



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

JOSÉ FELIPE GAZEL MENEZES

**Modelagem da palma de óleo na Amazônia: Redução da adequabilidade
climática até o final do século.**

BELÉM-PA

2024

JOSÉ FELIPE GAZEL MENEZES

Modelagem da palma de óleo na Amazônia: Redução da adequabilidade climática até o final do século.

Tese de Doutorado submetida como requisito à aprovação do 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 parte das exigências para a obtenção de grau de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia.

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Orientador: Dr. Alessandro Carioca de Araújo.

BELÉM-PA

2024

JOSÉ FELIPE GAZEL MENEZES

**MODELAGEM DA PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA: REDUÇÃO DA
ADEQUABILIDADE CLIMÁTICA ATÉ O FINAL DO SÉCULO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Aprovada em: 29/09/2023.

Banca Examinadora:

Prof. Alessandro Carioca de Araújo - Orientador
Doutor em Ciências Geoambientais
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Amazônia Oriental

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

Prof. Luciano Jorge Serejo dos Anjos - Membro Interno
Doutor em Ciências Ambientais
Universidade Federal Rural da Amazônia

Prof. Santiago Vianna Cuadra - Membro Externo
Doutor em Agronomia
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Agricultura Digital

Prof. Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro - Membro Externo
Doutora em Meteorologia Agrícola
Universidade Federal de Viçosa

**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)**

M541m Menezes, Jose Felipe Gazel.
Modelagem da palma de óleo na Amazônia: Redução da
adequabilidade climática até o final do século. / Jose Felipe Gazel
Menezes, Alessandro Carioca de Araújo . — 2023.
70 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alessandro Carioca de Araújo
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais,
Belém, 2023.

1. Climatologia-Pará. 2. Palma de óleo. 3. Modelagem. 4.
Mudanças climáticas. I. Título.

CDD 551.6098115

À minha querida e amada família, minha
fonte de inspiração e o melhor exemplo de
amor existente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me concedido a oportunidade de chegar até aqui, e ter me dado a perseverança, força e paz de espírito necessárias para superar os obstáculos.

À minha filha, Catarina, que por um amor sem tamanho, me impulsionou para a conclusão de mais esta etapa em minha vida.

A minha esposa e companheira, Amanda, pela ajuda e dedicação ao longo de todos esses anos.

Aos meus amados pais, Antônio e Samira, e aos meus irmãos Antônio Neto, João Paulo e Patrícia por se fazerem presentes em todos os momentos, seja nos mais alegres aos mais confusos e estressantes, me transmitindo calma, fé, determinação e amor, incentivando sempre os meus estudos e nunca desistindo de mim.

Ao professor e orientador Dr Alessandro Carioca de Araújo por todo o tempo dedicado a mim, e a esta tese, de forma a contribuir de maneira importantíssima para o desenvolvimento.

Aos meus sogros, Socorro e Roberto, pela disposição em ajudar na resolução de qualquer obstáculo e rede de apoio.

Às minhas Avós Dulcineia e Raimunda (in memoriam) pela paz, força e orações que sempre me foram dedicadas.

Ao professor Santiago Cuadra e seus bolsistas Victor e Michel por toda ajuda concedida. Ao professor Luciano dos Anjos, pela essencial contribuição e ajuda nesta tese.

Aos amigos do programa de pós-graduação em Meteorologia, Vania, Thaianne, Waléria, Davison, Nívia, Lívia, Márcio, Simone, Marcelo, Cássio, Paulo, Leoni, Fabiana, Guilherme, Yasmin e Ronaldo.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). A todos do Laboratório de análise de sistemas sustentáveis (Lass). Lugar que me acolheu para o desenvolvimento desta tese. Em especial à Julie Andrews, Kaleb Ribeiro, Giselle Nerino, Maryelle Machado e Bárbara Antonucci.

Aos meus amigos de longa data pelo apoio de sempre, Bruno Dias, Sabrinni Carneiro, Murilo e Danilo.

Aos amigos João Paulo Pedrosa, Felipe Higuchi e Layrson.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço à Universidade Federal do Pará, por ter me acolhido desde a graduação e hoje ter o prazer de concluir minha formação nessa importante instituição.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brasil) pela bolsa de pós-graduação concedida.

RESUMO

A Amazônia sofre historicamente com o desflorestamento. Desde o final da década de 1960 até os dias de hoje, o processo de ocupação sempre foi realizado de maneira desordenada. Adicionalmente a este fato, há problemas locais característicos da região amazônica, como grilagem e invasão de terras. Portanto, tais fatores ajudam a explicar o porquê de a região amazônica possuir extensas áreas desmatadas e abandonadas. O presente trabalho destaca o monocultivo de palma de óleo como alternativa para reintegrar e transformar áreas abandonadas em áreas produtivas. Adicionalmente, é apresentado a importância da produção de palma de óleo para o mercado global e local, e como as mudanças climáticas podem afetar a produção da palma de óleo em cenários futuros. É utilizado um modelo de superfície desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), para estimar a produção de palma de óleo. Este estudo foi conduzido em um monocultivo de palma de óleo com híbrido interespecífico (HIE), gerado a partir do cruzamento entre as espécies *Elaeis guineensis* Jacq (Africano) e *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés (Americano). Posteriormente, através da construção de um modelo de distribuição de espécies, estimamos como as áreas climaticamente adequadas ao cultivo de palma de óleo podem mudar no futuro, com base nos cenários de mudanças climáticas do IPCC.

Palavras-chave: climatologia-Pará; palma de óleo; modelagem; mudanças climáticas

ABSTRACT

The Amazon has historically suffered from deforestation. From the end of the 1960s to the present day, the occupation process has always been carried out in a disorderly manner. In addition to this fact, there are local problems characteristic of the Amazon region, such as land grabbing and invasion. Therefore, such factors help to explain why the Amazon region has extensive deforested and abandoned areas. This work highlights oil palm monoculture as an alternative to reintegrate and transform abandoned areas into productive areas. Additionally, the importance of oil palm production for the global and local market is presented, and how climate change may affect oil palm production in future scenarios. A surface model developed by the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA) is used to estimate oil palm production. This study was conducted in an oil palm monoculture with interspecific hybrid (HIE), generated from the cross between the species *Elaeis guineensis* Jacq (African) and *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés (American). Subsequently, by building a species distribution model, we estimate how areas climatically suitable for oil palm cultivation may change in the future, based on IPCC climate change scenarios.

Keywords: climatology-Pará; oil palm; modeling; climate changes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figure 1- Área de estudo.....	30
Figure 2- Comparação entre os dados observados e os dados estimados pelo satélite nasa power.	31
Figure 3- Comparação dos dias com 24 horas de dados observados e dados estimados pelo satélite nasa power.....	31
Figure 4- Torre micrometeorologica instalada na C22. Fonte: Julie Andrews de França e Silva.....	32
Figure 5- Esquema do modelo ECOSMOS.....	33
Figure 6- Produção de óleo de palma em t/ha estimada pelo modelo ECOSMOS.	34
Figure 7- Comparação entre a produção de óleo de palma em tonelada de cachos de fruto fresco por ha/ano (observado e simulado) na versão default.	35
Figure 8- Comparação de Rn (Observado e Simulado).	36
Figure 9- Comparação do fluxo de calor sensível (Observado e Simulado).....	36
Figure 10- Comparação entre o fluxo de calor latente (Observado e Simulado).	37
Figure 11- Comparação entre o NEE (Observado e Simulado).	38
Figure 12- Análise de sensibilidade dos parâmetros da planta.	38
Figure 13- Análise de sensibilidade dos parâmetros de radiação incidente do modelo ECOSMOS.	42
Figure 14- Calibração para HIE do modelo ECOSMOS.	44
Figure 15- Esquema da construção do modelo de dispersão de espécies.	53

Figure 16- Mudanças na temperatura da superfície global avaliadas com base em múltiplas linhas de evidência durante os periodos de 20 anos selecionados e para os 5 cenários ilustrativos de emissões considerados.

Fonte: (IPCC) AR6 final report..... 54

Figure 17- Evolução do cenário SSP2 4.5 nas 4 projeções selecionadas..... 55

Figure 18- Evolução do cenário SSP5 8.5 nas 4 projeções selecionadas..... 57

LISTA DE TABELAS

Table 1 Parâmetros da planta (default & calibrated).....	39
Table 2 Condutividade hídrica do solo no modelo ECOSMOS.	42
Table 3 Parâmetros de radiação incidente no modelo ECOSMOS.....	43
Table 4 Adequabilidade climática da palma de óleo no estado do Pará (cenário SSP2 4.5)	56
Table 5 Adequabilidade climática da palma de óleo no estado do Pará (cenário SSP5 8.5)	56

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL	14
MONOCULTIVO DA PALMA DE ÓLEO	14
1.1. MODELAGEM DE SUPERFÍCIE	19
1.2. CONTEXTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	20
1.4. OBJETIVOS DA PESQUISA	21
1.4.1 <i>Objetivo geral</i>	21
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	21
1.5 HIPÓTESES	22
1.5.1	22
1.5.2 EM RELAÇÃO AOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PALMA DE ÓLEO, FORMULA-SE A HIPÓTESE:.....	22
1.6. ESTRUTURA DA TESE	22
CAPÍTULO 2 CALIBRAÇÃO DO MODELO ECOSMOS PARA ESTIMAR A PRODUÇÃO DA PALMA DE ÓLEO HÍBRIDO INTERESPECÍFICO (HIE).....	23
RESUMO.....	23
2.1. INTRODUÇÃO	24
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
2.2.1 ÁREA DE ESTUDO	29
2.2.2 MODELO ECOSMOS	32
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
2.4. CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS.....	45
CAPÍTULO 3 ADEQUABILIDADE CLIMÁTICA DA PALMA DE ÓLEO NO ESTADO DO PARÁ EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.	47
RESUMO.....	47
ABSTRACT.....	48
3.1. INTRODUÇÃO	49
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
3.4. CONCLUSÃO:	58
REFERÊNCIAS.....	59
CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL	63
4.1. RESULTADOS CHAVES: IMPACTOS E APLICAÇÕES	63
4.2. CONCLUSÃO INTEGRADA	64
4.3. PRIORIDADES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	65
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
REFERÊNCIAS.....	67

CÁPITULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

Monocultivo da palma de óleo

A monocultura da palma de óleo pode apresentar uma importante estratégia na tentativa de recuperar espaços desflorestados na Amazônia. Apresenta baixo nível de agressão ambiental, estabelecendo rapidamente uma cobertura arbórea e protegendo o solo contra a lixiviação e a erosão (Furlan Júnior; Müller, 2004). O monocultivo da palma de óleo é abordado nesta tese como uma possibilidade de recuperar áreas já degradadas ou em processo de degradação. Desde que não sejam suprimidas áreas de floresta para implementação do plantio de palma, pode ser considerado como o mais importante instrumento de gestão ambiental de ordenamento do uso da terra relacionando condições socioeconômicas e condições ecológicas que vem sendo implementado na Amazônia (Becker, 2010). O decreto de lei nº 7.172 (2010) estabelece duas diretrizes importantes, a primeira diz que é proibido em todo o território nacional a derrubada de vegetação nativa para plantio da palma de óleo; e a segunda determina que é proibido o licenciamento ambiental para as indústrias que utilizem como insumo dendê cultivado em áreas não indicadas pelo zoneamento agroecológico da cultura da palma. Tal legislação busca impedir a expansão desordenada da palma de óleo e o desflorestamento para este fim. Contanto que a legislação seja seguida, a palma de óleo pode apresentar para o cenário amazônico grandes oportunidades socioeconômicas. A palma de óleo tem importância internacional muito expressiva, é utilizada em cerca de 50% de todos os produtos industrializados (WWF, 2021). O motivo dessa utilização em grande escala, está associado à sua versatilidade, pois o óleo possui propriedades e funções diferentes. É semissólido à temperatura ambiente; é resistente à oxidação, portanto, pode dar aos produtos uma vida útil mais longa; é estável em altas temperaturas, portanto, ajuda a dar aos produtos fritos uma textura crocante, além de ser inodoro e incolor, por isso não altera a aparência ou o cheiro dos produtos alimentícios, bem como é utilizado na produção de biocombustíveis.

Devido à ampla aplicação e utilização do óleo, o consumo mundial aumentou expressivamente nos últimos anos. O óleo de palma é, de longe, a

cultura oleaginosa mais importante do mundo, fornecendo cerca de 40% de todo o óleo vegetal comercializado no planeta (Murphy; Goggin; Paterson, 2021). Segundo a *Food and Agriculture Organization (FAO)*, a palma de óleo produz 36% do óleo de origem vegetal, seguido pelo óleo de soja com 25.5%, na terceira posição aparece colza e mostarda com 11.3%, girassol com 9%, amendoim com 2.5%, algodão com 2.1%, oliva com 1.6%, coco com 1.4% e gergelim com 0.6%. De acordo com a organização Palm Oil Investigation, a indústria de alimentos processados consome, aproximadamente, 72% de toda a produção de óleo de palma, a indústria de produtos de higiene e higiene pessoal consome 18% e a indústria de biocombustíveis consome o saldo em 10%.

Entre as indústrias que utilizam o óleo de palma como matéria prima, a alimentícia é responsável pela maioria do consumo. Para a palmeira africana, *Elaeis guineensis Jacq.*, a indústria utiliza, majoritariamente, o óleo proveniente do mesocarpo do fruto, conhecido como óleo de palma, e o óleo extraído da amêndoa do fruto, é denominado de óleo de palmiste. O óleo de palma possui alto teor de carotenoides. É uma rica fonte de vitamina E, coenzima Q10 e esteróis (Tyagi; Vasishtha, 1996). Segundo Mba *et al.*, (2015) o óleo de palma tem um perfil único de ácidos graxos e triacilglicerol, o que o torna adequado para inúmeras aplicações em alimentos. É o único óleo vegetal com composição quase 50-50 de ácidos graxos saturados e insaturados. No mesmo trabalho a autora demonstra que a fração líquida do óleo de palma é a oleína, e a parte sólida é a estearina. A estearina e a oleína possuem propriedades físicas e químicas diferentes. Enquanto a oleína é utilizada para produção de velas, sorvetes, cosméticos e biodiesel (Barriuso; Astiasarán; Ansorena, 2013), a estearina é utilizada para transformar a gordura em sólido sem o uso do processo de hidrogenação, esse processo consiste em submeter o óleo vegetal em estado líquido a outras moléculas em um ambiente de alta pressão, fazendo assim a gordura em estado sólido. Tal processo não é encontrado na natureza, portanto, estudos mostram que o corpo humano não é adaptado para o consumo de gorduras hidrogenadas. Arenhart *et al.*, (2009) mostra que o consumo de gordura hidrogenada pode acarretar diversos problemas à saúde humana, entre eles o aumento do colesterol, conseqüentemente, aumento nos fatores de risco a doenças cardiovasculares; enfraquecimento do sistema imunológico entre outros. Logo, o uso da estearina proveniente da palma de óleo é uma alternativa

ao consumo de gorduras hidrogenadas tornando mais saudáveis os alimentos produzidos pela indústria.

Atualmente, a produção de palma de óleo é dominada por países do sudeste asiático, de acordo com departamento de agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture*), dois países detêm, aproximadamente, 85% da produção mundial, Indonésia e Malásia. Em 2019 a Indonésia produziu cerca de 42.5 milhões de toneladas, 58% da produção global para o ano, enquanto a Malásia produziu 19 milhões de toneladas, 26% da produção global.

Na América do Sul, existem 3 países no ranking dos 10 maiores produtores de palma de óleo. Colômbia com 1,2 milhões de toneladas, Equador com 545 mil toneladas e o Brasil com 540 mil toneladas. No Brasil, o estado que mais se destaca na produção de palma de óleo é o estado do Pará. Segundo levantamento da Agropalma (2017), o Pará tem, aproximadamente, 210 mil hectares de palma de óleo, sendo 40 mil desses hectares localizados em áreas de agricultores familiares. Isto é decorrente do fato de que, o cultivo do óleo de palma, além de empregar um número significativo de pessoas, também tem a compra da produção garantida, e por vezes, até financiada por grandes empresas da região. Pesquisa realizada por Becker (2010), revela que o monocultivo de palma de óleo tem uso significativo de mão-de-obra. De acordo com a autora, é necessário um trabalhador para cada 5 a 10 há, durante todo o ano. Somente no estado do Pará, o setor da palma de óleo empregou cerca de 16 mil pessoas, apenas de forma direta (Brandão; Schoneveld, 2015). Dessa maneira, se configura como uma importante fonte de emprego e renda na Amazônia Paraense. Na empresa Marborges Agroindústria, situada no município de Moju, por exemplo, há 1200 colaboradores. Do ponto de vista socioeconômico, é possível afirmar que a geração de empregos através de uma monocultura de palma de óleo é considerável, quando comparada a outros sistemas que possui maior mecanização na colheita. Dessa maneira, o monocultivo de palma de óleo contribui para uma melhor distribuição de riqueza e renda, minimizando os fortes desequilíbrios sócio regionais.

