

Modelagem da produção da palma de óleo com híbrido interespecífico utilizando modelo ECOSMOS na Amazonia.

Modeling oil palm production with interspecific hybrid using ECOSMOS model in Amazonia.

Modelando la producción de palma aceitera con híbridos interespecíficos utilizando el modelo ECOSMOS en la Amazonia

José Felipe Gazel Menezes

Universidade Federal do Pará

jfgmenezes@gmail.com

Victor Hugo Benezoli

Universidade Federal de Viçosa

victorbenezoli@gmail.com

Julie Andrews de França e Silva

Universidade Federal Rural da Amazônia

julieandrewsfranca@gmail.com

Michel Anderson Almeida Colmanetti

Universidade Estadual de Campinas

michelcolmanetti@gmail.com

Santiago Vianna Cuadra

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

santiago.cuadra@embrapa.br

Alessandro Carioca de Araújo

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

alessandro.araujo@embrapa.br

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo calibrar a produção de palma de óleo com híbrido interespecífico (*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.

Palavras-chave: Palma de óleo; Modelagem; Amazônia.

Abstract

The present work aims to calibrate the production of oil palm with interspecific hybrid (*Elaeis guineensis* Jacq and *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés) in the Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa) ECOSMOS model. 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 a commercial plantation, 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.

Keywords: Oil palm; Modeling; Amazonia.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo calibrar la producción de palma aceitera con híbridos interespecíficos (*Elaeis guineensis* Jacq y *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés) en el modelo ECOSMOS de la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa). El modelo fue calibrado utilizando técnicas de análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más sensibles a la producción de palma aceitera con híbridos interespecíficos. La calibración fue validada utilizando datos climáticos observados en una plantación comercial, a través de una torre micrometeorológica instalada y operada por Embrapa. Los datos climáticos observados a través de la torre también se utilizaron como entrada en el modelo de 2014 a 2018, lleno de datos de era5 y nasa power. El modelo actual predice bien el flujo de calor sensible (H), el balance de radiación (Rn) y el intercambio de CO₂ con el ecosistema (NEE), sin embargo, sobreestima el flujo de calor latente (LE). Después de la calibración, el modelo pudo representar mejor los datos de producción observados con palma aceitera con híbrido interespecífico.

Palabras clave: Palma de óleo; Modelaje; Amazonia.

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 (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 (DE MIRANDA; MARTINHO; DE 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.

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 Arecacea. 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 agrônômico a resistência ao amarelecimento fatal (AF) (GOMES JUNIOR, 2010). A palma de óleo estudada neste artigo é um cruzamento entre as espécies *Elaeis guineensis* Jacq e *Elaeis oleifera* (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).

Metodologia

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) (Figura11). 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 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) (DE 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.

