



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

TASSIO KOITI IGAWA

**OS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO USO DA TERRA NO
CULTIVO DE CACAU NO BIOMA AMAZÔNICO BRASILEIRO**

Belém, PA
2021

TASSIO KOITI IGAWA

**OS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO USO DA TERRA NO
CULTIVO DE CACAU NO BIOMA AMAZÔNICO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Peter Mann de Toledo.

Coorientador: Prof. Dr. Luciano Jorge Serejo dos Anjos.

Belém, PA
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade
Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados
fornecidos pelo(a) autor(a)**

I24e Igawa, Tassio Koiti.
Os efeitos das mudanças climáticas e do uso da terra no
cultivo de cacau no bioma amazônico brasileiro / Tassio Koiti
Igawa. — 2021.
97 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Peter Mann de Toledo
Coorientador(a): Prof. Dr. Luciano Jorge Serejo dos Anjos
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais, Belém, 2021.

1. Theobroma cacao L.. 2. Modelagem de distribuição
de espécies. 3. Agricultura. I. Título.

CDD 630.2516

TASSIO KOITI IGAWA

**OS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DO USO DA
TERRA NO CULTIVO DE CACAU NO BIOMA AMAZÔNICO
BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

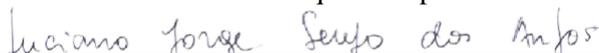
Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia
Linha de pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Belém, 26 de fevereiro de 2021
Banca Examinadora:



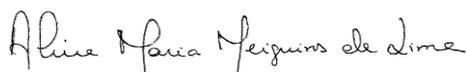
Prof. Peter Mann de Toledo – Orientador
Doutor em Geologia

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE



Prof. Luciano Jorge Serejo dos Anjos – Coorientador
Doutor em Ciências Ambientais

Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA



Profa. Aline Maria Meiguins de Lima – Membro
Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará – UFPA



Prof. Everaldo Barreiros de Souza – Membro
Doutor em Meteorologia Universidade
Federal do Pará -UFPA



Prof. Rosana Quaresma Maneschy- Membro
Doutora em Ciências Agrárias
Universidade Federal do Pará – UFPA

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia chegar a bom porto sem o precioso apoio de várias pessoas.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador Prof. Doutor Peter Mann de Toledo e ao meu coorientador Prof. Doutor Luciano Jorge Serejo dos Anjos pelo apoio, paciência, presteza e empenho.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais - UFPA, pelo conhecimento passado durante as aulas, que contribuirão para meu desenvolvimento profissional.

Não posso deixar de agradecer os pesquisadores Dr. Adriano Venturieri, Dr. Luiz Guilherme Teixeira Silva, Dr. Moisés Mourão, Dr. Moacir Azevedo Valente, Dr. Orlando dos Santos Watrin e Dra. Sandra Maria Neiva Sampaio, assim como, o Antônio Guilherme Campos que sempre me incentivaram a prosseguir na carreira acadêmica.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa.

À Universidade Federal do Pará, em especial, aos funcionários da Biblioteca do Instituto de Geociências, que realizaram a normalização da dissertação, assim como, sempre conduziam o atendimento com extrema competência e celeridade.

Por último, e não menos importante agradeço aos meus pais, irmã e amigos pelo incentivo e apoio de sempre.

RESUMO

“Mudança climática” se tornou um tema cada vez mais recorrente em reuniões intergovernamentais, pois sugerem o estabelecimento de um novo normal, com potencial para desafiar as espécies de plantas e as suas habilidades de sobreviver sob condições não análogas as atuais. A agricultura é um dos setores da atividade humana mais vulnerável às mudanças climáticas, sendo que alguns estudos indicam que as alterações do clima poderiam causar a redução da produção agrícola mundial. Dessa forma, é necessário a elaboração de trabalhos interdisciplinares com a finalidade de mensurar os possíveis efeitos causados pelas mudanças climáticas a esse setor produtivo. Diante disso, este trabalho tem por objetivo analisar os impactos das mudanças climáticas e do uso da terra no cultivo de cacau no bioma amazônico brasileiro em 2050. De modo geral, os resultados indicaram que ocorrerá uma nítida perda de adequação a ocorrência de cacau nos cenários futuros e com isso, poderá haver o aumento das áreas não recomendadas ao cultivo de cacau. As áreas de alto e médio potencial à produção de cacau ficarão localizadas, principalmente, no estado de Rondônia e no nordeste do estado do Pará em ambos os cenários analisados (RCP4.5 e 8.5). Além disso, foi possível identificar prováveis perdas significativas na produção de 92,92 e 95,28% nos cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. Isso poderá afetar cerca de 20.550 estabelecimentos, ou seja, milhares de produtores rurais. Portanto, pôde-se concluir que as mudanças climáticas trarão impactos negativos a produção de cacau no bioma amazônico brasileiro.

Palavras-chave: *Theobroma cacao* L. Modelagem de distribuição de espécies. Agricultura.

ABSTRACT

“Climate change” has become an increasingly recurrent theme in intergovernmental meetings, as it suggests the establishment of a new normal, with the potential to challenge plant species and their ability to survive under conditions not analogous to current ones. Agriculture is one of the sectors of human activity most vulnerable to climate change, with some studies indicating that climate change could cause a reduction in world agricultural production. Thus, it is necessary to prepare interdisciplinary works in order to measure the possible effects caused by climate change to this productive sector. Therefore, this work aims to analyze the impacts of climate change and land use on cocoa cultivation in the Brazilian Amazon biome in 2050. In general, the results indicated that there will be a clear loss of suitability for the occurrence of cocoa in the scenarios and with that, there may be an increase in areas not recommended for cocoa cultivation. The areas of high and medium potential for cocoa production will be located, mainly, in the state of Rondônia and in the northeast of the state of Pará in both scenarios analyzed (RCP4.5 and 8.5). In addition, it was possible to identify probable significant losses in production of 92.92 and 95.28% in scenarios RCP 4.5 and 8.5, respectively. This could affect about 20,550 establishments, that is, thousands of rural producers. Therefore, it was concluded that climate change will have a negative impact on cocoa production in the Brazilian Amazon biome.

Keywords: *Theobroma cacao* L. Species distribution modeling. Agriculture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Diagrama BAM (B= Interação de espécies, A= Condições ambientais e M=Área acessível). FN= Nicho Fundamental, RN = Nicho Realizado e P= Local adequado para ocupação das espécies.....	17
Figura 1.2 – Estrutura metodológica (a) do zoneamento de adaptação às mudanças climáticas, (b) do modelo das áreas potenciais de ocorrência das regiões produtoras de cacau e (c) dos potenciais impactos socioeconômicos frente às mudanças climáticas.....	21
Figura 2.1 – Mapa de localização do bioma amazônico brasileiro.....	27
Figura 2.2 – Esquema das etapas metodológicas realizadas na construção do modelo de distribuição de espécies.....	30
Figura 2.3 – Distribuição espacial da prevalência atual de cultivo de cacau.....	35
Figura 2.4 - Adequação climática do cacau cenários (a) atual, (b) futuro - RCP 4.5 e (c) futuro – RCP 8.5.....	36
Figura 2.5 – Solo adequado para o plantio de cacau.....	37
Figura 2.6 - Distribuição da adequação atual e futuro (RCP 4.5 e 8.5) do cacau nos territórios da MacroZEE.....	38
Figura 2.7- Zoneamento de adaptação às mudanças climáticas para plantio de cacau no bioma amazônico brasileiro (A) Atual, (B) 2050 (RCP4.5) e (C) 2050 (RCP8.5)	39
Figura 3.1 – Distribuição espacial das áreas desflorestada em 2050.....	56
Figura 3.2 – Distribuição espacial das áreas potenciais de ocorrência das regiões produtoras de cacau em A) 2050 (RCP4.5) e B) 2050 (RCP8.5)	57
Figura 3.3 – Áreas potenciais a produção de cacau em 2050 (km ²) nos cenários RCP4.5 e 8.5.....	58
Figura 4.1 – Distribuição espacial da ocorrência do gênero <i>Forcipomyia</i>	69
Figura 4.2 – Distribuição espacial das potenciais perdas da produção nos cenários RCP4.5 e 8.5.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Zoneamento esquemático do bioma amazônico brasileiro.....	33
Tabela 2.2 - Quantificação das zonas de adaptação.....	40
Tabela 3.1 - Coeficientes estimados por intermédio do método spatial lag para computar as adequações para a classe desflorestamento.....	51
Tabela 3.2 - Interpretação de acordo com os valores de Kappa.....	54

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL	12
1.1 Hipóteses	14
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo Geral.....	15
1.2.2 Objetivos Específicos.....	15
1.3 Referencial Teórico	15
1.3.1 A teoria do nicho ecológico e mudanças climáticas	15
1.3.2 Modelo de Circulação Geral	18
1.4 Materiais e Métodos	20
1.4.1 Estrutura metodológica	20
1.4.2 Escopo interdisciplinar da pesquisa	21
CAPÍTULO 2 MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO DO CACAU FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA	23
2.2 Introdução	24
2.3 Materiais e Métodos	26
2.3.1 Área de estudo.....	26
2.3.2 Conjunto de dados.....	27
2.3.3 Seleção das variáveis climáticas	28
2.3.4 Modelagem de distribuição de espécies.....	29
2.3.5 Classificação de adequação do solo	30
2.3.6 Análise dos dados.....	32
2.4 Resultados e Discussões	35
2.4.1 Modelagem de distribuição do cacau.....	35
2.4.2 Zoneamento de adaptação às mudanças climáticas	39
2.5 Conclusão	41
CAPÍTULO 3 INDICAÇÃO DAS FUTURAS REGIÕES PRODUTORAS DE CACAU EM DECORRÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DE USO DA TERRA	48

3.1	Introdução	49
3.2	Materiais e Métodos	51
3.2.1	Modelagem futura do desflorestamento.....	51
3.2.2	Modelo futuro das potenciais áreas para a produção de cacau	54
3.3	Resultados e Discussão	55
3.3.1	Modelo de desflorestamento	55
3.3.2	Modelo da potencialidade futura à produção de cacau	56
3.4	Conclusão	58
CAPÍTULO 4 PREVENDO IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS FUTUROS CAUSADOS POR MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE CACAU NA AMAZÔNIA BRASILEIRA		63
4.1	Introdução	64
4.2	Materiais e Métodos	65
4.2.1	Modelagem de distribuição do gênero <i>Forcipomyia</i>	65
4.2.2	Impactos socioeconômicos	67
4.3	Resultados e Discussão	68
4.3.1	Modelo de distribuição do gênero <i>Forcipomyia</i>	68
4.3.2	Impactos socioeconômicos	70
4.4	Conclusão	72
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO GERAL		76
5.1	Resultados Chave: Impactos e Implicações	76
5.2	Considerações Finais	76
REFERÊNCIAS		78
APÊNDICE A – MAPA DOS PONTOS DE OCORRÊNCIA DO THEOBROMA CACAO L.		82
APÊNDICE B – MAPA DOS PONTOS DE OCORRÊNCIA DO GÊNERO FORCIPOMYIA		83
ANEXO A - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DOS PONTOS DE OCORRÊNCIA DO CACAU		84
ANEXO B - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DOS PONTOS DE OCORRÊNCIA DO GÊNERO FORCIPOMYIA		92

ANEXO C – TABELA CONCEITUAL DOS TIPOS DE MÉTODOS DE MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO DE ESPÉCIES	97
--	-----------

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

A floresta amazônica consiste na maior área selvagem de alta biodiversidade do planeta (SANGERMANO; TOLEDANO; EASTMAN, 2012). Portanto, possui uma grande quantidade de espécies nativas que atualmente, são utilizadas para diversas finalidades. Dentre elas, o cacau, que em geral é cultivado em sistemas agroflorestais por pequenos agricultores nos trópicos úmidos (VAAST; SOMARRIBA, 2014) e que possui um importante papel do ponto de vista ambiental e econômico globalmente.

O cacau (*Theobroma cacao* L.) pertencente à família Malvaceae, é popularmente conhecido como árvore do chocolate (QIN et al., 2017). Tem seu centro de origem localizado no noroeste da América do Sul. Essa região que concentra a maior diversidade das espécies do gênero *Theobroma*, abrangendo 11 espécies reconhecidas (ZARRILLO et al., 2018).

Além disso, Zarrillo et al. (2018), indicaram que, diferentemente do que se supunha, a domesticação do cacau se deu a 5.300 anos atrás na região do sudeste do Equador. A partir das análises de três evidências arqueológicas: os grãos de amido de cacau, resíduos de teobromina absorvidos e DNA antigo presentes nos artefatos encontrados no sítio arqueológico Santa Ana-La Florida.

O cacau necessita de uma precipitação anual entre 1400-2000mm/ano para o seu crescimento (LAHIVE; HADLEY; DAYMOND, 2018). É uma planta que se adapta bem em temperaturas médias anuais acima de 21°C. Portanto, seu desenvolvimento ocorre em locais de clima quente e úmido e a sua ocorrência se concentra na faixa latitudinal de 20°N a 20°S (NASCIMENTO, 1994).

Atualmente, diversas fontes de evidências indicam que os povos pré-colombianos foram os responsáveis pela atual composição da floresta por meio de suas múltiplas práticas de manejo (LEVIS et al., 2018). Nesse contexto, a distribuição da diversidade genética do cacau na América do Sul ocorreu por meio da influência dos povos pré-colombianos que alteraram o processo natural de diferenciação genética (THOMAS et al., 2012).

Já no período pós-colombiano, a disseminação do cacau teve seu início em 1746, o qual foi levado do estado do Pará para o sul da Bahia pelo produtor Louis Frederic Warneaux. Em 1822, foi o marco inicial de expansão do cultivo de cacau a nível global, pois foi neste ano que as sementes de cacau chegaram ao continente

africano, mais precisamente na Ilha de São Tomé e Príncipe. Por fim, em 1970, foi transportado para Ásia sendo produzido na Malásia e Indonésia (MENDES, 2018).

No cenário atual, a produção de cacau é majoritariamente destinada a indústria de produção de chocolate (MENEZES et al., 2016) e seus derivados como doces de chocolate, chocolate em pó e manteiga de cacau (NURHADI, 2016). Mas também, tem se expandido o processo de industrialização da polpa de cacau para a produção de sucos, geleias, destilados, fermentados (vinho e vinagre), xaropes para confeito, néctares, sorvetes, doces e iogurtes (CEPLAC, 2020).

Nesse sentido, o cultivo de cacau possui grande importância socioeconômica em escala global, pois segundo Laliberté et al. (2011) a produção de cacau contribuiu com a renda familiar de 40 a 50 milhões de pessoas. Além disso, segundo os dados mais recentes da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), referente ao ano de 2019, o comércio internacional da semente de cacau movimentou cerca de 9,66 bilhões de dólares.

O Brasil é o 7º maior produtor mundial de cacau, com uma produção de 259.425 toneladas de amêndoas de cacau (FAO, 2019). Porém, é apenas o 42º maior exportador global. Isso indica que grande parte da produção permanece no mercado interno (cerca de 99,81% da produção) (FAO, 2019). Dentre os seis maiores produtores mundiais de cacau, quatro são africanos (1º - Costa do Marfim, 2º - Gana, 4º - Nigéria e 6º - Camarões), um é asiático (3º - Indonésia) e um sul americano (5º - Equador) (FAO, 2019). Portanto, vê-se uma nítida consolidação da expansão do cacau a nível global, por meio do destaque dos países africanos e asiáticos na produção desse fruto.

Na Amazônia brasileira, o principal estado produtor é o Pará. De acordo com os dados mais recentes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), referente ao ano de 2019, o estado produziu 128.961 toneladas de amêndoas, o que representou cerca de 50% da produção nacional (IBGE, 2019). Portanto, percebe-se que além de ser uma cultura nativa do bioma amazônico, a região também possui grande relevância em termos de produção em nível nacional.

No cenário atual, “mudanças climáticas” se tornou um tema cada vez mais recorrente em reuniões intergovernamentais, pois possuem potencial para afetar negativamente os ecossistemas naturais, atividades humanas de maneira geral e a sociedade como um todo (IPCC, 2013). Nesse contexto, se enquadra a produção agrícola, já que tal atividade depende diretamente de fatores climáticos. De acordo

com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013), as projeções indicam que ocorrerá o aumento da ocorrência de eventos extremos, assim como, a elevação da temperatura média do planeta e dos níveis do oceano o que poderá afetar também a produção agrícola mundial. Concomitante a isso, algumas projeções referentes aos biomas da América do Sul também indicaram a persistência de um aumento de temperatura anual por um longo período e uma significativa redução da umidade nos biomas florestais (ANJOS et al., 2021).

Contudo, na atual conjuntura de potencial consolidação de um clima não-análogo em um futuro próximo, estudos com a finalidade de estimar os eventuais impactos nas cadeias de produção agrícola causadas pelas mudanças climáticas são de grande importância, já que o setor agrícola é um dos mais vulneráveis aos piores impactos causados por essas alterações do clima (CLAPP; NEWELL; BRENT, 2018). De acordo com os dados da FAO, a redução da produção agrícola ficará entre 10 a 25% em 2050 (FAO, 2016). Dessa forma, a partir dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 13 (ODS 13), vê-se que para atender a demanda relacionada ao crescimento populacional de 7 para 9 bilhões de pessoas em 2050 haverá a necessidade de realizar a reformulação dos meios de produção, que atualmente são extremamente dependentes de insumos de origem fóssil. Pois, contribui para o aumento da emissão de gases do efeito estufa e conseqüentemente, para as mudanças no clima. Diante disso, para cumprir com Meta 13.b (promover mecanismos para a criação de capacidades para o planejamento relacionado à mudança do clima e à gestão eficaz, nos países menos desenvolvidos, inclusive com foco em mulheres, jovens, comunidades locais e marginalizadas) (CUADRA et al., 2018), faz-se necessário a realização de estudos interdisciplinares com a finalidade de investigar os possíveis impactos e suas dimensões causadas por essas alterações no clima.

1.1 Hipóteses

- Mudanças climáticas e do uso da terra, em particular o desmatamento, poderão afetar o cultivo de cacau e a atual distribuição espacial da produção, promovendo impactos socioeconômicos negativos na região Amazônica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

- Analisar os impactos das mudanças climáticas e do uso da terra no cultivo de cacau no bioma amazônico brasileiro para contribuir com a elaboração de mecanismos de gestão com a finalidade de minimizar os impactos socioeconômicos negativos na região Amazônica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Identificar as zonas de adaptação à ocorrência de cacau frente às mudanças climáticas no cenário atual e futuro na Amazônia brasileira.
- b) Indicar as prováveis regiões de produção de cacau nas áreas desflorestadas em 2050.
- c) Avaliar os possíveis impactos socioeconômicos causados pelas mudanças climáticas na produção de cacau.

1.3 Referencial Teórico

1.3.1 A teoria do nicho ecológico e mudanças climáticas

O conceito de nicho ecológico foi algo bastante debatido ao longo do século XX, por muitos cientistas. Teve início com Joseph Grinnell (1917), ao qual discutiu o nicho de uma variedade de espécies incluindo as exigências abióticas, habitat, comida e relação com os inimigos naturais, assim como, considerou o nicho como um local em um ambiente que determinada espécie ocupa.

Uma década depois, Charles Elton (1927), promoveu o segundo principal avanço no uso do nicho, pois realizou uma nova abordagem para o nicho de uma espécie como o seu papel funcional dentro de uma cadeia alimentar e seus impactos no ambiente. Portanto, a distinção entre os dois autores supracitados é que o escopo do Elton está voltado para os efeitos das espécies ao ambiente. Já o Grinnell teve como foco os efeitos do ambiente nas espécies.

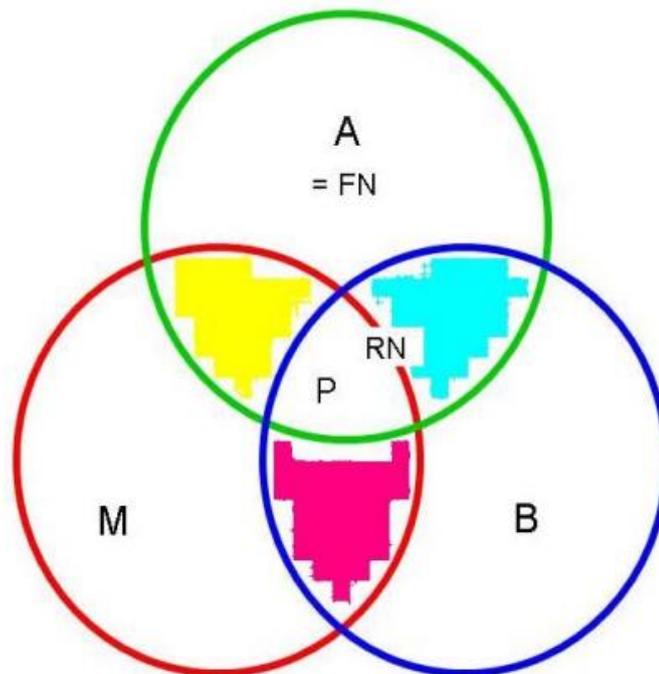
Evelyn Hutchinson (1957) aplicou uma abordagem mais quantitativa para o conceito de nicho que havia sido previamente realizada por Grinnell e Elton. Para tanto, definiu diversos números de fatores limitantes para um dado organismo. A quantidade de cada fator limitante que um dado organismo necessita para existir pode então ser plotado em um hipervolume ou espaço de n-dimensões. Desse modo, o espaço ocupado dentro do n-dimensional hipervolume deveria então ser a variação das condições onde as espécies podem existir.

Robert MacArthur deu prosseguimento e expansão da abordagem de Hutchinson. Além disso, com o esforço de alguns ecologistas na década de 60 e 70, formou-se um corpo de trabalho que é agora conhecido como a teoria do nicho, ao qual era essencialmente um grupo de modelos teóricos elaborados para investigar quantas espécies coexistentes poderiam sobreviver em uma determinada comunidade (MACARTHUR, 1972).

Com o intuito de criar um conceito de nicho no contexto de uma síntese para a ecologia, Chase e Leibold (2003), elaboraram uma definição geral ao qual consideraram o nicho ecológico como a descrição conjunta das condições ambientais que permitem que uma espécie satisfaça seus requisitos mínimos, de modo que a taxa de natalidade de uma população local seja igual ou superior à sua taxa de mortalidade, juntamente com o conjunto de efeitos per capita dessa espécie nessas condições ambientais.

Os autores Soberón e Peterson (2005), com intuito de identificar a área de distribuição de uma espécie determinaram que a presença de uma espécie ocorre sob três condições. Primeiramente, as variáveis abióticas devem ser adequadas a exigência da espécie. Além disso, faz-se necessário a presença e a ausência de determinados conjuntos de espécies. Por fim, a distribuição de uma espécie ocorrerá somente em regiões acessíveis, ou seja, que permitam a dispersão dos indivíduos (Figura 1.1).

Figura 1.1 – Diagrama BAM (B= Interação de espécies, A= Condições ambientais e M=Área acessível). FN= Nicho Fundamental, RN = Nicho Realizado e P= Local adequado para ocupação das espécies



Fonte: Soberón e Peterson (2005).

Diante do exposto, é possível identificar na Figura 1.1, que a área “A” representa a região geográfica com o conjunto apropriado de fatores abióticos para uma determinada espécie e pode ser considerada como a expressão geográfica do Nicho Fundamental (FN). A área “B”, é a região em que ocorre a interação entre as espécies o que pode ou não sobrepor extensivamente com “A”. $A \cap B$ representa a extensão geográfica do nicho realizado (RN) das espécies. “M” é composto pelas partes do mundo “acessível” às espécies no sentido ecológico, sem barreiras ao movimento e colonização. $A \cap B \cap M = P$ é a região que possui o conjunto adequado de fatores bióticos e abióticos e que é acessível às espécies, assim como, é equivalente a distribuição geográfica das espécies (SOBERÓN; PETERSON, 2005).

Contudo, os modelos de distribuição de espécies estão cada vez mais sendo utilizados para interpolar e extrapolar dados por meio do uso de pontos de observação no espaço, com intuito de prever a ocorrência de uma espécie para locais onde faltam dados de pesquisa, que é o caso de grande parte da superfície terrestre. Além disso, os mapas de distribuição de espécies ou de adequabilidade de habitat são necessários para priorizar ou direcionar áreas para status de proteção, avaliar ameaças a essas áreas e criar reservas (FRANKLIN, 2010).

Dessa forma, o modelo de nicho climático é aplicado para um espaço geográfico com a finalidade de identificar áreas ideais para a distribuição de determinadas espécies e esses tipos de modelo são utilizados para prever climas futuros baseados na combinação dos modelos de circulação geral da atmosfera-oceano e relatórios de vários cenários (CRUZ-CÁRDENAS et al., 2016).

As mudanças climáticas significam que um novo grande período de regimes ambientais deve emergir, com potencial para desafiar a população de plantas e as suas habilidades de sobreviver sob novas condições (ESTRADA-CONTRERAS et al., 2015). Portanto, as mudanças climáticas globais causadas por processos naturais e fatores antropogênicos podem promover os grandes problemas que afetarão o mundo durante o século XXI (SOUZA et al., 2019). Muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de prever essas alterações no clima. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), na estrutura do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) do programa de pesquisa climática global, criou uma série de cenários futuros com base nas forçantes antropogênicas relacionadas a concentração de gases do efeito estufa denominados de *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Dessa forma, foram criados quatro cenários (RCP2.6, 4.5, 6.0 e 8.5), os quais variam de acordo com o grau de intensificação das forçantes antropogênicas, com isso o cenário RCP2.6 é aquele que possui as alterações climáticas menos intensas, em contraposição ao cenário RCP8.5 (IPCC, 2013).

Portanto, os modelos de distribuição de espécies que se utilizam desses cenários futuros de mudanças climáticas são essenciais na identificação da influência das mudanças climáticas na adequação a ocorrência de determinadas espécies ao qual poderá contribuir para os tomadores de decisão na adoção de medidas com a finalidade de evitar a intensificação das mudanças no clima.