Destaca-se ainda que, outro fator para o óleo de palma ser o óleo vegetal mais comercializado no mundo inteiro, é a competitividade de preços e, adicionalmente a esses fatores, a expansão do cultivo de palma de óleo

apresenta ainda maior estabilidade no fornecimento do óleo, comparativamente a outros produtos (Brandão; Schoneveld, 2015). Na Malásia, a falta de mecanização nos plantios de palma de óleo é considerada um fator preocupante devido à falta de mão de obra na região (El Pebrían; Mohiddin, 2021). No entanto, para o contexto amazônico, esse baixo nível de mecanização no processo de colheita favorece a empregabilidade de mão de obra nos plantios, fato esse que contribui para o desenvolvimento regional de outros setores da economia local.

Da mesma maneira que ocorre em todas as monoculturas extensivas, desenvolvidas na região tropical úmida, o cultivo da palma de óleo também está sujeito a uma infestação acentuada de doenças e pragas (Medeiros; Sano, 1989). No caso da palma de óleo, a principal doença é o amarelecimento fatal (AF), que se caracteriza na sua fase inicial pelo ligeiro amarelecimento dos folíolos basais das folhas intermediárias (3, 4, 5 e 6), e depois ocorre o surgimento de necroses nas extremidades dos folíolos que evoluem para a seca total dessas folhas e posterior morte da palma de óleo. Apesar de ser considerado o mais sério problema fitossanitário dessa palmácea no Brasil, o AF ainda tem causa desconhecida e não possui medidas de controle eficazes (Boari, 2008).

Diversos ensaios para identificar um causador para o amarelecimento fatal não obtiveram sucesso durante as décadas de 70 e 80. Nos anos 90, apesar da continuidade das pesquisas no ramo biótico, alguns estudos se voltaram para uma possível origem abiótica do amarelecimento fatal, concentrando estudos e nutrientes absorvidos pela planta e propriedades físicas do solo. No fim dos anos 90, destacam-se os estudos de modelos epidemiológicos, abordando padrões espaciais e temporais do AF (Bergamin Filho *et al.*, 1998; Van de Lande, 1993). Recentemente o emprego de técnicas moleculares modernas (abordando a busca por viroides e fitoplasmas) tenta contribuir para esclarecer a causa do problema (Venturieri *et al.*, 2009). Já no estado do Pará, em 1974, surgiram as primeiras palmeiras infectadas com amarelecimento fatal no plantio pioneiro da DENPASA, na estrada de Mosqueiro, o que levou a sua inviabilização comercial (Homma, 2010)

Diante da necessidade de produzir uma variedade de palma de óleo mais resistente a doenças e pragas com menor custo de manutenção, foi realizado o cruzamento entre as espécies *Elaeis guineensis* Jacq (Africano) e *Elaeis oleifera*

(Kunth) Cortés (Americano). Os primeiros relatos desse cruzamento entre as duas espécies de palma de óleo, datam de 1949. Segundo (Homma, 2016), para que fosse possível realizar esse cruzamento, utilizou-se palmeiras de caiaué existentes no Museu Paraense Emílio Goeldi e o pólen de dendezeiro africano do Campo Agrícola Lira Castro, situado no km 18 da antiga Estrada de Ferro de Bragança. Na década de 1980, o híbrido interespecífico foi considerado como alternativa para o controle do amarelecimento fatal, além de apresentar menor porte, implicando redução no custo da colheita, aumento da vida útil econômica, distribuição da produção ao longo do ano e ocupação de áreas menos aptas para o dendezeiro africano.

Em 2010, o governo federal lançou, através da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias), o Programa de Produção Sustentável de Palma de Óleo no Brasil. Juntamente com as empresas produtoras e beneficiadoras de óleo e palmiste de dendê, tem lançado um agressivo programa de pesquisa, envolvendo tanto o dendezeiro africano como o híbrido interespecífico (Homma, 2016). Através dessas pesquisas, foi possível aprimorar o híbrido interespecífico que é a espécie associada a este estudo. O híbrido interespecífico possui reduzido crescimento do tronco em altura, facilitando o manejo e a colheita dos cachos. A taxa de extração industrial de óleo de palma é de aproximadamente 20%. Apresenta média de produção de cachos de 25 a 30 toneladas por ha/ ano, exigindo a realização da polinização assistida para atingir este potencial produtivo (Embrapa, 2010).

Outra característica do óleo produzido pela palma de óleo com HIE, é que possui mais oleína que estearina. Desse modo, se torna mais atrativo caso a indústria apresente maior necessidade desse composto do óleo. Adicionalmente, é importante destacar que o período de colheita da palma com HIE é diferente do tenera. O HIE possui pico de produção durante o período chuvoso, enquanto o tenera possui pico de produção no período menos chuvoso. Tal fato acrescenta significativo valor às indústrias que trabalham com palma de óleo, uma vez que podem distribuir a produção de óleo de palma ao longo do ano inteiro.

1.1. Modelagem de superfície

O mundo tem se tornado cada vez mais complexo devido a inúmeros fatores, incluindo nossa população crescente e suas demandas por mais alimentos, água e energia. No entanto, a porção de terra destinada à produção de alimentos não tem acompanhado esse crescimento. Há também pressões sobre os recursos naturais e suas substituições por áreas produtivas. Modelos são conjuntos de algoritmos e equações que permitem representar algo observado na natureza. A modelagem de sistemas agrícolas desempenha papel cada vez mais importante no desenvolvimento do manejo sustentável da terra, uma vez que os experimentos de campo demandam grande quantidade de recursos financeiros e de tempo. Tendo disponibilidade de informações de solo, manejo, clima e dados socioeconômicos, os modelos podem ajudar a identificar opções de gestão para maximizar as metas de sustentabilidade e rendimento para empresas e produtores (Jones *et al.*, 2017). A modelagem surge então, de uma necessidade de prever comportamentos e padrões que determinado sistema pode seguir, para assim otimizar esse sistema. Portanto, há um imenso ganho na agricultura através do uso da modelagem de sistemas agrícolas. À medida que a agricultura evolui, surge a necessidade de maior controle sobre a área destinada ao plantio, o melhor entendimento a respeito dos parâmetros do solo, do comportamento da cultura escolhida e até mesmo da adaptabilidade climática dessa cultura.

Um modelo pode ser definido como um conjunto de algoritmos escritos em diversas linguagens de programação que descrevem o comportamento de um sistema. E esses algoritmos são de valiosa contribuição para a agricultura. Segundo Dourado-Neto *et al.* (1998), modelos de culturas agrícolas podem ser classificados com base no modo como eles descrevem dados observados em termos das leis biofísicas ou apenas utilizando relações matemáticas sem qualquer relação com leis da física.

Outra utilização de modelos frequente da modelagem está no auxílio da tomada de decisões por produtores e órgãos governamentais, uma vez que permite prever o comportamento da cultura. A modelagem auxilia no planejamento da gestão diária de um sistema agrícola e é capaz de mitigar

situações relacionadas à pobreza no meio rural, bem como é um método de segurança alimentar, pois projeta a produtividade do sistema em diversas situações, o que permite avaliar o impacto das mudanças climáticas na cultura.

1.2. Contexto de mudanças climáticas

Mudanças climáticas ocorrem de maneira natural ou antrópica. Ambas ocorrem devido ao aumento de gases na atmosfera que causam um acúmulo dos gases capazes de reter radiação no planeta e assim modificar a temperatura do ar. Esses gases são o monóxido de carbono (CO); dióxido de carbono (CO₂); clorofluorcarbonos (CFC); óxido de nitrogênio (N_xO_x); dióxido de enxofre (SO₂) e Metano (CH₄). Erupções vulcânicas e metano produzido por animais são exemplos de emissões naturais. O aumento da concentração desses gases pode modificar os regimes de chuvas e, por consequência, modificar a vida de pessoas e plantas.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) descreve o acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera pós-revolução industrial como: “resultado do crescente uso de energia e expansão da economia global”. Esses gases do efeito estufa, também chamados de “greenhouse gases”, alteram o equilíbrio radiativo da atmosfera. Tais gases aquecem a superfície da Terra e as camadas mais baixas da atmosfera, porque absorvem parte da radiação de calor emitida pela Terra e a irradiam de volta para a superfície (Unfccc, 2011).

De acordo com o último relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), o AR6, as mudanças climáticas são mudanças nos padrões climáticos globais e no nível médio do mar, devido ao aumento das temperaturas causadas pelas atividades humanas que liberam gases de efeito estufa na atmosfera. No mesmo relatório é destacado ainda, outros impactos significativos, como por exemplo a acidificação dos oceanos, aumento no nível médio do mar e redução da precipitação pluviométrica. A mudança climática antrópica já está afetando muitos extremos climáticos em todas as regiões do globo. Evidências de mudanças observadas em extremos, como ondas de calor, chuvas intensas, secas e ciclones tropicais e, em particular, sua atribuição à influência humana, se fortaleceu desde o AR5. (Masson-Delmotte *et al.*, 2021).

Outro ponto de atenção que o AR6 mostra é com relação à ocorrência de eventos extremos. Conforme a temperatura aumenta, há uma tendência de que os eventos extremos ocorram com mais frequência e se tornem maiores. Por exemplo, cada 0,5°C de acréscimo na temperatura média global, causa aumento na intensidade e frequência de extremos quentes, incluindo ondas de calor (muito prováveis) e precipitação intensa (alta confiança). Mudanças perceptíveis na intensidade e frequência das secas meteorológicas, com mais regiões mostrando aumentos do que diminuições também é relatado no AR6.

Portanto, a tendência apresentada é de que os eventos extremos fiquem cada vez mais presentes no cotidiano, expondo as regiões do globo a eventos mais intensos e mais frequentes. Portanto, é de extrema importância procurar compreender os efeitos que essas mudanças podem acarretar. Fleiss *et al.*, (2017), afirmam que temperaturas mais quentes durante o século 21 permitirão que o dendezeiro cresça em novos locais, embora a área total adequada para o cultivo de dendezeiros diminua. Por um lado, o autor destaca que o aumento de eventos extremos de secas e inundações reduzirão os rendimentos do dendezeiro no futuro, mas essas perdas podem ser parcialmente mitigadas por temperaturas mais altas e níveis de dióxido de carbono, que podem aumentar a produtividade das plantas. Portanto, há indícios de que a palma de óleo possa se beneficiar de temperaturas mais altas, tanto para a produção quanto para a expansão de áreas suscetíveis ao cultivo.

1.4. Objetivos da pesquisa

1.4.1 Objetivo geral

Utilizar modelagem para prever a produção em um monocultivo de palma de óleo com híbrido interespecífico (HIE) na Amazônia Oriental e estimar impactos das mudanças climáticas na palma de óleo no estado do Pará.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar quais são os parâmetros determinantes para a produção de palma de óleo no modelo ECOSMOS.

- Calibrar o modelo ECOSMOS para estimar a produção de palma de óleo com híbrido interespecífico.
- Produzir mapas de adequabilidade climática da palma de óleo de acordo com cenários de mudanças climáticas do IPCC.

1.5 Hipóteses

1.5.1 Em relação a calibração e validação do modelo ECOSMOS, formula-se a hipótese:

O modelo ECOSMOS é capaz de prever o comportamento da produção da palma de óleo com HIE.

1.5.2 Em relação aos impactos das mudanças climáticas na palma de óleo, formula-se a hipótese:

A palma de óleo é suscetível a redução de áreas adequadas climaticamente em cenários de seca e de aumento de temperatura na Amazônia.

1.6. Estrutura da tese

Os resultados obtidos a partir desta tese serão apresentados no formato de capítulos e serão discutidos da seguinte forma: O primeiro capítulo trata-se de uma introdução geral sobre a tese. Tem por objetivo contextualizar o leitor sobre a importância de não desmatar a floresta amazônica e mostrar que é possível gerar emprego e renda a partir do monocultivo de palma de óleo na região a partir de terras já degradadas e abandonadas. O segundo capítulo, Calibração do modelo ECOSMOS para a variedade de palma de óleo híbrido interespecífico (HIE), mostra como após calibrado, o modelo da Embrapa é capaz de prever a produção na palma de óleo com HIE. No capítulo 3, apresenta-se o impacto que a palma de óleo apresenta baseado em cenários de mudanças climáticas do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). E por fim, no capítulo 4 apresenta-se uma conclusão geral para a tese.

CAPÍTULO 2 Calibração do modelo ECOSMOS para estimar a produção da palma de óleo híbrido interespecífico (HIE).

José Felipe Gazel Menezes; Alessandro Carioca de Araújo;

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo calibrar a produção de palma de óleo com híbrido interspecífico (*Elaeis guineensis* Jacq e *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés) no modelo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) ECOSMOS. O modelo foi calibrado utilizando técnicas de análise de sensibilidade para identificar os parâmetros mais sensíveis a produção da palma de óleo com híbrido interespecífico. A calibração foi validada utilizando dados climáticos observados em um plantio comercial, através de uma torre micrometeorológica instalada e operada pela Embrapa. Os dados climáticos observados através da torre também foram utilizados como entrada no modelo no período de 2014 a 2018, preenchidos com dados do ERA5 e nasa power. O modelo atual prediz bem o fluxo de calor sensível (H), o saldo radiação (Rn) e a troca de CO₂ com o ecossistema (NEE), porém, superestima o fluxo de calor latente (LE). Após calibrado, o modelo foi capaz de representar melhor os dados observados de produção com a palma de óleo com híbrido interespecífico.

Abstract

The present work aims to calibrate oil palm production with HIE (*Elaeis guineensis* Jacq and *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés) from the Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa) ECOSMOS model. The oil palm *Elaeis guineensis* was added to the model by Benezoli *et al.* (2021). The model was calibrated using sensitivity analysis techniques to identify the most sensitive parameters to oil palm production with interspecific hybrids. The calibration was validated using climate data observed in the planting area, through a micrometeorological tower installed and operated by Embrapa. The climate data observed through the tower was also used as input into the model from 2014 to 2018, filled with data from ERA5 and nasa power. The current model predicts well the sensible heat flux (H), the radiation balance (Rn) and the exchange of CO₂ with the ecosystem (NEE), however, it overestimates the latent heat flux (LE).

After calibration, the model was able to better represent the observed production data with oil palm with interspecific hybrid.

2.1. Introdução

Ocupando menos de 7 por cento da superfície terrestre, as florestas tropicais abrigam, talvez, metade das espécies da Terra e são ecológica, econômica e culturalmente cruciais para questões de segurança alimentar global, mudança climática, biodiversidade e saúde humana (Ellwanger *et al.*, 2020; Gallery, 2014). A região tropical varia entre 23,5° S e 23,5° N da linha do equador, nessa região estão localizadas as florestas tropicais. Portanto, a Amazônia na América do Sul, a floresta tropical do Congo na África e a floresta tropical da Indonésia, na Ásia são as principais florestas tropicais no mundo.

As florestas tropicais apresentam alta biodiversidade. A biodiversidade no planeta é maior na região tropical e diminui à medida que a latitude aumenta (BROWN, 2014). A biodiversidade é importante em sentido econômico, suporte ecológico à vida, valores culturais, recreação e valores científicos (Morton; Hill, 2015). As florestas tropicais, apesar de terem biodiversidade em abundância, não estão isentas de sofrer mudanças em suas características, em virtude das mudanças climáticas. De acordo com Corlett (2014), a percepção das mudanças relacionadas ao acúmulo de gases do efeito estufa na atmosfera, pode ser menos perceptível nos trópicos devido aos efeitos de variabilidade do El Niño oscilação sul (ENSO). Porém, o impacto que essas mudanças podem ter para o equilíbrio global é difícil de estimar. Em vista do exposto, o monitoramento de mudanças na região tropical tem notória importância para a manutenção do equilíbrio do planeta.

Nesse contexto, está inserido a Amazônia, a maior floresta tropical do mundo. A Amazônia compreende uma área de cerca de 8.187.964 km², o equivalente a 6% da superfície terrestre (Pnuma/Otca, 2008). É um bioma presente em oito países na América do Sul (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Guiana, Peru, Suriname e Venezuela). Desse total, 4.199.249 km² pertencem ao bioma Amazônia, e abriga cerca de 50% da biodiversidade mundial. Nesse bioma residem cerca de 24,3 milhões de pessoas (Ibge, 2010).

No final da década de 1960, se iniciou um processo de ocupação na região, com incentivo do governo brasileiro à época. Foram criados órgãos como a SUDAM e o BASA, para fomentar o desenvolvimento. Teve início então, a construção da rodovia transamazônica. Foi criado o PIN (Plano de Integração Nacional). O PIN previa três diretrizes importantes para serem implantadas, a construção de duas rodovias, a transamazônica e a Cuiabá-Santarém e a implantação de uma faixa de terra de 100 km de cada lado das novas rodovias, referentes a um programa de “colonização e reforma agrária” (Oliveira, 2005). Desde então, os índices de desflorestamento na região só aumentam. O monitoramento do desmatamento na Amazônia legal brasileira é desempenhado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados mostram que 719.014 km², equivalentes a 17,1% de sua extensão total já foram desflorestadas (Miranda; Martinho; Carvalho, 2020).