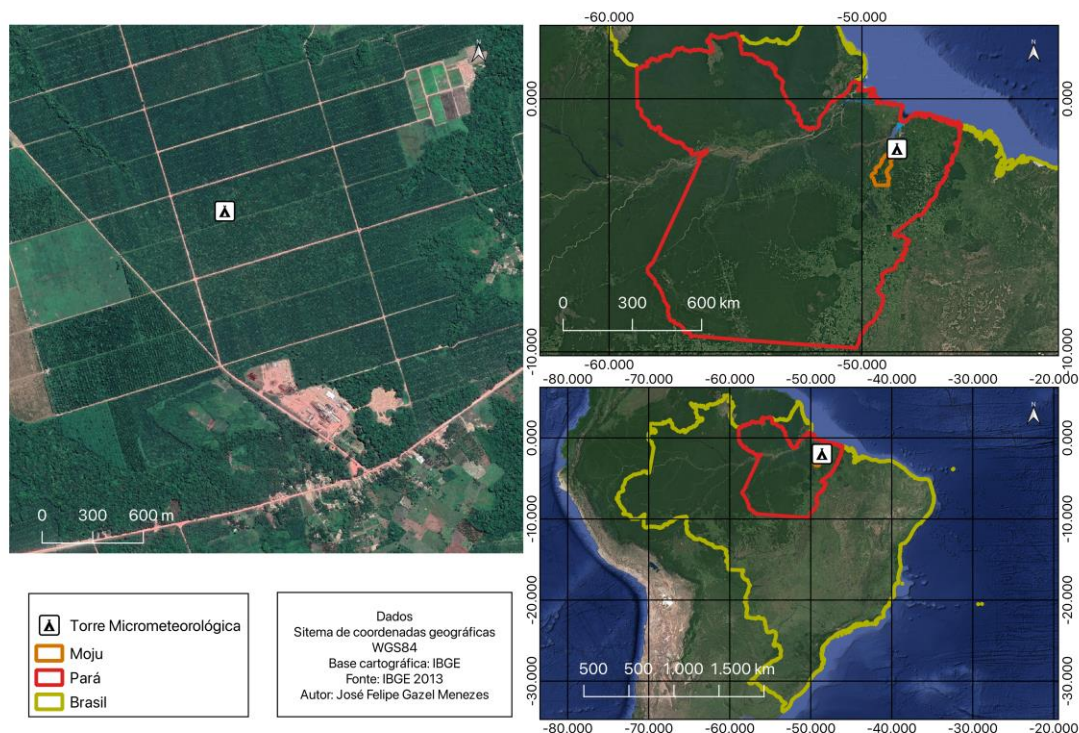


Figura - 1 Mapa de localização da torre micrometeorológica.
Fonte: Autor

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 Wm² da torre em comparação com os dados estimados pelo satélite.

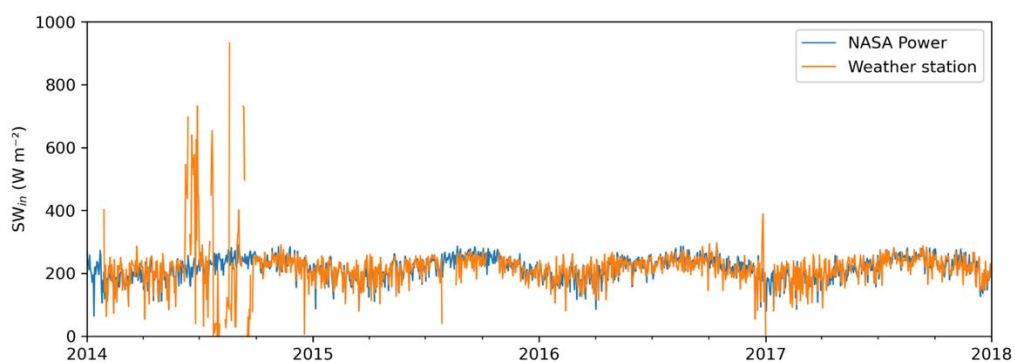


Figura - 2 Comparação entre os dados observados e os dados estimados pelo satélite nasa power.
Fonte: Autor

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)

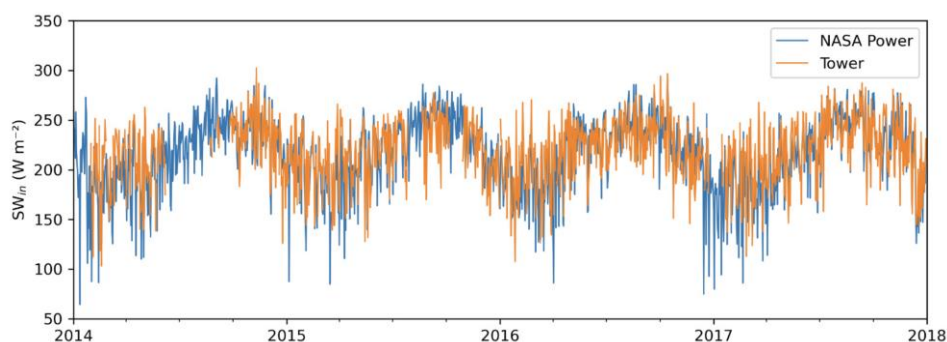


Figura - 3 Comparação dos dias com 24 horas de dados observados e dados estimados pelo satélite nasa power.
Fonte: Autor

O ECOSMOS é um modelo biofísico baseado no Agro-IBIS (Foley et al., 1996; Kucharik e 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 pools de crescimento vegetativo. Assim como no campo, no ECOSMOS o 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).