1.3.2 Modelo de Circulação Geral

Os Modelos de Circulação Geral (no inglês, General Circulation Model - GCM) são modelos matemáticos da circulação geral do oceano ou da atmosfera de um planeta e que são empregados para melhorar o entendimento sobre o sistema climático e para auxiliar na previsão do clima futuro (MCGUFFIE; HENDERSON-SELLERS, 2001).

Em meados da década de 50, Norman Phillips construiu o primeiro modelo de circulação geral da atmosfera bem-sucedido, ao qual descreveu padrões mensais

estatisticamente consistentes da atmosfera. Este modelo serviu de base para estudos sobre os potenciais efeitos climáticos de concentrações dos gases do efeito estufa (CO₂, 2002).

No final da década de 60, no Laboratório de Geofísica de Dinâmica de Fluidos da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) em Princeton, New Jersey, foi desenvolvido o primeiro modelo de circulação geral que combinava processos oceânicos e atmosféricos. Dessa forma, os cientistas puderam compreender como ocorre a interação entre o oceano e a atmosfera e de que forma influenciarão o clima (NOAA, 2021).

Já no início da década de 80, a divisão de Clima e Dinâmica do NCAR (National Center for Atmospheric Research), criou um modelo tridimensional global abrangente para uso das universidades e de cientistas da NCAR com a finalidade de compreender o clima global. Esse modelo por possuir o uso generalizado recebeu o nome de Modelo de Clima Comunitário (no inglês, Community Climate Model – CCM) e vem sendo continuamente refinado (COLLINS et al., 2004).

Na década de 90, alguns pesquisadores como Xue et al. (1996), identificaram os vieses gerados pela prescrição errônea dos tipos de solo e da vegetação nos modelos de circulação geral. Diante dos resultados desse trabalho foi possível melhorar o modelo da cultura e os erros sistemáticos nas simulações.

Nos anos 2000, houve o surgimento de modelos de circulação geral mais robustos como o HadCM3, que é um modelo de oceano-atmosfera acoplado e que por ter uma resolução oceânica mais alta evitou os ajustes dos fluxos, que consistia no calor artificial adicional e fluxos de umidade na superfície do oceano (LYNCH, 2006).

Contudo, esses modelos de circulação geral foram utilizados também para a elaboração de modelos mais complexos como o Modelo de Sistema Terrestre (no inglês, Earth System Model - ESM), que consiste em milhões de linhas de código de computador ao qual representa o ápice da compreensão das intrincadas interações acopladas da terra, oceano, criosfera e sistemas atmosféricos da Terra. Difere-se dos antigos modelos atmosféricos mais simples e esses modelos se tornaram veículos de um consenso científico ao qual é utilizado para projetar climas futuros (SANDERSON; KNUTTI; CALDWELL, 2015).

1.4 Materiais e Métodos

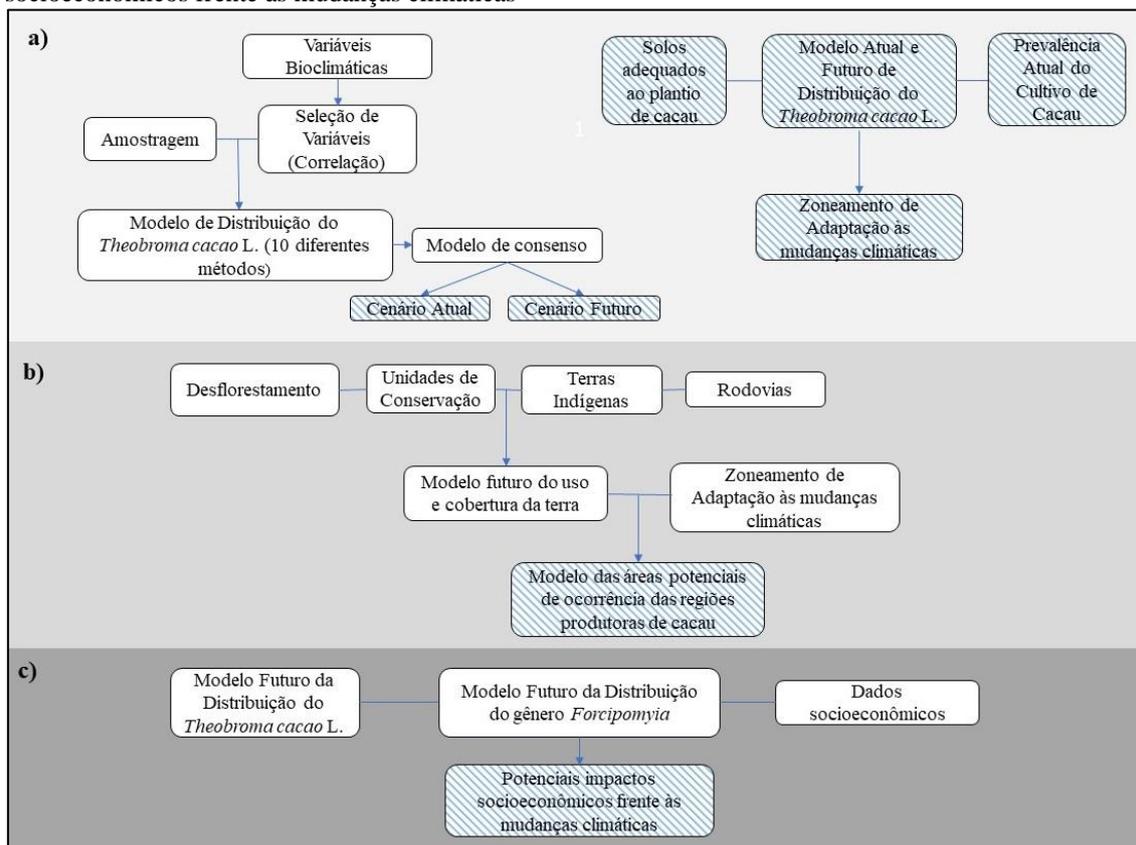
1.4.1 Estrutura metodológica

O mundo atual, de grandes avanços na tecnologia computacional e repentina explosão de dados, contribuiu para a formação da era “Big Data”. Diante disso, essa grande quantidade de dados permitiu realizar a seleção de quais dados devem ser usados e integrados para servir como um novo modo de resolver problemas, assim como, possibilita solucionar aqueles que anteriormente não eram possíveis de serem resolvidos (SONG; ZHU, 2016).

Algumas dessas vastas quantidades de dados disponíveis estão na área do sensoriamento remoto, ao qual possibilitaram realizar estudos climatológicos de forma contínua com dados em ampla escala espacial e temporal (ASNER; ALENCAR, 2010). Assim como, se tornou possível a construção de modelos climatológicos atuais e futuros a partir dessas informações em conjunto com dados de estações meteorológicas (FICK; HIJMANS, 2017; KARGER et al., 2017).

Este trabalho realizou uma análise integrada de diversos fatores que influenciam a ocorrência da espécie estudada. A figura 1.2 expressa o roteiro metodológico para a concepção dos resultados aos quais foram norteados pelos objetivos específicos e os itens hachurados foram os produtos dessa dissertação. Portanto, ilustrou-se os passos definidos na construção das zonas de adaptação às mudanças climáticas, o zoneamento das áreas mais prováveis de produção de cacau e os impactos socioeconômicos elaborados nos Capítulos 2, 3 e 4, respectivamente.

Figura 1.2 – Estrutura metodológica (a) do zoneamento de adaptação às mudanças climáticas, (b) do modelo das áreas potenciais de ocorrência das regiões produtoras de cacau e (c) dos potenciais impactos socioeconômicos frente às mudanças climáticas



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.4.2 Escopo interdisciplinar da pesquisa

A construção dos resultados da dissertação de mestrado se baseou em uma abordagem interdisciplinar com a finalidade de atender os objetivos propostos. A linguagem de programação serviu como instrumento chave para a geração dos modelos de distribuição de espécies. Além disso, para investigar a influência das mudanças climáticas na ocorrência do *Theobroma cacao* L. e do gênero *Forcipomyia* houve a necessidade de se fazer uso dos cenários climáticos para o futuro. Diante disso, o modelo de distribuição das espécies como cerne da pesquisa foi utilizado para gerar diversos outros produtos. Esse conjunto de premissas fundamentais que auxiliam os princípios de extração de informações e conhecimento dos dados é definida como ciência de dados (PROVOST; FAWCETT, 2013).

A econometria espacial, que é definida como “conjunto de métodos e técnicas, baseados na representação formal da dependência espacial e heterogeneidade espacial, que tratam de forma efetiva das peculiaridade causadas pelo espaço em análises

estatísticas em modelos de ciência regional”(ANSELIN, 1988), foi essencial na elaboração do modelo futuro de desflorestamento com a finalidade de identificar a dinâmica do uso e cobertura da terra com o propósito de indicar as áreas potenciais destinadas a produção de cacau em áreas já consolidadas em 2050.

Os conhecimentos agronômicos foram imprescindíveis na classificação das áreas dos solos adequados ao plantio de cacau, assim como, outras características relacionadas a autoincompatibilidade genética presente na maioria dos clones de cacau cultivado (ROYAERT et al., 2011), e com isso atestando a importância das relações interespecíficas em relação a atuação dos agentes de polinização para a produtividade do cacau.

Diante dessas informações e dos dados socioeconômicos do bioma amazônico brasileiro, foi possível obter estimativas referentes aos impactos socioeconômicos causados pelas mudanças climáticas. Vale ressaltar que as análises de todos os dados gerados se deu por meio do uso de um SIG (Sistema de informações Geográficas), ou seja, geotecnologias, que se caracterizam como aquelas úteis para coleta, processamento, análise e oferta de informações com referência geográfica (ROSA, 2005), serviram como elemento importante na elaboração dos resultados.

Portanto, foi possível identificar que o emprego da interdisciplinaridade foi essencial para alcançar os objetivos propostos na dissertação, pois ela permite resolver problemas e responder questões que não são possíveis de serem solucionadas de forma satisfatória com a utilização de apenas métodos ou abordagens univariadas (ASHBY; EXTER, 2019).

CAPÍTULO 2 MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO DO CACAU FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

RESUMO

O cacau é uma planta nativa do noroeste da América do Sul com grande relevância na economia global. As evidências indicam que o cacau é sensível ao clima seco. Concomitante a isso, existe as projeções dos cenários futuros das mudanças climáticas que sugerem um clima mais quente e seco na bacia amazônica. Neste trabalho, quantificamos a sua adequação edafoclimática ao bioma amazônico brasileiro, bem como contabilizamos as diferenças regionais no planejamento dos territórios de ocupação. Modelamos a adequação da distribuição geográfica do cacau usando um conjunto de 10 modelos correlativos que foram executados na biblioteca “biomod2”. Em seguida, definimos as zonas para indicar as maneiras pelas quais a produção de cacau pode ser capaz de se adaptar às mudanças climáticas de acordo com o modelo de adequação atual e futuro. Nossos resultados sugerem que a redução da precipitação e o aumento da temperatura podem promover a redução na adequação da produção de cacau no bioma amazônico brasileiro. Além disso, observamos uma redução de 36,75 e 61,2% das zonas de intensificação e expansão nos cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, em comparação com o cenário atual. Concluimos que é provável que haja perdas na adequação edafoclimática do plantio do cacau no bioma amazônico brasileiro, devido a diminuição da precipitação e aumento da temperatura.

Palavras-chave: *Theobroma cacao* L., Adequação Climática, Modelagem da Distribuição de Espécies, Produção de Culturas, Áreas vulneráveis.

ABSTRACT

Cocoa is a plant with origins in northwestern South America with high relevance in the global economy. Evidence indicates that cocoa is sensitive to a dry climate, under which crop production is reduced. Projections for future climate change scenarios suggest a warmer and drier climate in the Amazon basin. In this paper, we quantify the potential losses in cocoa production due to its edaphoclimatic suitability to the Brazilian Amazon biome as well as account for regional differences in planning occupation territories. We modeled the suitability of the geographical distribution of cocoa using an ensemble of 10 correlative models that were run in the “biomod2” library. Then, we defined a zoning

system to indicate ways in which cocoa production may be able to adapt to climate change according to the current and future suitability model. Our results suggest that a reduction in precipitation and an increase in temperature may promote a reduction in the suitability of cocoa production in the Brazilian Amazon biome. Furthermore, of the areas suitable for cocoa plantation, we found a 37.05% and 73.15% decrease in the areas suitable for intensification and expansion under scenarios RCP 4.5 and 8.5, respectively, in comparison with the current scenario. We conclude that it is likely that there will be losses in the edaphoclimatic suitability of cocoa plantation in the Brazilian Amazon biome, due to decreased rainfall and increased temperature.

Keywords: *Theobroma cacao* L., Climatic Suitability, Species Distribution Modeling, Crop Production, Vulnerable areas.

2.2 Introdução

A agricultura é um dos setores mais vulneráveis às mudanças climáticas (FARRELL et al., 2018) com alguns estudos indicando que mudanças climáticas causarão a redução da produção agrícola mundial (BALDOS; FUGLIE; HERTEL, 2020, THORNTON et al., 2011). De acordo com os dados da FAO, a redução da produção das culturas ficará entre 10 a 25% em 2050 (FAO, 2016). Conseqüentemente, a redução da oferta de alimentos promoverá o aumento e a volatilização dos preços, assim como, a redução da segurança alimentar, principalmente, nas regiões mais pobres do mundo (ROSEGRANT; TOKGOZ; BHANDARY, 2013).

Nesse contexto, o cacau (*Theobroma cacao* L.) é considerado como um dos cultivos de maior importância na renda familiar de pequenos agricultores em vários países tropicais (LÄDERACH et al., 2013). América do Sul representa 14,49% da produção global de cacau e recebeu com a exportação dessa produção 836 milhões de dólares (FAO, 2019). O Brasil é o segundo maior produtor de cacau da América do Sul e o sexto maior produtor mundial com uma produção de 259.425 toneladas (FAO, 2019).

Do ponto de vista biogeográfico, cacau é uma planta nativa do noroeste da América do Sul (ZARRILLO et al., 2018), onde originalmente evoluiu e se adaptou durante um longo período de domesticação iniciada há 5300 anos (ZARRILLO et

al., 2018). Tais espécies crescem preferencialmente em regiões com precipitação média de 1400-2000mm/ano (LAHIVE; HADLEY; DAYMOND, 2018). Se adaptam bem em temperaturas acima de 21° C. Em geral, seu desenvolvimento ocorre em locais de clima quente e úmido com uma variação de latitude de 20°N a 20°S (NASCIMENTO, 1994).

Projeções das mudanças climáticas indicam uma tendência de aumento de temperatura por um longo período em todos os biomas terrestres da América do sul e uma significativa redução de umidade nos biomas florestais (ANJOS et al., 2021). Alguns estudos sugerem que o ambiente quente e seco poderá alterar as zonas adequadas ao desenvolvimento do cacau (LÄDERACH et al., 2013). Dessa forma, os sistemas agroflorestais são considerados como uma estratégia chave no sentido de aumentar a resiliência dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas (ZOMER et al., 2016). Além disso, o cultivo de cacau por ocorrer, principalmente, em pequenas propriedades (VLIET; GILLER, 2017), de acordo com algumas evidências científicas, podem promover menores aumentos da temperatura de superfície e reduções nos volumes de chuva em comparação com grandes propriedades (MAEDA et al., 2021).

Entretanto, no cenário atual de consolidação potencial de um clima não análogo em um futuro próximo, estudos que estimam os possíveis impactos nas cadeias produtivas agrícolas causadas pelas mudanças climáticas são de grande importância, uma vez que o setor agrícola é o mais vulnerável aos efeitos adversos das alterações no clima (CLAPP; NEWELL; BRENT, 2018). Nesse sentido, o Brasil possui a Política Nacional sobre Mudança no Clima (PNMC), ao qual foi instituída em 2009, pela Lei nº 12.187 e que busca assegurar que o desenvolvimento econômico e social contribua para a proteção do sistema climático (BRASIL, 2009). Além disso, possui alguns projetos para promover o desenvolvimento rural de baixo carbono, maximizando a conservação e a produção econômica adaptada à região, como o Macrozoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal (MacroZEE) (GALFORD et al., 2013), que é um instrumento utilizado para planejar e ordenar o território brasileiro, tem sido proposta do governo brasileiro para apoiar as decisões de planejamento do desenvolvimento e do uso do território nacional em bases sustentáveis, tornando-se parte do Plano Plurianual (PPA) do Governo Federal, o qual consiste em um instrumento de planejamento governamental que define as diretrizes, objetivos e metas da administração pública federal com a finalidade de viabilizar a implementação dos programas (BRASIL, 2019).

O MacroZEE da Amazônia Legal foi aprovado no decreto nº 7.378 de 2010, ao qual tem por finalidade garantir a sustentabilidade do desenvolvimento regional, por meio da indicação de estratégias produtivas e de gestão territorial de acordo com a diversidade econômica, ecológica, cultural e social da Amazônia (BRASIL, 2010). Dessa forma, foram criados três principais categorias de territórios, o território rede, que consiste nas áreas no qual já se tem uma ocupação consolidada e possui extrema mobilidade, com fluxos e/ou conexões suscetíveis de sobreposições, já o território zona é caracterizado pela predominância de ecossistemas ainda preservados. Por fim, tem-se o território fronteira que se constitui de uma área com diferentes níveis de apropriação da terra, de povoamento e consolidação. Além disso, se expandem pelas estradas e/ou redes fluviais e por essas redes não estarem integradas, há um potencial para criação de inovações (MMA, 2020b).

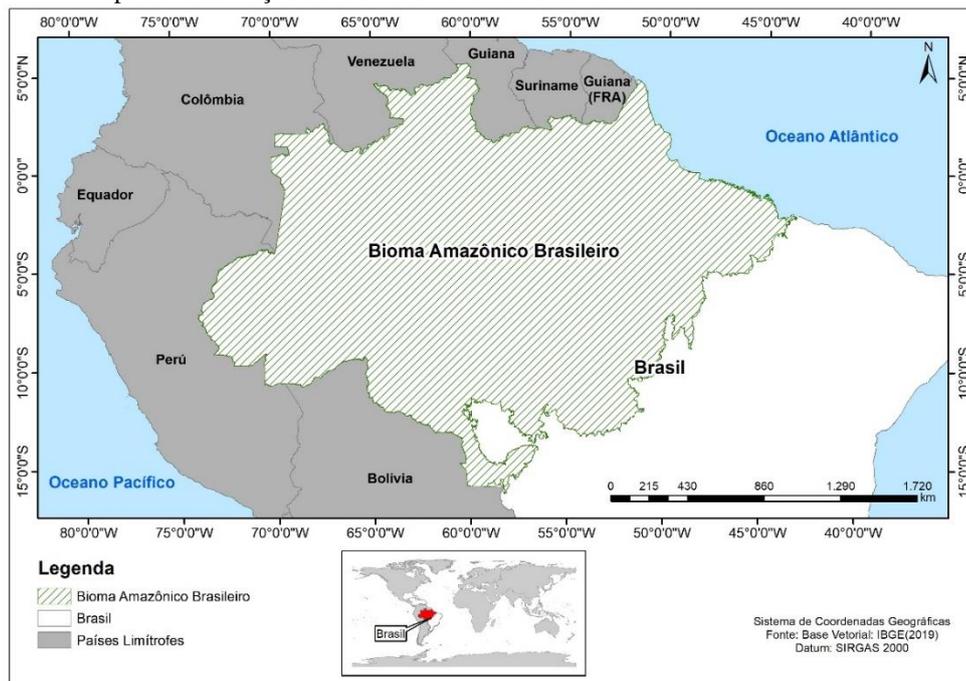
Diante do exposto, apesar de existir políticas governamentais a nível federal e estadual como a Política Nacional sobre Mudança no Clima (PNMC), Políticas Estaduais sobre Mudanças Climáticas. Existe uma falta de estudos referente aos impactos que as mudanças climáticas poderão causar na agricultura da região. Contudo, esse capítulo tem como objetivo quantificar os potenciais impactos na adequação edafoclimática do cacau frente às mudanças climáticas com a finalidade de servir de apoio para as tomadas de decisão fazendo uso dos métodos de modelagem de distribuição de espécies.

2.3 Materiais e Métodos

2.3.1 Área de estudo

O estudo será realizado no bioma amazônico brasileiro (Figura 2.1), que consiste na região com a maior biodiversidade do mundo (WINEMILLER et al., 2016), assim como, possui a maior diversidade de espécies do gênero *Theobroma* e por conta disso, foi considerado como o bioma, ao qual se localiza o centro de origem da espécie *Theobroma cacao* L. (ZARRILLO et al., 2018).

Figura 2.1 – Mapa de localização do bioma amazônico brasileiro



Fonte: Elaborado pelo autor.

A área estudada é uma das principais produtoras de cacau do Brasil, que representa cerca de 50% da produção nacional (IBGE, 2019) e compreende uma região de 4.186.943km².

O bioma amazônico brasileiro é caracterizado por ter altas temperaturas e chuvas fortes, com temperaturas que variam entre 22 e 26 °C e precipitação média de 2.300mm (DINIZ et al., 2020). Além disso, a precipitação na Amazônia possui uma sazonalidade anual ao qual varia entre 2,2 a 2,6mm/dia nos meses mais secos (julho e agosto) e 9mm/dia nos meses mais chuvosos (fevereiro e março) (SOUZA et al., 2014).

2.3.2 Conjunto de dados

Os dados de ocorrência das espécies foram obtidos no banco de dados do “SpeciesLink” (slink.org.br) e do Global Biodiversity Information Facility - GBIF (gbif.org). Os dados brutos (1310 pontos de ocorrência) passaram por um processo de limpeza durante o qual as coordenadas escritas incorretamente, duplicadas ou que estavam preenchidas sem informação foram removidas. Conseqüentemente, o número de pontos de ocorrência passou de 1310 para 288.

2.3.3 Seleção das variáveis climáticas

Para gerar o modelo de distribuição de espécie futura foram considerados os cenários RCPs 4.5 e 8.5 para cinco modelos dos futuros (2041–2060): CESM1-BGC, que foi gerado pelo Centro Nacional para Pesquisa Atmosférica (LINDSAY et al., 2014); CMCC-CMS, o qual foi criado pelo *Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici* (SCOCCIMARRO et al., 2011); CM5A-LR, que foi elaborado pelo *Institut Pierre-Simon Laplace* (PERSECHINO et al., 2012); MIROC5, o qual foi gerado pela Universidade de Tóquio (WATANABE et al., 2010) e ESM-MR, que foi criada no Instituto Max Planck para Meteorologia (GIORGETTA et al., 2013). Foram selecionados 5 modelos futuros, pois o erro associado à média de vários modelos da climatologia atual é menor ao utilizar de 5 a 12 modelos com menor interdependência (SANDERSON; KNUTTI; CALDWELL, 2015).

Dessa forma, assumimos o ano 2050 para caracterizar os modelos futuros. Pois, este ano possui projeções que indicam uma redução da produção agrícola entre 10 a 25% em 2050 (FAO, 2016). Além disso, vê-se que para atender a demanda relacionada ao crescimento populacional de 7 para 9 bilhões de pessoas em 2050 haverá a necessidade de realizar a construção de novas formas de produção, ao qual atualmente são extremamente dependentes de insumos de origem fóssil (CUADRA et al., 2018). Portanto, é nítida a importância da realização de estudos para esse ano com a finalidade de investigar as possíveis alterações na adequação de uma cultura agrícola como o cacau promovidas pelas mudanças climáticas.

Os dados referentes as variáveis bioclimáticas foram obtidas do banco de dados do *Climatologies at high resolution for the Earth's land surface areas* (KARGER, 2018). Vale ressaltar que os dados climatológicos foram gerados por meio da temperatura e precipitação mensal para os anos de 1979-2013 (KARGER et al., 2017). As 19 variáveis bioclimáticas usadas foram: temperatura média anual ($^{\circ}\text{C}/10$), variação diurna média ($^{\circ}\text{C}$), isothermalidade, temperatura sazonal (desvio padrão), temperatura máxima do mês mais quente ($^{\circ}\text{C}/10$), temperatura mínima do mês mais frio ($^{\circ}\text{C}/10$), variação de temperatura anual ($^{\circ}\text{C}/10$), temperatura média do trimestre mais úmido ($^{\circ}\text{C}/10$), temperatura média do trimestre mais seco ($^{\circ}\text{C}/10$), temperatura média do trimestre mais quente ($^{\circ}\text{C}/10$), temperatura média do trimestre mais frio ($^{\circ}\text{C}/10$), precipitação anual (mm/ano), precipitação do mês mais úmido (mm/mês), precipitação do mês mais seco (mm/mês), precipitação sazonal (coeficiente de variação), precipitação do trimestre

mais úmido (mm/trimestre), precipitação do trimestre mais seco (mm/trimestre), precipitação do trimestre mais quente (mm/trimestre) e precipitação do trimestre mais frio (mm/trimestre).

A colinearidade entre das variáveis preditoras promove a redução da eficiência e o aumento da incerteza do modelo de distribuição de espécies (MARCO JÚNIOR; NÓBREGA, 2018). Portanto, realizou-se a eliminação das variáveis bioclimáticas com correlação superior a 0,7 com o intuito de reduzir a colinearidade. Dessa forma, a partir dessa seleção, apenas seis variáveis climáticas obtiveram correlação abaixo de 0,7, que foram: a variação diurna média (°C); a isotermalidade; a temperatura média do trimestre mais úmido (°C/10); a temperatura média do trimestre mais seco (°C/10); precipitação do mês mais seco (mm/mês) e a sazonalidade da precipitação (coeficiente de variação).

A partir disso, realizou-se o “ensemble” dos modelos de cada variável bioclimática com intuito de serem utilizadas na elaboração do modelo atual e futuro de adequação a ocorrência do cacau, esse procedimento foi realizado com a finalidade de reduzir as incertezas em relação a utilização de somente um modelo de circulação geral (THUILLER et al., 2019).