Vários são os motivos pelos quais se desmata a floresta amazônica. Historicamente, o desflorestamento tinha como objetivo a agricultura tradicional e a pecuária extensiva, técnicas rudimentares que utilizam grande espaço na floresta com uma produtividade por hectare relativamente baixa. Atualmente, o principal destino dessas terras historicamente desflorestadas, está voltado à criação de gado e à expansão da agricultura, como milho e soja. Segundo Dias-Filho (2014), não existem estatísticas oficiais que quantifiquem, com precisão, o montante das áreas de pastagens degradadas no Brasil. Para a Amazônia, estima-se que cerca de 30 milhões de hectares ou cerca de 50% das pastagens plantadas estejam degradadas ou em processo de degradação (Dias-Filho, 2011). O custo ambiental da expansão agropecuária na Amazônia representa um sério problema para a floresta. É uma ameaça para os serviços ambientais prestados pela mesma, em particular, quando é utilizado fogo no desflorestamento.

Outra consequência do desflorestamento são as mudanças climáticas, a mudança no clima terrestre pode ocorrer de maneira natural (atividade solar, atividade vulcânica e tectônica) e de maneira antrópica. O IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) estima que houve um acréscimo na temperatura global de aproximadamente 1°C, quando comparado com o período pré-industrial. O último relatório do IPCC, diz ainda que há alta probabilidade de que esse valor chegue a 1,5°C entre 2030 e 2052. Estima-se

então, perda significativa de biodiversidade nas florestas tropicais. O desflorestamento, de forma mecanizada ou tradicional, contribui de maneira significativa na emissão de gases do efeito estufa (GEE). O aumento na temperatura do planeta ocorre devido ao aumento da concentração desses gases presentes na atmosfera. Atividades industriais e agropecuárias, queima de combustíveis fósseis e o desflorestamento, são os principais agentes a contribuir para o aumento de GEE. Esse aumento na temperatura global tem efeitos na atmosfera e no solo. Através da modificação no regime de precipitação pluviométrica, contribui com o aumento da erosão e assoreamento de rios e lagos.

Embora grande parte dos trópicos seja climaticamente adequada para a palma de óleo, há uma disponibilidade relativamente baixa de terra para plantio em todo o mundo, devido a outros usos das terras e as restrições ao plantio em áreas com alto estoque de carbono (Pirker *et al.*, 2016). Nesse sentido, existem alternativas de aproveitar áreas já degradadas na Amazônia, buscando reestabelecer a cobertura vegetal em uma pastagem abandonada, por exemplo. Destaca-se a implantação de sistemas que sejam viáveis para o produtor, mas que também apresentem ganhos ambientais. Esses sistemas são úteis para recuperar áreas consideráveis na Amazônia que estão ociosas, sem uso ou sem perspectiva de uso por um longo período. Sob essa ótica, não é mais necessário degradar a floresta para um melhor desenvolvimento econômico.

Dentre os vários sistemas disponíveis para reintegrar essas áreas subutilizadas ao processo produtivo do produtor rural, destaca-se o sistema de monocultivo de Palma de óleo. O monocultivo de palma de óleo tem obtido grande destaque nas últimas décadas, de 1998 a 2009, o consumo mundial saltou de 17 para 45 milhões de toneladas, representando hoje, pouco mais de 1/3 do total de óleos consumidos no mundo (Becker, 2010). A palma de óleo tem produtividade a partir do terceiro ano (6-8 t/ha), com cerca de oito anos, tem seu o ápice de produtividade, atingindo em média, 25 t/ha e mantém essa produtividade até aproximadamente os 17 anos. Tem vida útil de aproximadamente 25 anos (Cruz, 2016), o que representa uma vantagem por se tratar de um sistema que se mantém produtivo por um longo período. Culturas que são cultivadas por longo período ajudam a recuperar o solo.

O óleo de palma tem mercado internacional expressivo, adicionalmente a essas características, o interesse do plantio de palma de óleo na Amazônia está relacionado às condições climáticas favoráveis em boa parte do bioma Amazônico. Por se tratar de um plantio perene, com colheita de frutos manual, emprega significativa mão de obra humana, fator que favorece a geração de emprego e renda no campo. De acordo com o relatório da *International Energy Agency* (IEA), os custos da matéria-prima estão elevando os preços dos biocombustíveis, causando um declínio estimado de 3% na demanda global em 2021. Vários fatores estão causando esse aumento de preço, incluindo o crescimento da demanda por soja e milho na China, impactos climáticos, aumento dos custos de envio e, em menor grau, a própria demanda de biocombustíveis. Em resposta, os governos reduziram os mandatos de mistura na Argentina, Colômbia, Indonésia e Brasil, reduzindo a demanda por biocombustíveis. Esse declínio estimado sobre a perspectiva de altos custos de matérias-primas e biocombustíveis, representa um risco para as políticas de apoio aos biocombustíveis já em discussão nos Estados Unidos, Europa, Índia, China e Indonésia.

A palma de óleo (*Elaeis guineensis*) é uma monocotiledônea da família Arecaceae. Possui 3 tipos principais, dura, psifera e tenera (Gomes Junior, 2010). A cultivar mais disseminada no Brasil é a tenera, pois dentre todos os tipos, é a que possui maior taxa de extração de óleo do fruto. Já a palma de óleo (*Elaeis oleífera*), tem origem amazônica, e possui como principais características de interesse agrônomo a resistência ao amarelecimento fatal (AF) (Gomes Junior, 2010). A palma de óleo estudada nesta tese é um cruzamento entre as espécies *Elaeis guineensis* Jacq e *Elaeis oleífera* (Kunth) Cortés chamado de híbrido interespecífico, doravante representada pela sigla HIE. Apesar do HIE possuir taxa de extração de óleo do fruto menor que o tenera, ele possui outras vantagens comerciais, a exemplo o tamanho da estirpe que fica menor, facilitando o manejo da planta; maior resistência à pragas e doenças, entre elas o AF; e maior qualidade do óleo extraído do fruto (Meunier; Boutin, 1975; OOI *et al.*, 1981). O HIE é então, uma alternativa para o cenário amazônico e, portanto, é importante prever a sua produção. Esse entendimento é de interesse tanto do produtor quanto dos tomadores de decisão, pois auxilia no posicionamento de

maneira mais efetiva a respeito das políticas que cada país tem sobre a produção de biocombustíveis. Uma vez que a produção da palma de óleo é fundamental para este setor.

Neste trabalho é utilizada a modelagem para descrever o comportamento desse plantio, e para estimar a sua produção. O monocultivo de palma de óleo será simulado através de um modelo da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias) chamado ECOSMOS. O ECOSMOS é um modelo de crescimento biofísico baseado no Agro-IBIS (Foley *et al.*, 1996; Kucharik; Brye, 2003). Pesquisadores da EMBRAPA reescreveram o Agro-IBIS nas linguagens R e C++, e vêm implementando as culturas mais comuns no Brasil. Benezoli *et al.* (2021) adicionaram a palma de óleo ao modelo, utilizando um conjunto de parâmetros que simularam bem a produção de uma palma de óleo africana. Em seu trabalho foi observado que o modelo simulou com acurácia o saldo de radiação (R_n), o fluxo de calor latente (LE) e a troca líquida de CO_2 (NEE), porém, não foi capaz de simular o fluxo de calor sensível (H). Também em seu trabalho, foi descrito que o modelo ECOSMOS simulou bem a produção de um plantio de palma de óleo africana entre 12 e 25 anos, mas que superestimou os primeiros anos de produção.

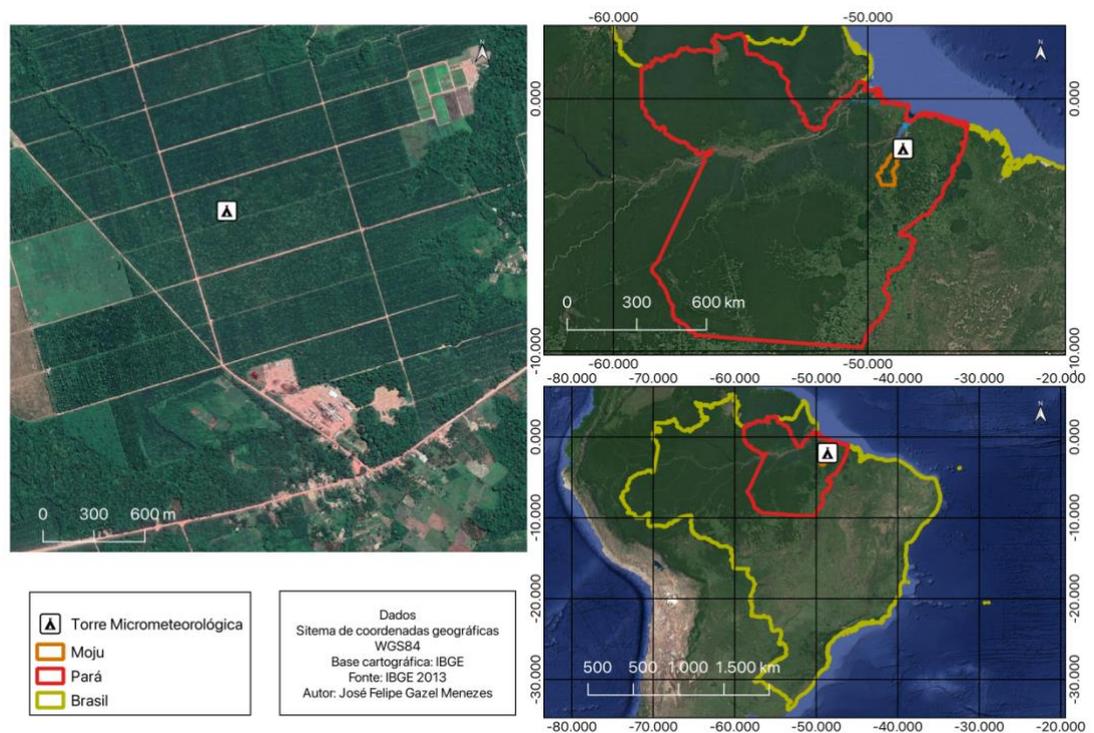
Para avaliação do modelo, serão usados dados de produção de uma empresa tradicional no plantio de palma de óleo. A Marborges é uma das empresas líderes no Brasil na produção de óleo de palma e palmiste, possui cerca de 7,7 mil hectares de palma de óleo híbrida. Dados climáticos de uma torre micrometeorológica instalada nas dependências dessa empresa em meio a um monocultivo de palma de óleo híbrida foram utilizados para alimentar o modelo ECOSMOS com dados de 2014 a 2018, o período anterior a esse intervalo foi simulado usando dados horários de um banco de dados próprio do modelo (Xavier *et al.*, 2022).

2.2. Material e métodos

2.2.1 Área de estudo

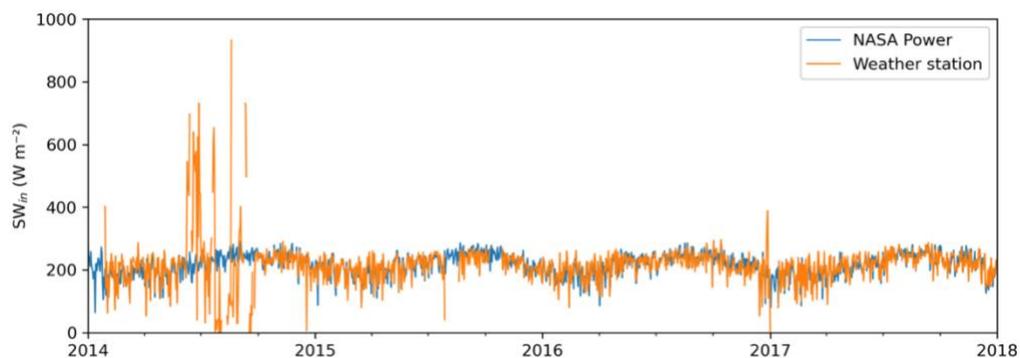
O experimento foi conduzido em plantio comercial do híbrido interespecífico – HIE (*Elaeis guineenses* Jcq. X *Elaeis oleífera* (Kunth) Cortés), de 5 mil hectares com 15 anos de idade na empresa Marborges agroindústria (Moju/PA) (1°59'32.3"S 48°36'26.5"W) (Figura 1). O plantio foi iniciado em 2007, após a implantação da palma de óleo híbrida para mitigar os danos causados pelo amarelecimento fatal. A sede da empresa fica na vila de Bacuriteua no município de Moju, PA-252, km 56 (Pina, 2010). Em Moju, o solo tem classificação Latossolos e solos concrecionários lateríticos (Fapespa, 2015). Já de acordo com Gomes Junior *et al.* (2015), o solo da empresa é predominantemente Latossolo Amarelo Distrófico franco arenoso. A classificação climática de Koppen-Geiger é classificada como af (clima equatorial) (Andrade *et al.*, 2017), com uma precipitação média anual de 2403 mm (ECMWF), distribuída entre os meses de maior precipitação, ocorrendo de janeiro a maio, e menor precipitação de julho a novembro, e uma temperatura média anual de 26,5 °C.

Figure 1- Área de estudo



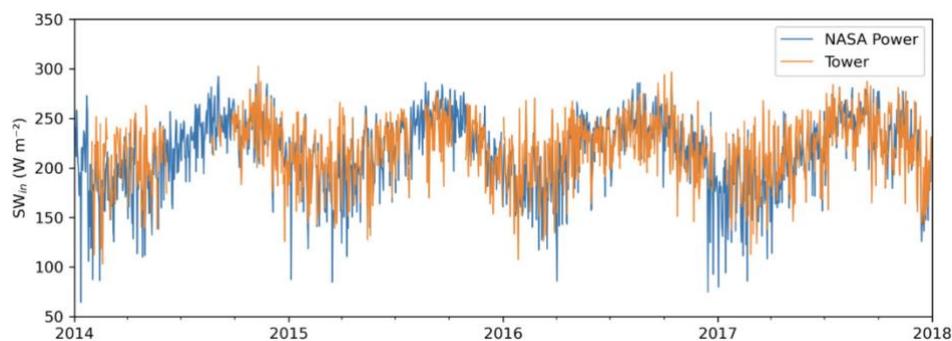
O ECOSMOS recebe como input uma série de dados horários, e não admite falhas na série. Portanto, os dados coletados na torre foram analisados e preenchidos usando dados do era5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) de precipitação, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura do ar e pressão. Já os dados de radiação foram preenchidos utilizando dados do *Nasa Power*. A figura 2, ilustra os dados de radiação em Wm^2 da torre em comparação com os dados estimados pelo satélite.

Figure 2- Comparação entre os dados observados e os dados estimados pelo satélite nasa power.



Mesmo sem os *outliers*, dados com valores significativamente altos e baixos estão presentes na Figura 2, isso ocorre, pois, nesses dias não há registros completos diários, dessa maneira a média de um dia que teve somente registros diurnos é muito alta, e a média dos dias que registraram apenas valores noturnos tende a 0. Portanto, para eliminar esses valores, foi aplicado um filtro que selecionou apenas os dias com as 24 horas de dados em comparação com os dados horários do satélite *Nasa Power* (Figura 3)

Figure 3- Comparação dos dias com 24 horas de dados observados e dados estimados pelo satélite nasa power.



Com os dados organizados e prontos para serem integrados no modelo ECOSMOS, foram realizadas rodadas de teste com o modelo. Inicialmente foram feitas rodadas com o modelo calibrado para a palma de óleo africana para verificação dos resultados.

Figure 4- Torre micrometeorologica instalada na C22.



Fonte: Julie Andrews de França e Silva (2018).

