vegetal, com pelo menos metade da vegetação já perdida para o desmatamento (BRASIL, 1998). O mesmo estudo aponta, também, a grande diferenciação ecológica da região semiárida, onde há graves problemas socioeconômicos com tendência de sobre-exploração dos recursos naturais, os quais afetam a qualidade ambiental e a capacidade de fixar populações (BRASIL, 1998).

De acordo com Antongiovanni, Venticinque e Fonseca (2018), a cobertura vegetal remanescente da Caatinga está fortemente fragmentada e cerca de 50% da vegetação original já foi perdida. O mesmo estudo descreve essa fragmentação da seguinte forma:

[...] os remanescentes da Caatinga estão distribuídos de forma desigual pela paisagem. Na porção oriental, mais próxima da costa, a perda de habitat é severa, e um elevado número de pequenos fragmentos podem ser encontrados. Padrão semelhante pode ser observado no extremo sul da Caatinga e em sua região central. No sul, algumas áreas foram completamente substituídas por matrizes antrópicas e praticamente não há remanescentes de Caatinga. Em contrapartida, a cobertura vegetal é relativamente bem preservada na região oeste, onde há uma alta densidade de fragmentos maiores, muitos deles com mais de 100 mil ha. Grandes fragmentos ainda são encontrados na parte norte e na parte central da região (ANTONGIOVANNI; VENTICINQUE; FONSECA, 2018, tradução nossa).

Essa perda da diversidade natural está, por vezes, associada às técnicas rudimentares de manejo do solo e da vegetação, as quais foram adotadas no passado sem a adequação necessária para as condições ambientais semiáridas do bioma (SOUZA, 2003; FUNCEME, 2015). Com elevada desigualdade e indicadores de desenvolvimento humano baixos, a população rural carente faz uso dos recursos naturais como parte essencial da subsistência, levando a mudanças lentas e contínuas a vegetação da Caatinga (ANTONGIOVANNI; VENTICINQUE; FONSECA, 2018; SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017).

A extração madeireira e a pecuária estão entre os motores antropogênicos predominantes que resultam na heterogeneidade espacial da Caatinga e modificam os remanescentes de vegetação do bioma (ANTONGIOVANNI; VENTICINQUE; FONSECA, 2018). A pecuária no bioma resulta em efeitos negativos no ecossistema, sendo o pastoreio intenso um dos fatores de perda da biodiversidade vegetal da Caatinga (SCHULZ et al., 2019). Dentro da extração madeireira, destaca-se o uso deste insumo para a produção de carvão vegetal destinado a siderurgia e para produção de lenha de uso industrial e doméstico (BRAZIL, 1998; SOUZA, 2003; CGEE, 2016).

Apesar de ser uma das florestas tropicais sazonalmente seca mais populosas do mundo, abrigando mais de 28 milhões de habitantes, a população humana do bioma tornou-se predominantemente urbana desde a década de 1980 (MEDEIROS et al., 2012; SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017). Com 64% da população da região vivendo em cidades, projetos recentes de infraestrutura agrária comercial estão voltados para sustentar o desenvolvimento das atividades desses centros urbanos, resultando em mudanças aceleradas e em larga escala no uso do solo (SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017). Como consequência, 63,6% da Caatinga foi modificada por meio de alterações antropogênicas (SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017), sendo o tamanho da população humana na região uma ameaça à biodiversidade local (MEDEIROS et al., 2012; FUNCEME; 2015; ANTONGIOVANNI; VENTICINQUE; FONSECA, 2018).

Devido às condições climáticas da Caatinga, sua restauração natural é mais complexa e lenta quando comparada a outros ambientes brasileiros, sendo a supressão insustentável dos recursos vegetais uma ameaça à biodiversidade e aos recursos hídricos regionais (SOUZA, 2020). Assim, o manejo não sustentável da terra, associado à elevada densidade demográfica, às técnicas agrícolas ultrapassadas (ex.: corte seguido de queimadas) às pastagens extensivas com sobrepastoreio, ao aumento da pressão antropogênica sobre os recursos naturais e aos elevados índices de aridez, resulta na aceleração dos processos erosivos em áreas onde os relevos são fortemente dissecados, resultando em uma grave ameaça ao bioma: a desertificação (SOUZA, 2003; FUNCEME, 2015; SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019; SOUZA 2020). Assim, a desertificação é uma degradação ambiental generalizada, fenômeno que se desenvolve sobre ambientes fragilizados, sendo consequência da incapacidade de recomposição natural dos componentes de um ecossistema (CGEE, 2016; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019).

De acordo com Mendonça (1990 *apud* MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2019), desertificação, do ponto de vista ecológico, foi caracterizada por José Bueno Conti da seguinte forma:

A escassez de organismos vivos, principalmente vegetais, indicaria a incidência do ambiente desértico e o agravamento dessa deficiência, ou seja, o declínio da atividade biológica corresponderia o avanço do processo de desertificação. Instalar-se-ia uma reação em cadeia com a mineralização do solo, agravamento do trabalho erosivo, invasão maciça das areias e outros processos que acabariam por criar uma degradação ambiental generalizada e o surgimento de condições semelhantes a desertos. A ação do homem estaria na origem dessa modalidade de desertificação, através da retirada predatória e em grande escala dos recursos da natureza.

Esse processo de degradação do solo é considerado uma das principais ameaças à Caatinga, a qual tem 94% do território em áreas com risco moderado ou alto de desertificação (SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017), podendo ter a intensidade dessa degradação fortalecida em decorrência dos efeitos das condições climáticas agressivas no solo exposto (SOUZA, 2003). Ademais, as precárias e deficientes condições de proteção da vegetação, somadas à pressão sobre os recursos naturais e ao descompasso da exploração e da degradação com a capacidade de recuperação dos recursos naturais, incrementam o desequilíbrio ambiental na Caatinga (SOUZA, 2003).

2.2.3 *Conservação Ambiental*

A inquietação quanto à necessidade de conservação do meio ambiente, disseminada em 1992 na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (Eco-92), é resultado de algumas décadas de discussões internacionais acerca das ameaças à natureza e à manutenção sadia dos recursos naturais do planeta. A preocupação social com a degradação ambiental cresceu e se tornou uma pauta política de mais destaque a partir do crescimento da compreensão da sociedade civil sobre impactos ambientais. Esses temas passaram a ser mais discutidos desde 1962 por autores como Rachel Carson, no clássico livro *Silent Spring*; Paul Ehrlich em *The Population Bomb*, e Donella Meadows e Dennis Meadows em *The Limits to Growth* (LOMBORG, 2012; BRASIL, 1992; ONU, 2015).

A Convenção da Diversidade Biológica, iniciada também em 1992, traçou diretrizes e metas essenciais para a conservação da biodiversidade do planeta, sendo essa uma “preocupação comum à humanidade” (BRASIL, 1992). Dentre os 13 objetivos elencados na convenção de 1992, destacam-se os seguintes pontos:

Cada Parte Contratante deve, na medida do possível e conforme o caso: a) Estabelecer um sistema de áreas protegidas ou áreas onde medidas especiais precisem ser tomadas para conservar a diversidade biológica; b) Desenvolver, se necessário, diretrizes para a seleção, estabelecimento e administração de áreas protegidas ou áreas onde medidas especiais precisem ser tomadas para conservar a diversidade biológica; c) Regulamentar ou administrar recursos biológicos importantes para a conservação da diversidade biológica, dentro ou fora de áreas protegidas, a fim de assegurar sua conservação e utilização sustentável; d) Promover a proteção de ecossistemas, habitats naturais e manutenção de populações viáveis de espécies em seu meio natural; e) Promover o desenvolvimento sustentável e ambientalmente sadio em áreas, adjacentes às áreas protegidas a fim de reforçar a proteção dessas áreas; f) Recuperar e restaurar ecossistemas degradados e promover a recuperação de espécies ameaçadas, mediante, entre outros meios, a elaboração e implementação de planos e outras estratégias de gestão; [...] (BRASIL, 1992)

Em momento mais recente, a ONU estipulou os 17 novos objetivos para o alcance do desenvolvimento sustentável (Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável divulgados em 2015), dentre as quais destacam-se: *medidas urgentes para combater a mudanças climáticas e seus impactos* (Objetivo 13); e *proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda da biodiversidade* (Objetivo 15) (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2015).

Por ser signatário desses acordos internacionais para o progresso do desenvolvimento sustentável e proteção do meio ambiente, o Brasil deve cumprir com metas de conservação dos seus ambientes naturais (GUERRA; COELHO, 2009; TEIXEIRA et al., 2021). A CDB se tornou uma referência internacional na difusão e implementação de áreas protegidas (BRASIL, 1992), levando o país a desenvolver instrumentos legais para a regulamentação dessas áreas (GUERRA; COELHO, 2009).

Sob o contexto da Convenção da Diversidade Biológica, assinado em 1992, após oito anos o Brasil estabeleceu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) por meio da Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000, o qual regulamentou o art. 225 da Constituição Federal de 1988 e unificou instrumentos legais anteriores para o estabelecimento de unidades de conservação no país (BRASIL, 2000; GUERRA; COELHO, 2009). Nessa lei foram definidas 12 categorias de unidades de conservação separadas em dois grupos: Uso Sustentável, a qual permite uso direto e sustentável dos recursos naturais; e Proteção Integral, a qual detém maior grau de proteção dentre as unidades de conservação por permitir apenas uso indireto dos recursos (BRASIL, 2000; TEIXEIRA et al., 2021).

Diante os objetivos da CDB, em 2013 foram elaboradas as metas globais de Aichi para 2020, a qual guiou a Meta Nacional 11 que estabelece a implementação de áreas protegidas em pelo menos 30% da Amazônia, 17% dos demais biomas e 10% das áreas marinhas e da costa brasileira (BRASIL, 1992; BRAZIL, 2015). Os relatórios periódicos elaborados pelo Brasil apontam que a Caatinga ainda não atingiu a meta de 17% de sua extensão dentro de áreas protegidas, como assumido pela Meta de Aichi 11 (BRASIL, 1992; UN, 2011; BRAZIL, 2015; BRAZIL, 2019; TEIXEIRA et al., 2021). Mesmo incluindo áreas protegidas estabelecidas por instrumentos legais diferentes do SNUC, como Reservas Legais (RL), Áreas de Preservação Permanente (APP), Terras Indígenas e Quilombolas, a Caatinga está categorizada como “no caminho” para o alcance de 17% do seu território sob salvaguarda de áreas protegidas para 2020, sendo essa uma meta não alcançada pelo país (BRAZIL, 2015; BRAZIL, 2019; TEIXEIRA et al., 2021).

Sob outra perspectiva, incluindo a diversidade territorial do bioma, a maioria das ecorregiões da Caatinga (delimitação elaborada pela Velloso, Sampaio e Pareyn em 2002) não atingiram a Meta de Aichi 11 para serem alcançadas até 2020, sendo alguns desses territórios marcados pela ausência de unidades de conservação de Proteção Integral (Tabela 3) e outros com grandes extensões UCs apenas da categoria Área de Proteção Ambiental, a categoria que detém o menor grau de proteção dos recursos naturais (BRASIL, 2000; TEIXEIRA et al., 2021). Nesse contexto, e dentro dos limites das ecorregiões, a Caatinga possui apenas 7,96% de áreas protegidas por unidades de conservação (excluindo-se as sobreposições), sendo 1,30% de UCs de Proteção Integral e 6,65% UCs de Uso Sustentável (TEIXEIRA et al., 2021). Apenas três das oito ecorregiões em destaque atingiram a meta de 17% de área protegidas (apesar de serem grandes extensões de APAs), enquanto as demais não atingem a metade da referida meta, demonstrando uma baixa cobertura de unidades conservação nas ecorregiões da Caatinga (TEIXEIRA et al., 2021).

Tabela 3 – Porcentagem de unidades de conservação por ecorregiões da Caatinga.

Ecorregiões (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002)	Grupo I – PI	Grupo II – RPPN	Grupo III- RUS	Grupo IV - APA	Total
	Proteção Integral	Uso Sustentável	Uso Sustentável	Uso Sustentável	
Complexo da Chapada Diamantina	4.06%	0.00%	0.15%	2.24%	6.44%
Complexo de Campo Maior	0.15%	0.00%	0.00%	17.13%	17.26%
Complexo Ibiapaba- Araripe	4.50%	0.04%	0.55%	16.28%	21.37%
Dunas do São Francisco	0.00%	0.00%	0.00%	53.14%	53.14%
Depressão Sertaneja Meridional	1.00%	0.01%	0.05%	2.74%	3.80%
Depressão Sertaneja Setentrional	0.18%	0.03%	0.03%	2.26%	2.51%
Planalto da Borborema	0.07%	0.00%	0.00%	0.05%	0.12%
Raso da Catarina	5.37%	0.00%	0.00%	2.02%	7.39%

Fonte: TEIXEIRA et al., 2021 (adaptado pelo autor). Nota: no estudo elaborado por Teixeira et al. (2021), as Unidades de Conservação foram enquadradas dentro de quatro grupos categorizados por nível de proteção seguindo os termos legais do SNUC. Legenda: Grupo I – PI são todas as unidades de Proteção Integral e é categorizado como o grupo de maior nível de proteção; Grupo II – RPPN são as UCs do grupo Uso Sustentável categorizada em um segundo nível de proteção, sendo a sua implementação um requisito do proprietário da terra, tornando-se uma UC privada; Grupo III – RUS são as UCs de Uso Sustentável categorizada em um terceiro nível, intermediárias ao Grupo II – RPPN e ao Grupo IV – APA; Grupo IV – APA são todas as UCs Áreas de Proteção Ambiental, sendo consideradas de baixíssimo nível de proteção diante as permissões de uso estabelecidas pelo SNUC.

Em análises anteriores com os dados do Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC), observa-se que o bioma Caatinga (delimitação do IBGE) estagnou no avanço da implementação de Unidades de Conservação, sendo que até 2014 somente 1,2% do território da Caatinga estava protegido em UCs do grupo Proteção Integral e 6,3% do grupo Uso Sustentável, totalizando 7,5% (BRAZIL, 2015; TEIXEIRA et al., 2021). Sob outra ótica, entre 2008 e 2014 houve uma tímida adição de novas UCs no bioma, sendo em 2008 apenas 0,99% das UCs eram de Proteção Integral e 6,04% de Uso Sustentável (BRASIL, 2008; HAUFF, 2010; BRAZIL, 2015).

Mais recentemente, de acordo com o Sexto Relatório para CDB, a Caatinga obteve 1,28% em aumento de áreas protegidas entre 2012 e 2018, totalizando 8,83%, contudo não há clareza no relatório oficial do Brasil se foram computadas apenas UCs ou se houve contabilização de áreas protegidas determinadas por legislações diferentes ao SNUC, como Terras Indígenas ou Áreas de Preservação Permanente (BRAZIL, 2019; TEIXEIRA et al., 2021). Assim, a implementação de áreas protegidas no Brasil, em especial na Caatinga, ocorreu ora de forma tímida, ora de forma arbitrária, sendo a Caatinga um bioma com baixos índices de proteção (7,7%) quanto ao número de UCs criadas, como também menor extensão dessas áreas, ficando à frente dos Pampas (2,7%) e do Pantanal (4,6%) (VIEIRA; PRESSEY; LOYOLA, 2019).

2.3 Modelagem de Nicho Ambiental (ENM)

De acordo com Schoener (1989), há três conceitos clássicos para *nicho ecológico* na ciência Ecológica: a função do nicho (J. Grinnel); o nicho de uma população persistente (G. E. Hutchinson); e o nicho de recursos utilizados (R. MacArthur & R. Levins). Para Grinnel, o nicho ecológico é a descrição quantitativa de todas as condições ambientais que permitem uma população persistir em uma dada região; para Hutchinson o nicho ecológico de uma espécie é sua função, ou papel, na comunidade ecológica ou seu habitat; e para MacArthur & Levins, nicho ecológico é, também, quantitativo e multidimensional, mas focado inteiramente no que membros de uma população de espécies, de uma dada região, fazem – especialmente como usam o recursos (SCHOENER, 1989).