2.3.4 Modelagem de distribuição de espécies

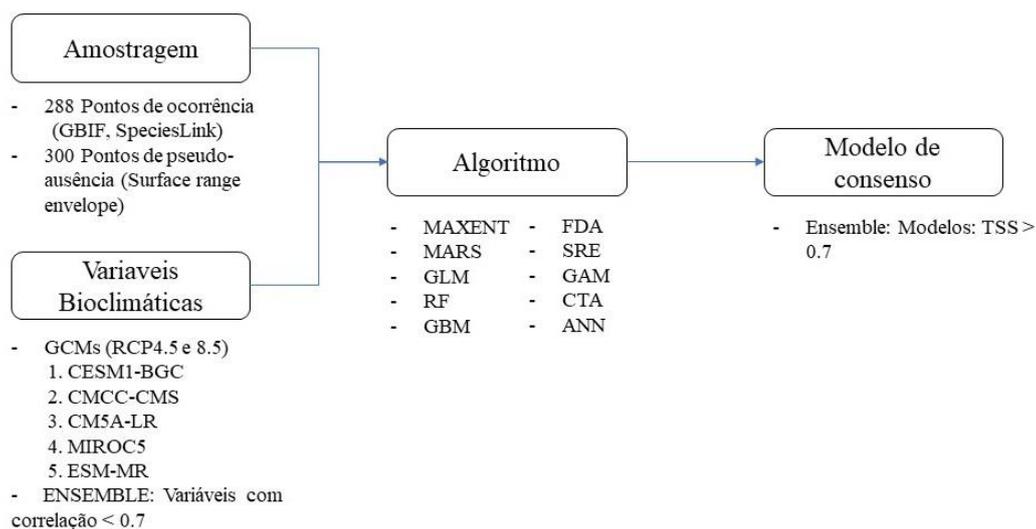
A modelagem de distribuição de espécies foi realizada por meio do programa RStudio versão 1.1463, ao qual a linguagem de programação utilizada é o R (R Core Team, 2020). Para a realização dos procedimentos de criação do modelo foi utilizada a biblioteca biomod2 (THUILLER et al., 2020). Dessa forma, realizou-se a elaboração dos modelos de distribuição de espécies a partir das variáveis bioclimáticas e dos dados georreferenciados da ocorrência do *Theobroma cacao* L. (288 pontos). Assim como, de 300 pontos de pseudo-ausência que foram gerados por meio da utilização da estratégia *Surface Range Envelope* (SRE), que realiza a criação de pontos de pseudo-ausência em locais fora da variação climática dos pontos de ocorrência, com a finalidade de melhorar a acurácia das amostras (ZHANG et al., 2015).

Para cada cenário (RCP 4.5 e 8.5) a distribuição foi analisada usando dez algoritmos de Modelagem de Distribuição de Espécies independentes: *Classification and Regression Trees* (CTA) (BREIMAN et al., 1984), *Generalized Boosted Regression Models* (GBM) (FREUND; SCHAPIRE, 1995), *Random Forest* (RF) (CUTLER et al., 2007), *Generalized Linear Models* (GLM) (HOSMER; LEMESHOW, 2000),

Generalized Additive Models (GAM) (HASTIE; TIBSHIRANI, 1990), *Multivariate Adaptive Regression Splines* (MARS) (FRIEDMAN, 1991), *Flexible Discriminant Analysis* (FDA) (HASTIE; TIBSHIRANI; BUJA, 1994), *Surface Range Envelope* (SRE), MaxENT (PHILLIPS et al., 2006) e *Artificial Neural Network* (ANN) (RIPLEY, 1996).

A validação dos modelos se deu com o uso de 25% das amostras e as métricas de avaliação dos modelos escolhidos foram o *True Skills Statistics* (TSS) e a *Area Under the Curve* (AUC). A partir dos resultados da validação foram selecionados aqueles modelos com valores de TSS acima de 0,7, com a finalidade de reduzir os erros de cada modelo (ESSER; SARAIVA; JARENKOW, 2019) e com isso promover a geração de um modelo consensual para o cenário atual e futuro (Figura 2.2), por meio de uma média aritmética entre esses modelos. Essa modelagem de conjunto é particularmente importante nessas situações de predições de um período de tempo diferente ou de regiões diferentes, pois mapeia a tendência principal e a variação geral de todos os modelos (GUISAN et al., 2017).

Figura 2.2 – Esquema das etapas metodológicas realizadas na construção do modelo de distribuição de espécies



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.5 Classificação de adequação do solo

O tipo de solo é uma variável importante que estabelece a adequação de determinada região para o plantio de certas culturas. Desse ponto de vista, estudos

relatados anteriormente identificaram que a bacia amazônica é caracterizada principalmente, por solos de baixa fertilidade (SCHNEIDER et al., 2002). Dessa forma, a adição de fertilizantes minerais é necessária para atender a demanda da plantação de cacau (SCHROTH et al., 2016). No entanto, existe poucas minas ou fábricas nas proximidades da bacia amazônica, o que significa que o transporte de fertilizantes para a região é cara (MENDES, 2013).

Os solos profundos com pouca pedregosidade foram considerados como adequados para o plantio de cacau, pois facilitam o desenvolvimento do sistema radicular da planta. Dessa forma, esses solos foram posteriormente classificados com base em sua fertilidade. Os solos eutróficos são caracterizados pela alta fertilidade, o que significa que pelo menos 50% de sua capacidade de troca catiônica é ocupada por cátions nutrientes (SCHROTH et al., 2016). Portanto, os solos distróficos são caracterizados com baixa fertilidade, que são solos com menos de 50% da capacidade de troca catiônica ocupada por cátions nutrientes.

Os solos de alta fertilidade podem ser usados para o plantio de cacau em áreas com menor suporte de infraestrutura, pois requerem menor quantidade de fertilizantes químicos, o que barateia os custos de produção. Porém, em regiões mais isoladas (território zona), é necessário realizar uma análise mais detalhada da viabilidade econômica da plantação, principalmente devido aos custos associados ao escoamento da produção. Por fim, os solos com baixa fertilidade devem estar localizados em regiões com bom suporte infra estrutural, o que diminui o custo de transporte. Diante disso, utilizou-se o território rede criado no projeto MacroZEE para delimitar a região com extrema mobilidade.

A aceitação da viabilidade econômica dos solos menos férteis se baseou na atual produção de cacau na região amazônica, pois de acordo com os dados de produção de cacau do IBGE (2019), associados a esses solos de baixa fertilidade, foi possível observar que os municípios aos quais não possuem solos férteis representaram 21,94% de toda a produção da região. Esse dado comprova que é possível plantar cacau em locais com solos menos férteis. Portanto, os solos caracterizados como adequados ao plantio de cacau foram aqueles com alta fertilidade em todos os territórios do MacroZEE ou os solos com baixa fertilidade que estavam localizados dentro do território rede. Esse procedimento foi realizado para promover uma delimitação dos solos com base na relação entre a infraestrutura e fertilidade dos solos, pois estão atrelados a viabilidade econômica da plantação.

Os dados de solos utilizados foram obtidos no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017). Assim, os tipos de solos selecionados foram os subtipos eutrófico e distrófico de Argissolos, Neossolos Flúvicos, Nitossolos e Latossolos e que na base de referência global são definidos como Acrisols, Fluvisols, Nitosols e Ferralsols, respectivamente.

2.3.6 Análise dos dados

Para a análise dos dados de adequação, recortamos o modelo de consenso para as áreas com os solos adequados ao plantio de cacau na região do bioma amazônico brasileiro, a fim de quantificar a adequação edafoclimática em um nível de mapeamento mais detalhado. Em seguida, associamos esses resultados aos territórios do MacroZEE. Vale ressaltar que as áreas selecionadas estavam fora de terras indígenas e unidades de conservação.

Para realizar a criação de medidas de adaptação com a finalidade de reduzir os problemas causados pelas mudanças climáticas, foi necessário realizar uma análise detalhada com base na categorização da aptidão climática atual e futura do cacau; na identificação das áreas produtoras de cacau; e nos tipos de solos associada aos territórios do MacroZEE para delimitar zonas de adaptação às mudanças climáticas com as respectivas medidas a serem implementadas. Para tanto, adaptamos o método de classificação das zonas elaborado no trabalho de Schroth et al. (2017), para o zoneamento de adaptação às mudanças climáticas no bioma amazônico brasileiro, conforme mostrado na Tabela 2.1. O zoneamento para as condições climáticas atuais foi criado com base nos critérios das colunas de prevalência atual de cultivo de cacau e de adequação climática futura projetada, ao qual substituímos os dados projetados pelos dados atuais.

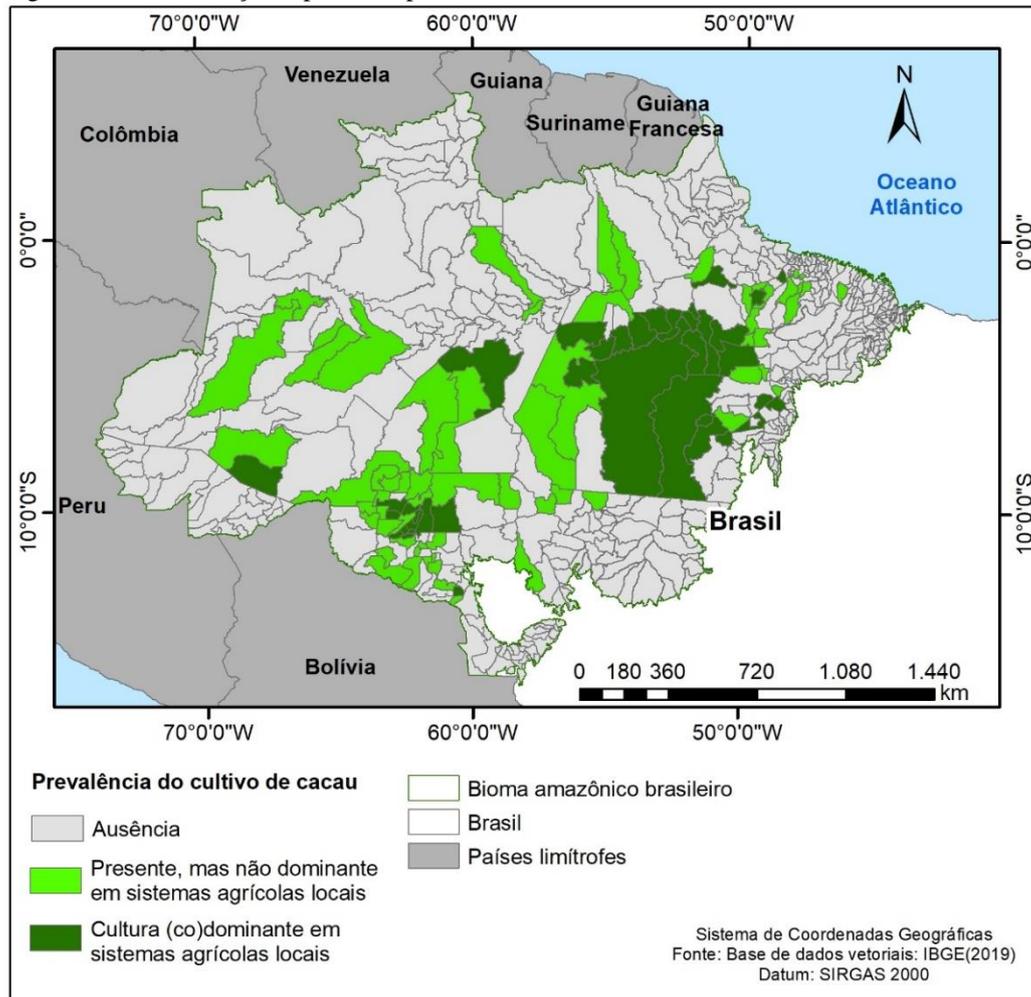
Tabela 2.1 – Esquema de elaboração do zoneamento de adaptação às mudanças climáticas

Zonas	Adequação climática atual	Adequação climática futura projetada	Prevalência atual de cultivo de cacau	Foco da estratégia de adaptação	Requisitos chave	Exemplos locais ou regionais
Zona de Intensificação	Média a Alta (>50%)	Média a Alta (>50%)	Cultura (co)dominante em sistemas agrícolas locais	Aprimoramento das técnicas de produção e insumos para aumento da produtividade; diversificação da produção para proteção contra riscos ambientais e de mercado	Assistência técnica; insumos; crédito acessível	Municípios de Uruará, Medicilândia e Altamira localizados no estado do Pará
Zona de Expansão	Média a Alta (>50%)	Média a Alta (>50%)	Presente, mas não dominante em sistemas agrícolas locais ou ausente	Expansão em áreas desmatadas combinadas com conservação florestal	Monitoramento e fiscalização de agências governamentais garantindo o planejamento do uso da terra e conservação de recursos; assistência técnica; crédito acessível	Grande parte do estado de Rondônia
Zona de Diversificação	Baixa para média (20 a 50%) ou média para alta (>50%)	Baixa para média (20 a 50%)	Cultura (co)dominante e ou presente, mas não dominante nos sistemas agrícolas locais	Diversificação das propriedades rurais com lavouras ou variedades mais resistentes ao calor e à seca; uso de técnicas para promover impactos menores às lavouras causados por mudanças no nível do microclima.	Fornecedores consolidados com ampla variedade de produtos; Incentivos governamentais para a silvicultura; assistência técnica; crédito acessível	Municípios de Cumaru do Norte localizados no estado do Pará
Zona de Conversão	Média para alta (>50%) ou baixa para média (20 a 50%)	Muito baixa (<20%)	Cultura (co)dominante e ou Presente, mas não dominante nos sistemas agrícolas locais	Transição progressiva por meio da diversificação com safras resistentes e cadeias de abastecimento mais bem adaptadas às futuras condições climáticas	Fornecedores com produtos adaptados a culturas alternativas; assistência técnica; crédito acessível	Município de Rio Maria localizado no estado do Pará
Zona não recomendada	Média para alta (>50%) ou baixa para média (20 a 50%) ou Muito baixa (<20%)	Muito baixa (<20%)	Ausente	Não recomendado ao plantio de cacau	-	Município de Santa Cruz do Xingu localizado no estado do Mato Grosso

Fonte: Adaptado de Schroth (2017).

A categorização da prevalência atual do cultivo de cacau se baseou na análise dos dados do IBGE (2019), referente aos valores de produção do cacau em relação a outras culturas perenes presentes nos municípios. Diante disso, foi criado um ordenamento de acordo com o valor de produção do cacau em relação a cada cultura perene e com isso, os municípios caracterizados como (co-)dominante em sistemas agrícolas locais foram aqueles em que o cacau estava em primeiro ou segundo lugar no ranking dos valores de produção entre as culturas perenes. Já os municípios considerados como presente, mas não dominante foram os que obtiveram uma posição igual ou abaixo da terceira colocação. Os municípios ausentes foram os que não possuíam valor de produção, ou seja, não realizam o cultivo de cacau. A distribuição espacial da prevalência atual do cultivo de cacau pode ser observada na Figura 2.3. Reitera-se que a prevalência se baseou em um dado municipal. Portanto, a distribuição espacial da prevalência atual de cultivo de cacau foi caracterizada de acordo com o limite dos municípios do bioma amazônico e que as áreas de proteção ambiental (Unidades de Conservação e Terras Indígenas) foram retiradas na elaboração do resultado final (Zoneamento de adaptação às mudanças climáticas).

Figura 2.3 – Distribuição espacial da prevalência atual de cultivo de cacau



Fonte: Elaborado pelo autor.

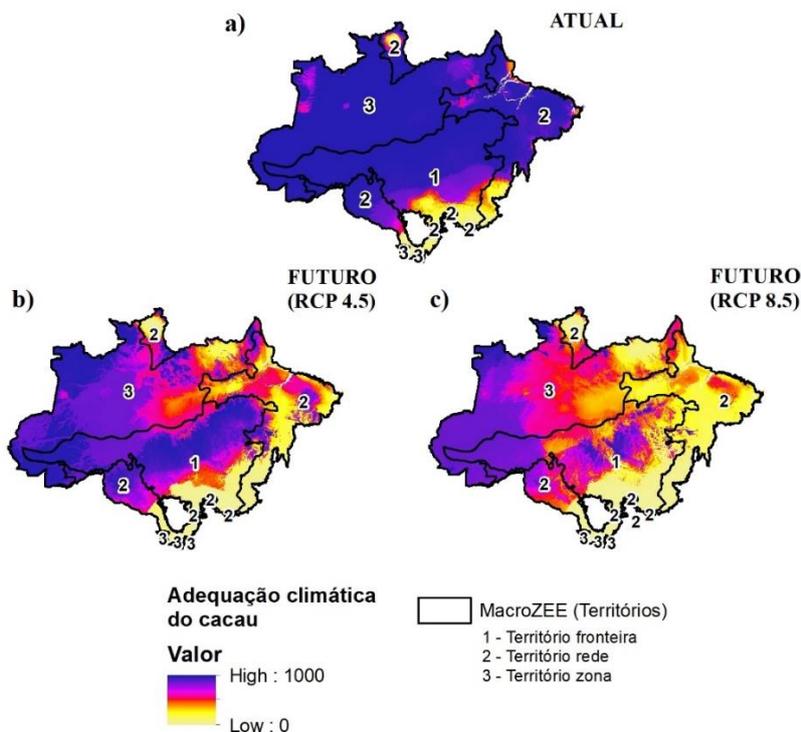
2.4 Resultados E Discussões

2.4.1 Modelagem de distribuição do cacau

Os modelos futuros obtiveram um excelente desempenho na validação, pois o TSS dos dez modelos gerados ficou entre 0,817 e 0,875. A área sob a curva ficou entre 0,908 e 0,986. Portanto, todos os dez modelos foram usados para desenvolver o modelo de consenso, pois obtiveram valores de TSS acima de 0,7. Quanto à importância das variáveis bioclimáticas para a distribuição atual do cacau seguiu a ordem: variação diurna média (°C), temperatura média do trimestre mais seco (°C/10), isothermalidade, precipitação do mês mais seco (mm/mês), temperatura média do mais chuvoso trimestre (mm/mês) e precipitação sazonal (coeficiente de variação).

O resultado gerado do modelo de distribuição do cacau atual e futuro para os cenários RCP 4.5 e 8.5, evidenciaram uma grande redução da adequação climática do cacau na região leste do bioma amazônico brasileiro tendo uma expansão das áreas com baixa adequação até a região central, principalmente, no cenário RCP 8.5 como evidenciado na Figura 2.4.

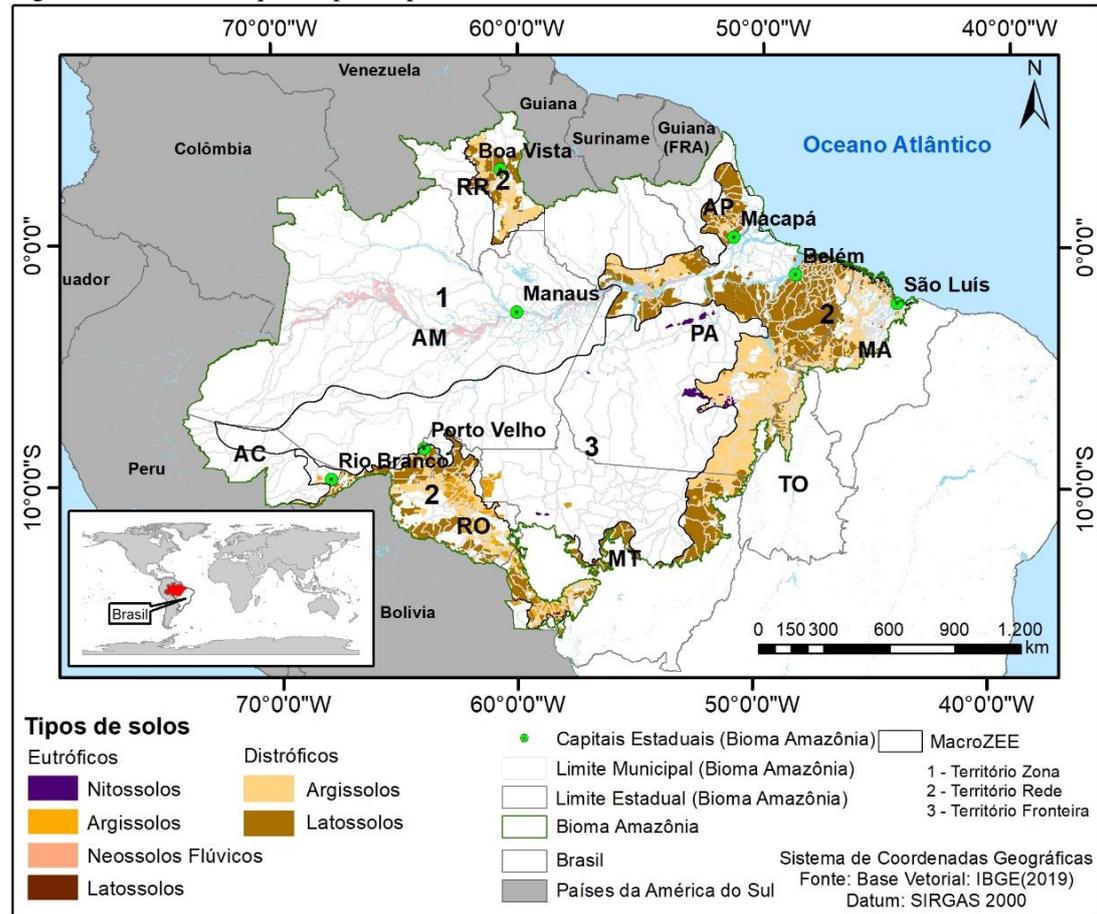
Figura 2.4 - Adequação climática do cacau cenários (a) atual, (b) futuro - RCP 4.5 e (c) futuro – RCP 8.5



Fonte: Elaborado pelo autor.

A classificação das áreas de solos adequados ao plantio de cacau mostrou que aproximadamente, 17% do bioma amazônico brasileiro possui condições favoráveis a realização do cultivo de cacau, conforme mostrado na Figura 2.5. Diante disso, o mapa de adequação climática foi recortado para as áreas de solos adequados ao plantio de cacau com a finalidade de identificar a adequação edafoclimática do *Theobroma cacao* L.

Figura 2.5 – Solos adequados para o plantio de cacau



Fonte: Elaborado pelo autor.

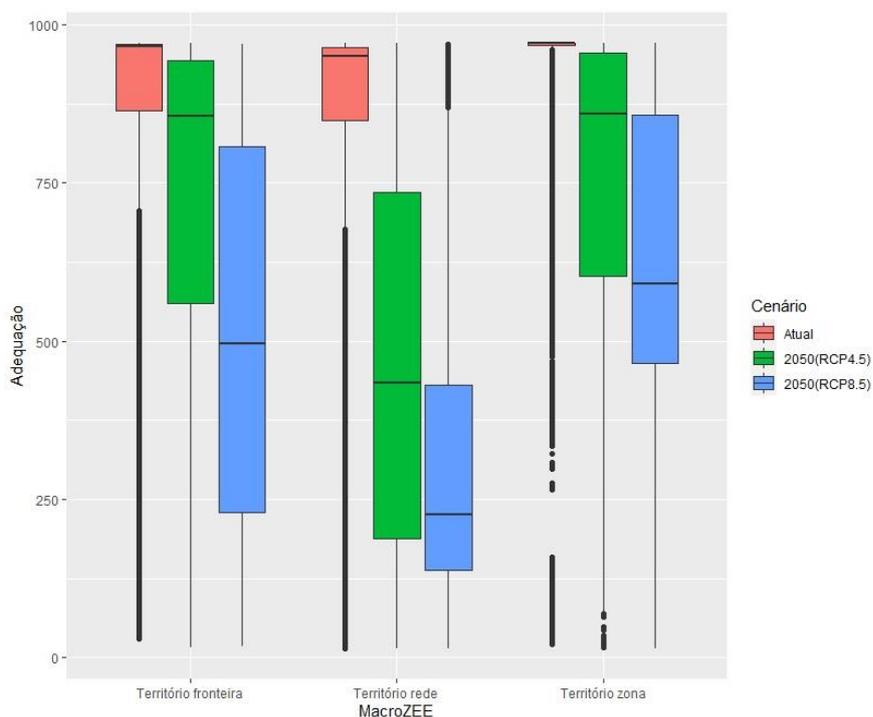
De acordo com o conjunto de dados bioclimáticos, foi possível identificar uma tendência de aumento da temperatura e diminuição da precipitação em áreas com solo adequado para o plantio de cacau. A variação diurna média aumentou no período avaliado em 0,25 e 0,31 ° C nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. A temperatura média do trimestre mais seco aumentou 2 e 2,67 ° C nos cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. A temperatura média do trimestre mais chuvoso aumentou 1,45 e 2,94 ° C nos cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. A precipitação do mês mais seco diminuiu 9 e 19,6 mm / mês nos cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. A precipitação sazonal aumentou de 4 e 7,7 coeficientes de variação nos cenários RCP 4.5 e 8.5.

A temperatura alta, nesse caso, representada nos cenários RCP 4.5 e 8.5, poderá prejudicar os rendimentos do cacau (NIETHER et al., 2018). De acordo com Läderach et al. (2013), a alta temperatura também pode causar indiretamente estresse a planta devido à maior demanda evapotranspirativa do ar.

A variável climática de precipitação no mês mais seco indicou uma diminuição da precipitação nos cenários futuros. Tal ambiente seco causará prejuízos ao desenvolvimento do cacau, visto que requer uma taxa de precipitação acima de 1400 mm / ano (LAHIVE; HADLEY; DAYMOND, 2018). Especificamente, quando o déficit de água no solo aumenta, a produção e o crescimento da árvore do cacau diminuem (ALVIM; KOZLOWSKI, 1977). Além disso, as plantas mais jovens são mais sensíveis ao déficit hídrico do que as plantas mais velhas. Assim, um período prolongado de seca promoverá um impacto significativo no crescimento do cacau (MOSER et al., 2010).