2.2.2 Modelo ECOSMOS

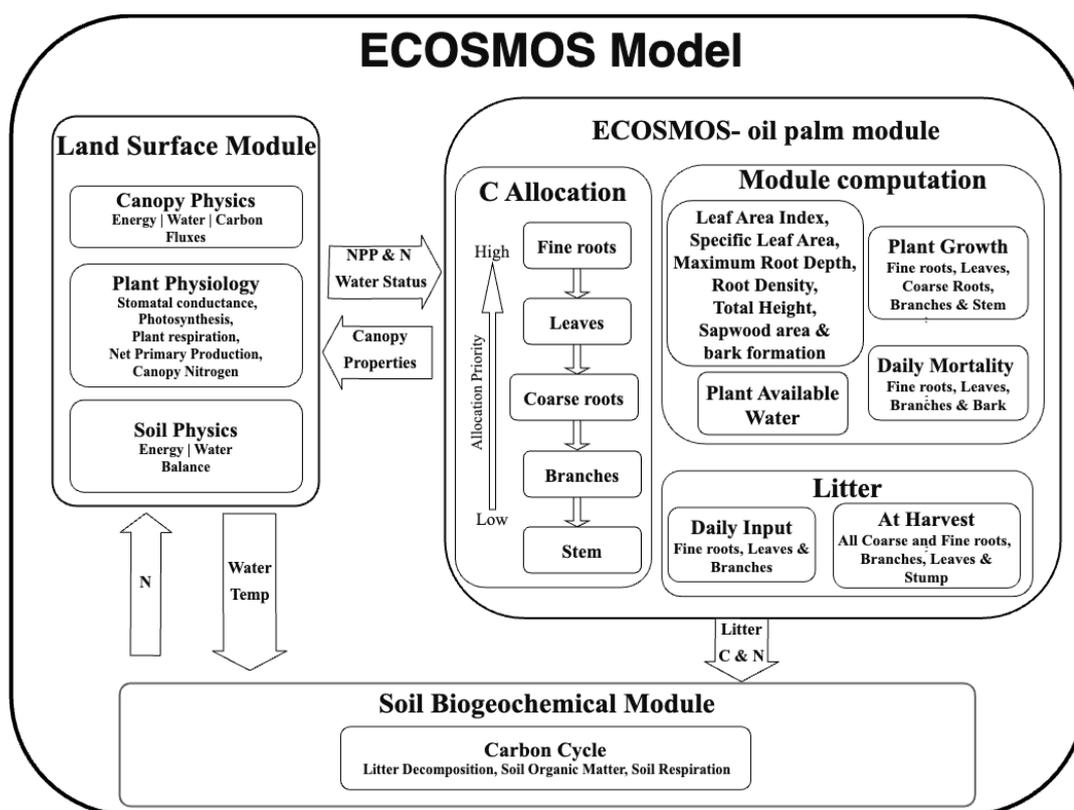
O ECOSMOS é um modelo biofísico baseado no Agro-IBIS (Foley *et al.*, 1996; Kucharik; Brye, 2003). Pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), reescreveram o Agro-IBIS nas linguagens R e C++, e vêm implantando as culturas mais comuns no Brasil. Uma das principais mudanças na estrutura do ECOSMOS é que os desenvolvedores podem adicionar novos Crops-PFT (tipo funcional da planta) como módulo em R, e esse módulo de cultivo está vinculado às sub-rotinas do modelo central que resolve os processos biofísicos, como a fotossíntese, balanço de energia e dinâmica da água no solo (Benezoli, 2021).

A palma de óleo possui algumas particularidades, é uma cultura perene e que durante cerca 25 anos tem produção de cachos e frutos. Durante a fase de crescimento vegetativo, a planta aloca NPP (Produção Primária Líquida) apenas para os reservatórios de crescimento vegetativo. Assim como no campo, no

ECOSMOS a planta está em estágio vegetativo nos primeiros 3 anos de vida. Começa a produzir a partir de 3 anos atingindo pico de produção com de cerca de 7 anos de idade. Nesse período, a planta já em estágio maduro produz até cerca de 25 a 30 anos de idade. (Barcelos *et al.*, 1987).

Com base na estrutura de subdossel criada por Fan *et al.* (2015) foram criados esquemas de fenologia e alocação de carbono. Os fitômeros possuem evolução fenológica simultânea, porém independente. Os mais novos e menores se sobrepõem aos fitômeros maiores e mais velhos em uma ordem sequencial determinada pelo filocrono (tempo térmico necessário para iniciar um fitômero). Os fitômeros compartilham um sistema radicular comum e um único caule, apesar de terem evoluções fenológicas individuais (Fan *et al.*, 2015).

Figure 5- Esquema do modelo ECOSMOS.



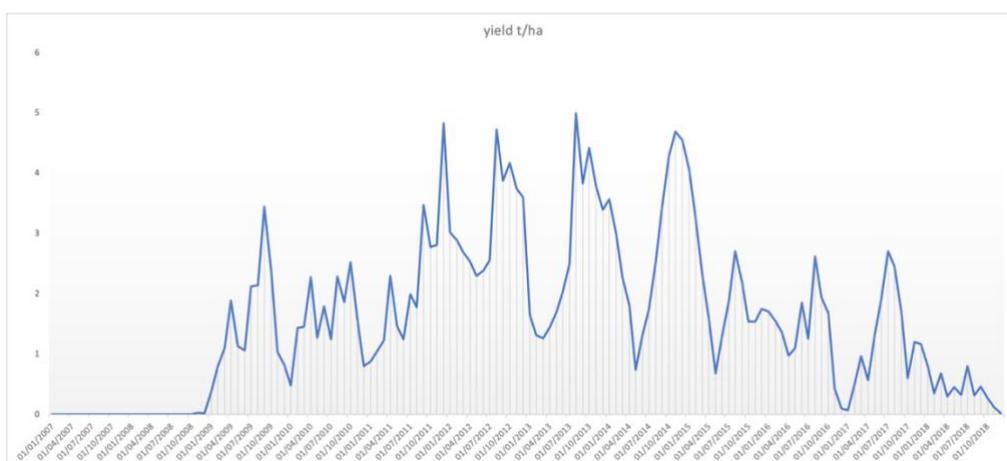
O modelo divide o ciclo de vida de cada fitômero em cinco estágios: (i) iniciação da lança foliar (folha fechada); (ii) abertura das folhas; (iii) maturidade foliar; (iv) enchimento do cacho de frutos; e (v) senescência foliar. As lanças

foliares não participam da fotossíntese durante o primeiro estágio, portanto não tem contribuição para o LAI (índice de área foliar). A planta move gradualmente o carbono do estoque utilizado nas folhas para o estoque de folhas aberto e fotossinteticamente ativo no segundo estágio. Durante o terceiro estágio, a planta atinge a maturidade. Na quarta etapa, a planta aloca o NPP para o enchimento do fruto até o amadurecimento do fruto, quando então está pronto para a colheita. Para fins de manejo, a colheita normalmente ocorre uma vez por mês. A senescência é iniciada pela folha no final, o que impede que o carbono seja alocado para ela. Assim que a folha entra na fase final da senescência, ela é podada.

2.3. Resultados e discussões

A palma de óleo apresenta produção de cerca de 4 a 5 toneladas de óleo por hectare ao ano (Chia *et al.*, 2009). A planta começa a produzir a partir do terceiro ano, mas atinge um pico de produção entre o quinto e sexto ano, que dura até cerca de 17 anos (Barcelos *et al.*, 1987). O ECOSMOS inicialmente apresentava produção da palma a partir do quinto ano de plantio (Figura 6). De acordo com a literatura, o pico de produção da palma ocorre até o décimo sétimo ano, porém o modelo mostrava significativa diminuição da produção a partir do nono ano.

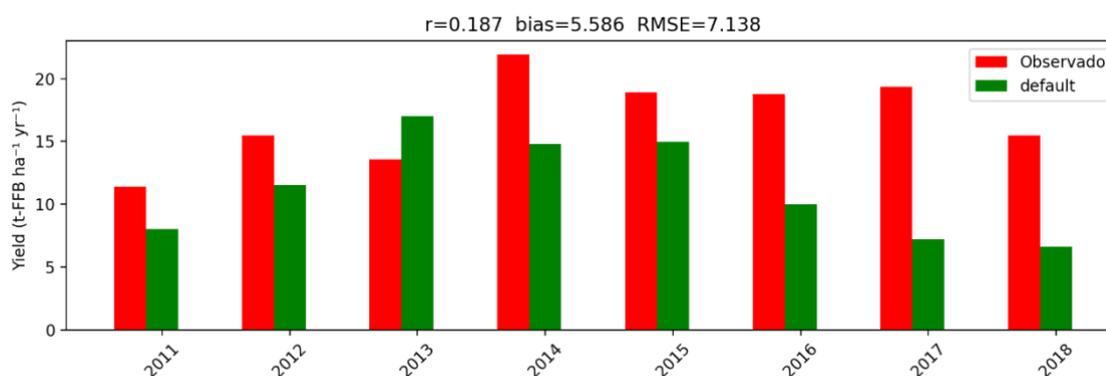
Figure 6- Produção de óleo de palma em t/ha estimada pelo modelo ECOSMOS.



Ao compararmos a simulação inicial com os dados da Marborges em uma escala anual, percebemos que ainda era observada redução a partir do quinto

ano de simulação, e que a diferença entre a produção simulada e observada era significativa (Figura 7). O modelo tem a saída em g-C ha^{-1} (gramas de carbono por hectare) e para ser expressa como tonelada de óleo de palma por hectare, sofre uma transformação descrita por Corley e Tinker (2008).

Figure 7- Comparação entre a produção de óleo de palma em tonelada de cachos de fruto fresco por ha/ano (observado e simulado) na versão default.

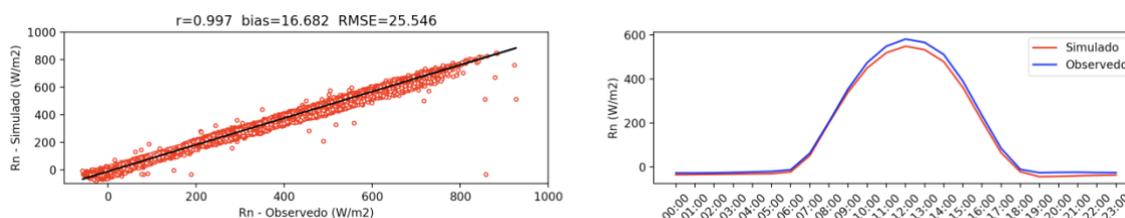


É possível observar ainda que, estatisticamente, as métricas calculadas para as simulações iniciais não estavam boas. Foram utilizadas 3 métricas para avaliar a calibração do modelo para palma de óleo com HIE. A correlação de Pearson (r), que mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas. É um índice adimensional com valores situados ente -1,0 e 1.0 portanto, é um índice que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. O bias, é uma métrica estatística que mostra o vés entre um dado observado e um dado simulado, refere-se ao erro sistemático ou tendência de um modelo preditivo de superestimar ou subestimar, consistentemente, os valores verdadeiros da variável de destino em todo o conjunto de dados. Em outras palavras, é a diferença entre a previsão média do modelo e o valor verdadeiro. O RMSE, é uma métrica comumente usada para medir a precisão de um modelo preditivo. Ele quantifica a diferença entre os valores previstos e os valores reais (observados) em um conjunto de dados. O RMSE basicamente calcula a média das diferenças quadradas entre os valores previstos e reais e, em seguida, obtém a raiz quadrada para convertê-la de volta à unidade original da variável de destino. Valores de RMSE mais baixos indicam melhor desempenho do modelo, pois significa que as previsões do modelo estão mais próximas dos valores reais.

Resultados e discussões

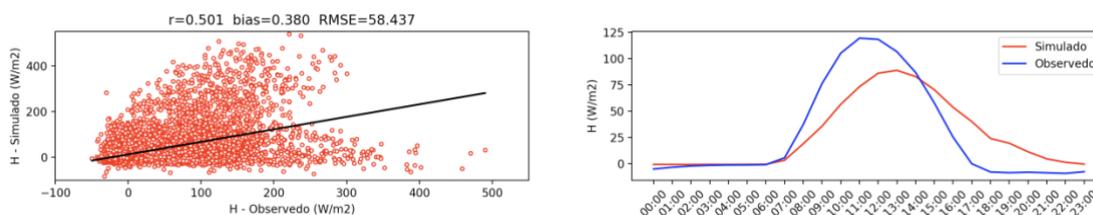
O Modelo ECOSMOS simulou bem o saldo radiação, o fluxo de calor latente e a troca de CO₂ com o ecossistema (NEE). Esse resultado era esperado uma vez que Benezoli *et al.* (2021) observou o mesmo comportamento em seu trabalho.

Figure 8- Comparação de Rn (Observado e Simulado).



O gráfico acima (figura 8), ilustra a comparação entre os valores de saldo radiação (Rn) estimados pelo modelo (vermelho) e observados (azul) em watts por metro quadrado (Wm²). Os dados observados foram coletados através do instrumento CNR4, Kipp & Zonen, comercializado pela Campbell Scientific. O CNR4 é composto por um par de piranômetros (onda curta), par de pirgeômetros (onda longa) e dois sensores de temperatura (Pt100 e termistor). O saldo radiação, portanto, é feito através de uma composição de dados aferidos por esses sensores presentes no equipamento em alturas entre 18 e 21 metros com frequência de amostragem de 60 segundos e armazenados em uma base de dados de 30 minutos. Uma vez que a frequência dos dados observados é de 30 minutos, e dos dados de saída simulados pelo ECOSMOS são horários, os dados observados foram padronizados pra escala horária para efeito de comparação. Foi então calculado um dia médio utilizando valores horários dos dados observados e simulados de Rn. Os resultados apresentados de Rn mostram que os valores estimados pelo modelo simulam muito bem os dados observados, tendo uma pequena superestimativa ao longo do período de maior incidência de radiação diária.

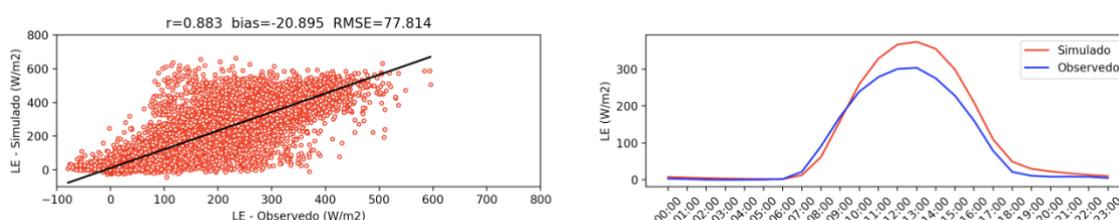
Figure 9- Comparação do fluxo de calor sensível (Observado e Simulado).



O gráfico acima (figura 9), ilustra a comparação entre os dados de calor sensível (H) simulados pelo modelo ECOSMOS e os dados observados através da torre micrometeorológica instalada nas dependências da Marborges. É possível observar que o modelo não prediz com acurácia os dados observados, há um distanciamento logo nas primeiras horas de radiação. Tal comportamento é esperado de acordo com os resultados obtidos por Benezoli *et al.* (2021), que observou que o modelo também não representou bem os dados de calor sensível, utilizando o ECOSMOS calibrado para a palma de óleo africana (tenera).

Em relação ao fluxo de calor latente (Le), o modelo representou de maneira satisfatória a variável, porém no período diário com pico de radiação, entre os horários de 10 horas e 17 horas, o modelo superestimou quando comparado com os dados observados (figura 10). No fluxo de calor latente, é possível observar que o modelo superestima os valores observados, ao contrário do que foi observado nas outras duas variáveis de radiação.

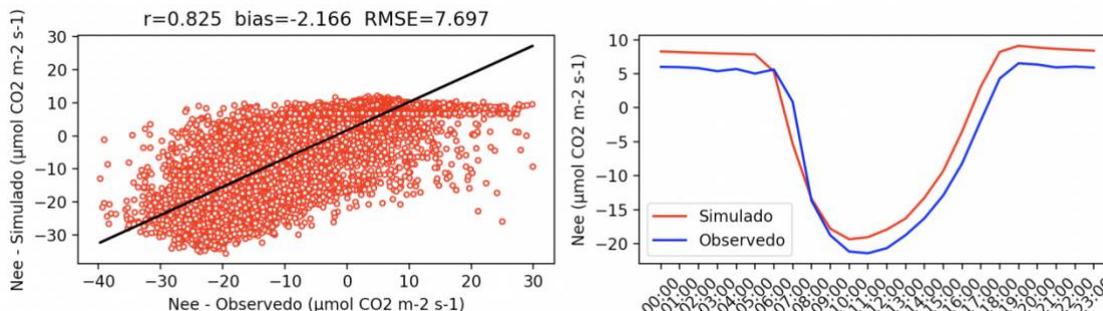
Figure 10- Comparação entre o fluxo de calor latente (Observado e Simulado).



De acordo com Wohlfarht *et al.* (2005), a definição do ambiente em sumidouro ou fonte de CO₂ é realizada pela avaliação da assimilação de CO₂ (fotossíntese) e emissão de CO₂ (respiração) por meio do balanço de CO₂ do Ecossistema (NEE). A palma de óleo nunca para de respirar, no entanto, durante o período diurno a fotossíntese é muito maior, se sobrepondo aos valores de respiração da planta. Já no período noturno a planta deixa de realizar

fotossíntese e, portanto, é observado somente os valores de respiração da planta.