Além desses conceitos, de acordo com Colwell (1992), historicamente a teoria do nicho também foi sinônimo de relações interespecíficas de espécies, em especial a competição

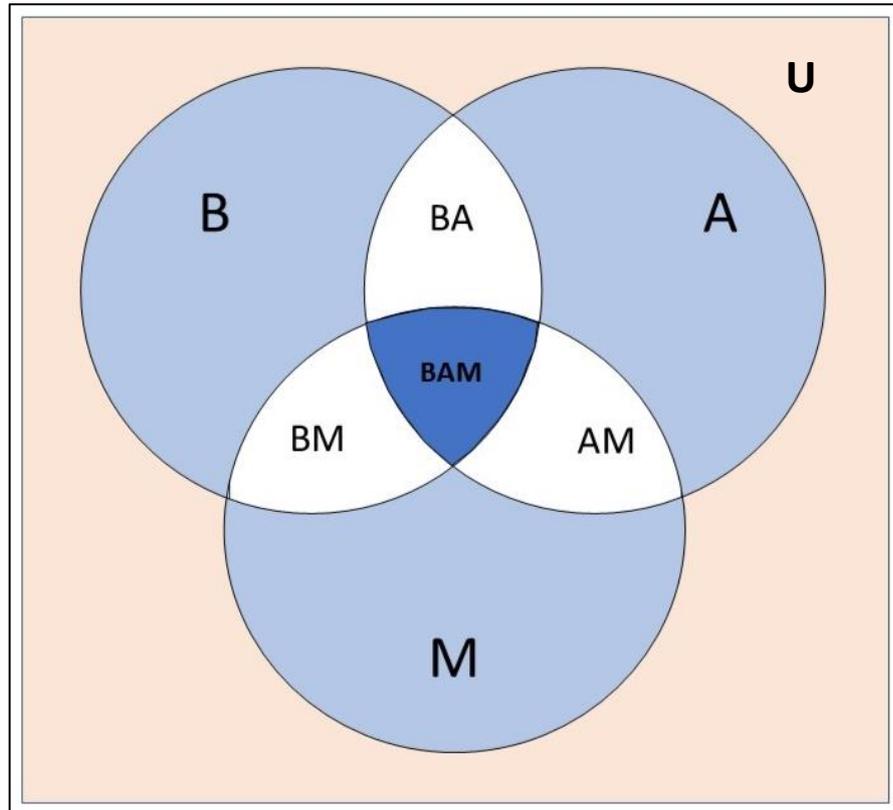
e predação, onde ambas eram chaves de interação que definiam as funções ecológicas das espécies. Apesar da distinção entre esses conceitos e do debate o qual aponta o conceito de *nicho* como atributo da espécie ou do ambiente (SCHOENER, 1989; COLWELL 1992; PULLIAM, 2000), adota-se aqui o termo *nicho* como requisitos ambientais de uma espécie para manter-se em determinado lugar, seguindo a definição de Grinnel.

Com base nisso, a Modelagem de Nicho Ambiental de espécies é uma abordagem que tem como alicerce a associação entre características ambientais e ocorrência geográficas de espécies (PETERSON et al., 2011 *apud* ANDERSON et al., 2016). Ela relaciona, por meio de algoritmos, esses dois grupos de dados: os registros geográficos de ocorrência de uma dada espécie; e os dados ambientais que caracterizam o local onde essas espécies são encontradas (ELITH; LEATHWICK, 2009; ANDERSON et al., 2016). Essa associação de dados ocorre por meio de uma variedade de algoritmos de modelagem que integram os dois tipos de informações (condições ambientais e registros de ocorrências), identificando outras áreas no espaço geográfico modelado onde as características ambientais são adequadas ou prováveis para uma dada espécie se estabelecer, mesmo que ainda não haja registro dela naquele local (GUISAN; ZIMMERMANN, 2000; ANDERSON et al., 2016).

A Modelagem de Nicho Ambiental (*Environmental Niche Modelling – ENM*), pode ser também conhecida como Modelagem de Distribuição Espacial, Modelagem de Nicho Ecológico, ou Modelagem de Adequabilidade de Habitat (PIRES-OLIVEIRA, 2019). Adota-se aqui a denominação ‘Modelagem de Nicho Ambiental’ por ser a mais adequada diante o uso do termo chave “ambiental” (PIRES-OLIVEIRA, 2019) e por ser mais coerente com o conceito de nicho descrito por Grinnel.

Desse modo, ENM consiste em identificar os limites de tolerância de espécies dentro de uma variedade de condições ambientais: condições abióticas, condições bióticas e capacidade de dispersão (Figura 03). As ENMs usam como dados de entrada os pontos de ocorrência de cada espécie, podendo ser aplicada dentro de diferentes cenários climáticos, objetivando um prognóstico da distribuição da espécie em estudo (DE MARCO JUNIOR; SIQUEIRA, 2009; RODRIGUES et al., 2015). Para realizar uma ENM, assume-se dois pressupostos: as espécies estão em equilíbrio com o meio o qual foram registradas; e as características ambientais estão adequadas dentro do espaço e do tempo, visto que essas condições ambientais são fatores limitantes da distribuição espacial das espécies (PEARSON; DAWSON, 2003; ELITH; LEATHWICK, 2009; PIRES-OLIVEIRA, 2019).

Figura 03 – Diagrama de BAM proposto por Soberón & Peterson (2005)



Fonte: elaboração própria, adaptado de Soberón & Peterson (2005). Legenda: diagrama representando as principais condições que podem estabelecer a distribuição geográfica de uma espécie, conhecido por Diagrama de BAM, idealizado por Soberón & Peterson (2005), onde: **U** é o universo ou região geográfica considerada; a área **B** representa as condições bióticas favoráveis, onde interações entre espécies ocorre; **A** é a região onde as condições abióticas são propícias para a espécie – ou Nicho Fundamental, para Hutchinson; e **M** é a área a qual a espécie pode alcançar (mobilidade). **BA** é a região de interseção das condições abióticas e bióticas favoráveis e que pode ser potencialmente invadida pela espécie, a qual ainda não conseguiu alcançá-la diante alguma limitação de mobilidade – também denominada de Nicho Realizado, para Hutchinson. A interseção **BM** é a área acessível e com fatores bióticos favoráveis, mas sem condições abióticas. **AM** é a região de interseção acessível, mas somente com condições abióticas propícias. A região **BAM** é aquela que a espécie consegue alcançar e encontra condições bióticas e abióticas favoráveis para o estabelecimento da espécie, sendo parte da interseção de Nicho Realizado (SOBERÓN; PETERSON, 2005; GIANNINI et al., 2012; PIRES-OLIVEIRA, 2019).

Esse tipo de estudo se tornou comum nas duas últimas décadas diante à ampla disponibilidade de aplicativos e métodos estatísticos e ao aumento na variedade de bancos de dados que reúnem registros de espécies, além da maior disponibilidade de dados ambientais de diferentes regiões e níveis de escala (DE MARCO JUNIOR; SIQUEIRA, 2009). De maneira geral, os ENM's reúnem conceitos da ecologia e da história da natureza com ferramentas desenvolvidas recentemente em estatística e tecnologia da informação, associados também aos

avanços no poder de processamento dos computadores e nos sistemas de informação da geografia física (ELITH; LEATHWICK, 2009).

Uma grande quantidade de algoritmos tem sido adotada nas modelagens, os quais podem ser classificados como “perfil”, “regressão” e “aprendizado de máquina” (HIJMANS; ELITH, 2013). A primeira classe não considera dados de ausência e de fundo (*background data*), sendo utilizado apenas informações de presença; as outras duas, os métodos de regressão e aprendizado de máquina, podem utilizar tanto informações de presença, quanto ausência e dados de fundo, não se tendo uma diferença clara entre essas duas classificações de métodos (HIJMANS; ELITH, 2013).

Apesar de ser usado majoritariamente em áreas da biologia da conservação, os ENM's têm sido utilizados em aplicações diversas das ciências ambientais (Tabela 4), na busca de compreender os padrões de distribuição de espécies, tanto para cenários presentes, como também para cenários paleoclimáticos e modelos projetados para cenários futuros (ELITH; LEATHWICK, 2009; MARCO JUNIOR; SIQUEIRA, 2009; THUILLER et al., 2009). Além disso, a modelagem de distribuição de espécies pode ser executada para ambientes terrestres, ecossistemas aquáticos continentais e ambientes marinhos, sendo a aplicação nos ambientes terrestres para a análises de distribuição de plantas o uso mais comum dos ENM's (ELITH; LEATHWICK, 2009).

Tabela 4 – Exemplos de aplicações de ENM's elencados por De Marcos Junior e Siqueira (2009).

Área de Aplicação	Método Estatístico	Exemplos
Predição de distribuição de espécies raras ou ameaçadas de extinção	Maxent; GARP	Engler et al., 2004; Guisan et al., 2006; Pearson et al., 2007
Guiar levantamentos para detectar espécies novas ou raras e novos padrões de distribuição	GARP; Distância Euclidiana	Raxworthy et al., 2003
Escolha de espécies para recuperação de áreas degradadas	GARP	Siqueira, 2005
Escolha de áreas prioritárias para conservação	GARP; ENFA; GLM	Araújo et al., 2004; Martinez et al., 2006
Determinação de áreas com maior risco de invasão por espécies exóticas	GARP; BIOCLIM; Maxent	Broennimann et al., 2007; Herborg et al., 2007 Loo et al., 2007; Peterson, 2003; Rouget et al., 2001; Sutherst & Maywald, 2005

Análise do efeito das mudanças climáticas globais sobre a biodiversidade	GARP; BIOCLIM; GLM	Heikkinen et al., 2006; Hijmans & Graham, 2006; Parra-Olea et al., 2005; Roura-Pascual et al., 2004; Thuiller et al., 2005
Predição de áreas ideais para plantio	GARP; Maxent; BIOCLIM; DOMAIN	Villordon et al., 2006

Fonte: DE MARCO JUNIOR; SIQUEIRA, 2009. Adaptado pelo autor.

Como exemplo, estudos por meio de ENM na Mata Atlântica e no Cerrado brasileiro já foram realizados tanto com espécies da flora quanto da fauna para cenários paleoclimáticos (BUENO et al., 2017). As predições estatísticas para a Mata Atlântica apresentam resultados que sugerem variações espaciais nos refúgios florestais para os cenários de eras glaciais, predizendo padrões de biodiversidade em táxons endêmicos (CARNAVAL; MORITZ, 2008). Para o Cerrado, foram investigadas a distribuição histórica da riqueza de répteis, além de uma possível expansão e interligação de diferentes savanas na América do Sul (WERNECK et al., 2012). Dentre os resultados, a estabilidade climática indica maior riqueza de répteis endêmicos da região e uma possível variação espacial do Cerrado, sendo possível uma conexão biogeográfica com a savana boliviana. (WERNECK et al., 2012).

Para a Caatinga, estudo realizado buscando padrões na distribuição de lagartos na região gerou resultados onde pesquisadores podem indicar potenciais áreas de prioridade para conservação, como também traçaram direções para uma melhor compreensão da biogeografia, ecologia e riqueza da espécie pesquisada. (MESQUITA et al., 2017). Em outro estudo, utilizando a modelagem aplicada para os efeitos das mudanças climáticas, mostrou-se que espécies de plantas endêmica da Caatinga estão vulneráveis diante os cenários intermediários e pessimistas de alta emissão de GEE's, sendo as espécies endêmicas com características especializadas de reprodução as mais ameaçadas (SILVA et al., 2019).

A modelagem de distribuição de espécies para estudos sobre os efeitos das mudanças climáticas é considerada uma ferramenta útil de análise (MARCO JUNIOR; SIQUEIRA, 2009; PHILLIPS, 2017). De forma geral, para cenários futuros de mudanças climáticas, as espécies podem tanto persistir em seu ambiente de ocorrência atual em virtude da plasticidade fenotípica e da aclimação, quanto migrar para novas áreas com clima mais adequado ou, alternativamente, podem também estar condenadas à extinção (SILVA et al., 2019).

Para essas abordagens sobre os efeitos das mudanças climáticas, utilizam-se como características ambientais os Modelos de Circulação Geral Atmosférica (*General Circulation*

Models – GCMs), os quais são elaborados pelo Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project – CMIP*), vinculado ao IPCC (IPCC, 2013; PIRES-OLIVEIRA, 2019). Assim, o CMIP projeta, por meio de conjunto de variáveis bioclimáticas do presente, cenários que buscam prever as condições climáticas futuras em diversos modelos de circulação global atmosférica (GCMs), os quais simulam condições futuras e podem ser utilizados para ENM's em larga escala (MARCOS JUNIOR et al., 2018; PIRES-OLIVEIRA, 2019).

3 METODOLOGIA

3.1 Banco de Dados

3.1.1 Dados das Espécies Vegetais

Para a execução da modelagem, é necessário ter pontos de ocorrência para as espécies. Posto isto e objetivando alcançar um estudo que seja representativo para a flora lenhosa (árvores e arbustos) da Caatinga como um todo, selecionou-se aleatoriamente 10% da flora lenhosa nativa do bioma para ser modelada. Utilizou-se como referência inicial o checklist de espécies nativas que ocorrem na Caatinga (FERNANDES; CARDOSO; QUEIROZ, 2020). Tal levantamento apontou a ocorrência de 3.347 espécies nativas na Caatinga, distribuídas em 962 gêneros e 153 famílias (FERNANDES; CARDOSO; QUEIROZ, 2020).

Dentre as 3.347 espécies registradas para a Caatinga, houve uma primeira seleção das espécies lenhosas, filtrando da lista de espécies de Fernandes, Cardoso & Queiroz (2020) apenas as espécies de árvores, arbustos e plantas suculentas. Dentre as suculentas, retiramos as de menor porte (cactos globosos, por exemplo), ficando apenas com as arbustivas e arbóreas (cactos colunares), resultando ao final em 1315 espécies. Diante as limitações de processamento para um número muito grande de espécies, foram selecionadas aleatoriamente 10% desse total de espécies lenhosas da Caatinga para modelagem. Todas as espécies nativas foram filtradas por meio de sorteio aleatório na plataforma Invertexto (<https://www.invertexto.com/lista-aleatoria>). Assim, foi gerada uma lista aleatória das 1315 espécies, as quais 131 primeiras foram selecionadas para modelagem de nicho ambiental (Anexo I). Com isso, considera-se que para este trabalho tem-se uma amostragem representativa da flora lenhosa do bioma Caatinga como um todo, na busca da compreensão dos efeitos esperados das mudanças climáticas globais sobre a vegetação do bioma.

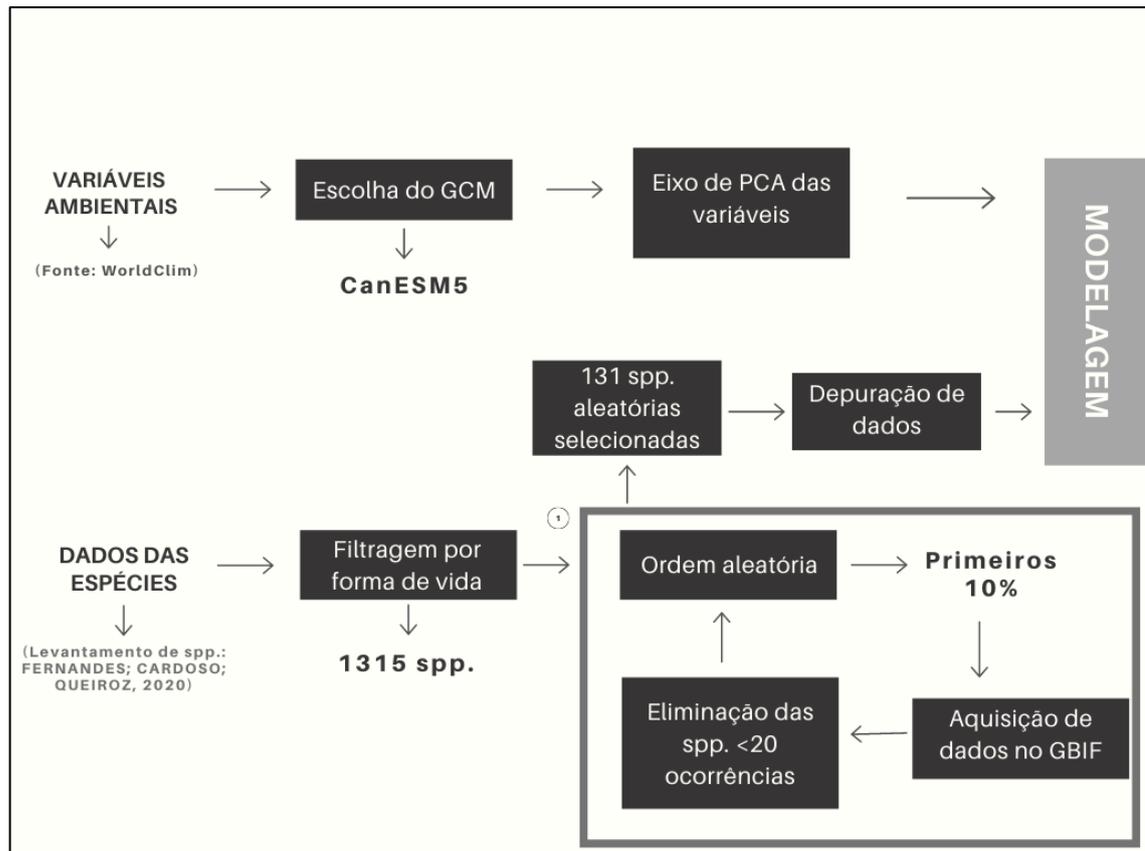
Para aquisição dos dados de distribuição das 131 espécies, utilizou-se dados primários de biodiversidade (pontos de ocorrência) disponíveis na base de dados do *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) (<https://www.gbif.org/>), maior plataforma de acesso à dados de biodiversidade (ANDERSON et al., 2016). Basicamente, três setores participam do processamento de dados do GBIF: provedores, os quais são museus, herbários e rede de observadores; usuários, que inclui o público em geral, analistas governamentais, ONGs, setor privado e cientistas; e equipe técnica, a qual gerencia os serviços e o banco de dados ofertado pela plataforma (ANDERSON et al., 2016). Para executar a modelagem com dados de boa qualidade, certas precauções no uso dos dados da base GBIF foram tomadas, seguindo as

orientações apontadas por Andrade et al. (2016) e Oliveira (2019), as quais foram adaptadas à pesquisa e serão abordadas no tópico Depuração de Dados.