De acordo com a Figura 2.6, a partir da relação entre a adequação edafoclimática do cacau e os territórios do MacroZEE, pôde-se perceber que o território rede será o que mais sofrerá perdas em termos de adequação climática e que as perdas de adequação mais intensas ocorrem no cenário RCP 8.5.

Figura 2.6- Distribuição da adequação atual e futuro (RCP 4.5 e 8.5) do cacau nos territórios da MacroZEE



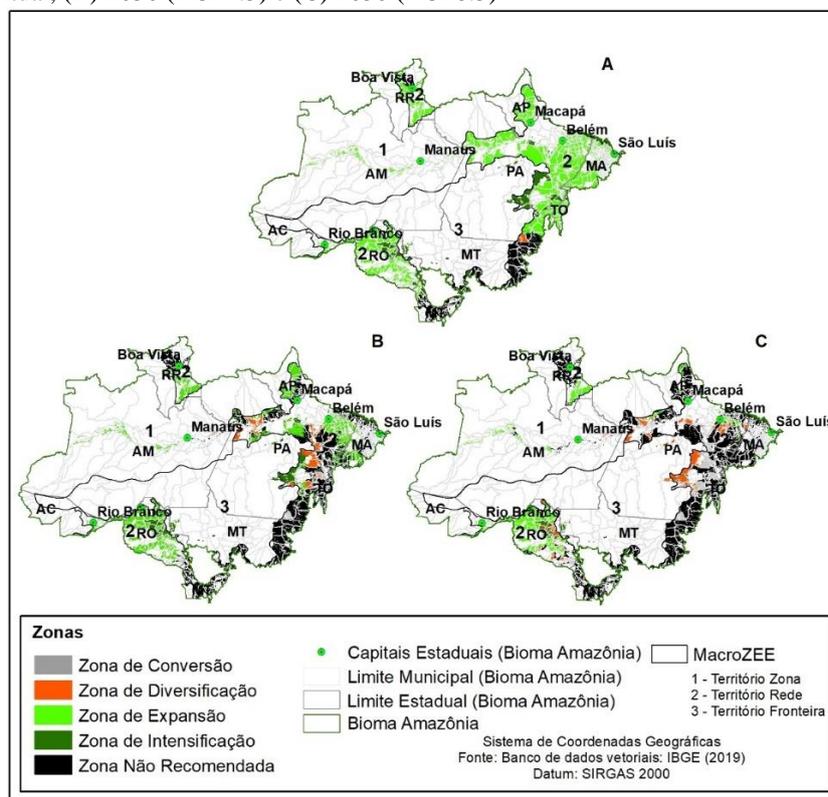
Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, os resultados gerados para os cenários dos RCPs 4.5 e 8.5 evidenciaram que o provável aumento da temperatura e redução da precipitação na região estudada promoverá a redução da adequação das áreas para a produção de cacau identificada neste estudo e que é semelhante a encontrada em outro estudo realizado na América Central (SOUSA et al., 2019).

2.4.2 Zoneamento de adaptação às mudanças climáticas

A partir da espacialização das zonas de adaptação às mudanças climáticas para o plantio do cacau no bioma amazônico brasileiro (Figura 2.7), foi possível observar que as maiores áreas não recomendadas para o plantio de cacau estão localizadas no sudeste do estado do Pará (PA) nos cenários RCP4.5 e RCP8.5. Além disso, observou-se uma grande área adequada para a expansão da plantação de cacau no estado de Rondônia (RO) em ambos os cenários futuros. A quantificação dessas zonas para adaptação às mudanças climáticas é mostrada na Tabela 2.2. É importante notar que as zonas de expansão no cenário RCP8.5 compreende uma área 20,22% menor do que no cenário RCP4.5. Diante disso, é nítida a importância de realizar medidas preventivas por tomadores de decisão no sentido de evitar que o cenário RCP8.5 se concretize.

Figura 2.7- Zoneamento de adaptação às mudanças climáticas para plantio de cacau no bioma amazônico brasileiro (A) Atual, (B) 2050 (RCP4.5) e (C) 2050 (RCP8.5)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2.2 – Quantificação das zonas de adaptação

Classes	Atual		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
Zona de conversão	1597.95	0.21	15505.92	2.08	56593.59	7.61
Zona de diversificação	4391.77	0.59	46419.80	6.24	64436.06	8.66
Zona de expansão	532394.94	71.55	279644.67	37.58	129174.18	17.36
Zona de intensificação	73834.26	9.92	53157.47	7.14	21657.23	2.91
Zona não recomendada	131843.07	17.72	349334.13	46.95	472200.93	63.46
Total	744061.99	100.00	744061.99	100.00	744061.99	100.00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A quantificação das zonas de adaptação (Tabela 2.2) permitiu identificar que as mudanças climáticas poderão promover uma redução de 36,75% e 61,2% das áreas adequadas para intensificação e expansão da plantação de cacau nos cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, em comparação com o cenário atual. Apesar disso, ainda haverá uma grande região disponível para expansão e intensificação em ambos os cenários, ou seja, 44,73% (RCP 4.5) e 20,27% (RCP 8.5) de todas as áreas com solo adequado para o plantio de cacau no bioma amazônico brasileiro. Vale ressaltar que em ambos os cenários, o estado de Rondônia (RO) possui uma grande área composta por zonas de expansão, o que pode indicar a realocação de áreas de produção de cacau para esse estado.

Além disso, observou-se que uma grande área necessita da implementação do processo de transição e diversificação com o plantio de outra cultura mais resistente à seca e ao calor. As zonas de diversificação e conversão têm 8,32% (RCP4.5) e 16,27% (RCP8.5) de todas as áreas com solo adequado para plantio de cacau. Além disso, foi possível identificar o aumento das zonas não recomendadas de 29,23% e 45,74% sob os cenários RCP4.5 e 8,5, respectivamente, em comparação com a zona não recomendada atual.

A falta de água promoverá um efeito negativo na fisiologia da folha (CARR; LOCKWOOD, 2011). Assim, além das medidas adotadas nas zonas de adaptação às mudanças climáticas, é necessário realizar outros procedimentos para reduzir o estresse

hídrico, pois o cacau é considerado sensível a falta de água (ALMEIDA; TEZARA; HERRERA, 2016). Uma das principais estratégias de adaptação às mudanças climáticas nessas áreas é a adoção de sistemas agroflorestais com plantio de culturas mais resistentes ao calor e à seca (Tabela 2.1). De acordo com Niether et al. (2018), os sistemas agroflorestais podem amortecer as condições climáticas extremas e reduzir o estresse no cacau. Por outro lado, algumas espécies que estão adaptadas para servirem de sombreamento em um sistema agroflorestal de cacau podem promover um risco para o funcionamento do sistema sob condições prolongadas de seca severa. Isso pode acontecer porque o conteúdo de água no solo em sistemas sombreados é menor do que em sistemas expostos à luz solar completa, sugerindo que a mortalidade do cacau em sistemas sombreados está ligada à forte competição pela água do solo (ABDULAI et al., 2018). Portanto, no caso da implantação de uma nova espécie em sistemas agroflorestais, é necessário um estudo específico para verificar se esta espécie pode ser prejudicial ao consórcio com o cacau ou também pode ser realizado uma análise de viabilização econômica para verificar se é possível realizar a implantação de um sistema de irrigação.

Outra alternativa para a mitigação dos impactos às mudanças climáticas nas plantações de cacau é o melhoramento genético de plantas. Este é um procedimento que permite selecionar um espécime mais adaptado às novas condições climáticas. No entanto, essa adaptação é desafiadora, pois requer uma abordagem coordenada e que necessita manter essa rede de pesquisa durante um longo período (FARRELL et al., 2018), levando em conta que o cacau é uma cultura perene e, portanto, é necessário mais tempo para criar uma nova variedade.

2.5 Conclusão

Portanto, é possível concluir que até 2050, é provável que haja perdas na adequação do plantio do cacau na Amazônia brasileira, devido a diminuição da precipitação e aumento da temperatura. Além disso, ficou evidente a maior perda de adequação climática do cacau no cenário RCP8.5 em relação ao RCP4.5, o que ilustra a importância de se adotar medidas preventivas pelos tomadores de decisão no sentido de evitar que o cenário RCP8.5 se concretize.

De acordo com os resultados da quantificação do zoneamento, foi possível observar que as áreas de expansão a plantação de cacau, constitui uma região

significativa em relação a área total disponível. Dessa forma, poderá ocorrer a necessidade de realocação da produção de cacau para essas áreas o que provavelmente ocorrerá de forma natural com o aumento dos preços da amêndoa de cacau causada pela redução da produção o que incentivará os produtores da região a iniciar o cultivo de cacau.

REFERÊNCIAS

ABDULAI, I. *et al.* Cocoa agroforestry is less resilient to sub-optimal and extreme climate than cocoa in full sun. **Global Change Biology**, v. 24, p. 273–286, 2018.

ALMEIDA, J. de; TEZARA, W.; HERRERA, A. Physiological responses to drought and experimental water deficit and waterlogging of four clones of cacao (*Theobroma cacao* L.) selected for cultivation in Venezuela. **Agricultural Water Management**, v. 171, p. 80–88, 2016.

ALVIM, P. de T.; KOZLOWSKI, T.T. **Ecophysiology of tropical crops**. Londres: Academy Press, 1977.

ANJOS, L. J. S. *et al.* Future projections for terrestrial biomes indicate widespread warming and moisture reduction in forests up to 2100 in South America. **Global Ecology and Conservation**, v. 25, p. e01441, 2021.

BALDOS, U. L. C.; FUGLIE, K. O.; HERTEL, T. W. The research cost of adapting agriculture to climate change: A global analysis to 2050. **Agricultural Economics (United Kingdom)**, v. 51, n. 2, p. 207–220, 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.187** de 29, de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC. Brasília, DF: Presidência da República, [2009]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm. Acesso em: 08 mar. 2021

BRASIL. **Decreto nº 7.378**, de 1º de dezembro de 2010. Aprova o Macrozoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal – MacroZEE da Amazônia Legal. Brasília, DF: Presidência da República, [2010]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7378.htm. Acesso em: 08 mar 2021.

BRASIL. **Lei nº 13.971**, de 27 de dezembro de 2019. Institui o Plano Plurianual da União para o período de 2020 a 2023. Brasília, DF: Presidência da República, [2019]. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/planejamento-e-orcamento/plano-plurianual-ppa/arquivos/Lein13.971de27dedezembrode2019.pdf>. Acesso em: 08 mar 2021.

BREIMAN, L.; FRIEDMAN J. H.; OLSHEN R. A.; STONE, C. J. **Classification and regression trees**. Wadsworth: [s.n], 1984.

CARR, M. K. V.; LOCKWOOD, G. The water relations and irrigation requirements of cocoa (*Theobroma cacao* L.): A review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 4, p. 653–676, 2011.

CLAPP, J.; NEWELL, P.; BRENT, Z. W. The global political economy of climate change, agriculture and food systems. **Journal of Peasant Studies**, v. 45, n. 1, p. 80–88, 2018.

CUADRA, S.V. *et al.* (ed.). **Ação contra a mudança global do clima** : contribuições da Embrapa. Brasília, DF : Embrapa, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/183492/1/ODS-13.pdf>. Acesso em: 05 mar 2021.

CUTLER, R. *et al.* Random Forests for Classification in Ecology. **Ecology**, v. 88, n. 11, p. 2783–2792, 2007.

DINIZ, J. V. A. *et al.* Fertility traits of recipient cows raised in the Amazon biome. **Livestock Science**, v. 240, 104147, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104147>.

ESSER, L. F.; SARAIVA, D. D.; JARENKOW, J. A. Future uncertainties for the distribution and conservation of *Paubrasilia Echinata* under climate change. **Acta Botanica Brasilica**, v. 33, n. 4, p. 770–776, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Climate is changing. Food and agriculture must too**. 2016. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5758e.pdf>. Acesso em: 21 maio 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. FAOSTAT. **Valor de exportação e quantidade produzida de cacau**. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>. Acesso em: 08 fev. 2020.

FARRELL, A. D. *et al.* Climate adaptation in a minor crop species: is the cocoa breeding network prepared for climate change? **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 42, n. 7, p. 812–833, 2018.

FREUND, Y.; SCHAPIRE, R. E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting BT - Computational learning theory. **Computational learning theory**, v. 904, n. Chapter 2, p. 23–37, 1995.

FRIEDMAN, J. H. Multivariate Adaptive Regression Splines. **The Annals of Statistics**, v. 19, n. 1, p. 1–141, 1991.

GALFORD, G. L.; SOARES-FILHO, B.; CERRI, C. E. P. Prospects for land-use sustainability on the agricultural frontier of the Brazilian Amazon. **Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.** v.368, n. 1619, 2013.

GLOBAL BIODIVERSITY INFORMATION FACILITY - GBIF. **Pontos de Ocorrência de *Theobroma cacao* L.** Disponível em: <https://doi.org/10.15468/dl.l5kuzh>. Acesso em: 17 out 2019.

GIORGETTA, M. A. *et al.* Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 5, n. 3, p. 572–597, 2013.

GUISAN, A. *et al.* **Habitat suitability and distribution models: with Applications in R**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

HASTIE, T.J.; TIBSHIRANI, R.J. **Generalized additive models**. London, New York, Tokyo, Melbourne and Madras: Chapman and Hall, 1990.

HASTIE, T.J.; TIBSHIRANI, R.; BUJA, A. Flexible discriminant analysis by optimal scoring. **Journal of the American Statistical Association**, v. 89, n. 428, p. 1255–1270, 1994.

HOSMER, D.W.; LEMESHOW, S. **Applied Logistic Regression**, John Wiley & Sons New Jersey, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE. **Banco de dados:** portal de mapas. 2017. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220925>. Acesso em: 28 ago. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE **Produção agrícola municipal**. 2019. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>> Acesso em: 08 fev. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE. Agência IBGE de notícias. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/25798-ibge-lanca-mapa-inedito-de-biomas-e-sistema-costeiro-marinho>. Acesso em: 1 dez. 2019.

KARGER, D. N. *et al.* Climatologies at high resolution for the earth’s land surface areas. **Scientific Data**, v. 4, p. 1–20, 2017.

KARGER, D.N. *et al.* **Climatologies at high resolution for the earth’s land surface areas**. Dryad Digital Repository, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/doi:10.5061/dryad.kd1d4>.

LÄDERACH, P. *et al.* Predicting the future climatic suitability for cocoa farming of the world’s leading producer countries, Ghana and Côte d’Ivoire. **Climatic Change**, v. 119, n. 3–4, p. 841–854, 2013.

LAHIVE, F.; HADLEY, P.; DAYMOND, A. J. The impact of elevated CO₂ and water deficit stress on growth and photosynthesis of juvenile cacao (*Theobroma cacao* L.). **Photosynthetica**, v. 56, n. 3, p. 911–920, 2018.

LINDSAY, K. *et al.* Preindustrial-control and twentieth-century carbon cycle experiments with the Earth System Model CESM1 (BGC). **Journal of Climate**, v. 27, n. 24, p. 8981–9005, 2014.

MARCO JÚNIOR, P. de; NÓBREGA, C. C. Evaluating collinearity effects on species distribution models: An approach based on virtual species simulation. **PLoS ONE**, v. 13, n. 9, 2018.

MENDES, F.A.T., REIS, S.M. Importância socioeconômica e ambiental. *In*: SILVA NETO, P.J.da *et al.* **Manual técnico do cacau para a Amazônia brasileira**. Belém, PA: CEPLAC/SUEPA; 2013. p. 12–19.

MMA. **MacroZEE da Amazônia Legal**. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial/macrozee-da-amaz%C3%B4nia-legal>. Acesso em: 7 mar. 2020.

MOSER, G. *et al.* Response of cocoa trees (*Theobroma cacao*) to a 13-month desiccation period in Sulawesi, Indonesia. **Agroforestry Systems**, v. 79, n. 2, p. 171–187, 2010.

NASCIMENTO, F. R. **A crise da lavoura cacauera: sua natureza e soluções** – uma análise das possibilidades do cacau. Brasília, DF: IPEA, 1994. (Estudos de Política Agrícola. Documentos de Trabalho, 26).

NIETHER, W. *et al.* Shade trees and tree pruning alter throughfall and microclimate in cocoa (*Theobroma cacao* L.) production systems. **Ann. For. Sci.** n. 75, 2018.

PERSECHINO, A., MIGNOT, J., SWINGEDOUW, D., LABETOULLE, S. ; GUILYARDI, É. Decadal predictability of the Atlantic meridional overturning circulation and climate in the IPSL-CM5A-LR model. **Climate Dynamics**, n. 40, p. 2359–2380, 2012.

PHILLIPS, S. B. *et al.* Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecological Modelling**, n. 190, p. 231–259, 2006.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Version 4.0.3 [software]**. 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 15 out. 2020.

RIPLEY, B. D. **Pattern recognition and neural networks**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

ROSEGRANT, M. W.; TOKGOZ, S.; BHANDARY, P. The new normal? A tighter global agricultural supply and demand relation and its implications for food security. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 95, n. 2, p. 303–309, 2013.

SANDERSON, B. M.; KNUTTI, R.; CALDWELL, P. A representative democracy to reduce interdependency in a multimodel ensemble. **Journal of Climate**, v. 28, n. 13, p. 5171–5194, 2015.

SCHNEIDER, R.R. *et al.* (ed.). **Sustainable amazon. Limitations and opportunities for rural development**. Washington, DC: The World Bank, 2002.

SCOCCIMARRO, E. *et al.* Effects of tropical cyclones on ocean heat transport in a high-resolution coupled general circulation model. **Journal of Climate**, n. 24, p. 4368–4384, 2011.

SCHROTH, G. *et al.* Commodity production as restoration driver in the Brazilian Amazon? Pasture re-agro-forestation with cocoa (*Theobroma cacao*) in southern Pará. **Sustainability Science**, v. 11, n. 2, p. 277–293, 2016.

SCHROTH, G. *et al.* From site-level to regional adaptation planning for tropical commodities: cocoa in West Africa. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 22, n. 6, p. 903–927, 2017.

SPECIESLINK. **Dados de ocorrência**. Disponível em: <http://www.splink.org.br/index?lang=pt>. Acesso em: 15 dez 2019.

SOUZA, E. B. de *et al.* Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia Legal brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo regcm4. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 293–306, 2016.

SOUSA, K. de *et al.* The future of coffee and cocoa agroforestry in a warmer Mesoamerica. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2019.

THORNTON, P. K. *et al.* Agriculture and food systems in sub-Saharan Africa in a 4°C+ world. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 369, n. 1934, p. 117–136, 2011.

THUILLER, W. *et al.* Uncertainty in ensembles of global biodiversity scenarios. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2019.

THUILLER, W. *et al.* **Package ‘biomod2’. Version 3.4.6** [software]. 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/biomod2/biomod2.pdf>. Acesso em: 15 out. 2020.

VAN VLIET, J.A.; GILLER, K.E. Chapter five – mineral nutrition of cocoa: a review. *In*: SPARKS, D.L. (ed). **Advances in agronomy**. New York: Academic Press, 2017. v. 141, cap. 5, p. 185–270.

WATANABE, M. *et al.* Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, n. 23, p. 6312–6335, 2010.

WINEMILLER, K.O. *et al.* Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. **Science**, v. 351, n.6269, 2016.

ZARRILLO, S. *et al.* The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon. **Nature Ecology and Evolution**, v. 2, n. 12, p. 1879–1888, 2018.

ZHANG, L. *et al.* Consensus forecasting of species distributions: the effects of niche model performance and niche properties. **PLoS ONE**, v. 10, n. 3, p. 1–18, 2015.

ZOMER, R. J. *et al.* Global tree cover and biomass carbon on agricultural land: the contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. **Scientific Reports**, v. 6, n. July, p. 1–12, 2016.

CAPÍTULO 3 INDICAÇÃO DAS FUTURAS REGIÕES PRODUTORAS DE CACAU EM DECORRÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DE USO DA TERRA

RESUMO

O desmatamento e o uso indiscriminado de práticas agrícolas têm contribuído de forma significativa para as emissões globais de carbono e conseqüentemente, para as mudanças climáticas. Nesse contexto, surgem várias medidas a serem adotadas com a finalidade de mitigar os impactos dessas mudanças no clima. Os sistemas agroflorestais (SAFs) com cacau surgem como uma alternativa para a substituição das áreas de pastagem na Amazônia, tendo em vista que poderão promover diversos benefícios do ponto de vista ambiental e econômico. Este trabalho possui como objetivo investigar quais serão as prováveis áreas potenciais para o cultivo de cacau baseado nas zonas de adaptação às mudanças climáticas nas possíveis áreas desflorestadas de 2050. O modelo de desflorestamento foi elaborado por meio do método regressão linear com efeitos espaciais. Já as áreas potenciais a produção de cacau foram criadas com base nas áreas desflorestadas geradas pelo modelo de desflorestamento e dos dados dos modelos de adaptação às mudanças climáticas. Os resultados dos modelos de desflorestamento indicaram que as áreas desflorestadas se concentrarão próximas as malhas viárias e evidentemente ao em torno das áreas já consolidadas. O modelo das áreas potenciais a produção de cacau indicou que as áreas com alto e/ou médio potencial a produção de cacau se concentrarão na região nordeste do estado do Pará e em grande parte do estado de Rondônia nos cenários futuros. Portanto, esses resultados poderão contribuir para os tomadores de decisão no planejamento do setor agrícola como o fornecimento de créditos para a implantação de sistemas agroflorestais com cacau em regiões de alto e médio potencial a produção de cacau no bioma amazônico brasileiro.

Palavras-chave: *Theobroma cacao* L.; Sistemas agroflorestais; Áreas consolidadas.

ABSTRACT

Deforestation and the indiscriminate use of agricultural practices have contributed significantly to global carbon emissions and, consequently, to climate change. In this context, there are several measures to be adopted in order to mitigate the impacts of these changes in the climate. Agroforestry systems (SAFs) with cocoa appear as an

alternative to replace pasture areas in the Amazon, in view of the fact that they may promote several benefits from an environmental and economic point of view. This work aims to investigate what are the likely potential areas for the cultivation of cocoa based on zones of adaptation to climate change in the possible deforested areas of 2050. The deforestation model was elaborated using the linear regression method with spatial effects. Potential areas for cocoa production, on the other hand, were created based on the deforested areas generated by the deforestation model and data from models of adaptation to climate change. The results of the deforestation models indicated that the deforested areas will be concentrated close to the road networks and evidently around the areas already consolidated. The model of potential areas for cocoa production indicated that areas with high and/or medium potential for cocoa production will be concentrated in the northeastern region of the state of Pará and in much of the state of Rondônia in future scenarios. Therefore, these results may contribute to decision makers in the planning of the agricultural sector, such as the provision of credits for the implantation of agroforestry systems with cocoa in regions of high and medium potential for cocoa production in the Brazilian Amazon biome.

Keywords: *Theobroma cacao* L.; Agroforestry systems; Consolidated areas.

3.1 Introdução

O desflorestamento observado em muitos países tem uma consequência direta na emissão de CO₂ para a atmosfera (HAMILTON; FRIESS, 2018; NADÈGE et al., 2017), cerca de um terço das emissões globais de carbono advém do desmatamento tropical e do uso indiscriminado de práticas agrícolas (CERRI et al., 2018). Portanto, esse desflorestamento tem contribuído de forma significativa para as mudanças climáticas, que permanece como umas das principais preocupações da comunidade internacional, assim como, é uma realidade que toda a humanidade deverá enfrentar (DAWOE et al., 2016).

A necessidade de reduzir os efeitos prejudiciais das mudanças climáticas tem criado uma busca por informações da evolução espaço-temporal da cobertura vegetal (NADÈGE et al., 2020). Nesse sentido, os sistemas agroflorestais surgem como uma alternativa para o uso sustentável da terra o qual possibilita de forma conjunta a

conservação dos recursos e a subsistência da população (WALDRON et al., 2017; TORQUEBIAU, 2007).

Nesse contexto, a região amazônica possui um importante papel na conservação da sua floresta, assim como, de realizar o uso sustentável das áreas já desflorestadas. Estudos apontam que a pastagem é o principal tipo de uso que se faz presente após o desflorestamento na região Amazônica (RIVERO et al., 2009; SOUZA et al., 2020). Diante disso, para essas áreas desmatadas se faz necessário o incentivo para a conversão das áreas de pastagem em lavouras que promovam maiores benefícios ambientais como o sistema agroflorestal (SAF). Este sistema de uso da terra é utilizado globalmente com a finalidade de atingir uma maior e mais diversa produção de biomassa além de outros benefícios ecológicos, assim como, serve como uma medida de mitigação as mudanças climáticas (MA et al., 2020).

O cacau que é uma planta nativa de sub-bosque da floresta amazônica (SCHROTH et al., 2004) e que é tipicamente cultivada em sistemas agroflorestais (SOMARRIBA et al., 2013), surge como uma alternativa para a substituição das áreas de pastagem na Amazônia. Tais sistemas poderão promover diversos benefícios em termos ambientais como o aumento da retenção de água e do solo quando comparado com áreas de pastagem aberta, que geralmente possuem solos inclinados (SCHROTH et al., 2016). Além disso, o cultivo de cacau em sistemas agroflorestais também poderá contribuir para o aumento do sequestro de carbono, pois o armazenamento poderá ser de 2,5 vezes mais carbono do que o cacau plantado no sistema de monocultivo, além de contribuir para a redução das temperaturas médias protegendo dos extremos de temperatura (NIETHER, 2020).