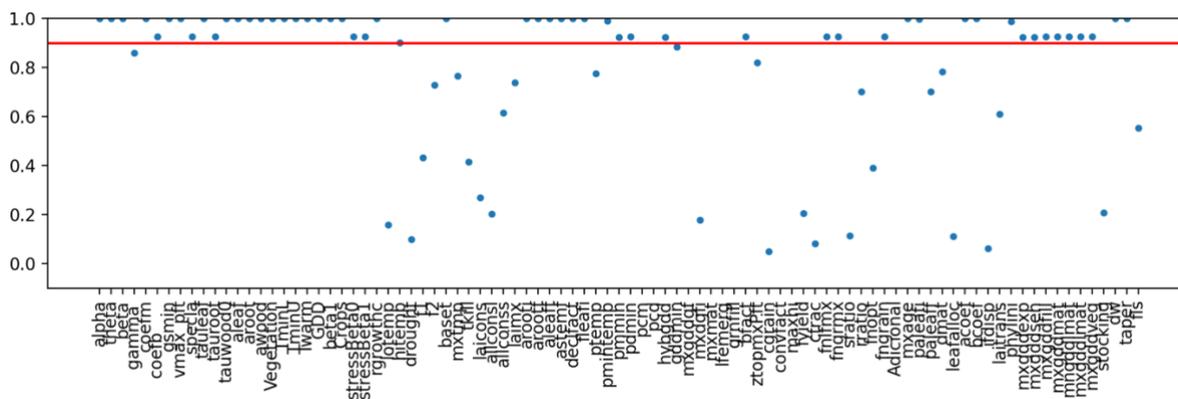
Figure 11- Comparação entre o NEE (Observado e Simulado).



O Nee foi um dado simulado com acurácia pelo ECOSMOS. A figura 11 ilustra que, no período diurno, os valores negativos indicam que a planta está fotosintetizando e, assim, assimilando carbono, enquanto valores positivos no período noturno, indicam a predominância do processo respiratório da planta e indicando liberação de CO₂ para o ecossistema. Destaca-se que o principal erro na simulação a partir das 10 horas do dia médio, e durante o período noturno. O que indica que o modelo representa melhor a respiração diurna da palma de óleo.

No entanto, diferente do observado por Benezoli et al., 2021, o ECOSMOS não simulava bem a produção de palma de óleo com HIE (Figura 7). Portanto, para atingir o objetivo desse trabalho, o modelo ECOSMOS precisou ser recalibrado com intuito de representar melhor a produção de palma de óleo com HIE. A calibração ocorreu da seguinte forma, foram realizadas cerca de 3000 simulações variando aleatoriamente os parâmetros da planta e parâmetros globais do modelo ECOSMOS. A partir dessas simulações, foi calculada a significância de cada parâmetro da planta através de uma análise de sensibilidade dos *outputs* de cada simulação (Figura 12).

Figure 12- Análise de sensibilidade dos parâmetros da planta.



Agora, possuindo os parâmetros da planta no modelo mais significativos para a produção, foram realizadas mais rodadas e calculadas as métricas de erro entre os dados observados de produção e os dados simulados pelo ECOSMOS. A tabela de parâmetro da planta é apresentada na tabela 1, mostrando os valores *defaults* e os valores da simulação com o menor erro quadrático médio (rmse) entre os dados observados e simulados de produção. O rmse é uma métrica utilizada para avaliar valores previstos por simulações em comparação com dados observados. Quanto mais próximo de 0, maior a similaridade entre as amostras observadas e simuladas.

Table 1- Parâmetros da planta (default & calibrated)

(continua)

	Default	Calibrated		Default	Calibrated
Canopy	oilpalm1	oilpalm1	Canopy	oilpalm1	oilpalm1
alpha	0.08	0.07	pmmin	11.97	11.00
theta	0.95	0.94	pdmin	1.00	1.00
beta	0.96	0.94	pcm	0.00	0.00
gamma	0.02	0.02	pcd	0.00	0.00

(continuação)

	Default	Calibrated		Default	Calibrated
coefm	10.43	10.40	hybgdd	65000.00	65000.00
coefb	0.01	0.01	gddmin	51.52	50.00
gsmin	0.00	0.00	mxgddgf	0.00	0.00
vmax_pft	0.00	0.00	mxdgfi	906.04	810.00
specla	13.00	13.00	mxmat	0.00	0.00
tauleaf	0.00	0.00	lfemerg	0.00	0.00
tauroot	1108.00	1108.00	grnfill	0.00	0.00
tauwood0	0.00	0.00	bfact	-4.00	-4.00
aleaf	0.00	0.00	ztopmxPft	25.80	25.00
aroot	0.00	0.00	cgrain	0.47	0.45
awood	0.00	0.00	convfact	0.00	0.00
Vegetation	0.00	0.00	maxhi	0.00	0.00
TminL	0.00	0.00	fyield	1.04	0.90
TminU	0.00	0.00	cfrac	0.45	0.45
Twarm	0.00	0.00	fnlfix	0.02	0.02
GDD	0.00	0.00	fngmx	0.02	0.02
beta1	0.98	0.98	sratio	0.02	0.02
Crops	0.00	0.00	rratio	0.74	0.73
stressBeta0	-34.50	-34.50	fnopt	0.05	0.03
stressBeta1	555.00	555.00	fngrain	0.01	0.01
rgrowthc	0.00	0.00	Adicional	0.00	0.00
lotemp	9.35	8.20	mxage	36.42	35.00
hitemp	41.31	40.30	paleafi	0.19	0.18

(conclusão)

	Default	Calibrated		Default	Calibrated
drought	1.04	1.02	paleaff	0.29	0.28
f1	0.51	0.50	dmat	0.56	0.54
f2	0.38	0.36	leafalloc	0.56	0.54
baset	289.97	288.16	acoef	0.12	0.12
mxtmp	25.27	25.00	bcoef	0.04	0.04
tkill	269.33	268.16	ifdisp	0.36	0.35
laicons	5.15	5.00	laitrans	0.18	0.18
allconsl	6.05	5.00	phylini	132.37	130.00
allconss	2.37	2.00	mxgddexp	1550.00	1550.00
laimx	7.62	6.40	mxgddsen	8217.00	8217.00
arooti	0.28	0.28	mxgddfll	3800.00	3800.00
arootf	0.10	0.10	mxgddmat	6033.00	6033.00
aleaff	0.00	0.00	mngddlmat	1118.00	1118.00
astemf	0.00	0.00	mxgddlmat	6000.00	6000.00
declfact	0.00	0.00	mxgddveg	7500.00	7500.00
fleafi	0.00	0.00	stocking	148.49	140.00
ptemp	284.50	283.16	dw	101.42	100.00
pmintemp	280.59	279.16	taper	63.01	50.00
			fls	0.17	0.15

Outra observação nas simulações, era que mesmo com as métricas estatísticas melhorando entre observação e simulação, ainda era observada significativa redução no valor do índice de área foliar durante as simulações, o que levava, conseqüentemente, à redução na produção do modelo. Após investigações, foi feita uma modificação no bperm, que é um parâmetro de

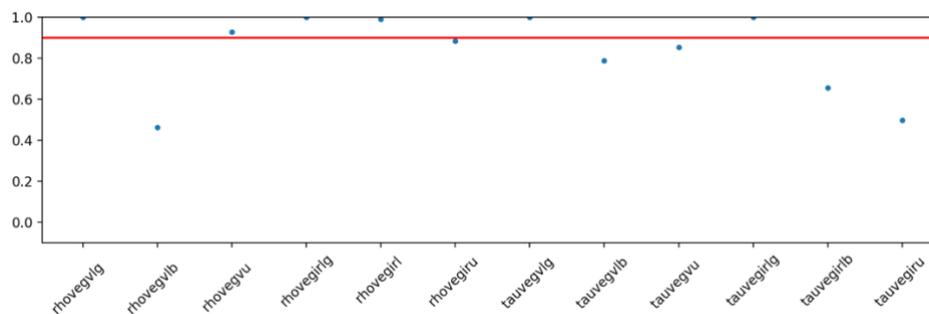
drenagem de água no solo que varia de 0.00 (completamente impermeável) a 1.00 (completamente permeável).

Table 2- Condutividade hídrica do solo no modelo ECOSMOS.

Bperm	
Default	Calibrated
0.4	0.01
0.3	0.01
0.2	0.01
0.1	0.01
0.1	0.01
0.1	0.01

Outra análise de sensibilidade foi realizada para verificar quais parâmetros de radiação incidente tem mais efeito na produção (Figura 13). Para isso, foram realizadas 100 rodadas, variando com números aleatórios dentro de um range máximo e mínimo para cada parâmetro de radiação incidente estão disponíveis no modelo. São esses parâmetros rhovegvlg; rhovegyvb; rhovegvu; rhovegirlg; rhovegirlb; rhovegiru; tauvegvlg; tauvegvlb; tauvegvu; tauvegirlg; tauvegirlb; tauvegiru. Esses parâmetros estão relacionados com transmitância e a refletância de folhas verdes e marrons da palma de óleo. A refletância é quantidade de luz que é refletida de uma superfície. Isto é, igual à razão entre a potência refletida e a potência incidente quando a luz é emitida sobre uma superfície. Já a transmitância é a quantidade de luz que é transmitida de uma superfície. É igual à razão entre a potência transmitida e a potência incidente quando a luz é emitida sobre uma superfície.

Figure 13- Análise de sensibilidade dos parâmetros de radiação incidente do modelo ECOSMOS.



Após análise de sensibilidade, foi observado que os parâmetros de radiação incidente que mais afetam na produção são: rho veglg, rho vegvu rho vegirlg, rho vegirl, tau vegvlg e tau vegirlg. A melhor simulação foi selecionada de acordo com a tabela.

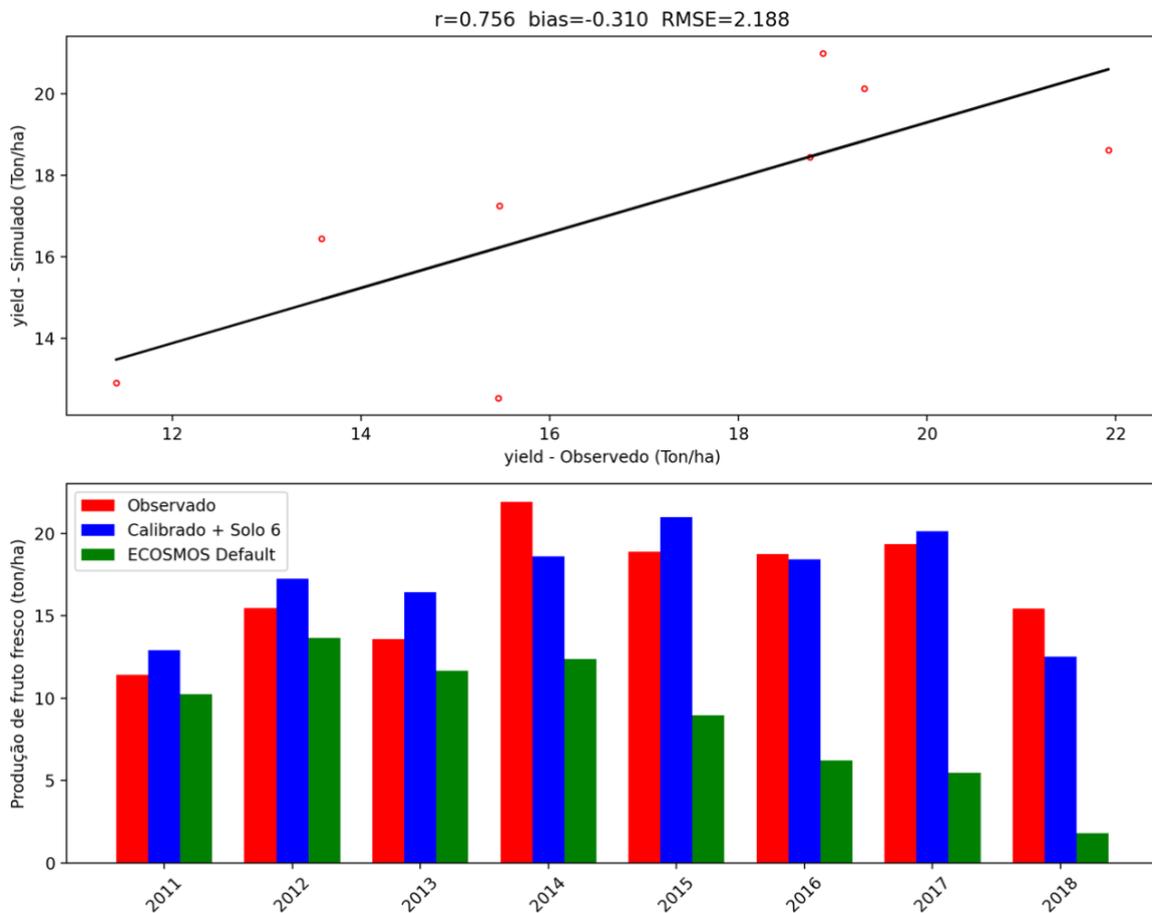
Table 3- Parâmetros de radiação incidente no modelo ECOSMOS.

	Default	Calibrated
rho veglg	0.09	0.06
rho vegvu	0.10	0.09
rho vegirlg	0.45	0.45
rho vegirl	0.58	0.53
tau vegvlg	0.05	0.02
tau vegirlg	0.25	0.28

Após calibração do solo e dos parâmetros da planta, no perfil de solo e nos parâmetros globais de radiação incidente, o modelo ECOSMOS foi capaz de reproduzir com maior acurácia a produção de palma de óleo com HIE. A Figura

14 ilustra a melhora na previsão que é comprovada pelas métricas estatísticas utilizadas. A correlação entre os dados que era de 0.187 passou a ser 0.756. O bias da simulação que era de 5.586 foi reduzido para -0.310. E o erro médio quadrático que era de 7.138 foi reduzido para 2.188.

Figure 14- Calibração para HIE do modelo ECOSMOS.



2.4. Conclusão

Em conclusão, esta tese explora a calibração do modelo ECOSMOS para a palma de óleo com híbrido interespecífico, visando melhorar com sua precisão e confiabilidade preditiva para a estimativa de produção do modelo. Através do desenvolvimento de uma estrutura de calibração e da implementação de técnicas como análises de sensibilidades, demonstramos com sucesso, a melhoria do seu desempenho.

Essas melhorias, ressaltaram o papel da calibração na mitigação de vieses, melhorando a precisão geral do modelo e aumentando sua adequação para aplicações. O ECOSMOS atualmente pode ser considerado um modelo mais abrangente, pois passa a integrar mais um tipo de palmeira que é capaz de simular. Desta maneira, é uma ferramenta que pode destacar-se no auxílio de gestores e tomadores de decisões em grandes empresas e em pequenas propriedades.

Os estudos e avanços da modelagem são constantes e buscam cada dia que passa, reproduzir com maior acurácia, fenômenos e comportamentos observados. Os avanços na modelagem da palma de óleo utilizando o modelo ECOSMOS são significativos, sobretudo, no cenário Amazônico. Cenário este que é fundamental no contexto da palma de óleo no Brasil, por se tratar do maior produtor de palma de óleo do país. A utilização da modelagem pode ainda prestar auxílio no cenário amazônico pois pode ser uma ferramenta que contribui para a destinação de plantios de palma de óleo em áreas degradadas e abandonadas, visando recuperá-las com um monocultivo comercialmente atrativo.

Referências

AMAZÔNIA Geo. **Perspectivas do meio ambiente na Amazônia**. Lima-Peru: PnUma/otca/centro de Pesquisa da Universidad del Pacifico, 2008.

ANDRADE, V. M. S.de. *et al.* **Considerações sobre clima e aspectos edafoclimáticos da mesorregião Nordeste paraense**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2017. cap.2, p.59-96.

BARCELOS, E. *et al.* **Dendê: informações básicas para o seu cultivo**. Brasília,DF: 1987.

- BECKER, B. K. Recuperação de áreas desflorestadas da Amazônia: será pertinente o cultivo da palma de óleo (Dendê)? **Confins. Revue Franco-Brésilienne de Géographie/Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 10, 2010. <https://doi.org/10.4000/confins.6609>.
- BENEZOLI, V. H. *et al.* Modeling oil palm crop for Brazilian climate conditions. **Agricultural Systems**, v. 190, p. 103130, 2021.
- BROWN, J. Why are there so many species in the tropics? **Journal of Biogeography**, v. 41, p. 8-22, jan. 2014.
- CHIA, G. S. *et al.* Repetibilidade da produção de cachos de híbridos interespecíficos entre o caiaué e o dendezeiro. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 2, p. 249–254, 2009.
- CORLETT, R. The impacts of climate change in the tropics. **State of the Tropics**, v. 2, p. 155–160, 2014.
- CORLEY, R. H. V.; TINKER, P. B. H. **The oil palm**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- CRUZ, B. A. **Características vegetativas e produção de cachos de híbridos interespecíficos entre o caiaué e o dendezeiro**. 2016. 54 f. Dissertação (Mestrado) - INPA, Manaus, 2016.
- DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens**: processos, causas e estratégias de recuperação. rev. atual. e ampl. Belém, PA, 2011.
- DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. (Documentos, 402).
- FAN, Y.; ROUPSARD, O.; BERNOUX, M.; LE MAIRE, G.; PANFEROV, O.; KOTOWSKA, M. M.; KNOHL, A. A sub-canopy structure for simulating oil palm in the Community Land Model (CLM-Palm): phenology, allocation and yield. **Geoscientific Model Development**, v.8, n.11, p.3785-3800, 2015.
- FOLEY, J. A. *et al.* An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical cycles**, v. 10, n. 4, p. 603–628, 1996.
- GALLERY, R. E. Ecology of tropical rain forests. *In*: MONSON, R. K. (ed.). **Ecology and the environment**. New York, NY: Springer, 2014. p. 247–272.
- GOMES JUNIOR, R. A. **Bases técnicas para a cultura da palma de óleo integrado na unidade produtiva da agricultura familiar**. Belém, Pa: Embrapa Amazônia Oriental, 2010.