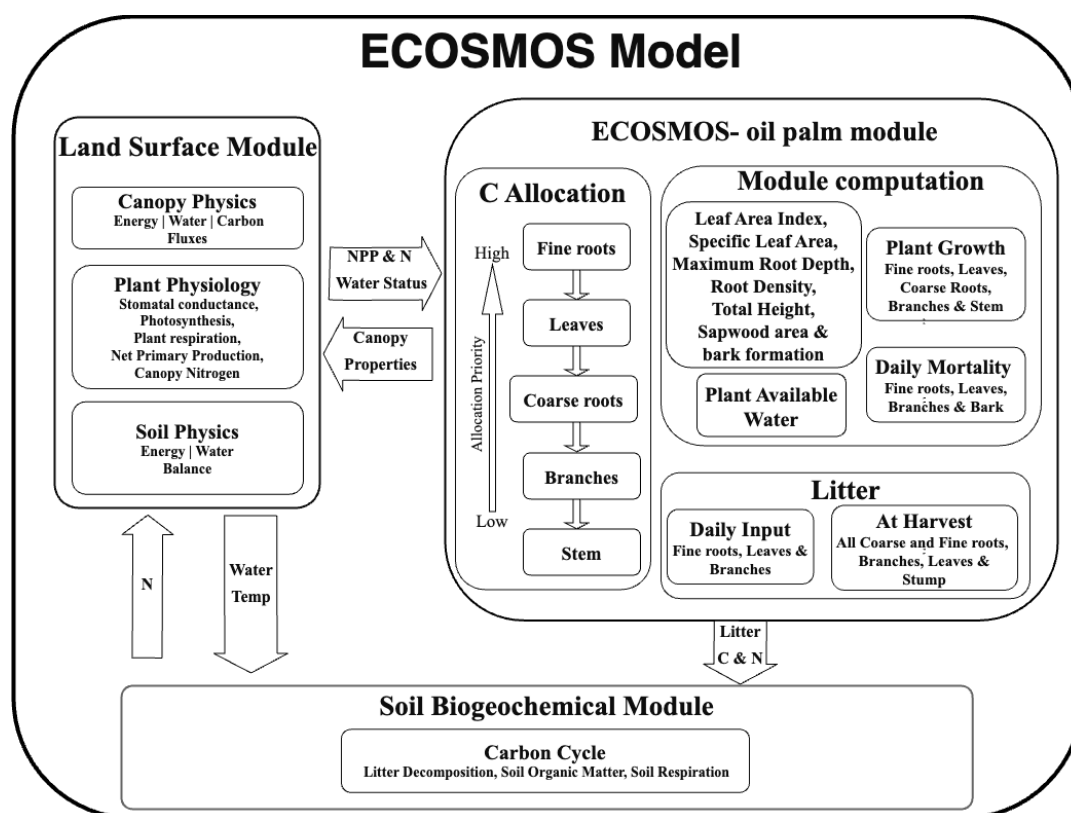


Figura - 4 Esquema de funcionamento do ECOSMOS.
Fonte: Michel Colmanetti

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.