Diante do exposto, vê-se a necessidade de estudos com a finalidade de indicar possíveis áreas adequadas aos sistemas agroflorestais em cenários de mudanças climáticas e de uso da terra. Portanto, este trabalho possui como objetivo investigar quais serão as prováveis áreas potenciais para o cultivo de cacau baseado nas zonas de adaptação às mudanças climáticas nas possíveis áreas desflorestadas de 2050.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Modelagem futura do desflorestamento

O modelo futuro do desflorestamento foi elaborado a partir dos dados das terras indígenas, unidades de conservação, aptidão agrícola, rodovias e desflorestamento no ambiente do programa LuccME 3.1, que possibilita a modelagem de uso da terra espacialmente explícita e que foi desenvolvido pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE) (INPE, 2019a). Esses dados vetoriais foram obtidos no banco de dados da Fundação Nacional do Índio (FUNAI, 2020), Instituto Chico Mendes (ICMBio, 2019), Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2002), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019a) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2019b).

Inicialmente, as variáveis supracitadas foram inseridas no programa FillCell 2.2, ao qual as informações referentes a essas variáveis foram incorporadas em grids de tamanho 5x5km. Deste modo, esses dados gerados contidos no shapefile dos grids, foram utilizados como dados de entrada no programa GeoDa (ANSELIN; SYABRI; KHO, 2006), com a finalidade de gerar os parâmetros do modelo spatial lag, que consiste em um modelo de regressão com efeitos espaciais globais. Após esse procedimento foram gerados coeficientes constantes na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Coeficientes estimados por intermédio do método spatial lag para computar as adequações para a classe desflorestamento

Determinantes espaciais do desflorestamento	Descrição	Coeficientes	Significância
W_uso_1	Coeficiente espacial autorregressivo	9.38E-01	0.000
Constant	Constante da regressão	1.86E-02	0.000
rod	Distância euclidiana em relação as rodovias (Fonte: IBGE, 2019a)	-5.48E-08	0.000
apt_5	Porcentagem de área da célula coberta por solos de alta aptidão (Fonte: MMA, 2002)	3.19E-02	0.000
ucti_1	Porcentagem de área da célula coberta por unidades e conservação e terra indígenas (Fonte: ICMBio, 2019; FUNAI, 2020)	-1.37E-02	0.000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para criação de um modelo no ambiente do LuccME 3.1, é necessário basicamente realizar duas etapas: a primeira, consiste na demanda, que computa o número total de células que serão alocadas para cada classe identificada (FEITOSA; MARETTO; VIEIRA, 2017). Nesse caso, são as áreas desflorestadas, florestas e outros (hidrografia e cerrado). Já a segunda etapa, é a de alocação, que é responsável pela atribuição espacial da demanda identificada na primeira etapa. Diante disso, faz-se necessário estimar a adequabilidade de cada classe considerada (FEITOSA; MARETTO; VIEIRA, 2017) por meio dos parâmetros, nesse caso, gerados no modelo de regressão spatial lag, o qual leva em consideração a autocorrelação espacial como uma parte do componente explanatório do modelo (AGUIAR; CÂMARA; ESCADA, 2007).

A construção do modelo de desflorestamento no presente trabalho tem como escopo a elaboração de uma máscara de desflorestamento para o ano de 2050, pois segundo a FAO (2016), ocorrerá a redução da produção agrícola entre 10 a 25% em 2050. Assim como, vê-se que com o crescimento populacional de 7 para 9 bilhões de pessoas em 2050 haverá o aumento da demanda de alimentos e com isso a intensificação da necessidade de se realizar a construção de novas formas de produção, que atualmente são extremamente dependentes de insumos de origem fóssil, os quais contribuem para o aumento da emissão dos gases do efeito estufa (CUADRA et al., 2018).

O conceito de desmatamento utilizado na criação dessa máscara se baseou na definição presente na metodologia do Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélites (PRODES), ao qual a define como um procedimento único, que inicia com a floresta intacta e termina com a conversão da floresta original em outras coberturas (INPE, 2019c).

O ‘spatial lag’ foi o método escolhido para a confecção do modelo de desflorestamento, tendo em vista que considera os efeitos espaciais presente na área de estudo, o que é um elemento importante a ser incluído, pois um modelo de mudança de uso da terra que não leva em consideração a dependência espacial é provável que sofra com a especificação incorreta do modelo (CARRIÓN-FLORES; FLORES-LAGUNES; GUCI, 2018). Diante disso, a partir dos parâmetros gerados no modelo ‘spatial lag’ (Equação 1) foi realizada a classificação do grid de acordo com a classe predominante no espaço celular, ou seja, aquela classe que possuir maior dimensão dentro do grid é

que será escolhida para representá-lo, como evidenciado na Equação 2 (CARRIÓN-FLORES; FLORES-LAGUNES; GUCI, 2018):

$$Y_{ik}^* = \rho \sum_{j=1}^N w_{ij} Y_{jk}^* + X_i B_k + \varepsilon_{ik}, \forall k = \{1, \dots, L\} \quad (1)$$

$$d_{ik} = I(Y_{ik}^* > Y_{il}^*), \forall k \neq l; k, l = \{1, \dots, L\} \quad (2)$$

em que:

$Y_{ik}^*(Y_{il}^*)$ = variável dependente na unidade espacial i da alternativa k (l);

w_{ij} = matriz espacial que denota os pesos espaciais quanto às unidades espaciais $ie j$;

X_i = matriz de atributos observados da unidade i ;

ρ e β_k = parâmetros de interesse;

ε_{ik} = erro aleatório na representação da alternativa k quanto à unidade espacial i ;

$d_{ik} = 1$ se a alternativa k for escolhida para a unidade i e 0 caso contrário;

I = função indicadora da magnitude de Y_{ik}^* e Y_{il}^* .

Dessa forma, para gerar o modelo de desflorestamento no ambiente do programa LuccME 3.1 foi utilizado como dados de entrada o shapefile dos grids, o qual contém as informações iniciais de cada variável e os dados de desflorestamento observado referente ao ano de 2008. Além disso, utilizou-se como dados de validação e calibração as áreas desflorestadas observadas de 2012 e 2016. Por outro lado, a demanda foi preenchida com a taxa de desmatamento anual de 2004-2019 (INPE, 2019b). Diante disso, seguiu-se a caracterização de taxa de desflorestamento de acordo com os cenários A, B e C dos autores Aguiar et al. (2016). O Cenário A (sustentabilidade) ocorreria uma redução do desflorestamento para 3900 km² em 2020 e em seguida, continuaria a redução tendendo a 1000 km² em 2025 e se estabilizando até 2050. No Cenário B (mediano) ocorre uma tendência a redução para 3900km² em 2020 e que foi se estabilizando até 2050. Por fim, no Cenário C (fragmentação) tem-se a tendência de aumento para 15000 km² em 2020 e estabilizando até 2050.

As classes desflorestamento e floresta no parâmetro de alocação ‘*Clue Like*’ foram caracterizados como unidirecional, ou seja, ocorrerá alterações negativas ou positivas dessas classes e a classe outros como estático, que representa o caráter inalterado dessa classe ao longo do tempo, pois são as classes de cerrado e hidrografia, que são definidos como estáticos no projeto de monitoramento do desmatamento da floresta amazônica brasileira por satélites (PRODES).

Contudo, reitera-se que após gerar o modelo futuro de desflorestamento realizou-se a conversão dos dados contínuos em dados categorizados com a finalidade

de criar a delimitação das classes do modelo das áreas desflorestadas para o ano de 2050. Dessa forma, foi considerado como grid de desflorestamento aqueles com os valores de desflorestamento maiores do que as demais classes (floresta e outros) como evidenciado na Equação (2).

A avaliação do modelo ocorreu por meio do cálculo do índice Kappa (COHEN, 1960) e dos erros de omissão e comissão do modelo em relação aos dados do PRODES referente ao ano de 2012 e 2016. O resultado foi analisado de acordo com a caracterização definida por Landis e Koch (1977), como evidenciado na tabela abaixo:

Tabela 3.2 - Interpretação de acordo com os valores de Kappa

Valor de Kappa	Interpretação
Menor que zero	insignificante (poor)
Entre 0 e 0,2	fraca (slight)
Entre 0,21 e 0,4	razoável (fair)
Entre 0,41 e 0,6	moderada (moderate)
Entre 0,61 e 0,8	forte (substantial)
Entre 0,81 e 1	quase perfeita (almost perfect)

Fonte: Landis e Koch (1977)

3.2.2 Modelo futuro das potenciais áreas para a produção de cacau

A delimitação das áreas indicadas como prováveis regiões para a produção de cacau em 2050 foram limitadas pelas áreas desflorestada de 2050 pois, o objetivo desse trabalho é investigar as prováveis áreas disponíveis para o plantio de cacau em áreas com uso já consolidado. Dessa forma, recortou-se os modelos de adaptação às mudanças climáticas que foram elaboradas no capítulo 2, com os cenários de desflorestamento de 2050. Diante do resultado será possível indicar a potencialidade das regiões para a produção de cacau no ano de 2050.

Contudo, criou-se uma categorização de acordo com as zonas de adaptação às mudanças climáticas para a indicação das áreas potenciais de produção futura de cacau. As zonas de intensificação foram consideradas como de alto potencial para a produção de cacau, uma vez que essas áreas mantêm a alta adequabilidade edafoclimática nos cenários futuros, além disso, é uma região de produção de cacau já consolidada. As zonas de expansão foram consideradas como de médio potencial, pois essas áreas assim como as zonas de intensificação, possuem alta adequabilidade edafoclimática. Porém necessitarão de um incentivo aos agricultores dessas regiões para que iniciem o plantio

de cacau. Nesse contexto, a atuação das culturas perenes no aumento da renda e da sustentabilidade é incontestável, desde que exista uma estrutura de beneficiamento adequado, assim como, de um mercado consumidor (HOMMA et al., 2018). Dessa forma, a falta de infraestrutura pode desencorajar investimentos de longo prazo, tal como os sistemas agroflorestais (JACOBI; RIST; ALTIERI, 2017). Diante disso, vê-se que a implantação dessa infraestrutura poderá ser um entrave na consolidação do cultivo de cacau em outras regiões que não possuem uma cadeia produtiva já consolidada, pois necessitarão de grandes investimentos privados ou de incentivos governamentais para o desenvolvimento da cadeia produtiva.

Por fim, as demais zonas foram consideradas como de baixo potencial para a produção de cacau devido à baixa adequabilidade edafoclimática dessas zonas nos cenários futuros.

3.3 Resultados e Discussão

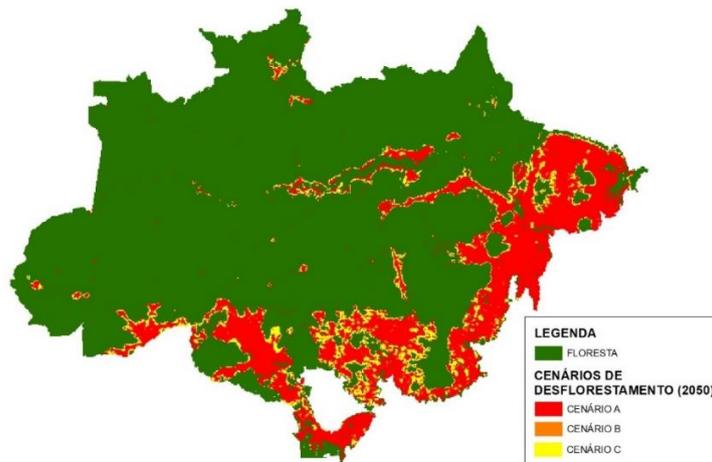
3.3.1 Modelo de desflorestamento

O modelo futuro de desflorestamento foi validado por intermédio da comparação entre os dados modelados e os dados observados (dados do PRODES referente ao ano de 2012 e 2016). Desse modo, realizou-se o cálculo do índice Kappa que resultou no valor 0,97 e 0,94 em 2012 e 2016, respectivamente. Portanto, de acordo com a classificação de Landis e Koch (1977), o modelo nos dois anos validados obtiveram uma concordância quase perfeita.

As áreas de desflorestamento do modelo (Ano – 2050) para os cenários A, B e C, foram quantificadas e os resultados apresentados foram: 788.870, 871.290 e 1.214.372 km², respectivamente. Além disso, foi possível observar a distribuição espacial da máscara de desflorestamento dos cenários A, B e C (Figura 3.1). Diante do exposto, fica evidente a semelhança da distribuição espacial dos cenários A e B com expansão das áreas próximas as rodovias. Enquanto que no Cenário C, foi apresentada uma distribuição espacial com maior intensificação dessas áreas desflorestadas ao redor das áreas de desmatamento já consolidada. Apesar de existir uma diferença em termos de área desmatada com outros trabalhos (AGUIAR et al., 2016; SOARES-FILHO et al., 2005), por conta da diferença metodológica e da taxa de desmatamento implementada para os cenários futuros. Esses trabalhos entram em consonância com este estudo ao

analisar a distribuição espacial das áreas desmatadas. Pois, se encontram ao redor das áreas consolidadas e próximas as regiões de mais fácil acesso como próximos as rodovias como evidenciado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Distribuição espacial das áreas desflorestada em 2050



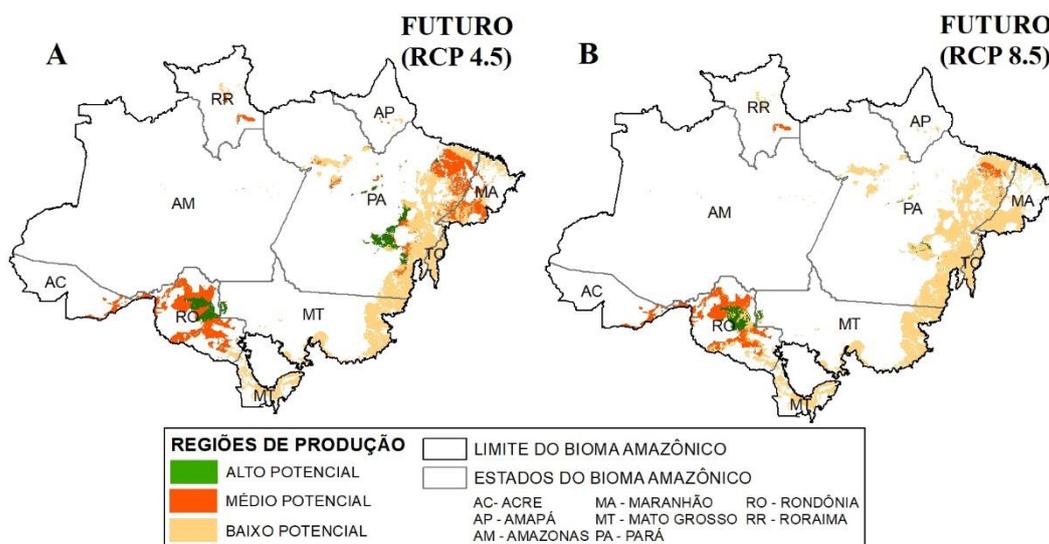
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Modelo da potencialidade futura à produção de cacau

Diante do modelo gerado foi possível observar que o estado de Rondônia e Pará serão os mais indicados de se realizar a produção de cacau. O modelo gerado no cenário RCP 4.5 evidenciou um alto potencial indicativo para a produção de cacau na região sudoeste e sudeste do estado do Pará (PA) (Figura 3.2). Este resultado mantém o atual cenário de produção, pois essa é a região da rodovia transamazônica e São Félix do Xingu, os quais são os locais que atualmente, mais produzem amêndoas de cacau no estado do Pará. Da mesma forma este padrão se repete nas regiões produtoras do estado de Rondônia de acordo com os dados do IBGE (2019b).

No cenário RCP 8.5, o potencial de ocorrência da região produtora de cacau reduziu bastante em relação ao RCP 4.5 (Figura 3.2) com grandes perdas no potencial de ocorrência no estado do Pará o que poderá resultar em uma significativa redução da produção a nível nacional, já que o estado do Pará representa cerca de 50% da produção nacional (IBGE, 2019b). Além disso, vê-se a permanência de uma extensa área de médio potencial no estado de Rondônia, o que poderá evidenciar uma alternativa de zona indicada para a produção de cacau em ambos os cenários.

Figura 3.2 – Distribuição espacial das áreas potenciais de ocorrência das regiões produtoras de cacau em A) 2050 (RCP4.5) e B) 2050 (RCP8.5)



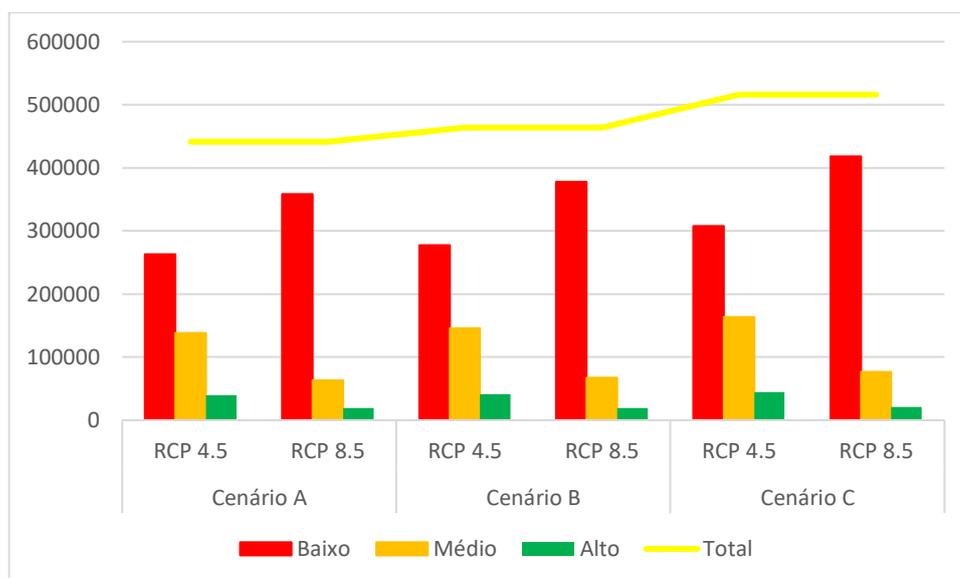
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas áreas potenciais à produção de cacau expressas na Figura 3.2, poderão ser utilizadas como ferramenta de planejamento por tomadores de decisão, pois permitem identificar as possíveis distintas potencialidades das regiões a produção de cacau em 2050 relativos aos cenários RCP4.5 e 8.5. Estes resultados poderão servir para direcionar e incentivar a implantação de sistemas agroflorestais com cacau, principalmente nas áreas de alto potencial pois os SAFs contribuem com a conservação da biodiversidade, assim como, o sequestro de carbono (TSCHARNTKE et al., 2011; SAJ et al., 2017) . Além disso, a complementariedade das espécies no uso de recursos podem promover a melhoria na eficiência do uso desses recursos e proporcionará melhores desempenhos do sistema (NIETHER et al., 2019).

A quantificação das áreas potenciais a produção de cacau evidenciou uma grande perda de áreas com alto potencial no cenário RCP 8.5 em comparação ao cenário RCP 4.5, como observado na Figura 3.3. De modo geral, a proporção entre os diferentes cenários de desflorestamento é bastante semelhante. É possível observar uma grande redução das áreas de médio e alto potencial a produção de cacau ao longo de toda a área de estudo. Dessa forma, fica nítida a influência das mudanças climáticas na redução das possíveis regiões adequadas a produção de cacau, e isso está consonante com os

resultados obtidos por Gateau-Rey et al. (2018), o qual confirmam que os sistemas agroflorestais brasileiros de cacau estão em risco.

Figura 3.3 – Áreas potenciais a produção de cacau em 2050 (km²) nos cenários RCP4.5 e 8.5



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Conclusão

Portanto, pôde-se concluir que de acordo com os resultados ocorrerá uma expansão das áreas desflorestadas com distribuição ao redor das áreas já consolidadas. Além disso, foi possível observar que a distribuição das áreas com potencial médio a produção de cacau estará concentrada nas regiões do nordeste do estado do Pará e em grande parte do estado de Rondônia nos cenários RCP 4.5 e 8.5. Também ficou evidente a redução das áreas com alto potencial de ocorrência das futuras regiões produtoras no cenário RCP 8.5 em relação ao cenário RCP4.5, o que indica ainda mais a importância da adoção de medidas que evitem a ocorrência desse cenário com maiores concentrações de gases do efeito estufa.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. P. D. *et al.* Land use change emission scenarios: anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 22, n. 5, p. 1821–1840, 2016.
- AGUIAR, A. P. D.; CÂMARA, G.; ESCADA, M. I. S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: exploring intra-regional heterogeneity. **Ecological Modelling**, v. 209, n. 2–4, p. 169–188, 2007.
- ANSELIN, L.; SYABRI, I.; KHO, Y. GeoDa: an introduction to spatial data analysis. **Geographical Analysis**, v. 38, n. 1, p. 5–22, 2006.
- CARRIÓN-FLORES, C. E.; FLORES-LAGUNES, A.; GUCI, L. An estimator for discrete-choice models with spatial lag dependence using large samples, with an application to land-use conversions. **Regional Science and Urban Economics**, v. 69, p. 77–93, 2018.
- CERRI, C. E. P. *et al.* Reducing Amazon deforestation through agricultural intensification in the cerrado for advancing food security and mitigating climate change. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 989, p. 1–18, 2018.
- COHEN, J. A Coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.
- CUADRA, S.V. *et al.* (ed.). **Ação contra a mudança global do clima: contribuições da Embrapa**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/183492/1/ODS-13.pdf>. Acesso em: 05 mar 2021.
- DAWOE, E. *et al.* Shade tree diversity and aboveground carbon stocks in theobroma cacao agroforestry systems: implications for REDD+ implementation in a West African cacao landscape. **Carbon Balance and Management**, v. 11, n. 17, p. 1–13, 2016.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. Climate is changing. Food and agriculture must too. 2016. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5758e.pdf>. Acesso em: 21 maio 2020.
- FEITOSA, F.; MARETTO, R. V.; VIEIRA, A. M. Struggle for space in coastal cities : a cellular automata model for simulating urban stratification dynamics. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 69/8, p. 1610–1627, 2017.
- FUNAI. Shape. Disponível em: <http://www.funai.gov.br/index.php/shape>. Acesso em: 01 de set. 2020.
- GATEAU-REY, L. *et al.* Climate change could threaten cocoa production: Effects of 2015-16 El Niño-related drought on cocoa agroforests in Bahia, Brazil. **PLoS ONE**, v. 13, n. 7, p. 1–17, 2018.

HAMILTON, S. E.; FRIESS, D. A. Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. **Nature Climate Change**, v. 8, p. 240–244, 2018.

HOMMA, A.K.O. *et al.* Pequenos produtores de Tomé-Açu e Viseu, Pará: da "agricultura de toco" a SAFs, uma mudança possível? *In*: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 56., 2018, Campinas. Brasília. **Anais** [...]. Brasília, DF: SOBER, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA - IBGE. **Portal de mapas do IBGE** – bases cartográficas contínuas. 2019a. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>. Acesso em: 01 set. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE. **Produção agrícola municipal**. 2019b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>. Acesso em: 08 fev. 2021.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE-ICMBio. **Mapa temático e dados geoestatísticos das unidades de conservação federais**. 2019. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/portal/geoprocessamentos/51-menu-servicos/4004-downloads-mapa-tematico-e-dados-geoestatisticos-das-uc-s>. Acesso em: 01 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS -INPE. **LuccME**. 2019a. Disponível em: luccme.ccst.inpe.br. Acesso em: 01 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Monitoramento do desmatamento da floresta Amazônica brasileira por satélites** – banco de dados – desflorestamento (Ano: 2008 a 2019). 2019b. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 01 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Metodologia utilizada nos projetos PRODES e DETER**. 2019c. Disponível em: http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes/pdfs/Metodologia_Prodes_Deter_revisada.pdf. Acesso em: 01 set. 2020.

JACOBI, J.; RIST, S.; ALTIERI, M. A. Incentives and disincentives for diversified agroforestry systems from different actors' perspectives in Bolivia. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 15, n. 4, p. 365–379, 2017.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–174, 1977.

MAEDA, E.E. *et al.* Large-scale commodity agriculture exacerbates the climatic impacts of Amazonian deforestation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.118, n.7, 2021.

MA, Z. *et al.* Carbon accumulation in agroforestry systems is affected by tree species diversity, age and regional climate: a global meta-analysis. **Global Ecology and Biogeography**, v. 29, n. 10, p. 1817–1828, 2020.

NADEGE, M. T. *et al.* Biodiversity and carbon stock in the SODECAO agroforestry system of center region of Cameroon: case of talba locality. **American Journal of Agriculture and Forestry**, v. 5, n. 4, p. 121–129, 2017.

NADEGE, M. T. *et al.* Ecological and economic potentials of cocoa agroforestry systems in the center region of Cameroon. **American Journal of Agriculture and Forestry**, v. 8, n. 5, p. 214–222, 2020.

MINISTÉRIO MEIO AMBIENTE- MMA. **Potencial agrícola do Brasil**. 2002. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Acesso em: 01 set. 2020.

NIETHER, W. *et al.* Below- and aboveground production in cocoa monocultures and agroforestry systems. **Science of the Total Environment**, v. 657, p. 558–567, 2019.

NIETHER, W. *et al.* Cocoa agroforestry systems versus monocultures: a multi-dimensional meta-analysis. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, 2020.

RIVERO, S. *et al.* Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, v. 19, n. 1, p. 41–66, 2009.

SAJ, S. *et al.* Contribution of associated trees to long-term species conservation, carbon storage and sustainability: a functional analysis of tree communities in cacao plantations of Central Cameroon. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 282–302, 2017.

SCHROTH, G. *et al.* Commodity production as restoration driver in the Brazilian Amazon? Pasture re-agro-forestation with cocoa (*Theobroma cacao*) in southern Pará. **Sustainability Science**, v. 11, n. 2, p. 277–293, 2016.

SCHROTH, G. *et al.* **Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes**. Washington, DC: Island Press, 2004.

SOARES-FILHO, B. S. *et al.* Cenários de desmatamento para a Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, p. 137–152, 2005.