GOMES JUNIOR, R. A. *et al.* Características vegetativas na fase juvenil de híbridos interespecíficos de caiaué com dendezeiro. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 1, p. 27–35, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 2010**. 2010.

JONES, J. W. *et al.* Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240–254, 1 jul. 2017.

KUCHARIK, C. J.; BRYE, K. R. Integrated Biosphere Simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of nitrogen fertilizer. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, n. 1, p. 247–268, 2003.

MEUNIER, J.; BOUTIN, D. L'Elaeis melanococca et l'hybride Elaeis melanococca x Elaeis guineensis. premières données. **Oléagineux**, v.30, n.1, p. 5-8,1975.

MIRANDA, E. E.de; MARTINHO, P. R. R.; CARVALHO, C. A.de. **Nota técnica sobre queimadas, desmatamentos e imóveis rurais no bioma Amazônia em 2019**. Belém: Embrapa Territorial-Nota Técnica/Nota Científica, 2020. p.1-6.

MORTON, S.; HILL, R. What is biodiversity, and why is it important? *In*: MORTON, Steve; LONSDALE, Mark; SHEPPARD, Andy (ed.). **Biodiversity: science and solutions for Australia**, 2015. p. 1–12.

OLIVEIRA, A. U. de. **BR-163 Cuiabá-Santarém: geopolítica, grilagem, violência e mundialização**. Amazônia revelada: os descaminhos ao longo da BR-163. Brasília, DF: CNPq, 2005. p. 67–183.

PINA, A. J. DE A. Experiências na produção para a cultura de palma de óleo na Amazônia: relato de experiências da Marborges Agroindústria SA (Moju-Pará). RAMALHO FILHO, A.; MOTTA, PEF da; FREITAS, PL de. 2010. p. 189–204.

PIRKER, J.; MOSNIER, A.; KRAXNER, F.; HAVLÍK, P.; OBERSTEINER, M. What are the limits to oil palm expansion?. **Global Environmental Change**, 40, 73-81, 2016.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v.42, n. 16, p. 8390– 8404, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>

CAPÍTULO 3 ADEQUABILIDADE CLIMÁTICA DA PALMA DE ÓLEO NO ESTADO DO PARÁ EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.

Resumo

A palma de óleo é uma alternativa viável tanto para o produtor rural em pequena escala quanto para a agroindústria na Amazônia, devido ao alto valor comercial

e adequabilidade na região. Este capítulo tem por objetivo avaliar os impactos que a palma de palma de óleo pode vir sofrer com as mudanças climáticas. Um modelo de distribuição de espécies foi criado para avaliar a adequabilidade climática da palma de óleo no estado do Pará atualmente e em cenários de mudanças climáticas fornecidos pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Utilizando dados de ocorrência de palma de óleo atuais, foram desenvolvidos cenários de acordo com os *Shared Socio-economic Pathways* (SSPs) SSP2 4.5 e SSP5 8.5 para o estado do Pará. Observamos que os cenários mostram redução da adequabilidade climática da palma de óleo em praticamente todo o estado do Pará até o final do século.

Palavras-chave: Modelagem; Amazônia Oriental; cenários futuros.

Abstract

Oil palm is a viable alternative for both small-scale rural producers and agroindustry in the Amazon, due to its high commercial value and suitability in the region. This chapter aims to assess the impacts that oil palm may suffer from climate change. A species distribution model was created to assess the climate suitability of oil palm in the state of Pará currently and in climate change scenarios provided by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Using current oil palm occurrence data, scenarios were developed in accordance with the Shared Socio-economic Pathways (SSPs) SSP2 4.5 and SSP5 8.5 for the state of Pará. We observed that the scenarios show reduced climate suitability of oil palm in practically the entire state of Pará by the end of the century.

Keywords: Modeling; Eastern Amazon; future scenarios;

3.1. Introdução

O globo experimenta diversas mudanças ao longo da sua história. A atmosfera, por estar inserida como parte fundamental para manutenção da vida terrestre não seria diferente. Em relatório recente da *Nacional Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) é exposto que a temperatura média da superfície da terra em 2021 (empatada com a de 2018) é o sexto ano mais quente registrado na história do monitoramento global de mudanças climáticas do órgão, que realiza o monitoramento desde 1880. A temperatura da superfície média global já é cerca de 1,1 °C maior que a média observada durante o final do século 19 (início da revolução industrial). De acordo com o mesmo relatório, 8 dos 10 anos mais quentes registrados na história aconteceram na última década. Portanto, não resta dúvida que um dos maiores desafios pela frente é buscar a mitigação e o combate às mudanças climáticas.

As mudanças climáticas ocorrem devido ao acúmulo de gases do efeito estufa (da sigla em inglês GEE) na atmosfera. Tais gases estão presentes de maneira natural na atmosfera, no entanto, com a queima de combustíveis fósseis e a substituição da cobertura vegetal do planeta, esses gases têm aumentado sua concentração na atmosfera terrestre. A radiação emitida pelo sol possui um comprimento de onda que atravessa a atmosfera terrestre até atingir o solo, é chamada de radiação de onda curta. Já a radiação terrestre, conhecida como radiação de onda longa é emitida em direção ao espaço. No entanto, como precisa atravessar a atmosfera e possui um comprimento de onda diferente da radiação solar, é refletida de volta para a terra pelos GEE, e assim aprisionam a radiação na atmosfera impedindo que ela retorne ao espaço. Tal processo aumenta a temperatura da superfície global e tem impactos significativos no funcionamento e na manutenção do sistema terrestre. Diversos são os problemas ao longo do globo, causados pelo aumento de temperatura; Alterações no balanço de radiação, menor precipitação, derretimento de calotas polares, aumento do nível médio do mar etc.

Dentre os diversos problemas relacionados às mudanças climáticas, estão os impactos que os sistemas agrícolas podem sofrer. Algumas culturas agrícolas podem ser beneficiadas com o aumento do dióxido de carbono na

atmosfera. Nas plantas, as mudanças podem causar estresse, alterações no crescimento e na composição nutricional, bem como nas relações mutualísticas e antagonísticas com diversos organismos (Chapin III *et al.*, 2000). Estudos indicam que o aumento de CO₂ atmosférico e de temperatura do ar, tem um efeito direto nas taxas fotossintéticas das plantas e que pode propiciar um aumento na assimilação de carbono que por sua vez, leva a planta a se desenvolver mais (Bordignon, 2016; Ceulemans; Mousseau, 1994). Tais efeitos podem ter efeitos positivos ou negativos dependendo da fisiologia de cada planta, e da quantidade de aumento de temperatura e CO₂ que essas plantas serão expostas.

Os trópicos, de maneira geral, são muito suscetíveis a impactos das mudanças climáticas devido à sua biodiversidade (Corlett, 2014). A região amazônica também presta importante papel na circulação global na América do Sul. Geralmente, a substituição de floresta por outros sistemas com áreas foliares menos densas e raízes menos profundas, apresentam menor evapotranspiração que a floresta, particularmente durante a estação menos chuvosa (Coe; Costa; Soares-Filho, 2009). Também modifica o balanço de radiação local, aumentando o fluxo de calor sensível e diminuindo o fluxo de calor latente. Essas mudanças, em larga escala na floresta, podem alterar a circulação célula de Hadley ou até mesmo do transporte de energia sobre o continente (Werth; Avissar, 2002).

A proposta deste capítulo é entender se o cultivo de palma de óleo é uma proposta viável para a Amazônia frente às eminentes mudanças climáticas. Com o aumento de temperaturas, o risco de seca aumentará, portanto, até 2100, provavelmente três quartos das terras altamente cultiváveis para palma de óleo haverá sumido (Li *et al.*, 2009; Paterson *et al.*, 2015, 2017). Uma perda particularmente severa de terra adequada está prevista para a Tailândia, Colômbia e Nigéria, que são países com significativa produção de óleo de palma, assim como em partes da Indonésia e da Malásia. Além de perdas em áreas cultiváveis devido as mudanças climáticas, há também a necessidade de avaliar como essas mudanças iram impactar em um plantio perene como a palma de óleo. A palma de óleo é um sistema agrícola de longo período produtivo, é comercialmente viável por aproximadamente 25 anos, quando começa apresentar declínio na produção, e as plantas se tornam altas a ponto de

dificultar a colheita o que a torna mais onerosa (Ramos; Veiga; Furlan Júnior, 2006).

Para este fim, utilizamos cenários apresentados no AR6 (*Sixth Assessment Report*) do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), que apresenta vários cenários em relação ao futuro. Estes cenários visam auxiliar aos tomadores de decisões (políticos, líderes, agentes privados e o governo) e ao público geral, uma série de futuros possíveis, com base em diferentes percursos socioeconómicos e políticas climáticas.

O relatório inclui vários cenários, incluindo *Representative Concentration Pathways* (RCPs) e *Shared Socio-economic Pathways* (SSPs). Os RCPs representam diferentes níveis de concentrações de gases do efeito estufa na atmosfera, enquanto os SSPs descrevem diferentes trajetórias de desenvolvimento socioeconômico.

O relatório final do AR6 avalia vários cenários, cada um representando diferentes níveis de aquecimento global e impactos associados. Estes cenários ajudam a compreender as potenciais consequências das diferentes escolhas políticas e ações tomadas para mitigar as alterações climáticas.

O relatório salienta que se continuarmos com as práticas habituais e não tomarmos medidas significativas para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, poderemos enfrentar consequências graves, como o aumento das temperaturas, a subida do nível médio do mar, eventos meteorológicos extremos mais frequentes, perda de biodiversidade, e impactos negativos na saúde etc. (SSP2, SSP3 e SSP5).

No entanto, o relatório também explora cenários em que são empreendidos esforços ambiciosos de mitigação (SSP1), conduzindo a um futuro mais sustentável e resiliente. Estes cenários envolvem a transição para fontes de energia renováveis, a adoção de tecnologias de baixo carbono, a implementação de soluções baseadas na natureza e a realização de mudanças significativas no uso do solo e nos padrões de consumo.

Em resposta a essas mudanças, anteriormente mencionadas, as espécies se movem em busca de condições climáticas adequadas que permitam a sua sobrevivência, desenvolvimento e reprodução (Garcia *et al.*, 2014; Pecl *et al.*, 2017). Ao fazer isso, alteram os seus padrões e características ao longo das gerações. Este fenômeno pode resultar na diminuição do número populacional e, em alguns casos, até na extinção de espécies (Miranda; Imperatriz-Fonseca; Giannini, 2019; Şekercioğlu; Primack; Wormworth, 2012). Como resultado desta reação em cadeia, as mudanças nos padrões climáticos podem acelerar a redução da biodiversidade e o comprometimento de funções essenciais dos ecossistemas. Estas mudanças têm consequências de longo alcance para a integridade de vários biomas em larga escala.

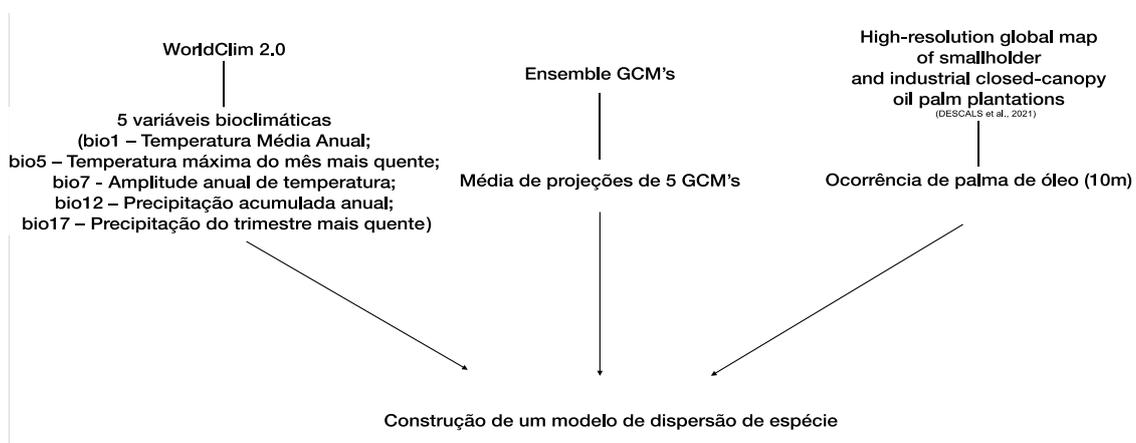
As mudanças climáticas terão impacto particularmente significativo sobre o estado do Pará. A agricultura é um setor expressivo na unidade federativa. O estado tem a maior área plantada do país e quase a totalidade da produção de palma de óleo. O estado do Pará apresenta atualmente 2,8 milhões de toneladas produzidas de óleo de palma, o que corresponde por cerca de 99% da produção brasileira, segundo dados do IBGE do ano de 2020. Os impactos econômicos tendem a ser maiores ainda nos municípios da mesorregião nordeste paraense, especialmente em Tailândia (18,77%), Tomé-Açu (17,65%), Moju (17,31%), Acará (15,66%) e Concórdia do Pará (3,11%) (Venturieri *et al.*, 2023).

3.2. Materiais e métodos

Para realização desse trabalho, foi utilizado um banco de dados de ocorrência de palma de óleo em alta resolução (10 metros) (Descals *et al.*, 2021). Esse banco de dados foi utilizado como input para criação de um modelo de distribuição de espécies alimentado por um ensemble de modelos de circulação globais (GCM) utilizando preditores climáticos sensíveis a palma de óleo. Nesta tese, é avaliado o impacto dos cenários SSP2 4.5 e SSP5 8.5 na palma de óleo. A palma de óleo, por ser uma cultura que evapotranspira bastante, entre 150 mm/mês (para meses com 10 ou menos dias chuvosos) e 120 mm/mês (para meses com mais de 10 dias chuvosos), é fisiologicamente sensível ao aumento de temperatura e à redução da precipitação. A palma de óleo requer uma precipitação média de 150 mm/mês, com períodos de seca não superiores a 2-

3 meses. A umidade relativa do ar deve ficar acima de 75% durante todo o ano (Verheye, 2010). Portanto, utilizamos como preditores bioclimáticos de alta resolução (cerca de 0.8 °) 5 variáveis. Seleccionamos as seguintes variáveis: bio1 – Temperatura Média Anual; bio5 – Temperatura máxima do mês mais quente; bio7 - Amplitude anual de temperatura; bio12 – Precipitação acumulada anual; e bio17 – Precipitação do trimestre mais quente. As variáveis bioclimáticas mencionadas acima foram baixadas do *WorldClim 2.0* da simulação mais recente gerada pelo CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*). Utilizamos quatro períodos distintos até o final do século: 2021–2040; 2041–2060; 2061–2080 e 2081–2100. Para minimizar o efeito da incerteza, associado aos diferentes Modelos de Circulação Global (GCMs) utilizou-se um conjunto médio de cinco GCMs (BCCCSM2-MR, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, MIROC6, MIROC-ES2L). Esses 5 GCMs foram selecionados considerando os valores de Sensibilidade Climática de Equilíbrio (ECS) e Resposta Climática de Transição (TCR).

Figure 15- Esquema da construção do modelo de dispersão de espécies.



A figura 15 ilustra o processo de organização do modelo de dispersão de espécies criado para avaliar o impacto das mudanças climáticas na adequabilidade climática da palma de óleo. Para avaliação dos impactos, foram selecionados os cenários SSP2 4.5 e SSP5 8.5. Os cenários variam a cada período de 20 anos selecionados para simulação (Figura 12). O modelo foi então criado a partir do biomod2, que é um pacote que fornece uma plataforma para modelagem de distribuição de espécies através de *ensembles*.

Figure 16- Mudanças na temperatura da superfície global avaliadas com base em múltiplas linhas de evidência durante os períodos de 20 anos selecionados e para os 5 cenários ilustrativos de emissões considerados.