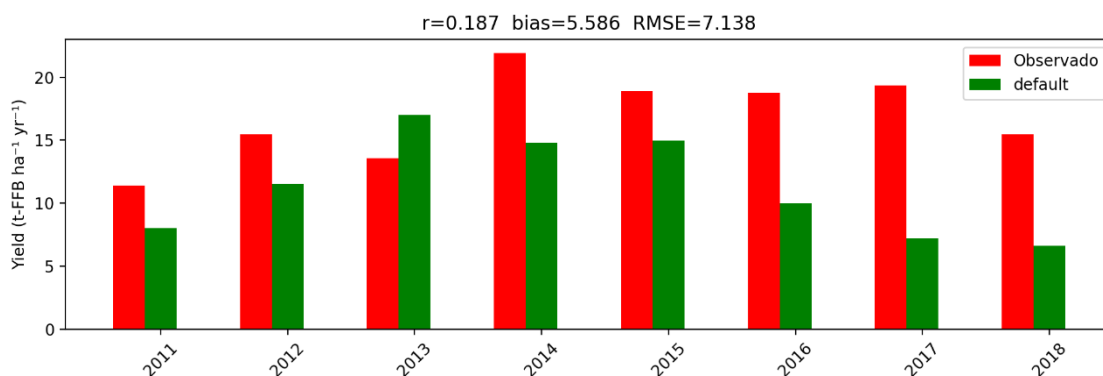


Figura - 5 Comparação entre a produção de óleo de palma em tonelada de cachos de fruto fresco por ha/ano (observado e simulado) na versão default.
Fonte: Autor

É possível observar 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 entre -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 viés 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 CO_2 com o ecossistema (NEE). Esse resultado era esperado uma vez que Benezoli et al., (2021) observou o mesmo comportamento em seu trabalho.

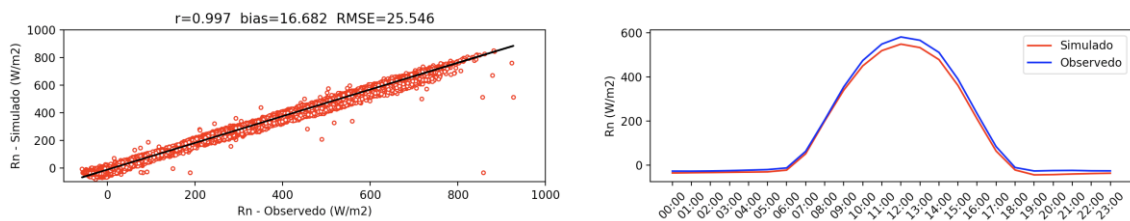


Figura - 6 Comparação de Rn (Observado e Simulado).

Fonte: Autor

O gráfico acima (figura 6), 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 para a 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.

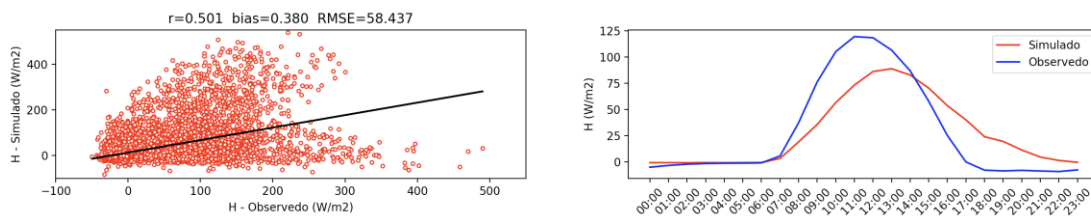


Figura - 7 Comparação do fluxo de calor sensível (Observado e Simulado).

Fonte: Autor.

O gráfico acima (figura 7), 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 8). 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.

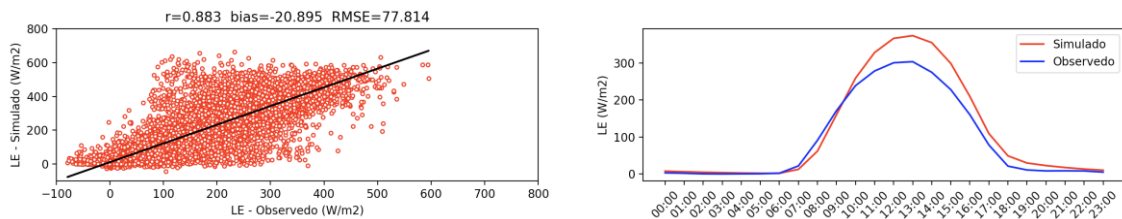


Figura - 8 Comparação entre o fluxo de calor latente (Observado e Simulado).
Fonte: Autor

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.