SOMARRIBA, E. *et al.* Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 173, p. 46–57, 2013.

SOUZA, M. B. de. *et al.* Dinâmica de uso e cobertura da terra no município de São Félix do Xingu, Estado do Pará, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. 1–13, 2020.

TORQUEBLAU, E. **L'Agroforesterie. Des arbres et des champs**. Paris, France: L'Harmattan, 2007.

TSCHARNTKE, T. *et al.* Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - a review. **Journal of Applied Ecology**, v. 48, n. 3, p. 619–629, 2011.

FRANKLIN, J. **Mapping species distributions: spatial inference and prediction**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

WALDRON, A. *et al.* Agroforestry can enhance food security while meeting other sustainable development goals. **Tropical Conservation Science**, v. 10, p. 1–6, 2017.

CAPÍTULO 4 PREVENDO IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS FUTUROS CAUSADOS POR MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE CACAU NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

RESUMO

Evidências sugerem que os impactos das mudanças climáticas globais somente intensificarão o declínio das populações de polinizadores, ameaçando a resiliência do ecossistema e a segurança alimentar em várias escalas. Nesse contexto, o cacau que possui em sua maioria clones cultivados com autoincompatibilidade genética poderá reduzir a sua produção em cerca de 90%. O objetivo deste trabalho foi mostrar os possíveis impactos socioeconômicos causados pelas mudanças climáticas, com o auxílio da modelagem de distribuição do cacau e de seu principal agente polinizador, os insetos do gênero *Forcipomyia*. A modelagem de distribuição de espécies foi realizada com o uso do programa RStudio por meio da biblioteca biomod2, onde foi utilizado um método de ‘ensemble’ para a criação do modelo consensual. Já os impactos socioeconômicos foram mensurados a nível municipal com base nas áreas de presença ou ausência do *Theobroma cacao* L. e do gênero *Forcipomyia*. A partir disso, foi possível prever uma perda de 92,92 e 95,28% da produção de cacau nos cenários RCP4.5 e 8.5, respectivamente. Dessa forma, considerando o valor de produção atual a perda anual poderá ser de 1,16 e 1,19 bilhão de reais nos cenários RCP4.5 e 8.5, respectivamente. Isso afetará diretamente cerca de 20.550 famílias que vivem da produção dessa cultura na Amazônia brasileira. Portanto, diante do exposto esses resultados poderão evidenciar um indicativo de potenciais prejuízos futuros a produção de cacau que afetaria milhares de famílias que vivem no bioma amazônico brasileiro. Além disso, poderá servir como modelo indicativo para os tomadores de decisão dos possíveis danos socioeconômicos que as mudanças climáticas poderão causar e com isso possar ser utilizado como ferramenta de planejamento territorial.

Palavras-chave: Polinizadores; *Forcipomyia*; agricultura.

ABSTRACT

Evidence suggests that the impacts of global climate change will only intensify the decrease in pollinator populations, threatening ecosystem resilience and food security at various scales. In this context, cocoa, which has mostly clones grown with genetic self-

incompatibility, may reduce its production by about 90%. The aim of this work was to show the possible socioeconomic impacts caused by climate change, with the help of modeling the distribution of cocoa and its main pollinating agent, the insects of the genus *Forcipomyia*. Species distribution modeling was performed using the RStudio program through the *biomod2* library, where an 'ensemble' method was used to create the consensual model. The socioeconomic impacts were measured at the municipal level based on the areas of presence or absence of *Theobroma cacao* L. and the genus *Forcipomyia*. From this, it was possible to predict a loss of 92.92 and 95.28% of cocoa production in the scenarios RCP4.5 and 8.5, respectively. Thus, considering the current production value, the annual loss may be 1.16 and 1.19 billion reais in the scenarios RCP4.5 and 8.5, respectively. This will directly affect about 20,550 families that live from the production of this culture in the Brazilian Amazon. Therefore, given the above, these results may show an indication of potential future damage to cocoa production that would affect thousands of families living in the Brazilian Amazon biome. In addition, it can serve as an indicative model for decision makers of the possible socioeconomic damage that climate change may cause and thus be able to be used as a territorial planning tool.

Keywords: Pollinators; *Forcipomyia*; agriculture.

4.1 Introdução

Um dos principais desafios da agricultura relacionadas às mudanças climáticas é a redução de polinizadores, que são importantes para manter a produção na maioria das culturas agrícolas (COSTANZA et al., 2014). As evidências sugerem que os impactos da mudança climática global apenas amplificarão o declínio nas populações de polinizadores, ameaçando a resiliência do ecossistema e a segurança alimentar em escalas local e global (MARSHMAN et al., 2019).

O cacau possui em sua maioria clones cultivados com autoincompatibilidade genética (ROYAERT et al., 2011). Dessa forma, todas essas variedades são estritamente dependentes da polinização por insetos, principalmente, devido à dificuldade de disseminação causado pelas barreiras físicas intrínsecas a planta que dificultam a polinização sem interferência de algum agente polinizador. Nesse sentido, em situações em que se tem a ausência de polinizadores a produção de cacau poderá reduzir cerca de

90% (KLEIN et al., 2008).

As espécies do gênero *Forcipomyia* (Família: Ceratopogonidae), que são os polinizadores primários dessa cultura (FREE, 1993; YOUNG, 1994; BOSU et al., 2018), dependem de habitats úmidos, sendo que as longas estações secas podem dizimar as populações de polinizadores (YOUNG, 1982; RUF, 1995). Além disso, os sistemas agroflorestais são habitats altamente atrativos para o desenvolvimento de ceratopogonídeos, pois se assemelham a seus habitats naturais (GLENDINNING, 1972; TSCHARNTKE et al., 2011).

Diante disso, fica evidente a importância da realização de estudos com a finalidade de investigar o comportamento da distribuição do gênero *Forcipomyia* com o intuito de estimar a produção de cacau em 2050 por meio da incorporação de influências dos polinizadores no modelo de produção do cacau no futuro. Portanto, este capítulo objetivou mostrar os possíveis impactos socioeconômicos causados pelas mudanças climáticas, com o auxílio da modelagem de distribuição do cacau (Capítulo 2) e do principal polinizador que são os insetos do gênero *Forcipomyia*.

4.2 Materiais e Métodos

4.2.1 Modelagem de distribuição do gênero *Forcipomyia*

A modelagem de distribuição do gênero *Forcipomyia* foi realizada por meio do programa RStudio versão 1.1463 (R Core Team, 2020), realizou-se os procedimentos de criação do modelo por meio da biblioteca biomod2, com intuito de indicar as áreas mais adequadas a ocorrência das espécies do gênero *Forcipomyia* (THUILLER et al., 2020).

Para gerar o modelo de distribuição de espécie futura foram considerados os RCPs 4.5 e 8.5, para cinco modelos futuros (2041–2060) de circulação geral: CESM1-BGC, que foi gerado pelo Centro Nacional para Pesquisa Atmosférica (LINDSAY et al., 2014); CMCC-CMS, o qual foi criado pelo *Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici* (SCOCCIMARRO et al., 2011); CM5A-LR, que foi elaborado pelo *Institut Pierre-Simon Laplace* (PERSECHINO et al., 2012); MIROC5, o qual foi gerado pela Universidade de Tóquio (WATANABE et al., 2010) e ESM-MR, que foi criada no Instituto Max Planck para Meteorologia (GIORGETTA et al., 2013). Foram selecionados 5 Modelos de Circulação Geral, pois o erro associado a média de vários

modelos da climatologia atual é menor ao utilizar de 5 a 12 modelos com menor interdependência (SANDERSON; KNUTTI; CALDWELL, 2015).

Os dados referentes as variáveis bioclimáticas foram obtidas do banco de dados do *Climatologies at high resolution for the Earth's land surface areas* (<https://chelsa-climate.org/>) (KARGER, 2018). Por conseguinte, realizou-se a eliminação dentre as 19 variáveis bioclimáticas obtidas de cada modelo de circulação geral, aquelas que apresentaram correlação maior que 0,7 com o intuito de reduzir a colinearidade, que promove a redução da eficiência e aumento da incerteza do modelo de distribuição de espécies (MARCO JÚNIOR; NÓBREGA, 2018).

Dessa forma, a partir da seleção baseada na correlação, apenas seis variáveis bioclimáticas obtiveram correlação abaixo de 0,7, que foram: a variação diurna média (°C); a isothermalidade; a temperatura média do trimestre mais quente (°C/10); a temperatura média do trimestre mais seco (°C/10); precipitação do mês mais seco (mm/mês) e a sazonalidade da precipitação (coeficiente de variação). Diante do exposto, realizou-se o “ensemble” dos modelos de cada variável bioclimática selecionada com intuito de serem utilizadas na elaboração do modelo atual e futuro de adequação da ocorrência do gênero *Forcipomyia*, esse procedimento é realizado com a finalidade de reduzir as incertezas em relação a utilização de somente um modelo de circulação geral (THUILLER et al., 2019).

A elaboração dos modelos de distribuição de espécies ocorreu com a utilização das variáveis bioclimáticas, dos dados georreferenciados de ocorrência das espécies do gênero *Forcipomyia* (163 pontos), que foram obtidos no banco de dados do GBIF (2021) e SpeciesLink (2021). Assim como, de 300 pontos de pseudo-ausência que foram gerados por meio da utilização da estratégia *Surface Range Envelope* (SRE), que realiza a criação de pontos de pseudo-ausência em locais fora da variação climática dos pontos de ocorrência, com a finalidade de melhorar a acurácia das amostras (ZHANG et al., 2015).

Para cada cenário (RCP 4.5 e 8.5) a distribuição foi analisada usando dez algoritmos de Modelagem de Distribuição de Espécies independentes: *Classification and Regression Trees* (CTA) (BREIMAN et al., 1984), *Generalized Boosted Regression Models* (GBM) (FREUND; SCHAPIRE, 1995), *Random Forest* (RF) (CUTLER et al., 2007), *Generalized Linear Models* (GLM) (HOSMER; LEMESHOW, 2000), *Generalized Additive Models* (GAM) (HASTIE; TIBSHIRANI, 1990), *Multivariate Adaptive Regression Splines* (MARS) (FRIEDMAN, 1991), *Flexible Discriminant*

Analysis (FDA) (HASTIE; TIBSHIRANI; BUJA, 1994), *Surface Range Envelope* (SRE), MaxENT (PHILLIPS et al., 2006) e *Artificial Neural Network* (ANN) (RIPLEY, 1996).

A validação dos modelos se deu com o uso de 25% das amostras e as métricas de avaliação dos modelos escolhidos foram o *True Skills Statistics* (TSS) e o *Area Under the Curve* (AUC). A partir dos resultados da validação foram selecionados aqueles modelos com valores de TSS acima de 0,7, com a finalidade de reduzir os erros de cada modelo (ESSER; SARAIVA; JARENKOW, 2019) e com isso promover a geração de um modelo consensual por meio do método ensemble para o cenário atual e futuro.

Os modelos consensuais foram convertidos no mapa de presença-ausência com o limiar definido a partir do método, que é recomendado, de abordagem média de probabilidade/adequabilidade (LIU et al., 2005).

4.2.2 Impactos socioeconômicos

A partir da construção do modelo de distribuição de espécies do gênero *Forcipomyia* e do *Theobroma cacao* L. (Capítulo 2), estes dados foram recortados nos municípios produtores dentro das regiões com solo adequado ao plantio de cacau e nas áreas desflorestada de 2050 (Capítulo 3), dessa forma, os municípios analisados foram somente dessas áreas. Portanto, utilizou-se desses dois modelos de distribuição de espécies para estimar os valores de produção de cacau da região Amazônica brasileira em 2050. Essa estimativa é de suma importância, pois, projeções indicam que em 2050 ocorrerá uma redução na produção agrícola mundial entre 10 a 25% (FAO, 2016). Além disso, com o crescimento populacional de 7 para 9 bilhões de pessoas em 2050 haverá o aumento da demanda de alimentos e com isso a intensificação da necessidade de se realizar a construção de novas formas de produção que sejam mais sustentáveis (CUADRA et al., 2018).

Os impactos socioeconômicos foram mensurados a nível municipal de acordo com as áreas de presença ou ausência do *Theobroma cacao* L. e do gênero *Forcipomyia* nas áreas que atualmente já realizam a produção de cacau. Estabeleceu-se então que a redução na produção dependerá se a área de presença de cacau e dos polinizadores (gênero *Forcipomyia*) for menor que a área colhida dos dados do IBGE (2019) para um determinado município. Caso essa área seja menor, essa redução na produção será

proporcional a razão entre a área de presença de cacau ou dos polinizadores com área colhida de acordo com os dados atuais do IBGE (2019) multiplicado pelos pesos, como evidenciado na Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Relação entre as áreas de presença de cacau e dos polinizadores com os dados do IBGE (2019) referente as áreas colhidas

	Cacau	Polinizadores	Peso	Resultado
Dados da área colhida (IBGE, 2019)	maior	maior	-	Não haverá perda na produção de cacau
	maior	menor	0,9	Haverá perda proporcional a razão entre área de presença do gênero <i>Forcipomyia</i> e a área colhida multiplicado pelo peso
	menor	maior	1	Haverá perda proporcional a razão entre área cacau e a área colhida multiplicado pelo peso
	menor	menor	0,9 e 1	Haverá perda proporcional a razão entre área <i>Forcipomyia</i> e a área colhida somado a perda entre a razão entre área cacau e a área colhida multiplicado pelos respectivos pesos

Fonte: Elaborado pelo autor.

A definição dos pesos foi realizada com base no critério de que a redução da produção de cacau será de 90%, caso não se tenha a ocorrência de polinizadores como definido por Klein et al. (2008). Portanto, assumiu-se o peso de 0,9 que consistiria no pior cenário em relação a diminuição da produção em casos de ausência completa de polinizadores. Já quando não houver a ocorrência de cacau a redução da produção será de 100% e com isso foi atribuído o peso 1. Vale ressaltar que essa redução da produção por influência da ausência de polinizadores ocorrerá nas áreas que no cenário atual já havia a ocorrência do gênero *Forcipomyia*.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Modelo de distribuição do gênero *Forcipomyia*

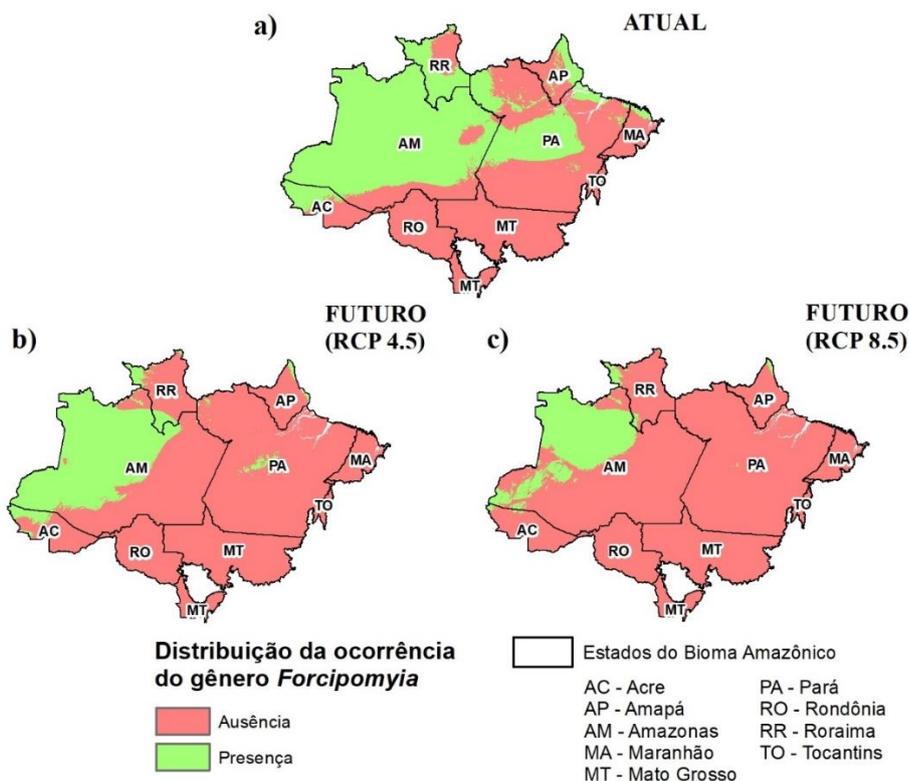
A investigação da distribuição do gênero *Forcipomyia* é fundamental para a análise da produção de cacau, tendo em vista que é considerada como o principal agente polinizador do *Theobroma cacao* L (BOSU et al., 2018). Dessa forma, os resultados da validação dos dez métodos de modelagem empregados para o *True Skills Statistics* ficaram entre 0,59 e 0,95. Portanto, foram selecionados 7 modelos para a geração do

modelo de consenso, ou seja, os três excluídos foram SRE, MARS e MaxEnt. Já os resultados para Área abaixo da curva os valores ficaram entre 0,8 e 0,99.

Em relação a importância das variáveis bioclimáticas utilizadas seguiu-se a seguinte ordem: Variação diurna média (bio2), Precipitação do mês mais seco (bio14), temperatura média do trimestre mais seco (bio 9), Isotermalidade (bio3), Temperatura média do trimestre mais chuvoso (bio8) e Precipitação sazonal (bio15).

A distribuição do gênero *Forcipomyia* se concentrou na região noroeste chegando na região mais central do bioma amazônico no cenário atual. Portanto, o segundo maior produtor de cacau do bioma amazônico brasileiro, que é o estado de Rondônia, apresentou uma ausência de ocorrência desses polinizadores o que pode estar relacionado com a menor produtividade desse estado em relação ao estado do Pará, que possui quase o dobro da produção por área de acordo com os dados IBGE(2019). No cenário RCP4.5, ocorreu uma grande redução das áreas de presença, em que o estado do Amapá, Roraima e Pará, praticamente perderam quase todas as áreas com ocorrência do gênero *Forcipomyia*. Por fim, foi possível observar no RCP8.5, um aumento ainda maior das áreas de ausência, com destaque para o estado do Pará que perdeu por completo as áreas com a presença desse gênero (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Distribuição espacial da ocorrência do gênero *Forcipomyia* (a) atual, (b) futuro (2050) - RCP 4.5 e (c) futuro (2050) – RCP 8.5



Fonte: Elaborado pelo autor.

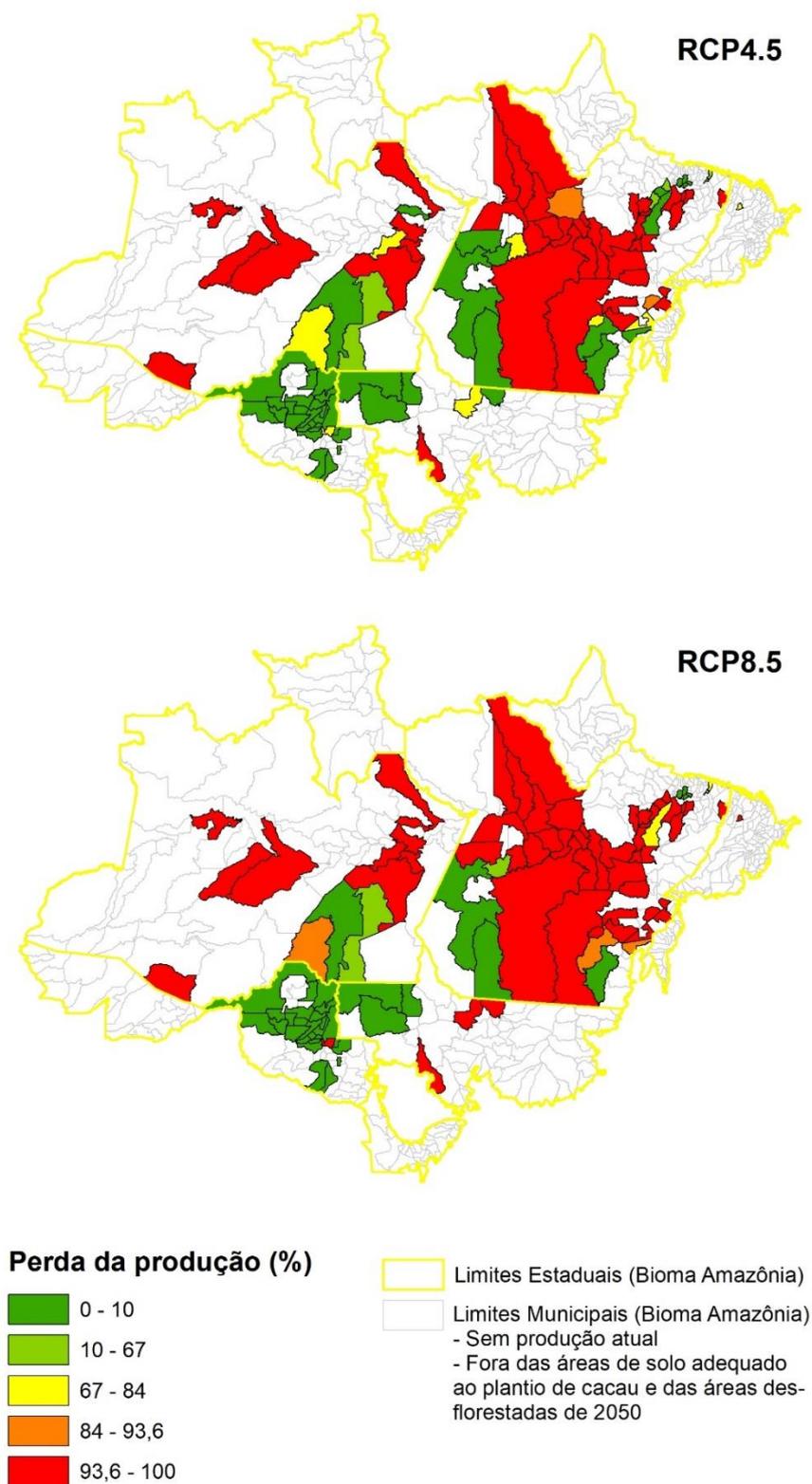
De acordo com o conjunto de dados bioclimáticos, foi possível identificar uma tendência de aumento da temperatura e diminuição da precipitação no bioma amazônico brasileiro. A variação diurna média aumentou no período avaliado em 0,38 e 0,48 °C nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. A temperatura média do trimestre mais seco aumentou 1,92 e 2,65 °C nos cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. A temperatura média do trimestre mais chuvoso aumentou 1 e 2,1 °C nos cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. A precipitação do mês mais seco diminuiu 7,43 e 14,47 mm / mês nos cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. A precipitação sazonal aumentou de 1,93 e 5,14 coeficientes de variação nos cenários RCP 4.5 e 8.5.

4.3.2 Impactos socioeconômicos

O setor agrícola tem sido considerado como um dos mais susceptíveis as influências adversas das mudanças climáticas (MASUD et al., 2017). Concomitante a isso, a estimativa realizada evidenciou uma perda de 92,92 e 95,28% da produção de cacau nos cenários RCP4.5 e 8.5, respectivamente. Dessa forma, considerando o valor de produção atual (IBGE, 2019) a perda será de 1,16 e 1,19 bilhão de reais nos cenários RCP4.5 e 8.5, respectivamente. Além disso, de acordo com o último censo agropecuário referente ao ano de 2017, dentre os municípios analisados, 20.550 estabelecimentos realizam a produção de cacau e de acordo com as estimativas todos esses estabelecimentos serão afetados com a redução na produção de cacau. Dessa forma, poderá afetar mais de 20.550 famílias, pois segundo os dados do IBGE(2017), 86,9% desses estabelecimentos são de agricultura familiar, ou seja, a mão-de-obra é majoritariamente de uma determinada família.

Dentre os municípios analisados, foi possível observar que houve uma grande perda de produção no estado do Pará (PA) em ambos os cenários futuros (RCP4.5 e 8.5). Como pode ser visualizado na Figura 4.2, inclusive engloba a maioria dos municípios da região da trasnamazônica, que é a região que mais produz no estado. Diante disso, essa redução na produção no estado será uma perda significativa a nível nacional haja visto que a produção paraense representa cerca de 50% da produção nacional (IBGE, 2019). Dentre os demais estados do bioma Amazônia brasileiro o que provavelmente irá sofrer menos com os efeitos adversos das mudanças climáticas será Rondônia (RO), ao qual como pode ser visualizado na Figura 4.2 apenas um município perderá mais que 10% da produção em todos os cenários futuros.

Figura 4.2 – Distribuição espacial das potenciais perdas da produção nos cenários RCP4.5 e 8.5



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Conclusão

Portanto, diante da modelagem da distribuição do cacau e do seu principal polinizador foi possível evidenciar um indicativo de potenciais prejuízos futuros a produção de cacau, aos quais provavelmente afetará milhares de agricultores que vivem no bioma amazônico brasileiro. Além disso, a distribuição espacial das possíveis perdas de produção nos cenários futuros poderão servir como ferramenta de planejamento territorial para os tomadores de decisão.

REFERÊNCIAS

BOSU, P. P. *et al.* Monitoring insect populations in cocoa agro-ecosystems within the catchment of the bobiri forest reserve in Ghana. **Ghana Journal of Horticulture**, v. 13, n. 1, p. 121–136, 2018.

BREIMAN, L.; FRIEDMAN J. H.; OLSHEN R. A.; STONE, C. J. **Classification and regression trees**. Wadsworth: [s.n], 1984.

COSTANZA, R. *et al.* Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, n. 1, p. 152–158, 2014.

CUADRA, S.V. *et al.* (ed.). **Ação contra a mudança global do clima** : contribuições da Embrapa. Brasília, DF : Embrapa, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/183492/1/ODS-13.pdf>. Acesso em: 05 mar 2021.

CUTLER, R. *et al.* Random forests for classification in ecology. **Ecology**, v. 88, n. 11, p. 2783–2792, 2007.