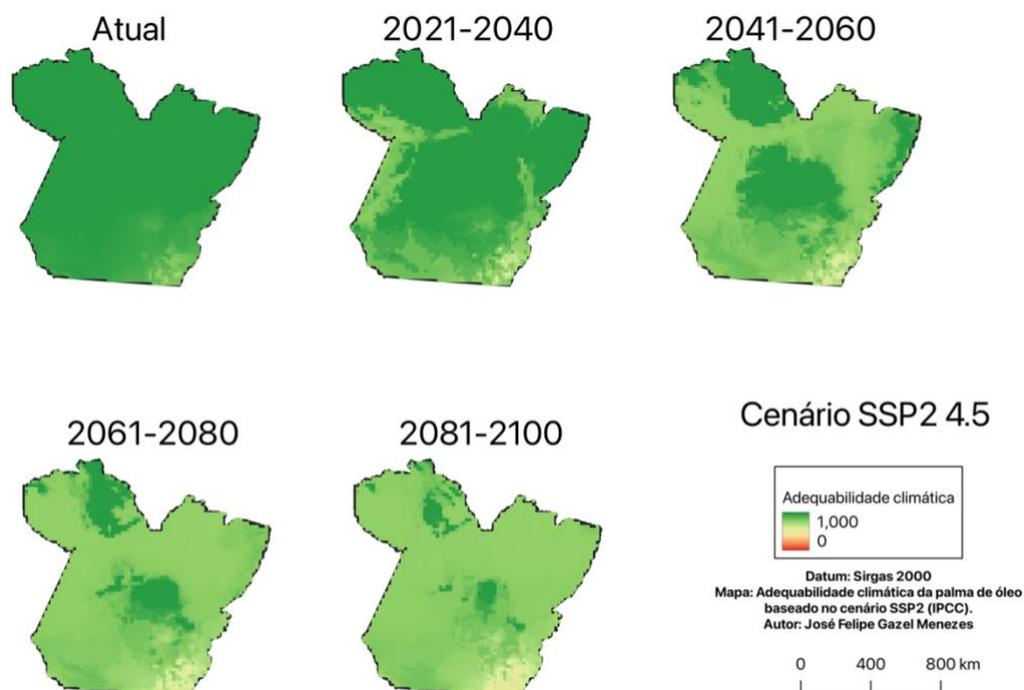
Scenario	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

Fonte: (Ippc, ano).

Nesta tese, selecionamos apenas o estado do Pará como área de estudo. O estado do Pará concentra cerca de 84% da produção nacional de palma de óleo no Brasil (*Foreign Agricultural Service*). Além de concentrar a maioria da área plantada, o estado do Pará desempenha papel primordial no desenvolvimento econômico e social da região Amazônica.

3.3. Resultados e discussões

Figure 17- Evolução do cenário SSP2 4.5 nas 4 projeções selecionadas.



A figura 17, ilustra a evolução do cenário SSP2 4.5 durante os períodos selecionados de 20 anos. As projeções mostram que, climaticamente, a redução da área cultivável para a palma de óleo tende a diminuir significativamente. A partir do período 2041-2060 apenas as áreas centrais do estado do Pará e parte do baixo amazonas ainda seriam cultiváveis. O valor de menor ocorrência atual da palma de óleo é de 872 em uma escala de adequabilidade que varia de 0 a 1000. Esse valor foi utilizado como ponto de corte para avaliar a redução na adequabilidade climática da palma de óleo ao longo dos períodos 2021-2040 (p2140), 2041-2060 (p4160), 2061-2080 (p6180), e 2081-2100 (p81100). Posteriormente, foi comparado o valor de cada pixel único nas projeções para avaliar quais pixels tinham valor maior que 872 (adequado) e quais tinham valores abaixo (inadequado) a tabela 4 ilustra os resultados obtidos.

Table 4- Adequabilidade climática da palma de óleo no estado do Pará (cenário SSP2 4.5)

	C245			
Atual	p2140	p4160	p6180	p81100
97%	76%	33%	14%	5%

De acordo com a análise realizada nesta tese, atualmente o estado do Pará tem adequabilidade climática de 97% para o plantio de palma de óleo, e perde área adequada com o aumento da temperatura e redução da precipitação. Já no primeiro período simulado, 2021 a 2040 é observado uma redução de 21% na área adequada climaticamente para a palma de óleo. No período seguinte, 2041 a 2060 é observado redução de 64% na adequabilidade. No período entre 2061 e 2080 é observado redução de 83% na adequabilidade. Por último, no final do século estima-se que o estado tenha apenas 5% de adequabilidade climática, de acordo com o cenário SSP2 4.5.

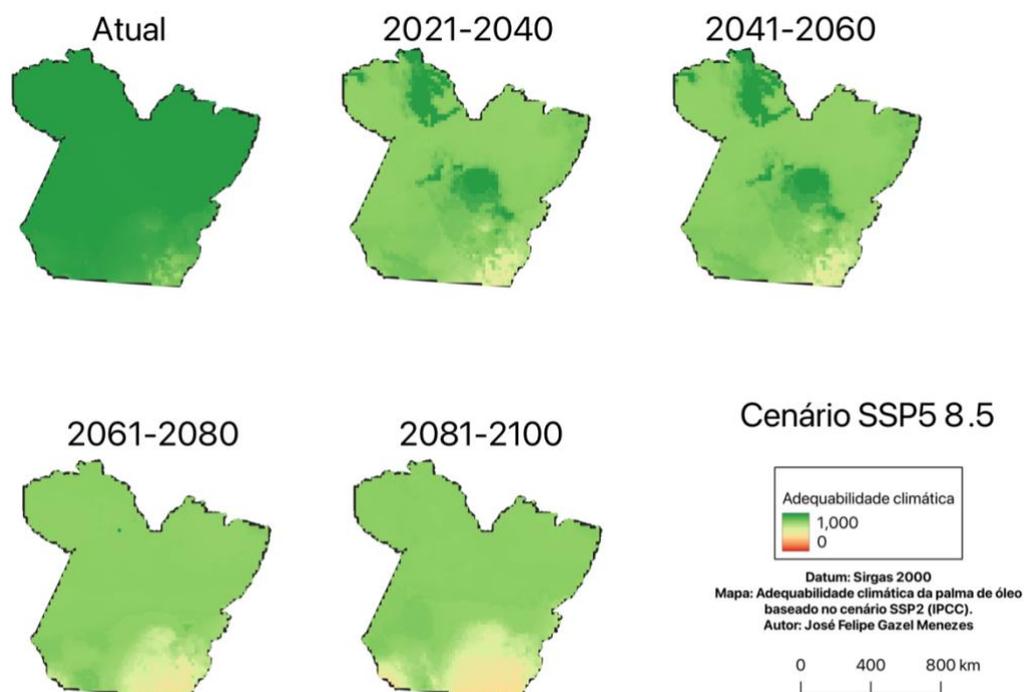
De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o estado do Pará tem cerca de 1.245.870,704 km². Portanto, atualmente o estado possui 1.208.494,583 km² de área considerada adequada, climaticamente, para o plantio de palma de óleo. Já ao final do século, espera-se que apenas 62.293,535 km² seja adequada para o plantio de palma de óleo de acordo com a projeção SSP2 4.5. Apenas a região central do estado e a região do baixo Amazonas tendem a se manter adequadas.

Table 5- Adequabilidade climática da palma de óleo no estado do Pará (cenário SSP5 8.5)

	C585			
Atual	p2140	p4160	p6180	p81100
97%	64%	11%	0%	0%

A tabela 5, mostra a redução nas áreas adequadas para o plantio de palma de óleo no estado do Pará utilizando o cenário SSP5 8.5.

Figure 18- Evolução do cenário SSP5 8.5 nas 4 projeções selecionadas.



Para o cenário SSP5 8.5 as projeções são ainda piores. De acordo com as simulações (Figura 18), a redução na adequabilidade climática da palma entre o cenário atual cai de 97% para 64%, o que representa uma redução de 33%. Já para o período de 2021 a 2040, a redução em relação ao cenário atual é de 86%. Ao analisar os próximos 2 períodos, 2061 a 2080 e 2080 a 2100, observamos que a palma de óleo se tornará climaticamente inadequada para o estado do Pará.

Portanto, de acordo com o cenário SSP5 8.5, é observado que já a partir do terceiro período simulado, 2061 a 2080 o estado do Pará não apresentará mais área adequada para o plantio de palma de óleo. Esses resultados mostram um cenário extremamente nocivo para a economia do estado.

Observa-se que o impacto do aumento de temperatura tende a ser significativo na cultura da palma de óleo. Porém destaca-se que as projeções não levam em consideração aspectos de adaptações que a palma de óleo pode sofrer em diferentes cenários. As projeções também não levam em consideração que a palma de óleo pode ser cultivada em ambiente com irrigação, e que a

palma de óleo pode sofrer modificações genéticas naturais ou através da aplicação de pesquisas futuras.

3.4. Conclusão:

Em conclusão, o potencial desaparecimento das plantações da palma de óleo devido ao aumento das temperaturas e a redução da precipitação evidencia uma possível crise no mercado global de produção de óleos com origem vegetal, uma vez que a palma de óleo desempenha papel importante nesse segmento. À medida que o tempo passa e atitudes para mitigar os impactos das mudanças climáticas não são tomadas, cada vez menos área disponível para diversas culturas estarão disponíveis no globo terrestre.

Na região da Amazônia oriental, mais especificamente sobre o estado do Pará, os impactos das mudanças climáticas na palma de óleo serão significativos. O estado possui 84% da produção nacional de palma de óleo, e caso as políticas de mitigação não surtam efeito no longo prazo, pode até deixar de ser climaticamente cultivável.

Estes resultados destacam a necessidade urgente de práticas sustentáveis e de esforços mais amplos para atenuar as mudanças climáticas. Caso contrário, no futuro serão necessárias medidas de adaptação, como desenvolvimento de variedades de palma com maior resistência à seca e sistemas de irrigação. Caso a cultura da palma de óleo seja substituída a longo prazo por uma cultura com maior resistência à esses cenários, surge outro problema. A palma de óleo emprega quantidade significativa de mão de obra no campo no estado do Pará por ter colheita e manejo feito de maneira manual.

Ademais, destaca-se que a palma de óleo é uma *commodity*, e portanto, sofre como qualquer outra com a variação de preço no mercado global. Atualmente é uma alternativa que apresenta ganhos ambientais e financeiros no estado do Pará, recuperando rapidamente o solo em áreas degradadas e sendo fonte de renda para indústrias e pequenos produtores. No entanto, esse cenário pode mudar no futuro caso ações mais efetivas não sejam adotadas.

Referências

- ANDRADE, V. M. S.de. *et al.* **Considerações sobre clima e aspectos edafoclimáticos da mesorregião Nordeste paraense**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2017. cap.2, p.59-96.
- ARENHART, M. *et al.* A realidade das gorduras trans: conhecimento ou desconhecimento. **Disciplinarum Scientia| Saúde**, v. 10, n. 1, p. 59–68, 2009.
- BARCELOS, E. *et al.* **Dendê: informações básicas para o seu cultivo**. Brasília,DF: [s.n.]. 1987.
- BARRIUSO, B.; ASTIASARÁN, I.; ANSORENA, D. A review of analytical methods measuring lipid oxidation status in foods: a challenging task. **European food Research and Technology**, v. 236, n. 1, p. 1–15, 2013.
- BECKER, B. K. Recuperação de áreas desflorestadas da Amazônia: será pertinente o cultivo da palma de óleo (Dendê)? **Confins. Revue Franco-Brésilienne de Géographie/Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 10, 2010. <https://doi.org/10.4000/confins.6609>.
- BENEZOLI, V. H. *et al.* Modeling oil palm crop for Brazilian climate conditions. **Agricultural Systems**, v. 190, p. 103130, 2021.
- BERGAMIN FILHO, A. *et al.* Análise temporal do amarelecimento fatal, do dendezeiro como ferramenta para elucidar sua etiologia. **Fitopatologia Brasileira**, v. 23, n. 3, p. 391–396, 1998.
- BOARI, A. DE J. **Estudos realizados sobre o amarelecimento fatal do dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.) no Brasil**. Belém: [s.n.].
- BORDIGNON, L. **Efeitos do aumento da concentração de CO2 atmosférico e da elevação da temperatura em plantas e suas interações biológicas**. 2016. 134f. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Instituto de Ciências Biológicas, Belo Horizonte/MG, 2016.
- BRANDÃO, F.; SCHONEVELD, G. **The state of oil palm development in the Brazilian Amazon: trends, value chain dynamics, and business models**. Borgos, Indonésia: CIFOR, 2015. (Working paper, 198).
- CEULEMANS, R.; MOUSSEAU, M. Effects of elevated atmospheric CO2 on woody plants. **New Phytol**127, p. 425–44610, 1994.
- CHAPIN III, F. S. *et al.* Consequences of changing biodiversity. **Nature**, v. 405, n. 6783, p. 234–242, 2000.
- CHIA, G. S. *et al.* Repetibilidade da produção de cachos de híbridos interespecíficos entre o caiaué e o dendezeiro. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 2, p. 249–254, 2009.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of Hydrology**, v. 369, n. 1, p. 165–174, 2009.

CORLETT, R. The impacts of climate change in the Tropics. **State of the Tropics**, v. 2, p. 155–160, 2014.

CORLEY, R. H. V; TINKER, P. B. H. **The oil palm**. [S.l.] John Wiley & Sons, 2008.

CRUZ, B. A. Características vegetativas e produção de cachos de híbridos interespecíficos entre o Caiaué (*Elaeis Oleifera*,(Kunth) cortés) e o Dendezeiro (*Elaeis Guineenses*, Jacq). 2016.

DESCALS, A. et al. High-resolution global map of smallholder and industrial closed-canopy oil palm plantations. **Earth System Science Data**, v. 13, n. 3, p. 1211–1231, 2021.

DOURADO-NETO, D. et al. Principles of crop modelling and simulation : II. The implications of the objective in model development . **Sci. agric**, v. 55, p. 51–57, ago. 1998.

EL PEBRIAN, D.; MOHIDDIN, D. N. A. Exploring mechanization degree and capacity in Malaysia's oil palm plantations. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 23, n. 2, 2021.

ELLWANGER, J. H. *et al.* Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, 2020.

FLEISS, S. *et al.* **Potential impacts of climate change on oil palm cultivation**. York: [s.n.], 2017.

FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS DO PARÁ-FAPESPA. **Boletim agropecuário do estado do Pará 2015**. Belém: Fapespa, 2015.

FURLAN JÚNIOR, J.; MÜLLER, A. A. **A agricultura familiar e a dendeicultura na Amazônia**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental-Comunicado Técnico, 2004.

GALLERY, R. E. Ecology of Tropical Rain Forests. Em: MONSON, R. K. (Ed.). **Ecology and the Environment**. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 247–272.

GARCIA, R. A. *et al.* Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. **Science**, v. 344, n. 6183, p. 1247579, 2014.

HOMMA, A. © e 0 1. **Agroenergia: a entrada de um novo ciclo na Amazônia?** Belém: Embrapa, 2016.

HOMMA, A. K. O. **Histórico do desenvolvimento de híbridos interespecíficos entre caiaué e dendezeiro**. Belém: Embrapa, (Documentos 421). Disponível em: www.embrapa.br/fale-conosco/sac. Acesso em: 24/03/2023

JONES, J. W. et al. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240–254, 1 jul. 2017.

GOMES JUNIOR, R. A. G. et al. Características vegetativas na fase juvenil de híbridos interespecíficos de caiaué com dendezeiro. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 1, p. 27–35, 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE(IPCC). **AR6 final report**, 2023.

LI, Y. et al. Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. **Climate research**, v. 39, n. 1, p. 31–46, 2009.

MASSON-DELMOTTE, V. et al. **Climate change 2021, The physical Science Basis : Summary for policymakers**. [s.l: s.n.]. Disponível em: www.ipcc.ch.

MBA, O. I.; DUMONT, M.-J.; NGADI, M. Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry – A review. **Food Bioscience**, v. 10, p. 26–41, 2015.

MEDEIROS, J. S.de; SANO, E. E. **Análise multitemporal de imagens digitais do Landsat TM na detecção de áreas afetadas por ataques de lagartas (Sibine fusca) na cultura de dende (Elais guineensis)**. [s.l: s.n.].

MIRANDA, L. S.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; GIANNINI, T. C. Climate change impact on ecosystem functions provided by birds in southeastern Amazonia. **Plos one**, v. 14, n. 4, p. e0215229, 2019.

MURPHY, D. J.; GOGGIN, K.; PATERSON, R. R. M. Oil palm in the 2020s and beyond: challenges and solutions. **CABI Agriculture and Bioscience**, v. 2, n. 1, p. 39, 2021.

PATERSON, R. R. M. et al. Future climate effects on suitability for growth of oil palms in Malaysia and Indonesia. **Scientific reports**, v. 5, n. 1, p. 14457, 2015.

PATERSON, R. R. M. et al. World climate suitability projections to 2050 and 2100 for growing oil palm. **The Journal of Agricultural Science**, v. 155, n. 5, p. 689–702, 2017.

PECL, G. T. et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. **Science**, v. 355, n. 6332, p. eaai9214, 2017.

PINA, A. J. de A. Experiências na produção para a cultura de palma de óleo na Amazônia: relato de experiências da Marborges Agroindústria SA (Moju-Pará). In: RAMALHO FILHO, A.; MOTTA, PEF da; FREITAS, PL de. **Zoneamento**

agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia. Rio de Janeiro: Embrapa Solo, 2010. cap. 13, p. 189–204.