Em passo seguinte, foram adquiridos os registros de ocorrência na plataforma GBIF dessas 131 espécies. Utilizou-se na modelagem apenas as espécies com 20 ou mais pontos de ocorrência disponíveis. Essa limitação se mostrou necessária diante ao processo de depuração de dados, o qual reduz em mais de 30% os registros defeituosos do GBIF. Dessa forma, aplica-se na modelagem apenas espécies com pontos de ocorrência em número suficiente para gerar um modelo mais robusto. Quando uma espécie dentre as selecionadas apresentou menos de 20 pontos disponíveis na base de dados do GIBF, ela foi substituída pela próxima espécie disponível na lista aleatória gerada anteriormente.

Somado a este fato, também foram substituídas as espécies que apresentaram tabela de atributos fora de padrão (colunas com formatação de dados diferentes), as quais possuíam categorias de dados divergentes do banco de dados padrão do GBIF. Assim, nessa primeira etapa, foram substituídas 24 espécies, sendo 19 por ter baixo número de ocorrências (< 20 pontos) e cinco por apresentarem inconsistências na qualidade dos dados iniciais. Ao final da seleção, obtivemos 75.671 registros primários de ocorrência de 131 espécies selecionadas aleatoriamente (Figura 03).

Figura 03 – Fluxograma entre a fonte de dados e a modelagem



Fonte: elabora pelo autor e por Sâmila Lima. Legenda: 1 – espécies que apresentaram menos de 20 registros foram descartadas, sendo selecionada para preencher a posição dessa espécie eliminada aquela em posição seguinte na lista aleatória gerada.

3.1.2 Variáveis Bioclimáticas

Por meio da base de dados WorldClim-[CMIP6] (<https://worldclim.org/>), é possível adquirir variáveis bioclimáticas do presente em formato *raster* para quase toda a superfície terrestre do planeta (com exceção da Antártida). Essa base de dados também inclui variáveis bioclimáticas projetadas para cenários futuros de aquecimento global, estimados pelo IPCC6, as quais estão incluídas em 9 GCMs (FICK; HIJMANS, 2017; SWART et al., 2019a; PIRES-OLIVEIRA, 2019). Cada GCM apresenta 19 variáveis bioclimáticas (Tabela 5), sendo 08 variáveis de precipitação e 11 variáveis de temperatura (FICK; HIJMANS, 2017; PIRES-OLIVEIRA, 2019) que representam tendências anuais, sazonalidades e dados extremos ou limitantes (KARGER et al., 2017; KARGER et al., 2019).

Para os cenários futuros, os GCMs podem apresentar até quatro projeções, intituladas *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), as quais são cenários plausíveis de emissão atmosférica de carbono resultados de distintos caminhos sociais relativos ao controle,

ou não, das mudanças climáticas para o final do século. Esses cenários variam entre o mais otimista, que considera que a humanidade reduzirá as emissões de gases de efeito estufa, ao mais pessimista, que considera que as tendências de aumento de emissão continuarão, ou serão acentuadas (SWART et al., 2019a). Os SSPs, lançados em 2021 pelo IPCC AR6, são antecedidos pelos *Representative Concentration Pathways* (RCPs), lançados no IPCC AR5, sendo os SSPs a nova versão do RCPs para o CMIP6 (HAUSFATHER, 2018).

Nesse contexto, os SSPs abrangem pressupostos socioeconômicos aos cenários de emissão de carbono, tais como crescimento populacional, acesso à educação, urbanização, crescimento econômico, disponibilidade de recursos naturais, desenvolvimento tecnológico e impulsores de demanda – como estilo de vida, por exemplo (HAUSFATHER, 2018).

Tabela 5 – Código e nome das 19 variáveis bioclimáticas.

Código	Variáveis Bioclimáticas
Bio1	Média anual de temperatura
Bio2	Variação diurna média (média entre temperaturas máxima e mínima)
Bio3	Isotermalidade (Bio2/Bio7)x100
Bio4	Sazonalidade da temperatura (desvio padrão x100)
Bio5	Temperatura máxima do mês mais quente
Bio6	Temperatura mínima do mês mais frio
Bio7	Variação anual de temperatura (Bio5 – Bio6)
Bio8	Temperatura média do trimestre mais úmido
Bio9	Temperatura média do trimestre mais seco
Bio10	Temperatura média do trimestre mais quente
Bio11	Temperatura média do trimestre mais frio
Bio12	Precipitação anual
Bio13	Precipitação do mês mais chuvoso
Bio14	Precipitação do mês mais seco
Bio15	Sazonalidade de precipitação (Coeficiente de Variação)
Bio16	Precipitação do trimestre mais úmido
Bio17	Precipitação do trimestre mais seco
Bio18	Precipitação do trimestre mais quente
Bio19	Precipitação do trimestre mais frio

Fonte: WorldClim (2021), disponível em <https://worldclim.org/data/bioclim.html>. Adaptado e traduzido pelo autor.

Para este trabalho, optou-se pelo GCM canadense *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis* – CanESM5 (SWART et al., 2019a; SWART et al., 2019b). O modelo de circulação global do Centro Canadense de Modelagem e Análise Climática é destacado por pesquisadores da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) por conseguir representar um cenário mais árido em estudo de remoção de viés de um grupo de

GCMs do CMIP5, lançado com IPCC AR5 (MARCOS JUNIOR et al., 2018). Além disso, Pires-Oliveira (2019) mostrou que o modelo canadense teve menor correlação com outros GCMs. O mesmo autor afirma que GCMs com “[...] redundância nos padrões de variação dos dados deve ser descartados e apenas os menos correlacionados devem ser utilizados.”. Ademais, não há necessidade da aplicação de vários GCMs em um ENM, evitando-se também escolhas aleatórias de modelos de circulação global, visto que muitos possuem alto grau de correlação (VARELA; LIMA-RIBEIRO; TERRIBLE, 2015; PIRES-OLIVEIRA, 2019).

O modelo de circulação CanESM5 disponibiliza quatro cenários futuros de acordo com as Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0, SSP5-8.5), além de dados do presente. Para execução do ENM, será aplicado o cenário intermediário e o mais pessimista de aquecimento global (SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente), já que atualmente o cenário mais otimista parece não ser o mais provável. Ademais, os modelos adotados são projetados para o período entre os anos 2061 e 2080. Os cenários intermediários e pessimistas do IPCC AR5 foram aplicados em modelagem de nicho ecológico de espécies vegetais para a Caatinga, apresentando respostas satisfatórias, sendo o cenário mais otimista (antigo RCP2.6) descartado por ser raramente utilizado para esse tipo de estudo (SILVA, et al., 2019).

Além disso, diante da extensão geográfica da área de estudo e das limitações de processamento, utilizou-se os dados do WorldClim com resolução de 5 minutos de arco (minutos de um grau de longitude e latitude), o que representa um pixel quadrado com aproximadamente 10km de lado (PEARSON et al., 2007). Essa resolução se mostrou adequada para estudos de dimensões continentais ou subcontinentais, evitando-se a autocorrelação espacial de dados (baixa variação entre pixels vizinhos), não sendo necessário o uso de camadas com resolução de elevado detalhe (1min. arc ou 1km) – com maior carga de processamento de dados – tampouco resolução para estudos de nível global (10min. arc ou 20km) (CHAPMAN; MUÑOZ; KOCH, 2005; PEARSON et al., 2007; GIANNINI et al., 2012).

Para a presente modelagem de nicho ambiental, as 19 variáveis bioclimáticas foram sumarizadas por meio de eixos da Análise de Componentes Principais (PCA – *Principal Component Analysis*). Desse modo, elimina-se possíveis correlações entre as variáveis bioclimáticas, adotando-se os eixos como preditores para a modelagem do cenário atual (MARCO; NOBREGA, 2018). Para a modelagem dos cenários futuros, projetou-se os modelos de PCA adotados no presente sobre as variáveis do futuro, mantendo-se o raciocínio inicial dos eixos da PCA, utilizando o pacote R *ENMGadgets* (BARVE; BARVE, 2019). Assim, adotou-se também eixos de PCA para as variáveis bioclimáticas dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

3.2 Análise de Tendências de Variáveis Bioclimáticas

Para a modelagem, utilizou-se eixos de PCA, que sumarizam as 19 variáveis bioclimáticas (Tabela 4) disponíveis no WorldClim, com dados de precipitação e temperatura. Contudo, na busca de compreender como as mudanças climáticas globais estavam alterando os padrões de precipitação e temperatura na Caatinga, selecionou-se quatro variáveis para realização de análise de tendências de alterações climáticas entre o cenário presente e os cenários de mudanças potenciais futuras. Elas são: Bio01 – Média Anual da Temperatura do Ar; Bio12 – Quantidade de Precipitação Anual Acumulada; Bio16 – Média Mensal da Quantidade de Precipitação no Trimestre mais Úmido; e Bio17 – Média Mensal da Quantidade de Precipitação no Trimestre mais Seco.

Tais variáveis foram selecionadas levando em conta as principais projeções de mudanças para o nordeste da América do Sul (apontadas no sexto relatório do IPCC). Também houve consideração dos fatores ambientais característicos da Caatinga, como clima típico de uma região semiárida – com temperaturas médias elevadas e umidade relativa do ar em torno de 50% – irregularidade de chuvas no tempo e espaço, elevada evapotranspiração, balanço hídrico negativo e disponibilidade de água restrita à quadra chuvosa. Dessa forma, as variáveis bioclimáticas selecionadas podem representar as características ambientais de precipitação e temperatura da Caatinga dentro das singularidades do bioma.

Objetivando compreender os efeitos previstos pelos modelos de mudanças climáticas sobre as principais variáveis, observou-se o quanto precipitação e temperatura mudaram em relação ao modelo do clima presente e aos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (intermediário e pessimista, respectivamente). Para isso, foram gerados 1000 pontos aleatórios, espacializados dentro do bioma da Caatinga (sensu IBGE 2019) e com distâncias superiores a 10km entre si, por meio da ferramenta ‘*Pontos aleatório no interior de polígonos*’, que fica na aba *Investigar* do menu *Vetor* no software QGIS (versão 3.16.6-Hannover).

Para cada ponto, foram extraídos os dados das variáveis Bio01, Bio12, Bio16 e Bio17 para o presente e para os cenários futuros. Em seguida, foram realizadas análises estatísticas descritivas de média e desvio padrão, objetivando avaliar se a tendência é de aumento ou redução de precipitação e temperatura do clima da Caatinga como um todo. Em seguida, comparou-se formalmente se havia diferenças significativas entre os valores climáticos do presente e dos modelos futuros. Para isso, avaliou-se a normalidade dos dados por meio do

teste de normalidade de Shapiro-Wilk no software PAST. Como os dados diferiram significativamente da normalidade, comparamos as médias de precipitação e temperatura do presente e dos cenários futuros usando o teste não paramétrico de comparação de médias de Mann-Whitney, também processado no software PAST (versão 4.08, 2001) (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001).

3.3 Depuração de Dados

3.3.1 Etapas da Depuração

O aumento do uso de ENM's nos últimos anos tem como um dos motivos a crescente disponibilidade de dados primários de biodiversidade, como os acessíveis no GBIF (ANDERSON et al., 2016). Contudo, esse aumento na aplicação de ENM's também mostrou que os dados primários de biodiversidade necessitam ser preparados e depurados, não sendo adequado o uso deles da forma primária sem um controle de qualidade (ANDERSON et al., 2016; PIRES-OLIVEIRA, 2019). De modo geral, os dados registrados em plataformas como GBIF são inseridos e acumulados com diferentes objetivos e metodologias, gerando conjuntos de dados de diferentes fontes e padrões de qualidade (ANDERSON et al., 2016).

Anderson e colaboradores (2016) elencaram três classes de dificuldades que afetam a acessibilidade de dados digitais primários de biodiversidade: 1) aqueles que afetam os dados em si, como inúmeras imprecisões (ex.: erros de localização), vieses (ex.: escolhas do observador, ou metodologias incorretas) e dados espaciais e ambientais vazios (ex.: falta de georreferenciamento, ou identificação taxonômica incorreta), resultando em dados incompletos e incertos; 2) aqueles que envolvem o acesso aos dados, como a falta de informações completas disponibilizadas aos usuários (ex.: sensível proteção de espécies contra exploração, ou proteção de interesses de pesquisadores), tornando a manipulação dos dados difícil; 3) aqueles que afetam o uso de dados, como o uso de dados primários à análises as quais não são adequadas, como aplicação sem um processo de limpeza, sem controle de qualidade ou em larga-escala (ex.: espécies de todo um continente).

Ao adquirir as informações do GIBF, a matriz de dados primários de cada espécie incluía 51 colunas de dados, que expressam desde dados taxonômicos, informações de coleta e armazenamento, à dados de localização e características ambientais. Diante da variedade de informações primárias existentes e a grande quantidade de registros de ocorrências, foi aplicado

aos dados um processo de depuração por meio de um algoritmo em ambiente de linguagem R (R Development Core Team 2020), o qual foi separado em três etapas (Tabela 6).

A primeira delas excluiu os registros anteriores à 1970, diante da falta ou à imprecisão de recursos tecnológicos de georreferenciamento até aquele ano, como também registros que não traziam dados de georreferenciamento para a observação. Desse modo, também, obtêm-se registros contemporâneos aos da série histórica dos das variáveis bioclimáticas. Em seguida, ainda na primeira etapa, foram removidas as ocorrências com dados de georreferenciamento que caíam em capitais, em centroides de países, registros duplicados (dados de localização exatamente iguais), registros na sede do GBIF em Copenhague, registros na sede de instituições de biodiversidade, pontos fora da curva (outliers geográficos), pontos sobre o oceano e registros com valor ‘zero’ nos dados de georreferenciamento (latitude e longitude), usando-se para isso a função *clean_coordinates*’ do Pacote *CoordinateCleaner* para R (ZIZKA et al., 2019).

Na segunda etapa foi realizada uma padronização dos nomes científicos aplicados a cada espécie. Como uma espécie pode, além do nome válido, ter sido cadastrada sob um nome em sinonímia, avaliamos os nomes científicos usados para cada espécie por meio da análise das colunas que informavam o nome da espécie e o nome científico. Foram identificados registros de nomes aceitos e seus sinônimos nos dados primários, os quais foram analisados na plataforma PlantMiner (CARVALHO; CIANCIRUSO; BATALHA, 2010) (<http://www.plantminer.com/>), como também pesquisados individualmente na base de dados da Flora do Brasil (<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>). Após análise dos nomes e sinônimos, os registros inconsistentes foram removidos. Em uma terceira e última etapa foi executado a exclusão de dados duplicados, que continham mesmo nome de espécie, mesma latitude e mesma longitude.

Tabela 6 – Descrição das etapas de depuração.