ESSER, L. F.; SARAIVA, D. D.; JARENKOW, J. A. Future uncertainties for the distribution and conservation of *Paubrasilia Echinata* under climate change. **Acta Botanica Brasilica**, v. 33, n. 4, p. 770–776, 2019.

FALQUE, M.; LESDALONS, C.; ESKES, A. B. Comparison of two cacao (*Theobroma cacao* L.) clones for the effect of pollination intensity on fruit set and seed content. **Sexual Plant Reproduction**, v. 9, n. 4, p. 221–227, 1996.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Climate is changing. Food and agriculture must too**. 2016. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5758e.pdf>. Acesso em: 21 maio 2020.

FREE, J. B. **Insect pollination of crops**. Second edition. London, UK: Academic Press, 1993.

FREUND, Y.; SCHAPIRE, R. E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting BT - Computational learning theory. **Computational learning theory**, v. 904, n. Chapter 2, p. 23–37, 1995.

GLOBAL BIODIVERSITY INFORMATION FACILITY-GBIF. **Pontos de ocorrência go gênero *Forcipomyia***. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15468/dl.x95vn3>. Acesso em: 06 jan. 2020.

GIORGETTA, M. A. *et al.* Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 5, n. 3, p. 572–597, 2013.

GLENDINNING, D.R. Natural pollination of cocoa. **New Phytologist**, n.71, p. 719-729, 1972.

HASTIE, T.J.; TIBSHIRANI, R.J. **Generalized additive models**. London, New York, Tokyo, Melbourne and Madras: Chapman and Hall, 1990.

HASTIE, T.J.; TIBSHIRANI, R.; BUJA, A. Flexible discriminant analysis by optimal scoring. **Journal of the American Statistical Association**, v. 89, n. 428, p. 1255–1270, 1994.

HOSMER, D.W.; LEMESHOW, S. **Applied logistic regression**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA - IBGE. **Censo agropecuário**. 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em: 28 ago. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA -IBGE. **Produção agrícola municipal**. 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>. Acesso em: 08 fev. 2021.

KARGER, D.N. *et al.* **Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas**. Dryad Digital Repository, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/doi:10.5061/dryad.kd1d4>.

KLEIN, A. M. *et al.* Advances in pollination ecology from tropical plantation crops. **Ecology**, v. 89, n. 4, p. 935–943, 2008.

LINDSAY, K. *et al.* Preindustrial-control and twentieth-century carbon cycle experiments with the Earth System Model CESM1 (BGC). **Journal of Climate**, v. 27, n. 24, p. 8981–9005, 2014.

LIU, C. *et al.* Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. **Ecography**, v. 28, p. 385–393, 2005.

MARCO JÚNIOR, P.de ; NÓBREGA, C. C. Evaluating collinearity effects on species distribution models: An approach based on virtual species simulation. **PLoS ONE**, v. 13, n. 9, 2018.

MARSHMAN, J.; BLAY-PALMER, A.; LANDMAN, K. Anthropocene crisis: climate change, pollinators, and food security. **Environments - MDPI**, v. 6, n. 2, p. 1–16, 2019.

MASUD, M. M. *et al.* Adaptation barriers and strategies towards climate change: Challenges in the agricultural sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 698–706, 2017.

OGUNTUNDE, P. G.; LISCHIED, G.; DIETRICH, O. Relationship between rice yield and climate variables in southwest Nigeria using multiple linear regression and support vector machine analysis. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, n. 3, p. 459–469, 2018.

PERSECHINO, A. *et al.* Decadal predictability of the Atlantic Meridional overturning circulation and climate in the IPSL-CM5A-LR model. **Climate Dynamics**, n. 40, p. 2359–2380, 2012.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Version 4.0.3 [software]. 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 15 out. 2020.

RIPLEY, B. D. **Pattern recognition and neural networks**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

ROYAERT, S. *et al.* Identification of marker-trait associations for self-compatibility in a segregating mapping population of *Theobroma cacao* L. **Tree Genetics and Genomes**, v. 7, n. 6, p. 1159–1168, 2011.

RUF, F. **Booms et crises du cacao**. Montpellier, France: CIRARD-SAR, 1995.

SANDERSON, B. M.; KNUTTI, R.; CALDWELL, P. A representative democracy to reduce interdependency in a multimodel ensemble. **Journal of Climate**, v. 28, n. 13, p. 5171–5194, 2015.

SCOCCIMARRO, E. *et al.* Effects of tropical cyclones on ocean heat transport in a high-resolution coupled general circulation model. **Journal of Climate**, n. 24, p. 4368–4384, 2011.

SPECIESLINK. **Dados de ocorrência**. Disponível em: <http://www.splink.org.br/index?lang=pt>. Acesso em: 06 jan 2021.

TSCHARNTKE, T. *et al.* Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - a review. **Journal of Applied Ecology**, v. 48, n. 3, p. 619–629, 2011.

THUILLER, W. *et al.* Uncertainty in ensembles of global biodiversity scenarios. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2019.

THUILLER, W. *et al.* **Package ‘biomod2’. Version 3.4.6** [software]. 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/biomod2/biomod2.pdf>. Acesso em: 15 out.

2020.

WATANABE, M. *et al.* Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, n. 23, p. 6312–6335, 2010.

YOUNG, A. M. Effects of shade cover and availability of midge breeding sites on pollinating midge populations and fruit set in two cocoa farms. **Journal of Applied Ecology**, v. 19, p. 47–63, 1982.

YOUNG, A. M. **The chocolate tree**. Washington, D.C., USA: Smithsonian Institution Press, 1994.

ZHANG, L. *et al.* Consensus forecasting of species distributions: the effects of niche model performance and niche properties. **PLoS ONE**, v. 10, n. 3, p. 1–18, 2015.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO GERAL

4.5 Resultados chave: impactos e implicações

Com a finalidade de atender os objetivos propostos nesta dissertação de mestrado, cujo o objetivo geral consistiu em analisar os impactos das mudanças climáticas e do uso da terra no cultivo de cacau na Amazônia brasileira. Os resultados chave gerados ao longo da construção deste trabalho foram:

- (1) Modelos de distribuição de espécies
- (2) Zoneamento de adaptação à ocorrência de cacau frente às mudanças climáticas
- (3) Mapa das áreas potenciais à produção de cacau nos cenários RCP4.5 e 8.5.
- (4) Estimativa dos possíveis impactos socioeconômicos das mudanças climáticas na produção de cacau em 2050.

Esses resultados poderão contribuir com a sociedade no sentido de estimar os prováveis impactos causados a produção de cacau caso os cenários futuros venham a se concretizar. Dessa forma, poderão ser utilizados como elementos de prevenção e adoção de medidas mitigadoras às mudanças climáticas com a finalidade de precaver a população dessas eventuais alterações no clima. Além disso, estes resultados poderão ser utilizados por tomadores de decisão com a finalidade de contribuir na gestão territorial do bioma amazônico brasileiro.

4.6 Considerações Finais

Contudo, foi possível concluir que as mudanças climáticas trarão grandes prejuízos a produção de cacau e alterações na distribuição espacial das áreas de cultivo. Tendo em vista, que de acordo com os resultados apresentados grande parte dos municípios produtores no bioma amazônico brasileiro sofrerão perdas significativas na produção e isso implicará em perdas econômicas nessas regiões produtoras já consolidadas. Porém, os resultados gerados podem servir como instrumento para os tomadores de decisão no sentido de aplicar medidas de mitigação às mudanças no clima como o uso de Sistemas Agroflorestais ou de

evitar que esses cenários de mudanças climáticas cheguem a se concretizar por meio de ações que reduzam a emissão de gases do efeito estufa como o combate ao desmatamento ilegal.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, L. J. S. *et al.* Future projections for terrestrial biomes indicate widespread warming and moisture reduction in forests up to 2100 in South America. **Global Ecology and Conservation**, v. 25, p. e01441, 2021.
- ANSELIN, L. **Spatial econometrics: methods and models**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988.
- ASHBY, I.; EXTER, M. Designing for Interdisciplinarity in Higher Education: Considerations for Instructional Designers. **TechTrends**, v. 63, n. 2, p. 202–208, 2019.
- ASNER, G. P.; ALENCAR, A. Drought impacts on the Amazon forest: The remote sensing perspective. **New Phytologist**, v. 187, n. 3, p. 569–578, 2010.
- CHASE, J.M.; LEIBOLD, M.A. **Ecological Niches: linking classical and contemporary approaches**. Chicago e Londres: The university of Chicago Press, 2003.
- CLAPP, J.; NEWELL, P.; BRENT, Z. W. The global political economy of climate change, agriculture and food systems. **Journal of Peasant Studies**, v. 45, n. 1, p. 80–88, 2018.
- COLLINS, W.D. *et al.* **Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0)**. Boulder, Colorado: NCAR TECHNICAL NOTE, 2004. Disponível em: <https://www.cesm.ucar.edu/models/atm-cam/docs/description/description.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2021
- COX, J.D. **Storm watchers: the turbulent history of weather prediction from Franklin's Kite to El Niño**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002.
- CRUZ-CÁRDENAS, G. *et al.* Modelado de la distribución potencial de especies de Pinaceae bajo escenarios de cambio climático en Michoacán. **Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 135–148, 2016.
- CUADRA, S.V. *et al.* (ed.). **Ação contra a mudança global do clima : contribuições da Embrapa**. Brasília, DF : Embrapa, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/183492/1/ODS-13.pdf>. Acesso em: 05 mar 2021.
- ELTON, C.S. **Animal ecology**. 1927. Disponível em: <https://archive.org/details/animalecology00elto/mode/2up>. Acesso em: 26 jan.2020.
- ESTRADA-CONTRERAS, I. *et al.* Climate change and effects on vegetation in Veracruz, Mexico: An approach using ecological niche modelling. **Acta Botanica Mexicana**, n. 112, p. 73–93, 2015.
- FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Climate is changing. Food and agriculture must too.** 2016. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5758e.pdf>. Acesso em: 21 maio 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Faostat.** 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>. Acesso em: 08 fev. 2021.

FRANKLIN, J. **Mapping species distributions: spatial inference and prediction.** Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

GRINNELL, J. The niche-relationships of the California Thrasher. **The Auk**, v. 34, n. 4, p. 427–433, 1917.

GUISAN, A. *et al.* **Habitat suitability and distribution models: with applications in R.** Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

HUTCHINSON, G.E. Concluding remarks. **Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology**, n. 22, p. 415–427, 1957.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Banco de dados:** portal de mapas. 2017. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220925>. Acesso em: 28 ago. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção agrícola municipal.** 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>. Acesso em: 08 fev. 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. **Informações das projeções climáticas.** 2013. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf. Acesso em: 20 jan. 2020.

KAUFMANN, T. Studies on the ecology and biology of Cocoa pollinator, *Forcipomyia squamipennis* I. and M. (Diptera: Ceratopogonidae) in Ghana. **Bulletin of Entomological Research**, v. 65, p.263-268, 1975.

LAHIVE, F.; HADLEY, P.; DAYMOND, A. J. The impact of elevated CO₂ and water deficit stress on growth and photosynthesis of juvenile cacao (*Theobroma cacao* L.). **Photosynthetica**, v. 56, n. 3, p. 911–920, 2018.

LALIBERTÉ, B. *et al.* **A global strategy for the conservation and use of cacao genetic resources, as the foundation for a sustainable cocoa economy.** Rome, Italy : Biodiversity International, 2011. E-book. Disponível em: https://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/_migrated/uploads/tx_news/A_global_strategy_for_the_conservation_and_use_of_cacao_genetic_resources_as_the_foundation_for_a_sustainable_cocoa_economy_1588.pdf. Acesso em: 04 dez. 2020.

LEVIS, C. *et al.* How people domesticated Amazonian forests. **Frontiers in Ecology**

and Evolution, v. 5, p. 1–21, 2018.

LYNCH, P. **The emergence of numerical weather prediction**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

MACARTHUR, R.H. **Geographical ecology**. Princeton: Princeton University Press, 1972.

MENDES, F.A. **Agronegócio cacau no estado do Pará: origem e desenvolvimento**. Belém, PA: Clube de autores, 2018.

MENEZES, A. G. T. *et al.* Investigation of chocolate produced from four different Brazilian varieties of cocoa (*Theobroma cacao* L.) inoculated with *Saccharomyces cerevisiae*. **Food Research International**, v. 81, p. 83–90, 2016.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION -NOAA. **The first climate model**. Disponível em: https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/welcome.html. Acesso em: 11 mar. 2021.

NURHADI, E. *et al.* Policy strategies of cocoa for lead up agroindustrial food and drinks in Jember Regency, Indonesia. **MATEC Web of Conferences**, v. 58, 2016.

PROVOST, F.; FAWCETT, T. Data science and its relationship to big data and data-driven decision making. **Big Data**, v. 1, n. 1, p. 51–59, 2013.

QIN, X. W. *et al.* Characterization of volatile compounds in criollo, forastero, and trinitario cocoa seeds (*Theobroma cacao* L.) in China. **International Journal of Food Properties**, v. 20, n. 10, p. 2261–2275, 2017.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada; geotechnologies on applied geography. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 81–90, 2005.

RUF, F. **Booms et crises du cacao**. Montpellier, France: CIRARD-SAR, 1995.

SANDERSON, B. M.; KNUTTI, R.; CALDWELL, P. A representative democracy to reduce interdependency in a multimodel ensemble. **Journal of Climate**, v. 28, n. 13, p. 5171–5194, 2015.

SANGERMANO, F.; TOLEDANO, J.; EASTMAN, R. Land cover change in the Bolivian Amazon and its implications for REDD+ and endemic biodiversity. **Landscape Ecology**, v. 27, n. 4, p. 571–584, 2012.

SOBERÓN, J.; PETERSON, A. T. Interpretation of models of fundamental ecological niche and species' distributional areas. **Biodiversity Informatics**, v. 2, p. 1–10, 2005.

SONG, I. Y.; ZHU, Y. Big data and data science: what should we teach? **Expert Systems**, v. 33, n. 4, p. 364–373, 2016.

SOUZA, T. T. de *et al.* Longer crop cycle lengths could offset the negative effects of climate change on brazilian maize. **Agrometeorology**, v. 78, n. 4, p. 622–631, 2019.

THOMAS, E. *et al.* Neotropics reflect genetic differentiation in pleistocene refugia followed by human-influenced dispersal Present spatial diversity patterns of theobroma cacao L. in the. **PLoS ONE**, v. 7, n. 10, 2012.

VAAST, P.; SOMARRIBA, E. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 6, p. 947–956, 2014.

XUE, Y.; FENNESSY, M. J.; SELLERS, P. J. Impact of vegetation properties on U.S. summer weather prediction. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 101, n. D3, p. 7419–7430, 1996.

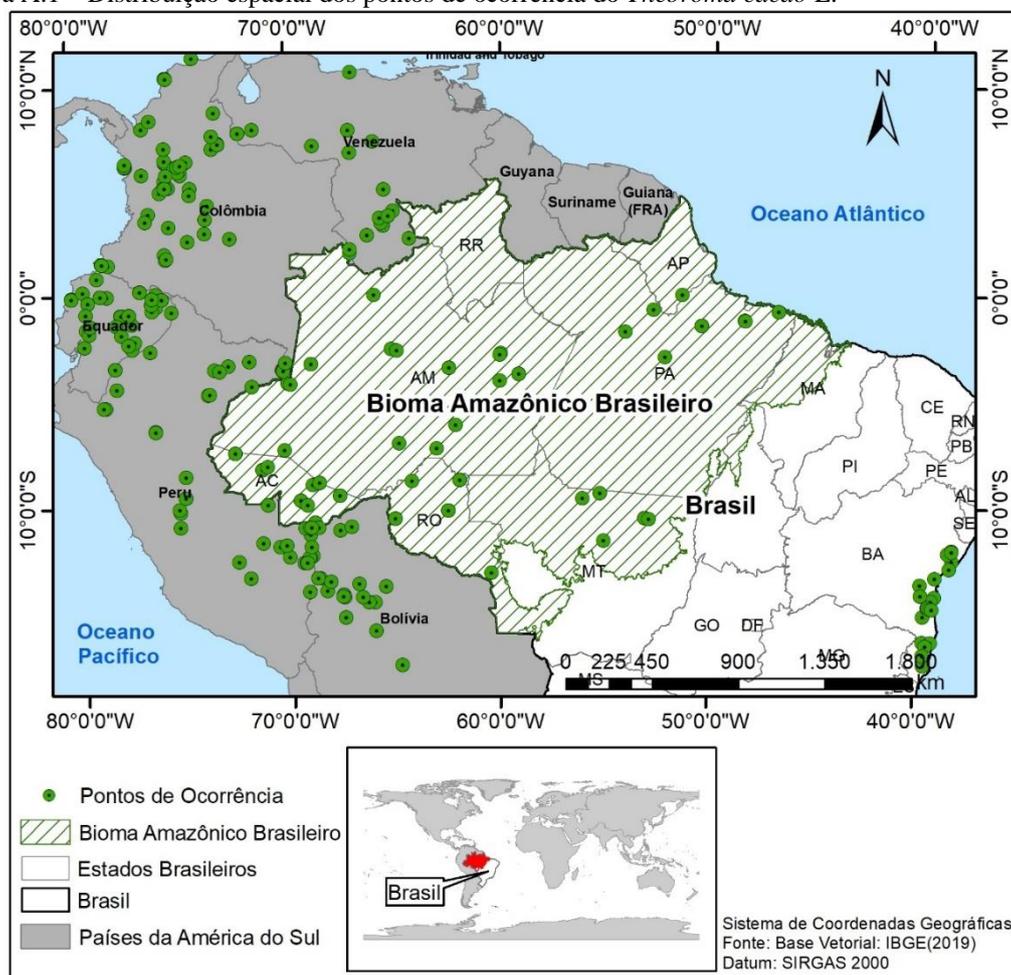
YOUNG, A. M. Effects of shade cover and availability of midge breeding sites on pollinating midge populations and fruit set in two cocoa farms. **Journal of Applied Ecology**, v. 19, p. 47–63, 1982.

ZARRILLO, S. *et al.* The use and domestication of theobroma cacao during the mid-Holocene in the upper Amazon. **Nature Ecology and Evolution**, v. 2, n. 12, p. 1879–1888, 2018.

APÊNDICE A – MAPA DOS PONTOS DE OCORRÊNCIA DO *THEOBROMA CACAO* L.

A distribuição espacial dos pontos de ocorrência do cacau se estende a outras regiões fora do bioma Amazônia (Figura A.1), como o estado da Bahia que segundo Mendes (2018), em 1746, mudas de cacau foram levadas para este estado pelo agricultor Louis Frederic Warneaux do estado do Pará. Atualmente, o estado da Bahia é o segundo maior produtor nacional com 113.039 toneladas o que representa 43,57% da produção brasileira (IBGE, 2019). Diante disso, infere-se que os pontos de ocorrência que estão localizados no estado da Bahia são de propriedades rurais, tendo em vista que não é uma planta nativa da região nordeste do Brasil. Portanto, caso isso ocorresse em trabalhos aos quais não tivessem a finalidade de mapear a adequação do cacau para a produção poderia ser considerado uma abordagem errônea.

Figura A.1 – Distribuição espacial dos pontos de ocorrência do *Thebroma cacao* L.

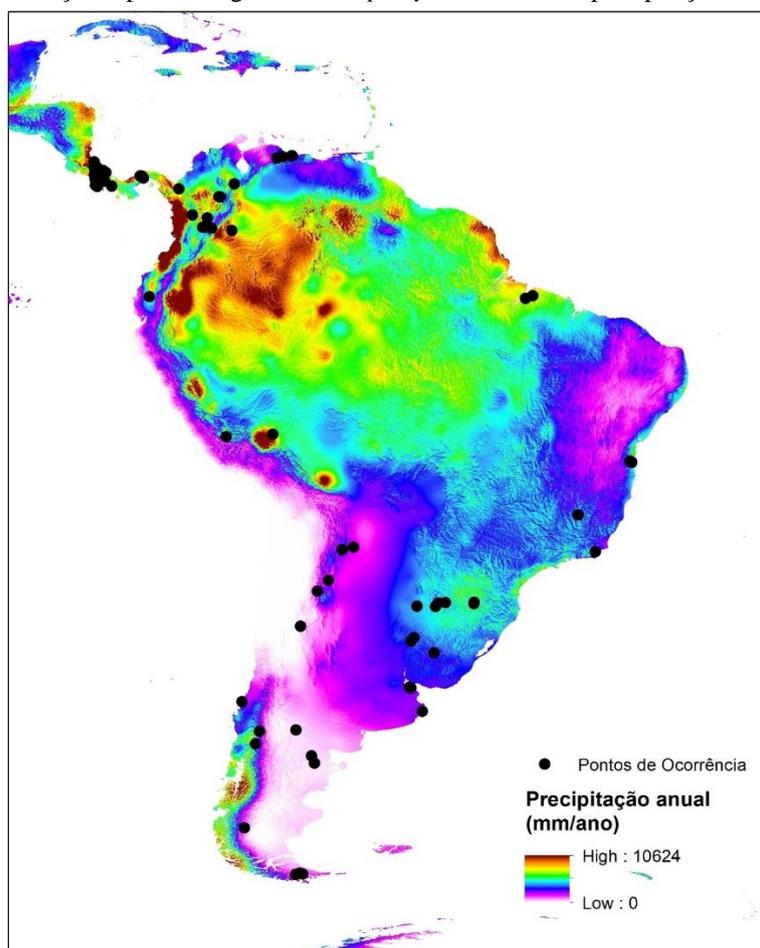


Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – MAPA DOS PONTOS DE OCORRÊNCIA DO GÊNERO *FORCIPOMYIA*

Uma das principais características do gênero *Forcipomyia* é a maior adequabilidade a regiões que possuam maior taxa de precipitação, pois dependem de ambientes úmidos (RUF, 1995; YOUNG, 1982), pois os ovos são colocados em madeira de decomposição úmida e diante disso, as maiores populações ocorrem na estação chuvosa (KAUFMANN, 1975). Isso está em consonância com a distribuição espacial observada na Figura C.1 ao qual é possível observar que a ocorrência do gênero *Forcipomyia* ocorre majoritariamente em locais com maior precipitação anual.