RAMOS, E. J. A.; VEIGA, A. S.; FURLAN JÚNIOR, J. Potencial produtivo de híbridos interespecíficos entre dendezeiro e caiauezeiro nas condições do nordeste paraense. **Embrapa Amazônia Oriental-Documentos (INFOTECA-E)**, 2006.

ŞEKERCIOĞLU, Ç. H.; PRIMACK, R. B.; WORMWORTH, J. The effects of climate change on tropical birds. **Biological conservation**, v. 148, n. 1, p. 1–18, 2012.

TYAGI, V. K.; VASISHTHA, A. K. Changes in the characteristics and composition of oils during deep-fat frying. **Journal of the American oil chemists' society**, v. 73, n. 4, p. 499–506, 1996.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE-UNFCCC. **Faltou o título em negrito.** [s.l: s.n.], 2011.

VAN DE LANDE, H. L. **Studies on the epidemiology of spear rot in oil palm (Elaeis guineensis Jacq.) in Suriname.** [s.l.] Wageningen University and Research, 1993.

VENTURIERI, A. *et al.* **Expressão do cultivo da palma de óleo no Pará (1985-2021).** Belém: EMBRAPA, 2023. (Comunicado Técnico 358).

VENTURIERI, Adriano *et al.* Relação entre ocorrência do amarelecimento fatal do dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.) e variáveis ambientais no estado do Pará. Natal: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 25 abr. 2009.

VERHEYE, W. Growth and production of oil palm. *In: In:* VERHEYE, W. H. (ed.). **Land use, land cover and soil sciences.** [S.l.] UNESCO-EOLSS Publishers, 2010.

WERTH, D.; AVISSAR, R. The local and global effects of Amazon deforestation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D20, p. LBA-55, 2002.

CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL

4.1. Resultados chaves: Impactos e Aplicações

Esta tese gerou informações sobre o cultivo de palma de óleo em uma das regiões mais importantes do planeta terra, a Amazônia. A região possui grande notoriedade devido a questões econômicas e socioambientais. A região Amazônica enfrenta desde o início do seu período de ocupação desafios proporcionais a sua magnitude. Imensas áreas já sofreram substituição da vegetação primária por outro tipo de vegetação com características completamente diferentes. Essa substituição causa mudança no microclima da região e na interação entre a floresta remanescente e as novas culturas instaladas. Muitas áreas são abandonadas após o uso na região. Uma alternativa para mitigar essas áreas degradadas e abandonadas é o plantio de uma monocultura rentável ao produtor e que reestabeleça alguma cobertura vegetal. Portanto, nesta tese, mostramos que a palma de óleo com híbrido interespecífico pode ser uma alternativa viável, sobretudo em regiões que são afetadas pelo amarelecimento fatal. Entregamos também, um modelo biofísico capaz de simular a produção dessa palmeira, servindo assim de auxílio aos gestores de indústrias e pequenas propriedades.

Já no terceiro capítulo, mostramos como as mudanças climáticas podem interferir em uma cultura que gera empregos e renda na região Amazônica, como é o caso da palma de óleo. Contribuímos para o melhor entendimento a respeito de como a palma de óleo pode ser impactada pelas mudanças climáticas, e assim, apresentamos informações e cenários que influem sobre diversas pessoas na região.

Ademais, este trabalho de tese fornece material fundamental para as empresas e os agricultores familiares que cultivam e dependem da palma de óleo na região Amazônica.

4.2. Conclusão integrada

Após passar por extenso processo de calibração, o modelo ECOSMOS se mostra capaz de reproduzir comportamentos biofísicos da palma de óleo com híbrido interespecífico (HIE) como por exemplo fluxo de calor sensível e saldo radiação. Bem como o balanço de CO₂ no ecossistema. Dessa maneira, adiciona conhecimento do comportamento da palmeira na região Amazônica. Atualmente, o modelo ECOSMOS é também capaz de reproduzir com maior precisão a produção de palma de óleo com híbrido interespecífico. Tal evolução é importantíssima no desenvolvimento de novas áreas com esta palmeira na região.

Os impactos das mudanças climáticas na palma de óleo no estado do Pará mostram que, caso a sociedade de maneira coletiva não tome iniciativas mais sérias a respeito da preservação do meio ambiente, o resultado será catastrófico para a cultura. O aumento de temperatura, bem como a redução dos regimes pluviométricos iram tornar a palma de óleo uma cultura inadequada climaticamente para a região Amazônica, o que terá efeito na economia local para indústrias e pequenos produtores que dependem do plantio e comercialização dessa cultura. Os 2 cenários avaliados mostram redução significativa até o final do século na adequabilidade climática da palma de óleo para a região.

4.3. Prioridades para Pesquisas Futuras

Devido ao tamanho grandioso e as particularidades de cada região da Amazônia, recomenda-se aplicar os modelos para outras áreas na região afim de verificar o comportamento dos modelos nesta tese apresentados. Recomenda-se também o investimento de pesquisas e de formação de mão de obra local para a instalação de experimentos e equipamentos para coleta de dados que permitam auxiliar nos avanços em diversas áreas da modelagem na Amazônia.

No segundo capítulo, é abordada a palma de óleo com híbrido interespecífico. Esse tipo de palmeira foi criada visando a resistência a patologias que ocorrem com a palmeira de origem africana, o Tenera (*Elaeis guineensis* Jacq.). Os avanços para identificar os agentes causadores dessa patologia carecem de maiores estudos, sobretudo a respeito dos tipos de solo em que essa patologia ocorre.

Devido a carência de dados na região Amazônica, muitas vezes é necessário recorrer a dados de sensoriamento remoto para adquirir dados. Os dados de sensoriamento são resultados de esforços históricos e são uma conquista importante para todos que trabalham com dados ambientais. No entanto, quando a aplicação dos dados ambientais é utilizada em áreas menores, esbarra na limitação de resolução que os dados de sensoriamento remoto maioria das vezes apresentam. Portanto, destaca-se a necessidade de redes de estações pluviométricas e fluviométricas bem estruturadas para validação e coleta de dados mais acurados.

Outro ponto deixado aqui como prioridade para pesquisas futuras, é a necessidade de avanços nas pesquisas envolvendo a dispersão de espécies fundamentais para a região, como a palma de óleo, o açaí, o cacau etc. Além das questões climáticas aqui apresentadas, existem também outros fatores que influenciam na adequabilidade climática das espécies, como por exemplo, perfis de solo, áreas irrigadas, adventos da tecnologia, máquinas etc. O surgimento de trabalhos e metodologias que sejam capazes de integrar esses fatores serão de enorme avanço para toda a região Amazônica.

4.4 Considerações Finais

A região Amazônica por sua extensão e importância no globo é cercada por malezas e incertezas. Questões históricas de uso e ocupação das terras são antigas e permanecem até os dias atuais. A região precisa de desenvolvimento, porém, esse desenvolvimento precisa acontecer de maneira planejada e com uso de técnicas e tecnologia para unir desenvolvimento e sustentabilidade.

A participação mais efetiva das comunidades locais e tradicionais da floresta Amazônica e nas decisões a respeito dela é vital para promover o bem-estar desses povos que habitam a região. As políticas precisam ser desenvolvidas buscando o equilíbrio e desenvolvimento da região, e dando prioridade sempre a preservação ambiental.

Outro fator que tende a prestar um papel fundamental no desenvolvimento da região são os avanços nos estudos de sistemas comerciais sustentáveis, como por exemplo os sistemas agroflorestais (SAFs). Alguns SAFs na região mostram grande potencial econômico e de preservação ambiental. Ajudam a preservar a fauna e flora nativa e conseqüentemente o equilíbrio ecológico. O constante monitoramento e investigação científica das espécies são cruciais para a compreensão desse ambiente tão dinâmico e único que é a floresta Amazônica.

Atualmente, a viabilidade econômica da palma de óleo se mostra uma tentativa viável para o desenvolvimento da região recuperando áreas degradadas abandonadas. Entretanto, esse cenário pode mudar no clima futuro caso os esforços para mitigar o aumento de temperatura no planeta não tenham efeito ou não sejam suficientes para evitar os cenários mais pessimistas apresentados nesta tese.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, V. M. S.de. *et al.* Considerações sobre clima e aspectos edafoclimáticos da mesorregião Nordeste paraense. Embrapa Amazônia Oriental-Capítulo em livro científico (ALICE), 2017.
- ARENHART, M. *et al.* A realidade das gorduras trans: conhecimento ou desconhecimento. **Disciplinarum Scientia| Saúde**, v. 10, n. 1, p. 59–68, 2009.
- BARCELOS, E. *et al.* **Dendê**: informações básicas para o seu cultivo. Brasília,DF: [s.n.]. 1987.
- BARRIUSO, B.; ASTIASARÁN, I.; ANSORENA, D. A review of analytical methods measuring lipid oxidation status in foods: a challenging task. **European food research and technology**, v. 236, n. 1, p. 1–15, 2013.
- BECKER, B. K. Recuperação de áreas desflorestadas da Amazônia: será pertinente o cultivo da palma de óleo (Dendê)? **Confins. Revue Franco-Brésilienne de Géographie/Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 10, 2010. <https://doi.org/10.4000/confins.6609>.
- BENEZOLI, V. H. *et al.* Modeling oil palm crop for Brazilian climate conditions. **Agricultural Systems**, v. 190, p. 103130, 2021.
- BERGAMIN FILHO, A. *et al.* Análise temporal do amarelecimento fatal, do dendezeiro como ferramenta para elucidar sua etiologia. **Fitopatologia Brasileira**, v. 23, n. 3, p. 391–396, 1998.
- BOARI, A. DE J. **Estudos Realizados Sobre o Amarelecimento Fatal do Dendezeiro (Elaeis guineensis Jacq.) no Brasil**. Belém: [s.n.].
- BORDIGNON, L. Efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e da elevação da temperatura em plantas e suas interações biológicas. 2016.
- BRANDÃO, F.; SCHONEVELD, G. **The state of oil palm development in the Brazilian Amazon: Trends, value chain dynamics, and business models**. [s.l.] CIFOR, 2015. v. 198
- CEULEMANS, R.; MOUSSEAU, M. Effects of elevated atmospheric CO₂ on woody plants. **New Phytol**127, p. 425–44610, 1994.
- CHAPIN III, F. S. *et al.* Consequences of changing biodiversity. **Nature**, v. 405, n. 6783, p. 234–242, 2000.
- CHIA, G. S. *et al.* Repetibilidade da produção de cachos de híbridos interespecíficos entre o caiaué e o dendezeiro. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 2, p. 249–254, 2009.
- COE, M. T.; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land

surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of Hydrology**, v. 369, n. 1, p. 165–174, 2009.

CORLETT, R. The impacts of climate change in the Tropics. **State of the Tropics**, v. 2, p. 155–160, 2014.

CORLEY, R. H. V; TINKER, P. B. H. **The oil palm**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2008.

CRUZ, B. A. **Características vegetativas e produção de cachos de híbridos interespecíficos entre o Caiuá (Elaeis Oleifera, (Kunth) Cortés) e o Dendezeiro (Elaeis Guineenses, Jacq)**. Orientadora; Suely de Souza Costa; Ricardo Lopes Coorientador, Jorge Hugo Iriarte Martel Coorientador. 2016. 54f. Dissertação (Mestrado) - INPA, Manaus, 2016.

DESCALS, A. *et al.* High-resolution global map of smallholder and industrial closed-canopy oil palm plantations. **Earth System Science Data**, v. 13, n. 3, p. 1211–1231, 2021.

DOURADO-NETO, D. *et al.* Principles of crop modelling and simulation : II. The implications of the objective in model development . **Sci. agric**, v. 55, p. 51–57, ago. 1998.

EL PEBRIAN, D.; MOHIDDIN, D. N. A. Exploring mechanization degree and capacity in Malaysia's oil palm plantations. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 23, n. 2, 2021.

ELLWANGER, J. H. *et al.* Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, 2020. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191375>.

FLEISS, S. *et al.* **Potential impacts of climate change on oil palm cultivation**. York: [s.n.], 2017.

FURLAN JÚNIOR, J.; MÜLLER, A. A. **A agricultura familiar e a dendeicultura na Amazônia**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2004. (Comunicado Técnico).

GALLERY, R. E. Ecology of Tropical Rain Forests. Em: MONSON, R. K. (Ed.). **Ecology and the Environment**. New York, NY: Springer, 2014. p. 247–272.

GARCIA, R. A. *et al.* Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. **Science**, v. 344, n. 6183, p. 1247579, 2014.

HOMMA, A. © e 0 1. **Agroenergia: a entrada de um novo ciclo na Amazônia?** Belém: Embrapa, 2016.

HOMMA, A. K. O. **Histórico do desenvolvimento de híbridos interespecíficos entre caiuá e dendezeiro**. Belém: Embrapa, (Documentos 421). Disponível em: www.embrapa.br/fale-conosco/sac. Aceso em: 24/03/2023

JONES, J. W. *et al.* Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240–254, 1 jul. 2017.

GOMES JUNIOR, R. A. *et al.* Características vegetativas na fase juvenil de híbridos interespecíficos de caiaué com dendezeiro. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 1, p. 27–35, 2015.

LI, Y. *et al.* Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. **Climate Research**, v. 39, n. 1, p. 31–46, 2009.

MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* **Climate change 2021, the physical science basis** : summary for policymakers. [s.l.: s.n.]. Disponível em: www.ipcc.ch.

MBA, O. I.; DUMONT, M.-J.; NGADI, M. Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry – a review. **Food Bioscience**, v. 10, p. 26–41, 2015.

MEDEIROS, J. S.de; SANO, E. E. **Análise multitemporal de imagens digitais do Landsat TM na detecção de áreas afetadas por ataques de lagartas (Sibine fusca) na cultura de dende (Elais guineensis)**. [S.l.: s.n.].

MIRANDA, L. S.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; GIANNINI, T. C. Climate change impact on ecosystem functions provided by birds in southeastern Amazonia. **Plos one**, v. 14, n. 4, p. e0215229, 2019.

MURPHY, D. J.; GOGGIN, K.; PATERSON, R. R. M. Oil palm in the 2020s and beyond: challenges and solutions. **CABI Agriculture and Bioscience**, v. 2, n. 1, p. 39, 2021.

FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS DO PARÁ–FAPESPA. **Boletim agropecuário do estado do Pará 2015**. Belém: Fapespa, 2015.

PATERSON, R. R. M. *et al.* Future climate effects on suitability for growth of oil palms in Malaysia and Indonesia. **Scientific reports**, v. 5, n. 1, p. 14457, 2015.

PATERSON, R. R. M. *et al.* World climate suitability projections to 2050 and 2100 for growing oil palm. **The Journal of Agricultural Science**, v. 155, n. 5, p. 689–702, 2017.

PECL, G. T. *et al.* Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. **Science**, v. 355, n. 6332, p. eaai9214, 2017.

PINA, A. J. de A. Experiências na produção para a cultura de palma de óleo na Amazônia: relato de experiências da Marborges Agroindústria SA (Moju-Pará). *In*: RAMALHO FILHO, A.; MOTTA, PEF da; FREITAS, PL de. **Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia**. Rio de Janeiro: Embrapa Solo, 2010. cap. 13, p. 189–204.

RAMOS, E. J. A.; VEIGA, A. S.; FURLAN JÚNIOR, J. **Potencial produtivo de híbridos interespecíficos entre dendezeiro e caiauezeiro nas condições do nordeste paraense**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental-Documentos (INFOTECA-E), 2006. (Documentos, 247).

ŞEKERCIOĞLU, Ç. H.; PRIMACK, R. B.; WORMWORTH, J. The effects of climate change on tropical birds. **Biological conservation**, v. 148, n. 1, p. 1–18, 2012.

TYAGI, V. K.; VASISHTHA, A. K. Changes in the characteristics and composition of oils during deep-fat frying. **Journal of the American oil Chemists' Society**, v. 73, n. 4, p. 499–506, 1996.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE-UNFCCC. **Disponível em:** <http://www.unfccc.org>. acessado em: 27/11/2022. [s.l.: s.n.], 2011.

VAN DE LANDE, H. L. **Studies on the epidemiology of spear rot in oil palm (Elaeis guineensis UNFCCC Jacq.) in Suriname**. [S.l.] Wageningen University and Research, 1993.

VENTURIERI, A. *et al.* **Expressão do cultivo da palma de óleo no Pará (1985-2021)**. Belém: EMBRAPA, 2023. (Comunicado Técnico 358).

VENTURIERI, Adriano *et al.* Relação entre ocorrência do amarelecimento fatal do dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.) e variáveis ambientais no estado do Pará. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 25, 2009. Natal. **Anais[...]**. Natal: ABSR, 2009.

VERHEYE, W. Growth and production of oil palm. *In*: VERHEYE, W. H. (ed.). **Land use, land cover and soil sciences**. [S.l.] UNESCO-EOLSS Publishers, 2010.

WERTH, D.; AVISSAR, R. The local and global effects of Amazon deforestation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D20, p. LBA-55, 2002.