Etapas	Descrição
Dados primários de biodiversidade	Dados primários brutos, contendo 51 colunas com informações de registros de ocorrência de uma dada espécie
1ª etapa	Eliminação de registros anteriores à 1970 e localizados: em capitais; em centroides; iguais; na sede do GBIF; na sede de instituições de biodiversidade; outliers; pontos no oceano; e valor ‘zero’ para os dados de georreferenciamento
2ª etapa	Identificação e eliminação de ocorrências com inconsistência nas informações de nome científico e sinônimos
3ª etapa	Eliminação de dados duplicados

Fonte: elaborado pelo autor

3.4 Modelagem de Nicho Ambiental

De acordo com Hijmans & Elith (2013), uma modelagem de nicho ambiental tem como objetivo “estimar a similaridade de condições de qualquer local com condições de locais de ocorrência já conhecidos de um fenômeno”, sendo comum o uso desse método para prever a distribuição de espécies baseando-se em dados climáticos preditores, assumindo que o clima é uma das principais variáveis para estabelecer o nicho de uma espécie (HIJMANS; ELITH, 2013). Para isso, passos geralmente tomados para executar a modelagem (GIANNINI et al., 2012; HIJMANS; ELITH, 2013) foram adaptados e adotados para esse trabalho, os quais são:

- Tratamento dos pontos de ocorrência: aquisição dos locais de ocorrência de uma dada espécie, avaliação e preparo dos pontos de presença (e ausência se disponível e adotado);
- Tratamento dos dados bioclimáticos: escolha, aquisição e preparo das variáveis bioclimáticas (preditores ambientais);
- Escolhas dos algoritmos a serem utilizados, sendo baseado nos objetivos do estudo e na disponibilidade dos dados de ocorrência;
- Modelos: execução, avaliação e ajustes nos modelos gerados;
- Conjunto: união (*ensemble*) dos modelos gerados e análise de incertezas

Assim, executou-se a Modelagem de Nicho Ambiental em ambiente R, sendo possível adotar diferentes modos de execução e uso de algoritmos com técnicas estatísticas variadas. Para esse estudo, adotou-se o *framework* do pacote ‘*dismo*’, aplicado em ambiente R (HIJMANS; ELITH, 2013), por permitir implementar algoritmos além daqueles disponibilizados pelo pacote. Assim, a ENM processou, mantendo-se a configuração padrão, os algoritmos das seguintes técnicas estatísticas: Envelope de Superfície (SER ou BIOCLIM); Análise de Fatores de Nicho Ecológico (ENFA); Modelo Linear Geral (GLM); Múltiplas Splines Adaptativas de Regressão (MARS); Máxima Entropia (MAXENT); Máquinas de Vetor de Suporte (SVM); Redes Neurais Artificiais (ANN); e *Random Forest* (RF). Destaca-se que, diante a extensão dos pontos de ocorrências e sua maior concentração no nordeste brasileiro, foram consideradas pelos algoritmos apenas um ponto de ocorrência por pixel. Isso é necessário para reduzir o viés no modelo gerado no caso de pontos que ocorrem em uma mesma célula de dados bioclimáticos.

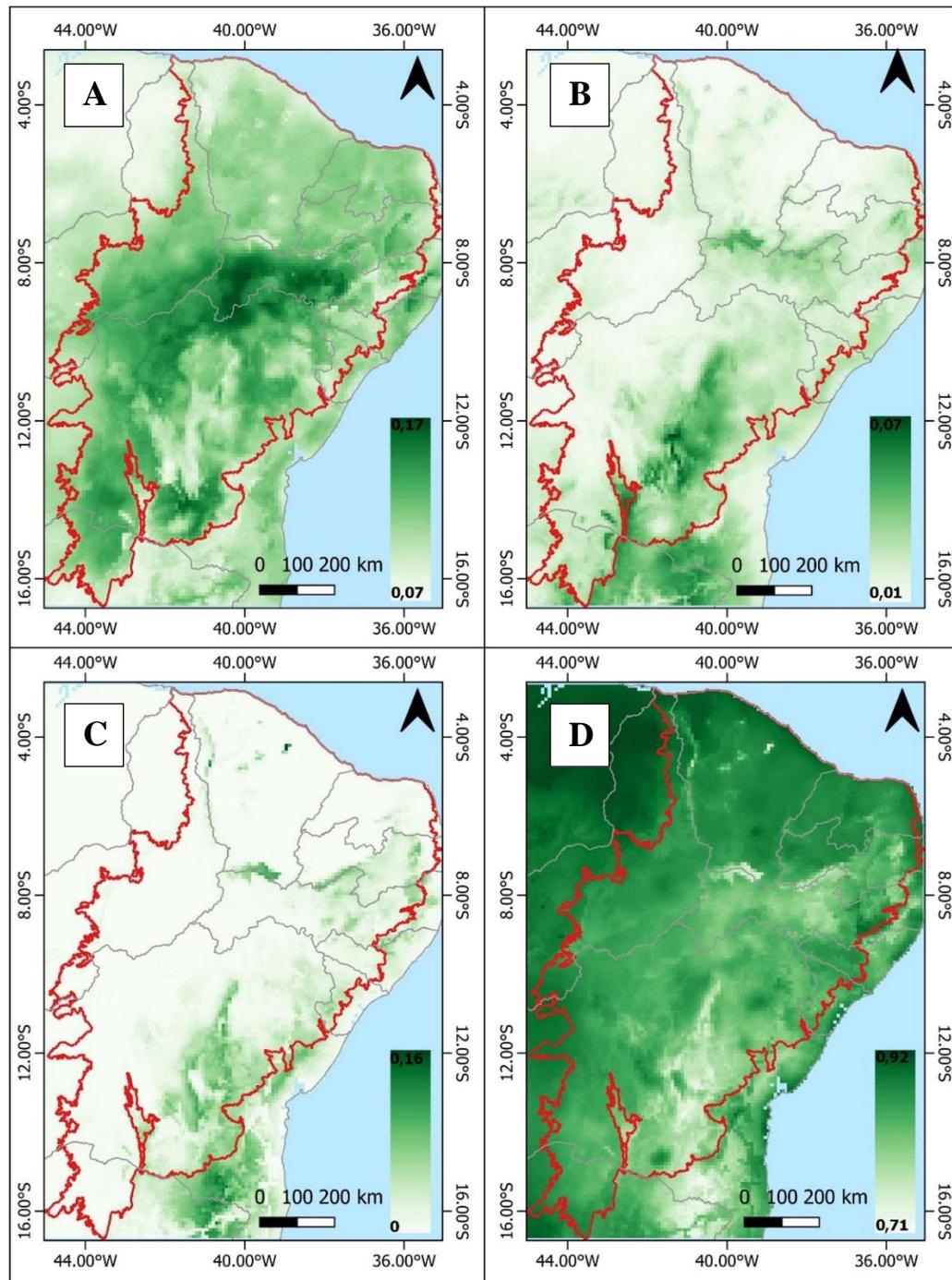
Para avaliação da performance dos modelos, adotou-se o *True Statistic Skills* (TSS), recomendado por Allouche et al. (2006) como métrica de avaliação de modelos de distribuição

de espécie. Desse modo, foram mantidas as espécies modeladas com TSS superior a 0,4 (ZHANG et al., 2015). Além disso, como estratégia de particionamento, adotou-se o método *bootstrap*, o qual seleciona 70% dos dados para calibração e 30% para avaliação. Dessa forma, os modelos gerados para cada espécie, no cenário presente, apresentaram acurácia satisfatória dentro da avaliação das métricas indicadas.

Os modelos gerados para cada espécie foram integrados em conjunto (conhecido como *ensemble*) (ARAUJO; NEW, 2007) em dois momentos. O primeiro deles foi realizada a média simples dos modelos por espécie (com TSS > 0.4), totalizando em 393 *rasters* (131 modelos para cada cenário). Em seguida, converteu-se os dados matriciais contínuos em dados binários (ausência ou presença), adotando-se como limite o padrão do ‘dismo’. O segundo *ensemble* foi executado por meio da soma dos valores das médias das 131 espécies, em cada pixel de cada cenário, podendo-se extrair, ao final do resultado modelado de adequabilidade, a riqueza potencial para cada espécie – por meio da sobreposição dos *rasters* binários. Assim, tem-se como foco no resultado final do processo de modelagem de nicho ambiental deste trabalho a riqueza potencial de espécies para o presente e para os cenários intermediário e pessimista de mudanças climáticas. Ou seja, cada pixel dos dados matriciais finais para os cenários modelados traz o valor total da quantidade de espécies que potencialmente se adequariam àquelas condições previstas pelas variáveis bioclimáticas.

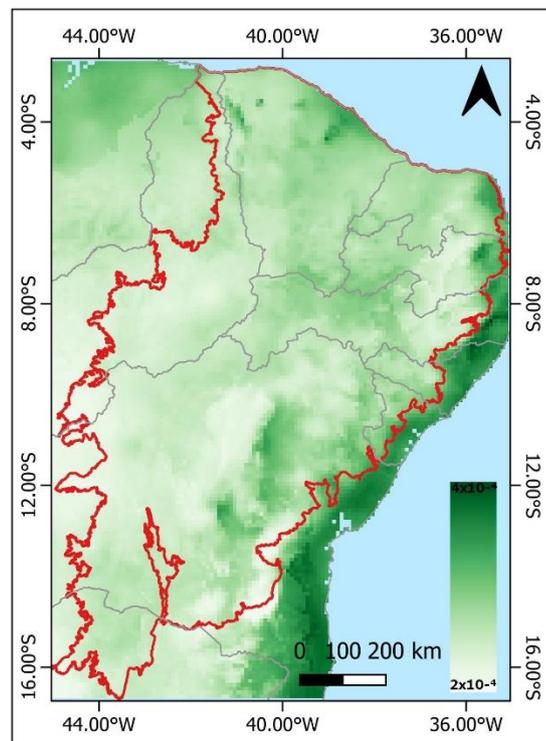
Paralelamente ao processo de modelagem de nicho ambiental, foi realizada a análise de incerteza dos modelos gerados (JOSE’ALEXANDRE FILHO et al., 2009; TERRIBILI et al., 2012), independentemente do valor do TSS. Para isso, analisou-se quatro componentes em cada pixel, aninhados de modo hierárquico decrescente de maior importância: espécies; intervalo temporal (presente e futuro); cenário de mudanças climáticas (SSPS); e algoritmos das técnicas estatísticas. Assim, para cada célula da área de estudo, verificou-se a variação de adequabilidade para cada um desses componentes (Figuras 4 e 5) por meio da média da soma dos quadrados (ANOVA). Com isso, fraciona-se a variação da adequabilidade gerada em cada célula e verifica-se qual desses componentes ‘explica’ a variação de adequabilidade para aquele pixel. Ou seja, consegue-se obter quanto cada componente desses interfere na adequabilidade final do modelo.

Figura 4 – Resultado da análise de incerteza para as quatro componentes variáveis dentro do modelo da Caatinga – Parte 1



Fonte: autor. Legenda: valores de cada pixel é a ‘explicação’ da variação da adequabilidade média, onde A – representa a variação de adequabilidade da componente *espécies* (de 0,07 a 0,17); B – a proporção da variação entre as componentes *intervalo de tempo* e *espécie* (de 0,01 a 0,07); C – a proporção da variação entre as componentes *cenário de mudanças climáticas* e *intervalo de tempo* (de 0 a 0,16); D – a proporção da variação entre as componentes *algoritmos de técnicas estatísticas* e *cenários de mudanças climáticas* (de 0,71 a 0,92).

Figura 5 - Resultado da análise de incerteza para as quatro componentes variáveis dentro do modelo da Caatinga – Parte 2



Fonte: autor. Legenda: valores de cada pixel é a ‘explicação’ da variação da adequabilidade *residual* (de 2×10^{-4} a 4×10^{-4})

Por fim, para compreender melhor os impactos na perda da biodiversidade vegetal da Caatinga, as camadas matriciais (*rasters*) dos cenários futuros tiveram os valores subtraídos pelos dados do presente, gerando dois produtos desse cálculo. Para cada *raster* resultante dessa subtração, classificou-se os valores dos pixels em três grupos, separados por intensidade de perda: (I) a classe com pixels menores que -1, onde houve perda acentuada de riqueza; (II) a classe com pixels entre -1 e 1, que representam células sem alteração de adequabilidade para as espécies, com valores de perda ou ganho próximo a zero; e (III) a classe com pixels maiores que 1, os quais apresentaram ganho de adequabilidade. Para cada uma dessas classes, calculou-se sua extensão dentro do bioma Caatinga para cada um dos dois processos de subtração.

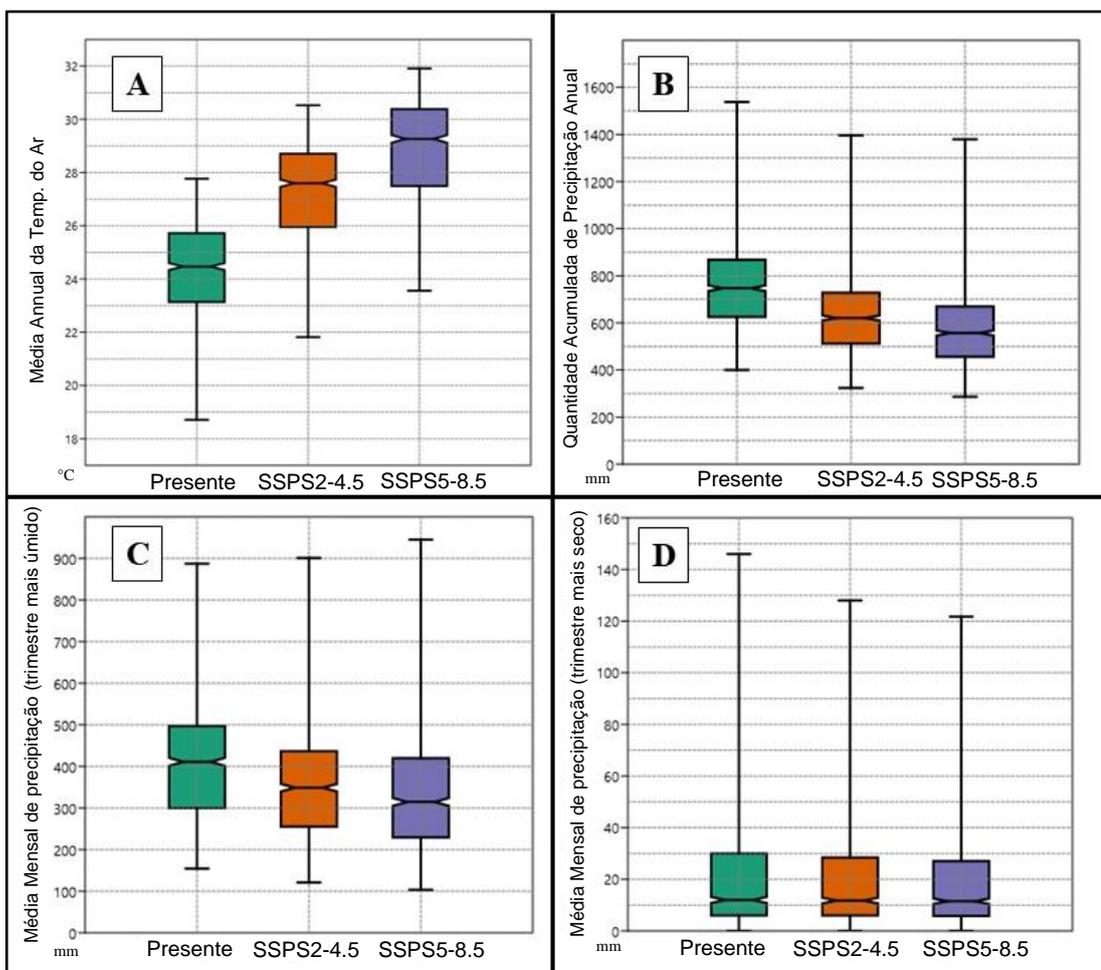
Os modelos de nicho ambiental gerados foram processados e tratados no software QGIS (versão 3.16.6-Hannover, 2020), sendo adquiridas informações pertinentes para a compreensão do trabalho, como áreas, dados estatísticos e distribuição espacial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Tendências Climáticas

Sob a perspectiva das tendências das variáveis bioclimáticas para o presente e as projetadas para cenários futuros, as análises (Figura 7) apontam para uma redução média das chuvas no período mais úmido, com presença de eventos climáticos extremo, acentuação da escassez de chuvas no período de estiagem e aumento médio das temperaturas anuais. Tais inferências corroboram com as tendências reportadas pelo sexto relatório do IPCC (2021), como também com os resultados extraídos por meio da modelagem de nicho ambiental, discutidas no próximo tópico (Tópico 4.3).

Figura 7 – Análises de tendências das variáveis Bio01 (A), Bio12 (B), Bio16 (C) e Bio17 (D).



Fonte: elaborado pelo autor. Descrição: análises de tendências para o presente (verde), para o cenário intermediário de mudanças climáticas (laranja), e para o cenário pessimista de mudanças climáticas (roxo). A – média anual da temperatura do Ar; B – quantidade de precipitação anual acumulada; C – média mensal da quantidade de precipitação no trimestre mais úmido; D – média mensal da quantidade de precipitação no trimestre mais quente.