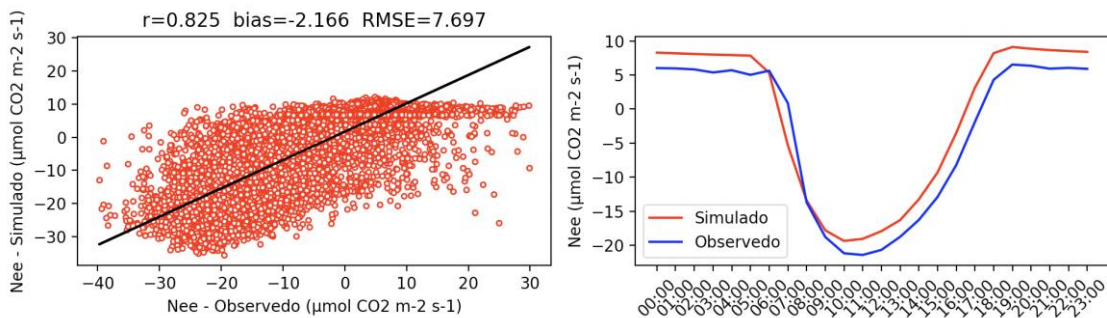


Figura - 9 Comparação entre o NEE (Observado e Simulado).
Fonte: Autor

O Nee foi um dado simulado com acurácia pelo ECOSMOS. A figura 9 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 10).

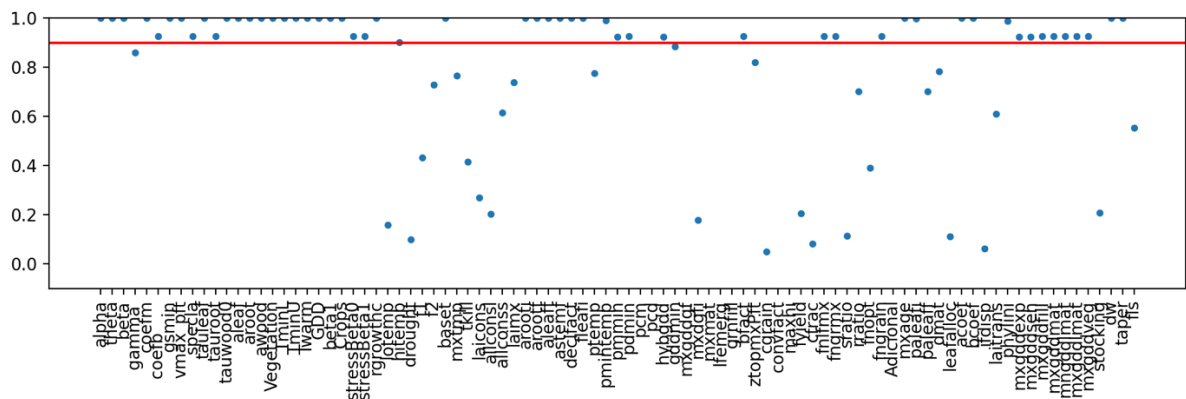


Figura - 10 Análise de sensibilidade dos parâmetros da planta.

Fonte: Autor

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.

	Default	Calibrated		Default	Calibrated
Canopy	oilpalm1	oilpalm1	Canopy	oilpalm1	oilpalm1
alpha	0.08	0.074	pmmin	11.97	11
theta	0.95	0.94	pdmin	1	1
beta	0.96	0.94	pcm	0	0
gamma	0.02	0.017	pcd	0	0
coefm	10.43	10.4	hybgdd	65000	65000
coefb	0.01	0.007	gddmin	51.52	50
gsmin	1.00E-05	0.00001	mxgddgf	0	0
vmax_pft	0.000091	0.000091	mxdgfi	906.04	810
specla	13	13	mxmat	0	0
tauleaf	0	0	lfemerg	0	0
tauroot	1108	1108	grnfill	0	0
tauwood0	0	0	bfact	-4	-4
aleaf	0	0	ztopmxPft	25.8	25