Figura C.1 – Distribuição espacial do gênero *Forcipomyia* nas áreas de precipitação anual



Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DOS PONTOS DE OCORRÊNCIA DO CACAU

(continua)

Pontos	Latitude	Longitude
1	9°40' 48,000" S	67°39' 0,000" W
2	10°56' 30,661" S	68°51' 8,802" W
3	4°22' 5,900" S	70°2' 16,000" W
4	1°25' 12,000" S	48°27' 0,000" W
5	19°56' 10,000" S	40°37' 0,001" W
6	16°22' 40,001" S	39°34' 48,000" W
7	0°57' 0,000" S	52°45' 0,000" W
8	7°36' 59,976" S	72°36' 0,000" W
9	7°37' 0,001" S	72°36' 0,000" W
10	4°30' 0,000" S	71°45' 0,000" W
11	15°10' 0,001" S	39°35' 0,000" W
12	12°30' 0,000" S	38°18' 0,000" W
13	16°23' 15,997" S	39°11' 1,000" W
14	2°48' 0,000" S	65°8' 0,000" W
15	14°47' 0,000" S	39°10' 48,000" W
16	2°0' 29,002" S	54°4' 9,001" W
17	6°24' 22,219" S	62°6' 5,281" W
18	14°10' 1,999" S	39°43' 19,999" W
19	9°2' 13,999" S	64°12' 2,002" W
20	11°52' 23,002" S	55°2' 53,999" W
21	12°9' 37,001" S	38°30' 20,999" W
22	0°57' 50,500" S	46°52' 42,500" W
23	14°13' 13,001" S	39°3' 34,999" W
24	13°19' 13,001" S	39°3' 37,001" W
25	14°25' 53,760" S	39°13' 26,400" W
26	14°43' 0,001" S	39°22' 57,000" W
27	16°33' 37,001" S	39°25' 13,001" W
28	13°40' 49,001" S	39°46' 50,002" W
29	8°59' 59,000" S	61°55' 12,000" W
30	8°59' 58,999" S	61°55' 12,000" W
31	8°59' 59,000" S	61°55' 12,000" W
32	17°30' 4,828" S	39°30' 43,355" W
33	9°52' 32,401" S	56°3' 55,901" W
34	0°14' 24,299" S	51°24' 45,900" W
35	3°11' 55,021" S	52°12' 44,420" W
36	10°48' 20,120" S	65°0' 28,631" W

(continuação)

Pontos	Latitude	Longitude
37	1°40' 55,992" S	50°28' 49,080" W
38	7°30' 0,000" S	70°15' 0,000" W
39	3°28' 16,228" S	68°56' 6,301" W
40	3°43' 59,880" S	62°25' 0,120" W
41	10°46' 23,000" S	53°5' 23,000" W
42	0°15' 0,000" S	65°55' 12,000" W
43	10°26' 19,888" S	62°28' 21,201" W
44	17°1' 0,001" S	39°33' 0,000" W
45	10°56' 30,660" S	68°51' 8,802" W
46	4°22' 5,902" S	70°2' 16,001" W
47	4°20' 0,000" S	60°1' 0,001" W
48	8°24' 21,600" S	71°19' 48,000" W
49	12°0' 2,999" S	38°18' 0,000" W
50	14°10' 1,920" S	39°43' 19,920" W
51	9°37' 12,000" S	55°13' 12,000" W
52	0°57' 50,501" S	46°52' 42,499" W
53	12°51' 49,151" S	38°23' 47,490" W
54	10°48' 20,002" S	65°0' 29,002" W
55	9°10' 8,000" S	68°57' 4,000" W
56	3°2' 34,145" S	59°58' 8,789" W
57	13°23' 39,984" S	60°25' 21,000" W
58	10°46' 23,016" S	53°5' 22,992" W
59	1°41' 8,030" S	50°28' 51,297" W
60	3°28' 16,226" S	68°56' 6,302" W
61	7°30' 34,522" S	63°1' 19,178" W
62	10°26' 19,889" S	62°28' 21,202" W
63	12°50' 25,804" S	69°24' 22,327" W
64	12°44' 5,647" S	72°33' 27,961" W
65	12°30' 38,761" S	68°58' 44,879" W
66	1°0' 19,253" S	77°48' 52,268" W
67	1°0' 7,085" S	77°48' 52,646" W
68	0°59' 43,696" S	77°48' 57,964" W
69	0°59' 43,033" S	77°48' 57,262" W
70	0°59' 38,839" S	77°49' 1,560" W
71	0°59' 35,869" S	77°48' 55,876" W
72	0°59' 19,147" S	77°48' 44,204" W
73	0°59' 14,237" S	77°49' 17,177" W
74	0°59' 11,857" S	77°49' 11,989" W
75	0°59' 11,472" S	77°49' 12,079" W
76	0°59' 4,589" S	77°49' 3,184" W

(continuação)

Pontos	Latitude	Longitude
77	0°58' 47,604" S	77°50' 6,720" W
78	0°58' 44,659" S	77°48' 55,444" W
79	0°5' 8,772" S	78°27' 56,059" W
80	2°32' 19,903" N	72°38' 22,978" W
81	6°14' 6,947" N	75°33' 56,905" W
82	6°16' 10,247" N	75°33' 48,067" W
83	6°20' 34,559" N	75°34' 44,328" W
84	7°3' 59,123" N	73°5' 15,785" W
85	7°4' 6,193" N	73°5' 23,658" W
86	7°4' 52,914" N	73°6' 45,176" W
87	7°5' 48,764" N	73°5' 54,528" W
88	7°5' 51,666" N	73°5' 53,588" W
89	7°5' 54,269" N	73°5' 53,509" W
90	7°5' 54,874" N	73°5' 53,203" W
91	7°5' 55,993" N	73°5' 53,084" W
92	7°5' 56,130" N	73°5' 53,020" W
93	7°7' 7,507" N	73°6' 17,705" W
94	10°21' 15,210" N	75°25' 44,756" W
95	10°21' 18,166" N	75°25' 48,763" W
96	10°21' 19,490" N	75°25' 47,248" W
97	12°36' 18,886" S	69°7' 26,371" W
98	6°28' 56,921" S	76°22' 21,680" W
99	3°6' 49,140" S	60°0' 52,326" W
100	1°37' 23,567" S	79°29' 34,800" W
101	1°26' 47,170" S	48°25' 40,462" W
102	0°6' 29,171" S	80°7' 3,839" W
103	4°9' 4,975" N	73°38' 15,684" W
104	13°31' 4,217" S	72°0' 15,822" W
105	0°7' 22,508" S	80°7' 17,591" W
106	0°7' 17,868" S	80°7' 16,266" W
107	0°3' 16,920" S	78°46' 38,964" W
108	0°3' 5,026" S	78°46' 26,458" W
109	3°29' 17,999" N	73°44' 42,000" W
110	5°37' 47,672" N	74°51' 3,953" W
111	5°54' 1,328" N	74°51' 21,557" W
112	5°57' 48,341" N	75°6' 7,697" W
113	10°21' 18,000" N	75°25' 45,995" W
114	6°30' 53,035" S	76°21' 50,375" W
115	5°21' 4,007" N	75°37' 7,511" W
116	5°46' 4,102" N	74°58' 16,399" W

(continuação)

Pontos	Latitude	Longitude
117	6°50' 47,040" N	73°22' 30,360" W
118	10°19' 8,587" N	75°24' 42,379" W
119	3°9' 3,398" N	75°27' 47,902" W
120	14°43' 16,000" S	39°21' 58,000" W
121	14°43' 16,000" S	39°22' 4,001" W
122	14°43' 14,002" S	39°21' 58,000" W
123	14°43' 13,001" S	39°21' 56,999" W
124	14°43' 13,001" S	39°21' 58,000" W
125	14°43' 12,000" S	39°21' 56,002" W
126	14°43' 10,999" S	39°21' 55,001" W
127	14°43' 7,000" S	39°21' 51,001" W
128	14°43' 0,998" S	39°22' 13,001" W
129	14°43' 0,998" S	39°22' 4,001" W
130	14°42' 56,999" S	39°22' 5,999" W
131	14°11' 21,152" S	68°20' 2,141" W
132	10°21' 15,001" S	75°17' 6,000" W
133	1°48' 42,872" S	79°20' 10,507" W
134	0°1' 4,865" S	76°10' 26,731" W
135	6°4' 12,832" N	77°23' 34,242" W
136	6°5' 16,127" N	77°24' 53,654" W
137	6°6' 14,922" N	77°25' 40,019" W
138	12°35' 14,075" S	69°10' 34,226" W
139	2°35' 44,830" S	77°20' 30,232" W
140	0°53' 27,787" S	75°27' 14,742" W
141	7°54' 34,319" N	76°36' 3,150" W
142	8°35' 55,136" N	73°13' 24,488" W
143	3°47' 17,520" N	76°23' 30,458" W
144	14°46' 52,799" S	39°16' 21,500" W
145	14°48' 0,000" S	39°10' 0,001" W
146	12°32' 38,760" S	70°6' 18,360" W
147	8°16' 27,264" N	76°13' 32,520" W
148	10°12' 0,000" S	75°19' 59,988" W
149	3°43' 9,998" S	70°18' 25,999" W
150	1°51' 15,001" N	75°42' 24,001" W
151	1°27' 59,976" S	78°3' 0,000" W
152	1°27' 0,000" S	79°16' 59,988" W
153	1°35' 37,702" N	75°38' 54,949" W
154	2°25' 48,000" N	74°35' 24,000" W
155	3°25' 51,290" N	76°33' 35,996" W
156	12°3' 0,000" S	38°18' 0,000" W

(continuação)

Pontos	Latitude	Longitude
157	1°39' 0,000" N	75°36' 24,001" W
158	13°33' 59,976" S	68°39' 59,976" W
159	11°31' 0,001" S	69°6' 0,000" W
160	11°19' 59,880" S	67°40' 0,120" W
161	5°19' 15,996" S	78°41' 4,992" W
162	2°15' 43,200" S	77°12' 28,800" W
163	1°55' 8,400" S	77°49' 33,600" W
164	0°37' 59,988" S	76°9' 59,976" W
165	14°13' 12,000" S	69°10' 12,000" W
166	10°4' 12,000" S	71°6' 0,000" W
167	9°53' 0,000" S	69°31' 0,001" W
168	9°53' 0,000" S	69°31' 12,000" W
169	14°45' 0,000" S	66°1' 48,000" W
170	14°45' 0,000" S	66°20' 0,000" W
171	5°18' 59,976" S	78°46' 59,988" W
172	14°21' 59,976" S	67°33' 0,000" W
173	8°24' 23,000" S	71°19' 54,001" W
174	8°24' 21,600" S	71°19' 55,200" W
175	6°15' 0,000" N	74°34' 12,000" W
176	8°16' 44,000" S	71°5' 16,001" W
177	10°7' 0,001" S	69°13' 0,001" W
178	4°51' 0,000" S	73°50' 0,000" W
179	0°49' 0,001" S	76°22' 0,001" W
180	3°42' 0,000" S	70°15' 0,000" W
181	2°24' 0,000" S	79°36' 0,000" W
182	1°29' 43,944" N	78°39' 40,392" W
183	16°7' 9,998" S	66°0' 6,001" W
184	3°47' 0,000" S	70°17' 0,000" W
185	3°46' 59,988" S	70°15' 0,000" W
186	3°23' 58,524" S	70°8' 30,912" W
187	1°25' 0,001" S	77°20' 0,000" W
188	0°58' 12,000" S	77°27' 0,000" W
189	0°58' 0,001" S	77°27' 0,000" W
190	10°28' 59,988" N	66°54' 0,000" W
191	13°34' 59,988" S	68°45' 59,976" W
192	13°34' 59,880" S	68°46' 0,120" W
193	3°30' 0,000" S	72°49' 59,988" W
194	5°1' 48,475" N	75°26' 2,296" W
195	15°27' 59,976" S	67°27' 59,976" W
196	14°30' 0,000" S	67°30' 0,000" W

(continuação)

Pontos	Latitude	Longitude
197	12°50' 0,000" S	69°17' 0,000" W
198	12°49' 59,988" S	69°16' 59,988" W
199	12°49' 48,000" S	69°16' 48,000" W
200	12°4' 59,988" S	69°3' 0,000" W
201	11°12' 0,000" S	69°20' 0,000" W
202	9°40' 12,000" S	75°1' 48,000" W
203	9°40' 0,001" S	75°2' 0,000" W
204	3°30' 0,000" S	78°10' 12,000" W
205	3°30' 0,000" S	78°10' 0,001" W
206	0°9' 59,976" N	79°34' 59,988" W
207	17°45' 0,000" S	64°45' 0,000" W
208	11°10' 0,001" S	69°7' 0,001" W
209	11°9' 59,976" S	67°6' 59,976" W
210	1°24' 52,600" N	78°21' 32,198" W
211	1°45' 0,000" N	67°2' 0,000" W
212	1°55' 0,001" N	67°2' 0,000" W
213	2°25' 0,001" N	64°14' 0,000" W
214	2°36' 0,000" N	66°12' 0,000" W
215	3°45' 0,000" N	64°59' 0,000" W
216	4°47' 0,000" N	65°24' 0,000" W
217	5°3' 35,237" N	75°34' 30,072" W
218	14°30' 0,000" S	66°37' 0,001" W
219	14°28' 0,001" S	67°34' 0,008" W
220	13°45' 0,000" S	68°9' 0,000" W
221	11°10' 59,988" S	68°40' 59,988" W
222	4°49' 59,988" S	73°45' 0,000" W
223	6°55' 0,001" N	68°42' 0,000" W
224	7°4' 7,050" N	73°5' 17,700" W
225	7°4' 11,064" N	73°5' 22,488" W
226	7°39' 4,000" N	67°1' 40,004" W
227	2°45' 0,000" S	76°30' 0,000" W
228	1°28' 29,424" N	78°37' 58,692" W
229	3°3' 0,000" N	65°27' 0,004" W
230	3°10' 0,001" N	65°33' 0,000" W
231	3°24' 9,666" N	65°37' 42,092" W
232	3°30' 0,000" N	65°12' 0,004" W
233	6°34' 0,001" N	66°59' 0,000" W
234	3°39' 59,976" S	73°30' 0,000" W
235	5°41' 35,520" N	76°39' 5,184" W
236	11°51' 59,976" S	71°21' 59,976" W

(continuação)

Pontos	Latitude	Longitude
237	10°50' 2,040" S	52°52' 23,160" W
238	4°2' 0,000" S	59°6' 0,000" W
239	4°1' 59,988" S	59°6' 0,000" W
240	4°1' 59,880" S	59°6' 0,000" W
241	0°31' 0,001" S	76°23' 0,000" W
242	6°2' 54,316" N	75°0' 5,922" W
243	6°4' 58,728" N	74°50' 49,884" W
244	11°18' 8,708" N	74°10' 13,080" W
245	12°4' 0,001" S	70°33' 0,000" W
246	2°53' 0,000" S	64°52' 0,001" W
247	0°31' 0,120" S	76°22' 59,880" W
248	0°21' 0,000" S	79°21' 59,976" W
249	0°21' 0,000" S	79°21' 57,600" W
250	0°48' 0,000" N	78°54' 0,000" W
251	6°55' 36,383" N	75°34' 17,454" W
252	5°36' 45,551" N	75°31' 59,077" W
253	7°34' 59,880" N	72°7' 59,880" W
254	7°34' 59,988" N	72°7' 59,988" W
255	7°45' 0,000" N	71°28' 59,988" W
256	9°41' 0,000" S	67°39' 0,000" W
257	0°16' 59,988" S	75°52' 59,988" W
258	0°16' 58,800" S	75°52' 58,800" W
259	0°15' 0,000" S	76°21' 0,000" W
260	0°6' 57,600" N	76°54' 57,600" W
261	0°6' 59,976" N	76°54' 59,976" W
262	0°7' 0,001" N	76°55' 0,001" W
263	11°11' 0,000" S	69°2' 0,000" W
264	7°28' 17,652" N	73°20' 41,208" W
265	8°39' 59,976" S	75°0' 0,000" W
266	3°44' 52,980" S	73°14' 49,992" W
267	4°58' 0,001" N	74°26' 0,000" W
268	14°0' 0,000" S	65°30' 0,000" W
269	13°51' 54,000" S	66°47' 7,998" W
270	12°0' 0,000" S	70°15' 0,000" W
271	3°19' 0,001" S	71°51' 0,000" W
272	0°53' 34,980" S	79°29' 20,976" W
273	4°27' 59,976" S	78°9' 0,000" W
274	4°59' 20,911" N	75°39' 39,823" W
275	4°47' 59,381" N	75°50' 57,768" W
276	5°0' 0,400" N	75°35' 12,005" W

(conclusão)

Pontos	Latitude	Longitude
277	9°4' 12,000" S	68°37' 12,000" W
278	9°4' 0,001" S	68°37' 0,001" W
279	7°15' 20,365" S	64°47' 54,978" W
280	2°22' 59,880" S	77°30' 0,000" W
281	7°4' 32,880" N	65°54' 42,840" W
282	2°48' 38,815" N	73°48' 13,583" W
283	3°44' 0,000" S	62°25' 0,001" W
284	4°39' 3,013" N	74°27' 58,061" W
285	4°24' 19,267" S	69°55' 32,563" W
286	6°13' 31,501" N	77°24' 13,637" W
287	1°41' 8,030" S	50°28' 51,297" W
288	11°3' 0,000" S	75°19' 0,120" W

ANEXO B - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DOS PONTOS DE OCORRÊNCIA DO GÊNERO *FORCIPOMYIA*

(continua)

Pontos	Latitude	Longitude
1	27° 9' 39,960" S	52° 25' 12,000" W
2	4° 30' 24,001" N	74° 11' 17,002" W
3	14° 47' 4,290" S	39° 13' 24,049" W
4	12° 42' 11,002" S	69° 33' 14,000" W
5	22° 25' 35,000" S	42° 2' 3,998" W
6	19° 20' 56,591" S	43° 37' 10,088" W
7	1° 14' 39,458" S	47° 53' 36,629" W
8	10° 32' 22,376" N	83° 30' 23,332" W
9	10° 29' 35,999" N	67° 31' 37,999" W
10	10° 29' 35,131" N	67° 36' 45,644" W
11	10° 27' 0,000" N	68° 18' 59,760" W
12	10° 20' 7,800" N	68° 44' 44,880" W
13	10° 6' 0,000" N	83° 22' 0,001" W
14	10° 5' 46,388" N	83° 30' 41,501" W
15	9° 59' 45,445" N	83° 26' 9,114" W
16	9° 58' 37,250" N	83° 27' 11,664" W
17	9° 58' 27,451" N	83° 26' 58,790" W
18	9° 58' 24,211" N	83° 27' 5,134" W
19	9° 58' 19,427" N	83° 27' 39,622" W
20	9° 57' 42,185" N	83° 26' 51,367" W
21	9° 56' 12,692" N	83° 24' 51,502" W
22	9° 55' 32,628" N	83° 11' 29,058" W
23	9° 55' 31,490" N	83° 11' 20,659" W
24	9° 55' 30,468" N	83° 11' 17,412" W
25	9° 55' 26,936" N	83° 11' 21,725" W
26	9° 55' 23,016" N	83° 23' 53,610" W
27	9° 55' 19,596" N	83° 24' 37,901" W
28	9° 55' 18,138" N	83° 23' 55,266" W
29	9° 55' 17,756" N	83° 11' 21,134" W
30	9° 55' 16,504" N	83° 11' 25,638" W
31	9° 55' 11,122" N	83° 23' 49,837" W
32	9° 49' 9,440" N	83° 9' 38,358" W
33	9° 48' 52,574" N	83° 10' 12,252" W
34	9° 48' 21,737" N	83° 10' 17,620" W
35	9° 44' 14,993" N	82° 48' 59,904" W
36	9° 44' 9,280" N	82° 48' 54,310" W

(continuação)

Pontos	Latitude	Longitude
37	9° 43' 40,051" N	82° 49' 7,572" W
38	9° 40' 31,361" N	83° 1' 36,394" W
39	9° 40' 29,752" N	83° 1' 41,318" W
40	9° 40' 28,117" N	83° 1' 39,688" W
41	9° 40' 21,583" N	83° 1' 39,673" W
42	9° 40' 20,356" N	83° 3' 11,560" W
43	9° 40' 20,183" N	83° 2' 28,918" W
44	9° 40' 15,726" N	83° 1' 34,129" W
45	9° 39' 52,790" N	83° 1' 28,884" W
46	9° 39' 50,918" N	83° 1' 37,416" W
47	9° 39' 41,177" N	83° 1' 50,552" W
48	9° 39' 26,251" N	83° 1' 40,084" W
49	9° 38' 26,945" N	83° 8' 17,686" W
50	9° 38' 25,001" N	83° 8' 15,000" W
51	9° 37' 15,283" N	83° 16' 17,375" W
52	9° 37' 12,727" N	83° 17' 2,540" W
53	9° 36' 56,376" N	83° 15' 50,404" W
54	9° 36' 36,860" N	83° 16' 3,544" W
55	9° 35' 18,902" N	82° 36' 17,874" W
56	9° 29' 8,279" N	83° 29' 27,265" W
57	9° 27' 33,998" N	83° 11' 11,000" W
58	9° 27' 30,679" N	83° 30' 49,262" W
59	9° 27' 14,368" N	83° 30' 1,739" W
60	9° 26' 27,200" N	83° 31' 15,517" W
61	9° 25' 53,000" N	83° 11' 58,999" W
62	9° 24' 18,612" N	83° 30' 46,069" W
63	9° 22' 59,002" N	83° 12' 47,999" W
64	9° 21' 15,001" N	83° 14' 3,998" W
65	9° 20' 28,824" N	83° 22' 11,647" W
66	9° 18' 32,954" N	83° 16' 47,345" W
67	9° 15' 23,134" N	83° 3' 57,582" W
68	9° 13' 9,728" N	83° 4' 32,203" W
69	9° 11' 44,992" N	83° 3' 30,100" W
70	9° 9' 7,560" N	79° 50' 47,328" W
71	9° 7' 14,502" N	83° 0' 33,692" W
72	9° 7' 9,318" N	82° 57' 51,602" W
73	9° 6' 59,976" N	79° 42' 0,000" W
74	9° 6' 51,419" N	82° 57' 53,251" W
75	9° 6' 44,896" N	82° 57' 48,373" W
76	9° 6' 37,012" N	82° 57' 42,962" W

(continuação)

Pontos	Latitude	Longitude
77	9° 6' 25,909" N	82° 57' 42,296" W
78	9° 6' 18,860" N	82° 57' 50,040" W
79	9° 4' 25,028" N	82° 58' 45,624" W
80	9° 3' 46,033" N	82° 59' 20,407" W
81	9° 3' 37,876" N	82° 59' 10,601" W
82	9° 3' 18,367" N	82° 59' 22,099" W
83	9° 3' 18,367" N	82° 59' 22,078" W
84	9° 2' 57,203" N	82° 59' 20,501" W
85	9° 2' 34,433" N	82° 59' 28,709" W
86	9° 2' 21,530" N	83° 0' 35,878" W
87	9° 2' 2,008" N	83° 0' 39,186" W
88	9° 2' 1,687" N	82° 57' 45,648" W
89	9° 2' 0,244" N	82° 59' 23,881" W
90	9° 1' 58,753" N	83° 0' 39,193" W
91	9° 1' 58,746" N	83° 0' 35,917" W
92	9° 1' 51,956" N	82° 58' 5,311" W
93	9° 1' 45,764" N	83° 0' 58,864" W
94	9° 1' 43,799" N	82° 57' 53,867" W
95	9° 1' 32,390" N	82° 57' 45,702" W
96	9° 1' 29,672" N	82° 49' 8,371" W
97	9° 1' 22,400" N	83° 29' 46,432" W
98	9° 0' 31,936" N	83° 0' 21,355" W
99	9° 0' 26,212" N	82° 49' 15,067" W
100	8° 57' 50,072" N	82° 50' 4,535" W
101	8° 57' 0,000" N	79° 33' 59,760" W
102	8° 56' 58,002" N	82° 50' 11,177" W
103	8° 56' 5,327" N	82° 45' 59,263" W
104	8° 55' 0,484" N	82° 47' 49,081" W
105	8° 54' 57,067" N	82° 46' 41,959" W
106	8° 54' 54,000" N	82° 48' 0,554" W
107	8° 54' 47,351" N	82° 47' 1,651" W
108	8° 54' 23,116" N	82° 48' 16,992" W
109	8° 53' 54,989" N	82° 45' 7,218" W
110	8° 53' 29,303" N	82° 47' 34,570" W
111	8° 48' 58,655" N	82° 54' 35,327" W
112	8° 48' 58,644" N	82° 54' 35,280" W
113	8° 45' 33,793" N	83° 16' 59,261" W
114	8° 45' 0,000" N	83° 18' 0,000" W
115	8° 32' 11,810" N	83° 25' 31,843" W
116	8° 32' 5,334" N	83° 25' 36,001" W

(continuação)

Pontos	Latitude	Longitude
117	8° 31' 59,178" N	83° 27' 11,581" W
118	8° 31' 47,420" N	83° 26' 6,194" W
119	8° 31' 31,210" N	83° 28' 0,646" W
120	8° 24' 20,664" N	83° 20' 31,553" W
121	8° 22' 59,988" N	82° 9' 59,760" W
122	8° 12' 58,860" N	72° 14' 50,676" W
123	7° 55' 54,084" N	76° 44' 40,200" W
124	7° 9' 4,702" N	73° 32' 24,400" W
125	7° 6' 21,409" N	73° 24' 57,690" W
126	5° 40' 0,001" N	75° 43' 0,001" W
127	5° 22' 53,404" N	74° 31' 16,450" W
128	4° 36' 41,198" N	74° 55' 46,200" W
129	4° 16' 33,499" N	72° 33' 18,601" W
130	1° 1' 4,080" S	79° 28' 37,920" W
131	1° 27' 18,068" S	48° 30' 8,521" W
132	12° 50' 9,600" S	73° 29' 42,000" W
133	14° 41' 6,360" S	39° 21' 51,840" W
134	14° 41' 6,572" S	39° 21' 51,995" W
135	14° 45' 0,000" S	39° 13' 0,012" W
136	22° 18' 0,000" S	62° 49' 59,880" W
137	22° 31' 0,336" S	63° 48' 20,160" W
138	25° 7' 41,880" S	65° 0' 59,400" W
139	26° 4' 23,088" S	65° 58' 33,787" W
140	27° 3' 0,000" S	52° 24' 0,000" W
141	27° 5' 50,888" S	54° 53' 47,180" W
142	27° 7' 46,524" S	55° 30' 39,744" W
143	27° 25' 40,620" S	57° 20' 18,600" W
144	27° 27' 40,320" S	55° 44' 38,400" W
145	29° 9' 57,460" S	67° 30' 0,000" W
146	30° 15' 27,720" S	57° 35' 41,280" W
147	30° 33' 2,160" S	57° 51' 42,120" W
148	31° 36' 21,600" S	55° 50' 30,840" W
149	34° 49' 26,468" S	57° 59' 8,671" W
150	34° 52' 22,800" S	57° 53' 1,320" W
151	34° 52' 23,041" S	57° 53' 1,381" W
152	35° 59' 59,028" S	72° 46' 28,956" W
153	37° 6' 9,652" S	56° 51' 55,310" W
154	38° 49' 35,540" S	68° 4' 1,920" W
155	38° 54' 0,000" S	71° 17' 0,000" W
156	40° 6' 56,520" S	71° 39' 39,240" W

(conclusão)

Pontos	Latitude	Longitude
157	41° 27' 2,794" S	66° 43' 10,088" W
158	42° 12' 0,000" S	66° 27' 0,000" W
159	49° 2' 32,100" S	72° 51' 30,240" W
160	54° 42' 25,700" S	67° 58' 1,661" W
161	54° 46' 29,197" S	67° 41' 56,936" W
162	54° 48' 25,200" S	68° 18' 44,280" W

ANEXO C – TABELA CONCEITUAL DOS TIPOS DE MÉTODOS DE MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO DE ESPÉCIES

Algoritmos	Métodos	Principal característica
Surface Range Envelope	Envelope	É definido no espaço ambiental pelos registros mais extremos das espécies ao longo de cada variável ambiental selecionada
Generalized Linear Models	Regressão	Permite que a variável resposta siga outras distribuições e funções de variância não constantes para serem modeladas
Generalized Additive Models	Regressão	Não requer postulação de uma forma para curva de resposta de uma função paramétrica específica
Multivariate Adaptive Regression Splines	Regressão	Ajusta pedaços de funções que juntos podem acomodar respostas não-lineares
Classification and regression trees	Classificação e sistemas de aprendizado de máquina	Explica a variação de uma única variável resposta com uma ou mais variáveis explanatórias. As variáveis respostas podem ser discretas ou contínuas e as variáveis explanatórias também podem ser de qualquer tipo
Flexible Discriminant Analysis	Classificação e sistemas de aprendizado de máquina	Permite o usuário substituir a combinação linear com funções não-paramétricas
Artificial Neural Network	Classificação e sistemas de aprendizado de máquina	Técnica matemática que tenta simular os aspectos funcionais e estruturais das redes neurais biológicas com a finalidade de classificar objetos e fazer previsões
Random Forest	Melhoramento e armazenamento	Tem sido desenvolvido para checar o sobreajuste adicionando estocasticidade no processo da construção de árvores
Generalized Boosted Regression Models	Melhoramento e armazenamento	Computa a sequência de árvores bem simples, onde cada nova árvore é ajustada ao resíduo do conjunto de árvores tal longe desenvolvidos
MaxENT	Máxima Entropia	A probabilidade de distribuição que melhor representa os dados

Fonte: Guisan et al. (2017).