Diante essa análise de tendências para o polígono do bioma Caatinga (Tabela 8), destaca-se que há projeção de um aumento médio da temperatura entre 2,9°C e 4,5°C dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 em relação ao clima atual, respectivamente, sendo a média do cenário mais pessimista maior que a temperatura máxima do presente (Figura 7 – A). Já a quantidade de precipitação acumulada tem uma redução média, de 120mm a 170mm, para os cenários intermediários e pessimista, respectivamente (Figura 7 – B).

Por outro lado, para a média mensal da quantidade de precipitação no trimestre mais úmido (Figura 7 – C), projeta-se uma redução na média das chuvas, de 50mm a 70mm para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente. Por último, a média mensal da quantidade de precipitação no trimestre mais seco (Figura 7 – D), apresenta redução de eventos de chuva e leve atenuação da média mensal.

Tabela 8 – Estatística descritiva das tendências das variáveis bioclimáticas selecionadas

Variável Bioclimática	Cenário projetado	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão
Bio01	Presente	18,71	27,77	24,35	24,47	1,77
	SSPS2-4.5	21,81	30,53	27,27	27,60	1,81
	SSPS5-8.5	23,56	31,91	28,90	29,27	1,85
Bio12	Presente	400,00	1538,00	756,10	747,00	180,15
	SSPS2-4.5	324,00	1396,00	634,47	620,75	169,64
	SSPS5-8.5	286,25	1379,50	585,24	557,12	176,65
Bio16	Presente	154,00	887,00	413,10	411,00	133,03
	SSPS2-4.5	120,75	901,25	361,12	348,87	131,43
	SSPS5-8.5	103,50	945,00	342,89	314,62	144,91
Bio17	Presente	0	146,00	24,43	12,00	28,14
	SSPS2-4.5	0	128,00	22,70	11,75	25,03
	SSPS5-8.5	0	121,75	21,88	11,50	23,99

Fonte: elaborado pelo autor. Descrição: Estatística descritiva da análise de tendências para as variáveis Bio01 – Média anual da temperatura do Ar; Bio12 – Quantidade de precipitação anual acumulada; Bio16 – Média mensal da quantidade de precipitação no trimestre mais úmido; Bio17 – Média mensal da quantidade de precipitação no trimestre mais quente.

Destaca-se que para as três variáveis de precipitação, há indicativo de potenciais eventos extremos representados pelos pontos com quantidades máximas (*outliers*), especialmente no trimestre mais úmido onde há tendência de aumento desses eventos. Diante disso, as chuvas intensas concentradas em pequenos intervalos de tempo já recebem destaque no sexto relatório do IPCC (2021) para a região do nordeste da América do Sul, onde está localizada a Caatinga.

A análise de tendência para a Caatinga confirma o aumento das temperaturas na região, que já enfrentam temperaturas mais elevadas e períodos de estiagem maiores. Ambos os destaques intensificam os riscos de desertificação de regiões da Caatinga quando analisados em conjunto com a perda da riqueza de espécie vegetais que ocorrem no bioma (Tópico 4.3), fatores que resultam na degradação generalizada do ambiente – notadamente conhecida como desertificação. Dessa forma, os processos de desertificação e de degradação ambiental estão sob maior pressão do clima – como já apontado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2016) – condição que agrava os impactos das mudanças climáticas no bioma.

Além disso, diante essa redução do aporte hídrico pelas chuvas e do aumento das temperaturas, o balanço hídrico negativo tende a se intensificar no sertão nordestino, reduzindo a permanência de água no solo e a disponibilidade hídrica para as populações. Isso acarretará efeito direto na agricultura, na criação de animais e no abastecimento humano, podendo acentuar os problemas socioeconômicos da região (CGEE, 2016). O balanço hídrico negativo é, também, um impacto direto na permanência de espécies no ecossistema semiárido brasileiro – mesmo que essas espécies estejam adaptadas. Associado a isso, as queimadas poderão ser frequentes no bioma, como já aponta a lista de impulsionadores de impactos climáticos Tabela 2), onde apresenta tendência de aumento de queimadas para o nordeste da América do Sul (IPCC, 2021).

Desse modo, as medidas urgentes de combate às mudanças climáticas e seus impactos (compromissados pela ODS 13) precisam ser promovidas de forma mais contundente e eficaz, diante à ocorrência iminente desses impactos no ecossistema de floresta seca mais biodiverso e populoso do mundo. A escassez hídrica, a desertificação e o aumento das temperaturas são impactos locais que se impõe sobre a resiliência adaptativa das espécies e de populações em um curto espaço de tempo.

Apesar da instituição da Política Nacional sobre Mudanças Climáticas (PNMC) há mais de uma década (Lei Federal nº12.187, de 29 de dezembro de 2009) pelo Governo Federal (BRASIL, 2009), o Brasil ainda carece de ações de planejamento e de mecanismos para a atenuação dos impactos, como os descritos para a Caatinga. Destaca-se que o Art. 3º da referida

lei, dita que as ações decorrentes da PNMC devem ser executadas sob responsabilidade dos entes políticos e dos órgãos da administração pública, observando os princípios da precaução, da prevenção, da participação cidadã, do desenvolvimento sustentável e o das responsabilidades comuns. Contudo, as ações para execução da PNMC estão em passos morosos, desde a sua criação.

Em 2016, por meio da Portaria N° 150, foi instituído o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA), objetivando reduzir a vulnerabilidade nacional aos impactos das mudanças do clima e fazendo a gestão de risco desses impactos. Mesmo com essa iniciativa, o primeiro ciclo de execução do PNA foi de inserção do tema quanto as adaptações das políticas pública do país, promovendo entendimento acerca da gestão e redução de risco (BRASIL, 2021). O relatório final de monitoramento e avaliação afirma que há evidências que o Brasil vem implementando os compromissos assumidos no Acordo de Paris, declaração a qual revela-se em contradição diante às taxas de desmatamento e de queimadas, onde Brasil pode exceder as metas nacionais de emissão dos Gases do Efeito Estufa para 2030 (DA SILVA JUNIOR et al., 2020).

4.2 Qualidade dos Dados

As três etapas da depuração retiraram 32.207 registros de ocorrências, de modo que se contabilizou ao final da depuração 43.464 registros de 131 espécies. A primeira etapa teve maior número de remoções, fato que corroborou para os apontamentos de Anderson et al. (2016) e Oliveira (2019) devido às imprecisões e erros das informações de georreferenciados (Tabela 7).

Tabela 7 – Registros de ocorrências após as etapas da depuração.

Etapa	Registros de ocorrências
Dados primários de biodiversidade	75.671
1ª etapa	59.788
2ª etapa	57.312
3ª etapa	43.464

Fonte: elaborado pelo autor

Na segunda etapa, 395 nomes foram sinalizados e identificados, constando inconsistências entre os sinônimos e epítetos identificados nos dados primários adquiridos no GBIF. Com auxílio da plataforma PlantMiner (acesso em: <http://www.plantminer.com>), houve a checagem inicial desses sinônimos por meio da sinalização da plataforma. Em seguida foi realizada a verificação de cada espécie no banco de dados da Flora do Brasil. Assim, constatou-se que 95 nomes científicos e seus sinônimos apresentavam imprecisões ou erros nas informações, como nome científico não encontrado na Flora do Brasil, ou espécie não encontrada, ou sinônimo vinculado à espécie diferente. Esses 95 nomes e sinônimos identificados resultaram na remoção de 2.476 registros de ocorrências, contabilizando-se ao fim da segunda etapa 57.312 registros. Na terceira e última etapa foi realizada a remoção de dados duplicados de espécie e dados georreferenciados.

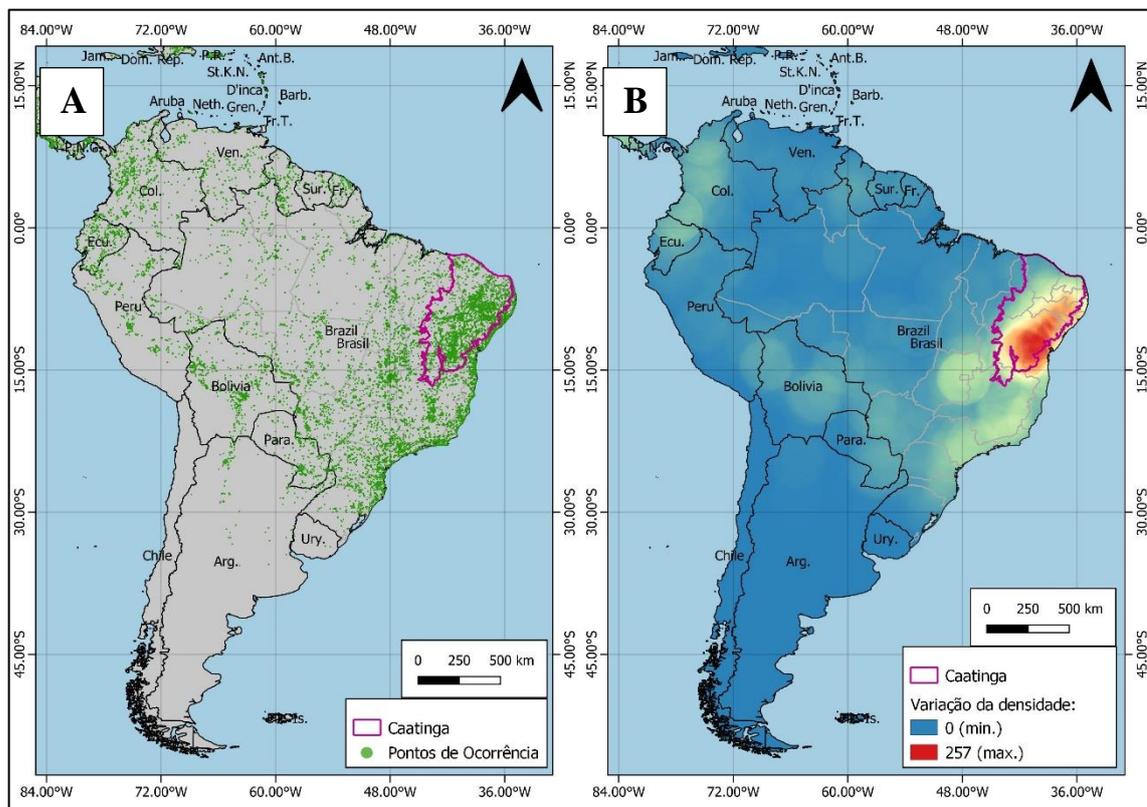
Ao total, foram removidos 13.848 dados que continham informações equivalentes, restando 43.464 registros de ocorrências das 131 espécies selecionadas para a modelagem. A *Alseis latifolia* foi a espécie que apresentou menor número de registros após a depuração, com 13, enquanto a *Senna pendula* apresentou 4.243 registros. A média de registros foi de 331,80, com mediana de 130 e desvio padrão de 570,90. Quatro espécies ficaram com abaixo de 20 registros, enquanto 11 espécie tiveram mais de mil registros.

As etapas de depuração demonstram a necessidade de controle na qualidade de dados adquiridos de plataformas como o GBIF. Um banco de dados, onde há uma extensa variedade de dados primários de biodiversidade, pode apresentar dados inconsistentes e não serem adequados para a execução de um ENM, por exemplo. As inconsistências mais observadas foram a falta de informações precisas de georreferenciamentos, com uma variedade de pontos localizados em capitais, centroides de países e em instituições de pesquisa, como universidades, herbários e museus. Além desses, observa-se também a carência de uma metodologia rígida para a observação, coleta e entrada de dados na plataforma. A variedade de imprecisões quanto aos nomes e sinônimos corrobora para essa carência na metodologia. Por fim, há uma grande quantidade de dados duplicados, comprovando a necessidade de filtrar e limpar os dados primários de biodiversidade disponíveis no GBIF.

A depuração dos dados primários de biodiversidade se consolida como etapa fundamental para a execução da modelagem de nicho ambiental, como descrito por Giannini et al. (2012) e Hijmans & Elith (2013). O corte inicial arbitrado para adquirir 20 registros por espécies dos dados primários de biodiversidade na plataforma GBIF se mostrou adequada, diante à redução circunstancial de registros ao longo das etapas de depuração de dados, onde a espécie *Alseis latifolia* manteve 13 registros.

A distribuição final dos pontos de ocorrências pode ser visualizada na Figura 8, sendo o polígono do bioma Caatinga a região de maior densidade dos pontos, embora haja pontos também fora da Caatinga, já que diversas espécies nativas não são endêmicas e também ocorrem em outros biomas.

Figura 8 – Mapa da distribuição de pontos de ocorrência obtidos para 131 espécies vegetais lenhosas da Caatinga sorteadas para a análise (A) após depuração e de densidade dos pontos de ocorrência (B) após depuração.

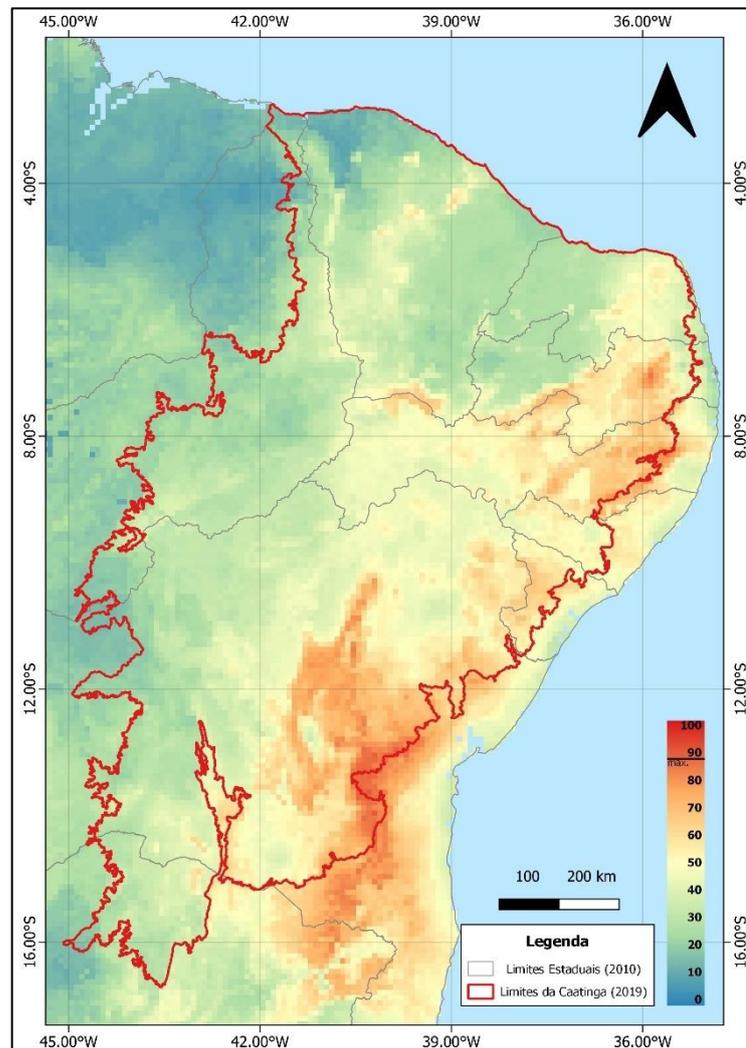


Fonte: elaborado pelo autor. Descrição: A – representa-se nesse mapa aproximadamente 36,6 mil pontos de ocorrência pela América do Sul e parte da América Central. B – a densidade de pontos está classificada em 32 classes, onde a menor delas (azul) representa de zero a oito pontos de ocorrência por célula (tamanho da célula 0.01 por 0.01), e o valor máximo (vermelho) representa até 257 pontos de ocorrência por célula.

4.3 Riqueza Estimada

Como produto final da modelagem de nicho ambiental, elaborou-se um mapa da riqueza potencial da Caatinga, baseado na soma dos modelos individuais (para cada pixel) das espécies vegetais selecionadas. Construiu-se um mapa de riqueza potencial para as condições atuais, modeladas para o presente (Figura 9) e um prognóstico para os cenários SSPS2-4.5 e SSPS5-8.5 (Figura 10).

Figura 9 – Riqueza potencial de espécies vegetais lenhosas da Caatinga modeladas para as condições climáticas do presente



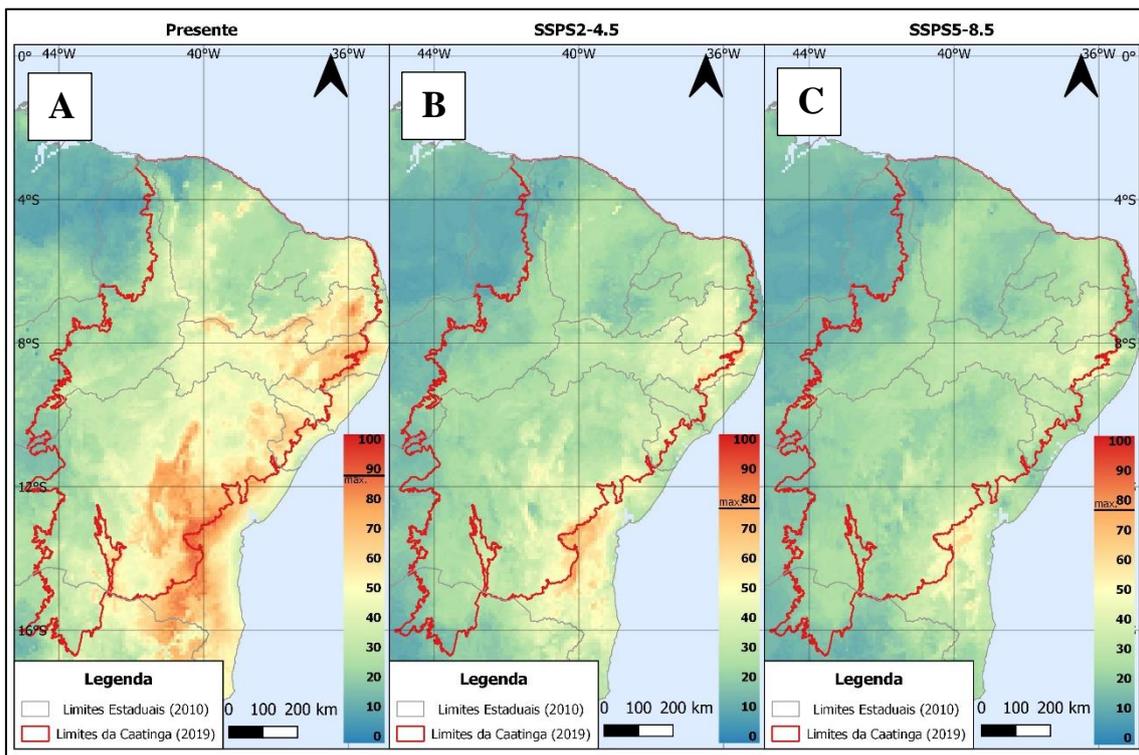
Fonte: elaborado pelo autor. Descrição: riqueza de espécies vegetais com ocorrência na Caatinga, geradas pela modelagem de nicho ambiental para o presente, onde em cada pixel apresenta um valor de riqueza de espécies, sendo as cores mais frias os valores menores, enquanto as cores mais quentes os maiores.

Em uma análise inicial, depreende-se que, para o presente, há maior potencial de riqueza de espécies vegetais da Caatinga nas regiões de altitude do bioma e seu entorno (áreas de barlavento, por exemplo), como as regiões da Ibiapaba, Araripe, Borborema, Chapada Diamantina e maciços residuais. Além delas, as regiões do Agreste nordestino e alguns trechos da Zona da Mata, em ecótonos com o bioma Mata Atlântica, apresentam valores potenciais de riqueza para as espécies vegetais. Para ambos os casos, essas áreas tendem a receber influências climatológicas diferentes das demais áreas da Caatinga, como: as chuvas orográficas, nas regiões de altitude e entorno; as frentes de leste, no Agreste e Zona da Mata; e as frente frias oriundas do sul do continente que atingem o extremo sul da Caatinga. Destaca-se, também, que

as áreas de cotas altimétricas elevadas têm temperaturas amenas quando comparadas com as demais regiões da Caatinga.

Em contrapartida, parte das regiões cristalinas do bioma, especialmente a setentrional, além do extremo norte do bioma, da região das Dunas do São Francisco (oeste da Bahia), do norte de Minas Gerais e da região de ecótono com o bioma Cerrado, apresentam menores riquezas modeladas para o presente. Isso representa que a Caatinga tende a ter menor riqueza nessas áreas. Pode-se justificar essa menor riqueza potencial devido aos aspectos climáticos dessas regiões, como regime pluviométrico baixo e as elevadas temperaturas, como também aos aspectos da estrutura geomorfológica e pedológicas dessas áreas. Por outro lado, os pontos de riqueza potencial elevada nos cenários futuros (Figura 10) apresentam valores de pixel semelhantes aos de baixa riqueza potencial do presente.

Figura 10 – Riqueza de espécies vegetais modeladas para o presente (A) e cenário intermediário (B) e pessimista (C).

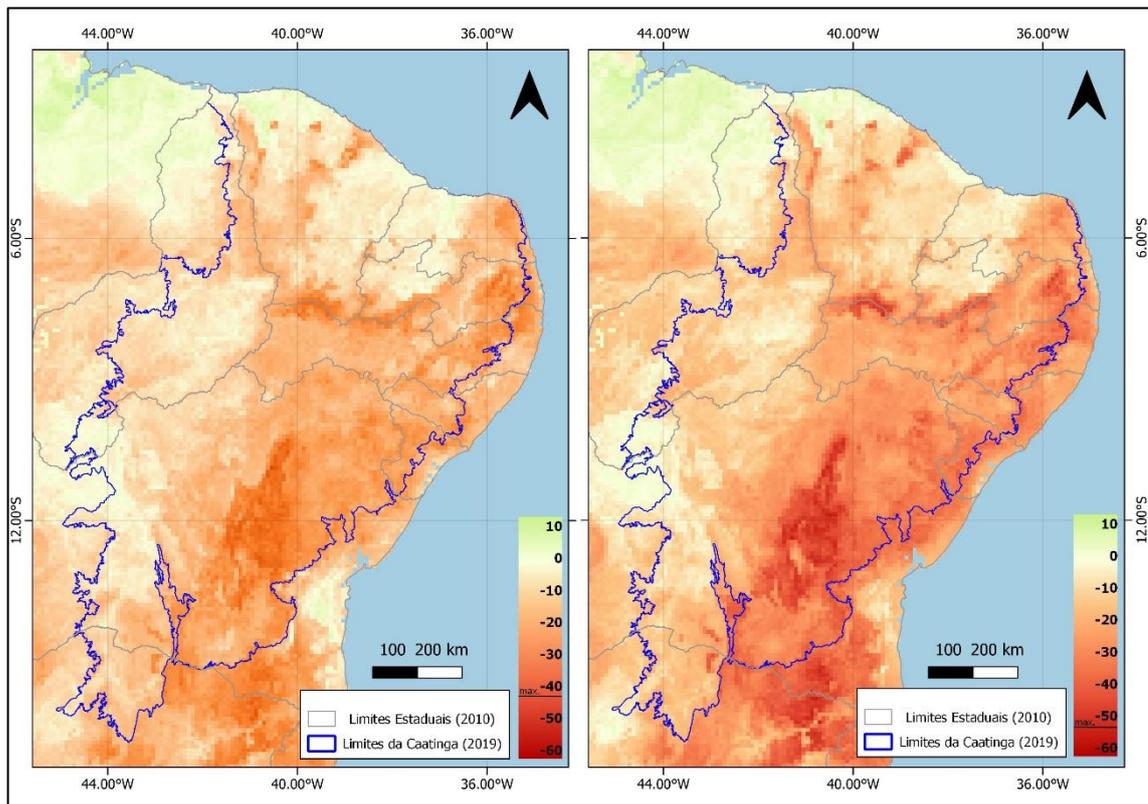


Fonte: elaborado pelo autor. Descrição: riqueza de espécies vegetais com ocorrência na Caatinga, geradas pela modelagem de nicho ambiental para o presente (A) e cenários futuros (B e C), onde em cada pixel apresenta um valor de riqueza de espécies, sendo as cores mais frias os valores menores e as cores mais quentes os maiores.

Dentro da área do bioma Caatinga (IBGE, 2019), o valor máximo de riqueza para as condições climáticas atuais foi de 89 espécies (considerando as 131 modeladas), pixel localizado na região da Chapada Diamantina. Quando os modelos são projetados para os cenários de mudanças climáticas globais, computando a riqueza potencial de cada pixel, obtém-

se o valor máximo de riqueza de 75 espécies no cenário intermediário, e de 56 para o cenário pessimista. Por sua vez, os valores mínimos foram: 9 para as condições presentes e 8 para ambos os cenários futuros. Respectivamente, as médias foram: 40,99; 28,64 e 25,56, tendo-se uma perda média de 16,35 espécies por pixel no cenário SSPS2-4.5 e de 19,43 espécies por pixel no cenário SSPS5-8.5. Assim, infere-se, com esses resultados, que haverá perda de adequabilidade de extensas áreas do bioma Caatinga para diversas das espécies nativas diante das mudanças climáticas, com baixa diferença entre os valores médios para os cenários SSPS2-4.5 e SSPS5-8.5. Ou seja, o impacto na biodiversidade vegetal – com a perda de riqueza potencial – no cenário intermediário é similar ao impacto no cenário mais pessimista, ambos sendo visualmente representados na Figura 10.

Figura 11 – Diferenças entre as riquezas potenciais do presente e dos cenários SSPS2-4.5 (A) e SSPS5-8.5 (B).



Fonte: autor. Descrição: a diferença da riqueza potencial de cada cenário futuro com o presente, como resultado da subtração das camadas matriciais para cada situação, sendo as cores mais quente onde haverá maior perda de riqueza (< -1) e as regiões com cores mais frias as áreas poderá haver ganho de riqueza ($> +1$).

De outra modo, calculou-se as intensidades de perda por meio das diferenças dos valores de riqueza potencial modelada entre o presente e cada cenário do futuro (Figura 11), sendo possível compreender quais regiões do bioma irão ter as maiores perdas de riqueza.

As regiões apresentadas para o presente com elevada riqueza potencial (Figura 9) serão áreas do bioma com espaçadas manchas indicativas de perda de riqueza, como demonstrado na Figura 11. Mesmo sob um cenário intermediário de mudanças climáticas, as regiões de altitude e seus entornos, o Agreste e a Zona da Mata apresentam as regiões de maiores perdas de riqueza, acentuando-se essa diferença quando comparado o resultado da subtração do cenário mais pessimista com o presente. Além dessas áreas, observa-se também perdas mais concentradas na região Meridional do bioma. Já a região Setentrional (exceto os maciços residuais e áreas de altitude), oeste da Bahia e sudeste do Piauí (ecótono com Cerrado) são as regiões de menores perdas – sendo também as áreas de menor riqueza para as espécies típicas da Caatinga atualmente (Figura 9).

Tabela 7 – Área proporcional de cada classe de intensidade para perda de riqueza modelada dentro da Caatinga

Classe de intensidade	Diferença com cenário SSPS2-4.5	Diferença com cenário SSPS5-8.5
I	96,2%	97,3%
II	2,6%	1,8%
III	1,2%	0,9%

Fonte: elabora pelo autor. Descrição: a Classe I é aquela com maior intensidade de perda, por representar pixels com diferença negativa (< -1) entre a riqueza potencial modelada para o os cenários futuros e a riqueza potencial modelada para o presente; a Classe II agrupa pixels que representam estabilidade na riqueza, por serem próximo a zero, onde não há perda ou ganho de riqueza; Classe III classifica os pixels com ganho de riqueza por apresentar valores positivos (> +1).

Com isso, o resultado dessa classificação demonstra quão vulnerável é a flora nativa do bioma predominantemente nordestino diante dos cenários de mudanças climáticas intermediário e pessimista. A perda da biodiversidade em um ecossistema amplamente fragmentado e com cobertura vegetal reduzida (ANTONGIOVANNI; VENTICINQUE; FONSECA, 2018) poderá implicar ameaças às espécies nativas endêmicas de flora ou fauna, inclusive sob riscos de extinção. Essa perda intensa de riqueza de espécies vegetais lenhosas do bioma representa, também, uma consequência direta na redução de recursos naturais para população humana, seja na alimentação ou no uso da madeira para forragem e lenha, além de acentuar as dificuldades na agricultura local (IPCC, 2021).

4.3.1 Impactos Sobre a População Humana

A população da Caatinga enfrenta históricos de secas e flagelo social, situações que ditam a vulnerabilidade econômica do povo sertanejo (BRASIL, 1998, SOUZA, 2003). Com uma dependência direta da flora lenhosa da Caatinga, seja para produção de energia, forragem ou alimentação, a perda da riqueza potencial poderá acentuar a vulnerabilidade social e econômica da população que habita o bioma, o qual detém ecossistema de floresta sazonalmente seca mais populoso do mundo (MEDEIROS et al., 2012; CGEE, 2016; SILVA; LEAL; TABARELLI, 2017). A redução da biodiversidade vegetal impactará diretamente na perda de serviços ecossistêmicos, tais como proteção dos solos e dos recursos hídricos (SOUZA, 2003; CGEE, 2016; SILVA, LEAL, TABARELLI, 2017). Esses impactos, associados aos fortes efeitos negativos na agricultura de subsistência e comercial, na criação de animais e no abastecimento humano, poderão ampliar mais ainda a precariedade socioeconômica presente no bioma (SOUZA, 2003; CGEE, 2016; IPCC, 2021).

Destaca-se, aqui, as regiões de altitude e seu entorno, por apresentarem elevada riqueza potencial diante a influência de chuvas orográficas e clima ameno, fatores os quais também são atrativos para população humana, tanto para uso alternativo do solo quanto em busca da disponibilidade de recursos hídricos (LIMA, 2022). Ao mesmo tempo, essas regiões de elevadas altitudes do bioma podem ter o risco incrementado por apresentarem prognóstico de maiores intensidades na perda da riqueza potencial da vegetação em cenários de mudanças climáticas.

Somando o potencial atrativo para o homem com o prognóstico de intensas perdas de riqueza vegetal nas regiões de elevada cota altimétrica, os riscos de degradação ambiental generalizada serão ampliados. Sendo assim, essas áreas merecem notoriedade e maior prioridade na busca por conservação, visto que a Caatinga já apresenta baixa cobertura de Unidades de Conservação de Proteção Integral, como também está distante de alcançar a meta de Aichi de conservar 17% do território (TEIXEIRA et al., 2021).

Por sua vez, as regiões já fragilizadas ambientalmente, com perda de riqueza vegetal, desertificadas ou com riscos de desertificação (CGEE, 2016; SILVA, LEAL, TABARELLI, 2017), estão amparadas legalmente pela Política Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PNCD), instituída pela Lei Federal nº 13.153, de 30 de julho de 2015 (BRASIL, 2015), alinhada com as diretrizes das Nações Unidas para combate à desertificação, em especial com a ODS 15.

Contudo, apesar da existência de um instrumento legal recente e sólido para auxiliar as regiões desertificadas e prevenir o avanço de novos núcleos e dos núcleos existentes, o poder público não está alcançando os objetivos da PNCD, tampouco estabelecendo os instrumentos necessário para o eficiente combate à desertificação. Os planos da ação e os relatórios de implementação estão estagnados pelo executivo federal, ente principal e responsável pela gestão integrada e participativa da PNCD (disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/gestao-territorial/combate-a-desertificacao.html> - consultado em 03 de março de 2022). Assim, o bioma Caatinga, que se prolonga por 10 estados brasileiros, encontra-se atualmente desassistido no combate à desertificação pelo executivo federal e com risco iminente de ampliação das áreas desertificadas diante à acentuada intensidade de perda de riqueza vegetal nos cenários de mudanças climáticas iminente.

Por fim, destaca-se que essa acentuada perda potencial de riqueza vegetal para o bioma Caatinga acarretará cenários socioeconômicos de maior desigualdade e de menores acessos aos recursos naturais, em especial água e flora lenhosa, os quais são fundamentais para a resiliência da população da Caatinga. Ao se vislumbrar a importância dos serviços ecossistêmicos os quais a flora lenhosa traz para o ambiente e para a população sertaneja da Caatinga, associando com cenários de maior degradação ambiental generalizada, ampliação dos núcleos de desertificação e longos períodos de escassez hídrica, a mitigação e o enfrentamento desses impactos merecem pronta notoriedade e ações em curto espaço de tempo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Caatinga, bioma brasileiro de clima semiárido e que abriga a floresta sazonalmente seca de maior extensão no mundo, enfrentará árduos desafios para conseguir alcançar os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável 13 e 15. Os cenários de mudanças climáticas intermediário e pessimista apontam para uma profunda perda da riqueza vegetal do bioma, componente ambiental de relevante importância para os população da Caatinga e para o fornecimento de serviços ecossistêmicos ao bioma.

A modelagem de nicho ambiental de espécies lenhosas da Caatinga apresentou preocupante cenários de perda de biodiversidade vegetal, o quais somam-se aos impactos trazidos no 6º Relatório do IPCC, lançado em 2021. A cobertura vegetal do bioma está fortemente vinculada a proteção dos seus solos, os quais, quando degradados e expostos, apresentam riscos elevados de degradação generalizada. Além disso, a dependência e vínculo socioeconômico com as espécies vegetais do bioma poderão aprofundar ainda mais os transtornos sociais enfrentados pelas prolongadas secas e flagelo social.

As tendências de mudanças climáticas analisadas para o bioma corroboram com os impactos estabelecidos pelo IPCC (2021) para o nordeste da América do Sul, destacando-se a redução no aporte hídrico das chuvas, maior período de secas ecológicas e agrícolas, aumentos nos eventos extremos de chuva e enchente, aumento da temperatura média do ar e do calor extremo, mudanças para um clima árido e aumento das queimadas.

Tais tendências, associadas aos resultados modelados de nicho ambiental de intensa perda de riqueza da vegetação no bioma, trazem uma conjuntura desoladora para a Caatinga na existência das mudanças climáticas. Esse temeroso cenário é o resultado das fracassadas ações políticas de âmbito nacional e global que, há décadas, tentam buscar a redução de gases do efeito estufa, como também da ineficaz mitigação dos impactos nas populações mais vulneráveis a sofrerem com as mudanças no clima.

Futuros trabalhos poderão cobrir lacunas para a melhor compreensão dos efeitos das mudanças climáticas na Caatinga. Dentre eles, a modelagem de espécies específicas e endêmicas da região, como também a modelagem de nicho ambiental limitada geograficamente as ecorregiões da Caatinga (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002). Tais ideias podem trazer respostas em uma escala de trabalho de maior detalhe, seja ela geográfica ou de espécies específicas.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, Aziz Nacib. **O domínio morfoclimático semi-árido das caatingas brasileiras**. Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia, 1974.
- AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. Ateliê editorial, 2003.
- ALBUQUERQUE, Ulysses Paulino de; ANDRADE, Laise de Holanda Cavalcanti. **Conhecimento botânico tradicional e conservação em uma área de caatinga no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil**. Acta botânica brasílica, v. 16, n. 3, p. 273-285, 2002.
- ALLOUCHE, O., et al. **Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS)**. J Appl Ecol 43:1223–1232. doi:10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x. 2006
- ANDRADE, E. M. D. et al. **Water as capital and its uses in the Caatinga**. In Caatinga (pp. 281-302). Springer, Cham. 2017
- ANDRADE-LIMA, D. (1981). **The caatingas dominium**. Revista Brasileira de Botânica, 4(2), 149–153.
- ANDERSON, Robert P. et al. **Are species occurrence data in global online repositories fit for modeling species distributions? The case of the Global Biodiversity Information Facility (GBIF)**. Final Report of the Task Group on GBIF Data Fitness for Use in Distribution Modelling. Global Biodiversity Information Facility (GBIF), 2016.
- ANTONGIOVANNI, Marina; VENTICINQUE, Eduardo M.; FONSECA, Carlos Roberto. **Fragmentation patterns of the Caatinga drylands**. Landscape Ecology, v. 33, n. 8, p. 1353-1367, 2018.
- ARAÚJO, Miguel B. et al.. **Validation of species–climate impact models under climate change**. Global change biology, v. 11, n. 9, p. 1504-1513, 2005
- ARAÚJO, M. B., & NEW, M. **Ensemble forecasting of species distributions**. Trends in ecology & evolution, 22(1), 42-47. 2007
- ASSOCIAÇÃO CAATINGA. **Bioma Caatinga**. Ceará. 2020?. Disponível em: <https://www.acaatinga.org.br/sobre-a-caatinga/>. Acesso em 31 dez. 2020
- BARVE, N., & BARVE, V. **ENMGadgets: Pre and post processing in ENM workflow**. R package version 0.1. 0.1. 2019
- BFG – **The Brazil Flora Group. Growing knowledge: an overview of seed plant diversity in Brazil**. Rodriguésia, 66, 1085-1113. 2015
- BRASIL, M. M. A. **A Convenção sobre Diversidade Biológica-CDB**, Cópia do Decreto Legislativo nº 2, de 5 de junho de 1992. MMA. Brasília, p. 30, 2002. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/textoconvenoportugus.pdf>

BRASIL. **Biomass continentais do Brasil**. Governo Federal: IBGE. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/15842-biomass.html?=&t=downloads> . Acesso em 12 de jan. 2021

BRASIL. Lei federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000. **Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/sistema-nacional-de-ucs-snuc>. Acesso em: 01 mai. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Primeiro relatório nacional para a Convenção sobre Diversidade Biológica**: Brasil. Brasília, 1998. 283 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/item/7926-primeiro-relat%C3%B3rio> . Acesso em: 20 mai. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, The Nature Conservancy. **Mapa de Unidades de Conservação e Terras Indígenas do Bioma Caatinga**. Brasília, 2008. 1 mapa, color. Escala 1: 1750000. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/203/_arquivos/mapa_das_ucs.pdf Acesso em: 23 mai. 2018

BRASIL, Lei nº12.187 de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências**. Diário Oficial da União. 2009 Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm . Acessado em: 03 de fev. de 2022.

BRAZIL, Ministry of the Environment. Secretariat of Biodiversity and Forests - SBF. **Fifth National Report to the Convention on Biological Diversity**: Brazil. Brasília: Ministry of the Environment, 2015. Disponível em: <https://www.cbd.int/doc/world/br/br-nr-05-en.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2018

BRASIL, Lei nº13.153 de 30 de julho de 2015. **Institui a Política Nacional Combate a Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca e seus instrumentos; prevê a criação da Comissão Nacional de Combate à Desertificação; e dá outras providências**. Diário Oficial da União. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/113153.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2013.153%2C%20DE%2030,Desertifica%C3%A7%C3%A3o%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%Aancias. Acessado em: 03 fev. 2022

BRAZIL. Ministry of the Environment **6th National Report to the Convention on Biological Diversity**. Brasília: Ministry of the Environment, 2019. Disponível em: <https://www.cbd.int/doc/nr/nr-06/br-nr-06-en.pdf>. Acesso em: 10 mar 2021

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Clima e Relações Internacionais. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**: relatório final de monitoramento e avaliação, ciclo 2016-2020 Brasília, DF: MMA, 2021.

BUENO, M. L. et al. **Effects of Quaternary climatic fluctuations on the distribution of Neotropical savanna tree species**. *Ecography*, 40(3), 403–414. <https://doi.org/10.1111/ecog.01860> . 2017

CARNAVAL, A. C.; MORITZ C. **Historical climate modelling predicts patterns of current biodiversity in the Brazilian Atlantic forest.** 2008 *Journal of Biogeography*, 35(7), 1187–1201. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01870.x>

CARVALHO, G. H., CIANCIARUSO, M. V., & BATALHA, M. A. **Plantminer:** A web tool for checking and gathering plant species taxonomic information. *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 815–816. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.11.014>. 2010

CASTELLETTI, C. H. M. et al. **Quanto ainda resta da Caatinga?** Uma estimativa preliminar. *Ecologia e conservação da caatinga*, p. 777-796, 2003

CGEE-Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil.** 2016

CHAPMAN, Arthur D.; MUÑOZ, Mauro ES; KOCH, Ingrid. **Environmental information: placing biodiversity phenomena in an ecological and environmental context.** *Biodiversity Informatics*, v. 2, 2005

COLWELL, Robert K. **Niche:** a bifurcation in the conceptual lineage of the term. *Keywords in evolutionary biology*, p. 241-248, 1992.

CONTI, J. B. *Clima e meio ambiente*, 1998. Atual, São Paulo. *In:* MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil.** Oficina de textos, 2019

DE MARCO, P., & NÓBREGA, C. C. **Evaluating collinearity effects on species distribution models:** An approach based on virtual species simulation. *PloS one*, 13(9), e0202403. 2018

DA SILVA JUNIOR, C. A. et al. **Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil.** *Scientific Reports*, 10(1), 1-14. 2020

DE MARCO JÚNIOR, P.; SIQUEIRA, M. F. **Como determinar a distribuição potencial de espécies sob uma abordagem conservacionista.** *Megadiversidade*, v. 5, n. 1-2, p. 65-76, 2009.

ELITH, Jane; LEATHWICK, John R. **Species distribution models:** ecological explanation and prediction across space and time. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, v. 40, p. 677-697, 2009.

FERNANDES, Moabe F.; CARDOSO, Domingos; DE QUEIROZ, Luciano P. **An updated plant checklist of the Brazilian Caatinga seasonally dry forests and woodlands reveals high species richness and endemism.** *Journal of Arid Environments*, v. 174, p. 104079, 2020.

FERNANDES, Moabe Ferreira; QUEIROZ, Luciano Paganucci de. **Vegetação e flora da Caatinga.** *Ciência e cultura*, v. 70, n. 4, p. 51-56, 2018.

FICK, S.E., HIJIMANS, R.J., **WorldClim 2:** new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37, 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>. 2017

FUNCEME. **Zoneamento ecológico-econômico das áreas susceptíveis à desertificação do núcleo I – Irauçuba/Centro-Norte.** Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. - Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2015

GIANNINI, Tereza C. et al. **Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies.** *Rodriguésia*, v. 63, p. 733-749, 2012.

GUERRA, Antônio José Teixeira; COELHO, Maria Célia Nunes. **Unidades de Conservação: abordagens e características geográficas.** Bertrand Brasil, 2009

HAMADA, Emília; GHINI, Raquel; OLIVEIRA, Bruno Silva. **Projeções de variáveis climáticas de interesse agrícola para o Brasil ao longo do século 21.** Embrapa Meio Ambiente-Capítulo em livro científico (ALICE), 2017.

HAMMER, Ø., HARPER, D.A.T., RYAN, P.D. **PAST:** Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9pp. 2001

HAUFF, Shirley N. **Alternativas para a manutenção das unidades de conservação da Caatinga.** Brasília: MMA, 2010

HAUSFATHER, Z. **Explainer:** how ‘shared socioeconomic pathways’ explore future climate change. *Carbon Brief*, 19. 2018

HIJMANS, Robert J.; ELITH, Jane. **Species distribution modeling with R.** R CRAN Project, 2013.

IBGE **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil:** compatível com a escala 1:250.000. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro: IBGE, 2019, 168 p.

IBGE, R. **Manual técnico da vegetação brasileira.** 2012.

IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

- JOSE'ALEXANDRE FILHO, F. D., et al. **Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate change.** *Ecography*, 32(6), 897-906. 2009
- KANGER, D.N. et al. **Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas.** *Scientific Data* 4, 170122. 2017
- KANGER, D.N. et al., **High-resolution precipitation and temperature timeseries for the 21st century.** 2019. Disponível em: https://chelsa-climate.org/wp-admin/download-page/CHELSA_tech_specification.pdf . Acesso em: 15 jan. 2021.
- LOMBORG, Bjørn. **Environmental Alarmism, Then and Now: The Club of Rome's Problem—and Ours.** *Foreign Affairs*, p. 24-40, 2012.
- MARCOS JUNIOR, Antonio Duarte et al. **Classificação Climática de Thornthwaite para o Brasil com Base em Cenários de Mudanças Climáticas do IPCC-AR5.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 4, p. 647-664, 2018.
- MARENGO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. **Drought in Northeast Brazil – past, present, and future.** *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017.
- MEDEIROS, Salomão de Sousa et al. **Sinopse do censo demográfico para o semiárido brasileiro.** Instituto Nacional de Seminário (INSA), 2012.
- MENDONÇA, Francisco de Assis. **A evolução sócio-econômica do Norte Novíssimo de Paranaíba-PR e os impactos ambientais: Desertificação.** São Paulo: USP/FFLCH, 1990.
- MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil.** Oficina de textos, 2019.
- MILES, L., et al. **A global overview of the conservation status of tropical dry forests.** *Journal of Biogeography*, 33, 491–505. 2006
- MORAES, Flavia. **Entenda como são feitos os relatórios do IPCC.** O ECO, Rio de Janeiro. 27 set 2013. Disponível em: <https://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/27621-entenda-como-sao-feitos-os-relatorios-do-ipcc/>. Acesso em: 19 jan. 2021.
- MORO, M. F. Lughadha, EM; Filer, DL; Araújo, FS; Martins, FR. **A catalogue of the vascular plants of the Caatinga phytogeographical domain: A synthesis of floristic and phytosociological surveys.** *Phytotaxa*, v. 160, p. 1-30, 2014.
- MORO, Marcelo Freire et al. **Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará.** *Rodriguésia*, v. 66, n. 3, p. 717-743, 2015.
- MORO, M.F. et al. Síntese dos estudos florísticos e fitossociológicos realizados no semiárido brasileiro. In: Eisenlohr PV, Felfili JM, Melo MMRF, Andrade LA, Neto JAAM. (eds.) **Fitossociologia no Brasil : Métodos e Estudos de Casos.** Vol. II. Viçosa, Editora da Universidade Federal de Viçosa. p. 412-451. 2015
- MOURA, MSB de et al.. **Clima e água de chuva no Semi-Árido.** Potencialidades da água de chuva no Semiárido brasileiro. Petrolina: Embrapa Semiárido, p. 37-59, 2007.

Nações Unidas Brasil (Org.). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

Nações Unidas Brasil (Org.). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

QGIS.org, **QGIS Geographic Information System**. QGIS Association. <http://www.qgis.org>, 2020

PEARSON, Richard G.; DAWSON, Terence P. **Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?**. *Global ecology and biogeography*, v. 12, n. 5, p. 361-371, 2003.

PEARSON, R. G. **Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar**. *Journal of biogeography*, 34(1), 102-117. 2007

PENNINGTON, R. T. et al. **Neotropical seasonally dry forests and Quaternary vegetation changes**. *Journal of Biogeography*, 27(2), 261–273. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00397.x>, 2000

PHILLIPS, Steven J. et al. **Opening the black box: An open-source release of Maxent**. *Ecography*, v. 40, n. 7, p. 887-893, 2017.

PIO, I. D. S. L. et al. **Traditional knowledge and uses of medicinal plants by the inhabitants of the islands of the São Francisco river, Brazil and preliminary analysis of *Rhaphiodon echinus* (Lamiaceae)**. *Brazilian Journal of Biology*, v. 79, n. 1, p. 87-99, 2019.

PIRES-OLIVEIRA, João Carlos. **Indicando Caminhos: propostas conceituais e metodológicas na modelagem de adequabilidade ambiental**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação) - Faculdade de Ciências Agrárias Biológicas e Sociais Aplicadas, Campus de Nova Xavantina, Universidade do Estado do Mato Grosso. Nova Xavantina. 2019. Disponível em: <http://portal.unemat.br/media/files/joao-oliveira-ppgec-dissertacao-2017.pdf>. Acesso em 05 jan. 2021.

PULLIAM, H. Ronald. **On the relationship between niche and distribution**. *Ecology letters*, v. 3, n. 4, p. 349-361, 2000.

R Core Team (2020). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RANDALL, David A. et al. Climate models and their evaluation. In: **Climate change 2007: The physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (FAR). Cambridge University Press, 2007. p. 589-662.

RODRIGUES, P. M. S. et al. **Climate change effects on the geographic distribution of specialist tree species of the Brazilian tropical dry forests**. *Brazilian Journal of Biology*, v. 75, n. 3, p. 679-684, 2015.

SAMPAIO, E. et al. **Vegetação & flora da caatinga**. Recife, Associação Plantas do Nordeste, Instituto de Conservação Ambiental. 2002

SAMPAIO, G.; MARENGO, J.; NOBRE, C. **A atmosfera e as mudanças climáticas**. Biologia & Mudanças climáticas no Brasil. Rima Ed. São Paulo, Brasil, 2008.

SCHOENER, T. W. **The ecological niche**. 1989

SCHULZ, Katharina et al. **Grazing reduces plant species diversity of Caatinga dry forests in northeastern Brazil**. Applied Vegetation Science, v. 22, n. 2, p. 348-359, 2019.

SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R; TABARELLI, M. **Caatinga - The largest tropical dry forest region in south america**. 2018. Editora Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3>

SILVA, Jéssica Luiza Souza e et al. **Climate change will reduce suitable Caatinga dry forest habitat for endemic plants with disproportionate impacts on specialized reproductive strategies**. PloS one, v. 14, n. 5, p. e0217028, 2019.

SILVA, José Maria Cardoso da et al. The Caatinga: understanding the challenges. In: **Caatinga**. Springer, Cham, 2017. p. 3-19.

SWART, Neil C., et al. **The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3)**. Geoscientific Model Development 12.11 (2019a): 4823-4873.

SWART, Neil C., et al. **CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 CMIP**. Earth System Grid Federation. (2019b) doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1303>.

SOUZA, D.D. **Adaptações de Plantas da Caatinga**. São Paulo. Oficina de Texto, 2020. p 96.

SOUZA, M.J.N de – Limitações Geoambientais ao Desenvolvimento Sustentável no Semiárido Brasileiro. In: **Transformaciones Regionales y Urbanas em Europa Y América Latina**. Ed. Biblioteca de La Universitat de Barcelona. 2003. p. 143-152

TEIXEIRA, L. P. et al. **How much of the Caatinga is legally protected? An analysis of temporal and geographical coverage of protected areas in the Brazilian semiarid region**. Acta Botanica Brasilica, 35, 473-485. 2021

TERRIBILE, L. C. et al. **Areas of climate stability of species ranges in the Brazilian Cerrado: disentangling uncertainties through time**. 2012

THUILLER, Wilfried et al. **BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions**. Ecography, v. 32, n. 3, p. 369-373, 2009.

UN (Org.). **Convention on Biological Diversity: Aichi Biodiversity Targets**. 2011. Disponível em: <https://www.cbd.int/sp/targets/#GoalC>. Acesso em: 03 out. 2019.

VARELA, S., LIMA-RIBEIRO, M. S., & TERRIBILE, L. C. **A short guide to the climatic variables of the last glacial maximum for biogeographers**. PloS one, 10(6), e0129037. 2015

VELLOSO, A. L., SAMPAIO, E. V. S. B., & PAREYN, F. G. C. **Ecorregioes propostas para o Bioma caatinga**. Recife: Associação Plantas do Nordeste, Instituto de Conservação Ambiental. *The Nature Conservancy do Brasil*, 74(07). 2002

WERNECK, F. P., et al. (2012). **Climatic stability in the Brazilian Cerrado: Implications for biogeographical connections of South American savannas, species richness and conservation in a biodiversity hotspot**. *Journal of Biogeography*, 39(9), 1695–1706. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2012.02715.x>

WILLIS, Kathy J; BACHMAN, Steve (2016). **State of the World's Plants 2016**. Royal Botanic Gardens, Kew, 84. <https://doi.org/978-1-84246-628-5>.

ZANOTTA, Daniel Capella; FERREIRA, Matheus Pinheiro; ZORTEA, Maciel. **Processamento de imagens de satélite**. Oficina de Textos, 2019.

ZHANG, I. et al. **Consensus forecasting of species distributions: The effects of niche model performance and niche properties**. *PloS one*, 10(3), e0120056. 2015

ZIMMERMANN, Niklaus E. et al. **New trends in species distribution modelling**. *Ecography*, v. 33, n. 6, p. 985-989, 2010.

ZIZKA, Alexander et al. **CoordinateCleaner: Standardized cleaning of occurrence records from biological collection databases**. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 10, n. 5, p. 744-751, 2019.

ANEXO A – QUADRO DE ESPÉCIES VEGETAIS SORTEADAS

ID_SORTED	Scientific Name	Life_Form	Neotropical_Biome	Class	Occurrence_num
5	<i>Acalypha multicaulis</i> Müll.Arg.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	448
20	<i>Aeschynomene martii</i> Benth.	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	205
41	<i>Allophylus quercifolius</i> (Mart.) Radlk.	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	109
42	<i>Allophylus racemosus</i> Sw.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	497
45	<i>Alseis latifolia</i> Gleason	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	193
50	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	tree	SDTFW	Lenhosa	3258
56	<i>Anemopaegma mirabile</i> (Sandwith) A.H.Gentry	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	2
62	<i>Annona spinescens</i> Mart.	tree	SDTFW	Lenhosa	63
63	<i>Annona sylvatica</i> A.St.-Hil.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	507
65	<i>Aparisthium cordatum</i> (A.Juss.) Baill.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	1676
68	<i>Aralia bahiana</i> J. Wen	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	3
72	<i>Arrojadoa rhodantha</i> (Gürke) Britton & Rose	succulent	SDTFW	Lenhosa	168
73	<i>Aspidosperma cuspa</i> (Kunth) Blake	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	86
76	<i>Aspidosperma multiflorum</i> A.DC.	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	278
81	<i>Aspidosperma ramiflorum</i> Müll.Arg.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	76
90	<i>Aureliana pogogena</i> (Moric.) I.M.C.Rodrigues & Stehmann	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	130
117	<i>Brasilicereus phaeacanthus</i> (Gürke) Backeb.	succulent	Caatinga Endemic	Lenhosa	
151	<i>Calliandra harrisii</i> (Lindl.) Benth.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	
152	<i>Calliandra imperialis</i> Barneby	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	10
162	<i>Calliandra umbellifera</i> Benth.	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	19
174	<i>Campomanesia eugenioides</i> (Cambess.) D.Legrand ex Landrum	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	155

175	<i>Campomanesia guazumifolia</i> (Cambess.) O.Berg	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	476
187	<i>Casearia decandra</i> Jacq.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	1270
188	<i>Casearia eichleriana</i> Sleumer	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	253
194	<i>Casearia selloana</i> Eichler	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	60
207	<i>Ceiba rubriflora</i> Carv.-Sobr. & L.P.Queiroz	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	37
211	<i>Centrolobium sclerophyllum</i> H.C.Lima	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	
220	<i>Chamaecrista belemii</i> (H.S.Irwin & Barneby) H.S.Irwin & Barneby	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	135
226	<i>Chamaecrista eitenorum</i> (H.S.Irwin & Barneby) H.S.Irwin & Barneby	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	139
263	<i>Cnidoscolus bahianus</i> (Ule) Pax & K.Hoffm.	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	297
273	<i>Cnidoscolus rupestris</i> Fern.Casas	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	3
292	<i>Combretum fruticosum</i> (Loefl.) Stuntz	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	2155
311	<i>Cordia glazioviana</i> (Taub.) Gottschling & J.S.Mill.	tree	SDTFW	Lenhosa	141
328	<i>Coursetia rostrata</i> Benth.	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	234
329	<i>Coursetia vicioides</i> (Nees & Mart.) Benth.	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	6
330	<i>Coussapoa microcarpa</i> (Schott) Rizzini	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	456
333	<i>Crateva tapia</i> L.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	2469
379	<i>Cupania racemosa</i> (Vell.) Radlk.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	318
381	<i>Cupania rugosa</i> Radlk.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	92
405	<i>Denscantia calcicola</i> R.M. Salas & E.L. Cabral	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	0
430	<i>Ephedranthus pisocarpus</i> R.E.Fr.	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	35
446	<i>Erythroxylum laetevirens</i> O.E.Schulz	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	52
448	<i>Erythroxylum longisetulosum</i> Loiola & M.F.Sales	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	6
454	<i>Erythroxylum oxypetalum</i> O.E.Schulz	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	12
461	<i>Erythroxylum revolutum</i> Mart.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	283

474	<i>Eugenia ayacuchae</i> Steerm.	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	55
488	<i>Eugenia gemmiflora</i> O.Berg	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	67
502	<i>Eugenia stictopetala</i> Mart. ex DC.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	509
512	<i>Facheiroa squamosa</i> (Gürke) P.J.Braun & Esteves	succulent	Caatinga Endemic	Lenhosa	31
517	<i>Ficus arpazusa</i> Casar.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	163
525	<i>Ficus cyclophylla</i> (Miq.) Miq.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	76
528	<i>Ficus goiana</i> C.C.Berg, Carauta & A.F.P.Machado	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	23
535	<i>Ficus trigona</i> L.f.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	1279
549	<i>Geoffroea spinosa</i> Jacq.	tree	SDTFW	Lenhosa	312
557	<i>Guapira obtusata</i> (Jacq.) Little	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	262
559	<i>Guapira tomentosa</i> (Casar.) Lundell	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	119
561	<i>Guatteria pohliana</i> Schltdl.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	48
564	<i>Guettarda angelica</i> Mart. ex Müll.Arg.	tree	SDTFW	Lenhosa	423
574	<i>Handroanthus</i> <i>diamantinensis</i> Espírito-Santo & M.M. Silva-Castro	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	7
581	<i>Handroanthus</i> <i>spongiosus</i> (Rizzini) S.Grose	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	133
593	<i>Helicteres muscosa</i> Mart.	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	165
594	<i>Helicteres ovata</i> Lam.	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	123
601	<i>Heteropterys</i> <i>sincorensis</i> W.R.Anderson	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	77
603	<i>Hillia parasitica</i> Jacq.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	899
617	<i>Hymenaea eriogyne</i> Benth.	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	178
620	<i>Hymenaea</i> <i>stigonocarpa</i> Mart. ex Hayne	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	970
621	<i>Hymenaea velutina</i> Ducke	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	123
623	<i>Ilex affinis</i> Gardner	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	659

630	<i>Ipomoea franciscana</i> Choisy	shrub	SDTFW	Lenhosa	36
636	<i>Jacaranda jasminoides</i> (Thunb.) Sandwith	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	
645	<i>Jatropha mutabilis</i> (Pohl) Baill.	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	1237
671	<i>Licania rigida</i> Benth.	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	148
703	<i>Machaerium hirtum</i> (Vell.) Stellfeld	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	727
720	<i>Manihot anomala</i> Pohl	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	961
725	<i>Manihot dichotoma</i> Ule	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	268
730	<i>Manihot pohliana</i> Müll.Arg.	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	3
738	<i>Margaritopsis</i> <i>carrascoana</i> (Delprete & E.B.Souza) C.M.Taylor & E.B.Souza	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	64
748	<i>Marsdenia ulei</i> Schltr. & Rothe	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	3
751	<i>Matayba guianensis</i> Aubl.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	1574
753	<i>Mattfeldanthus</i> <i>andrade-limae</i> (G.M.Barroso) Dematt.	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	48
758	<i>Maytenus horrida</i> Reissek	shrub	SDTFW	Lenhosa	6
776	<i>Miconia albicans</i> (Sw.) Triana	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	2268
779	<i>Miconia ibaguensis</i> (Bonpl.) Triana	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	1273
782	<i>Miconia nervosa</i> (Sm.) Triana	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	2737
783	<i>Miconia prasina</i> (Sw.) DC.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	3715
793	<i>Mimosa adenophylla</i> Taub.	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	75
798	<i>Mimosa gemmulata</i> Barneby	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	421
805	<i>Mimosa</i> <i>ophthalmocentra</i> Mart. ex Benth.	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	474
817	<i>Molopanthera</i> <i>paniculata</i> Turcz.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	66
821	<i>Mouriri glazioviana</i> Cogn.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	101

831	<i>Myrcia multiflora</i> (Lam.) DC.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	1947
836	<i>Myrcia polyantha</i> DC.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	124
841	<i>Myrciaria ferruginea</i> O.Berg	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	90
844	<i>Myrciaria pilosa</i> Sobral & Couto	tree	SDTFW	Lenhosa	60
847	<i>Myriopus paniculatus</i> (Cham.) Feuillet	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	428
850	<i>Myrocarpus fastigiatus</i> Allemão	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	68
857	<i>Nectandra purpurea</i> (Ruiz & Pav.) Mez	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	331
875	<i>Ocotea xanthocalyx</i> (Nees) Mez	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	60
876	<i>Ormosia bahiensis</i> Monach.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	32
879	<i>Ouratea glaucescens</i> (A.St.-Hil.) Engl.	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	68
881	<i>Ouratea xepophila</i> Rizzini	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	2
890	<i>Paliavana tenuiflora</i> Mansf.	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	237
892	<i>Palicourea marcgravii</i> A.St.-Hil.	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	1424
893	<i>Parapiptadenia</i> <i>blanchetii</i> (Benth.) Vaz & M.P.Lima	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	62
894	<i>Parapiptadenia</i> <i>zehntneri</i> (Harms) M.P.Lima & H.C.Lima	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	344
911	<i>Pera glabrata</i> (Schott) Poepp. ex Baill.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	2324
912	<i>Pereskia aureiflora</i> Ritter	succulent	Caatinga Endemic	Lenhosa	16
915	<i>Pereskia stenantha</i> Ritter	succulent	Caatinga Endemic	Lenhosa	45
938	<i>Pilosocereus</i> <i>glaucochrous</i> (Werderm.) Byles & G.D.Rowley	succulent	SDTFW	Lenhosa	28
943	<i>Pilosocereus</i> <i>pentaedrophorus</i> (Cels) Byles & Rowley	succulent	Caatinga Endemic	Lenhosa	
946	<i>Pilosocereus</i> <i>tuberculatus</i> (Werderm.) Byles & G.D.Rowley	succulent	Caatinga Endemic	Lenhosa	87
947	<i>Piper aduncum</i> L.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	5930
969	<i>Platymiscium</i> <i>pubescens</i> Micheli	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	92

989	<i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.) L.P.Queiroz	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	331
990	<i>Pouteria andarahiensis</i> T.D.Penn.	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	201
992	<i>Pouteria gardneriana</i> (A.DC.) Radlk.	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	197
1015	<i>Psidium glaziovianum</i> Kiaersk.	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	9
1017	<i>Psidium minutiflorum</i> Amshoff	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	2
1023	<i>Psidium rhombeum</i> O.Berg	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	36
1026	<i>Psidium salutare</i> (Kunth) O.Berg	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	1254
1029	<i>Psychotria bracteocardia</i> (DC.) Müll.Arg.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	562
1054	<i>Rhamnidium molle</i> Reissek	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	35
1066	<i>Ruprechtia laxiflora</i> Meisn.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	540
1075	<i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl.	tree	SDTFW	Lenhosa	845
1087	<i>Senegalia bahiensis</i> (Benth.) Seigler & Ebinger	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	969
1089	<i>Senegalia globosa</i> (Bocage & Miotto) L.P.Queiroz	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	244
1098	<i>Senegalia paganuccii</i> Seigler, Ebinger & Ribeiro	tree	SDTFW; Savannas	Lenhosa	65
1107	<i>Senna appendiculata</i> (Vogel) Wiersema	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	83
1112	<i>Senna cearensis</i> Afr.Fern.	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	73
1121	<i>Senna neglecta</i> (Vogel) H.S.Irwin & Barneby	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	193
1122	<i>Senna pendula</i> (Humb.& Bonpl.ex Willd.) H.S.Irwin & Barneby	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	6078
1130	<i>Senna splendida</i> (Vogel) H.S.Irwin & Barneby	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	729
1156	<i>Solanum paludosum</i> Moric.	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	751
1159	<i>Solanum rhytidoandrum</i> Sendtn.	shrub	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	758
1172	<i>Stachytarpheta hatschbachii</i> Moldenke	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	41
1176	<i>Sterculia striata</i> A.St.-Hil. & Naudin	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	383
1180	<i>Strychnos parvifolia</i> A.DC.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	224

1182	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	149
1194	<i>Symphyopappus compressus</i> (Gardner) B.L.Rob.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	246
1196	<i>Tabaroa caatingicola</i> L.P.Queiroz, G.P.Lewis & M.F.Wojc.	tree	Caatinga Endemic	Lenhosa	15
1197	<i>Tabebuia aurea</i> (Silva Manso) Benth. & Hook.f. ex S.Moore	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	901
1216	<i>Tibouchina gardneri</i> (Naudin) Cogn.	shrub	Caatinga Endemic	Lenhosa	48
1221	<i>Tocoyena hispidula</i> Standl.	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	14
1230	<i>Trichilia hirta</i> L.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	2333
1238	<i>Turnera blanchetiana</i> Urb.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	134
1239	<i>Turnera calyptrocarpa</i> Urb.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	141
1240	<i>Turnera cearensis</i> Urb.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	211
1250	<i>Turnera subulata</i> Sm.	shrub	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	843
1267	<i>Verrucularia glaucophylla</i> A.Juss.	shrub	SDTFW; Savannas	Lenhosa	322
1269	<i>Vitex capitata</i> Vahl	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	144
1270	<i>Vitex cymosa</i> Bertero ex Spreng.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	424
1279	<i>Waltheria brachypetala</i> Turcz.	shrub	SDTFW	Lenhosa	360
1294	<i>Xylopia laevigata</i> (Mart.) R.E.Fr.	tree	SDTFW; Rainforest	Lenhosa	426
1295	<i>Xylopia sericea</i> A.St.-Hil.	tree	SDTFW; Savannas; Rainforest	Lenhosa	629
1310	<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	tree	SDTFW	Lenhosa	330
TOTAL					75652