aroot	0	0	cgrain	0.47	0.45
awood	0	0	convfact	0	0
Vegetation	0	0	maxhi	0	0
TminL	0	0	fyield	1.04	0.9
TminU	0	0	cfrac	0.45	0.45
Twarm	0	0	fnlfmx	0.02	0.015
GDD	0	0	fngrmx	0.02	0.017
beta1	0.98	0.98	sratio	0.02	0.02
Crops	0	0	rratio	0.74	0.73
stressBeta0	-34.5	-34.5	fnopt	0.05	0.03
stressBeta1	555	555	fngrain	0.01	0.013
rgrowthc	0	0	Adicional	0	0
lotemp	9.35	8.2	mxage	36.42	35
hitemp	41.31	40.3	paleafi	0.19	0.18
drought	1.04	1.02	paleaff	0.29	0.28
f1	0.51	0.5	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	bcoef	0.04	0.04
tkill	269.33	268.16	ifdisp	0.36	0.35
laicons	5.15	5	laitrans	0.18	0.18
allconsl	6.05	5	phylini	132.37	130
allconss	2.37	2	mxgddexp	1550	1550
laimx	7.62	6.4	mxgddsen	8217	8217
arooti	0.28	0.28	mxgddfill	3800	3800
arootf	0.1	0.1	mxgddmat	6033	6033
aleaff	0	0	mngddlmat	1118	1118
astemf	0	0	mxgddlmat	6000	6000
declfact	0	0	mxgddveg	7500	7500

fleafi	0	0	stocking	148.49	140
ptemp	284.5	283.16	dw	101.42	100
pmintemp	280.59	279.16	taper	63.01	50
			fls	0.17	0.15

Tabela - 1 Parâmetros da planta (default & calibrated)

Fonte: Autor

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).

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

Tabela - 2 Condutividade hídrica do solo no modelo ECOSMOS.

Fonte: Autor

Outra análise de sensibilidade foi realizada para verificar quais parâmetros de radiação incidente tem mais efeito na produção (Figura 11). 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; tauvegyvb; 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.

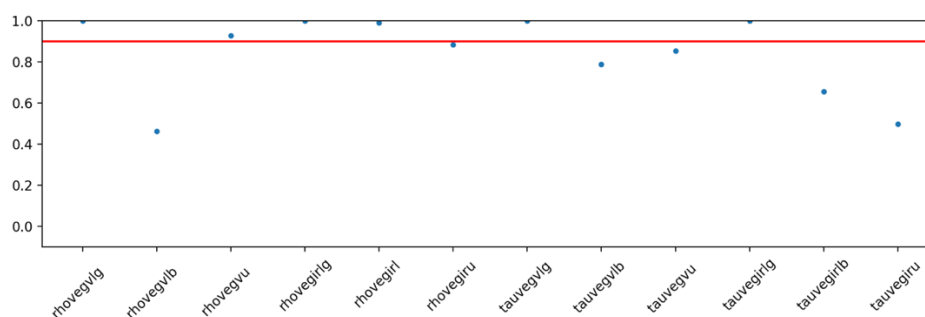


Figura - 11 Análise de sensibilidade dos parâmetros de radiação incidente do modelo ECOSMOS.

Fonte: Autor

Após análise de sensibilidade, foi observado que os parâmetros de radiação incidente que mais afetam na produção são: rhoevglg, rhoevgvu rhoevgirlg, rhoevgirl, tauvevglg e tauvegirlg. A melhor simulação foi selecionada de acordo com a tabela.

	Default	Calibrated
rhoevglg	0.09	0.06
rhoevgvu	0.10	0.09
rhoevgirlg	0.45	0.45
rhoevgirl	0.58	0.53
tauvevglg	0.05	0.02
tauvegirlg	0.25	0.28

Tabela - 3 Parâmetros de radiação incidente no modelo ECOSMOS.

Fonte: Autor

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 12 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.

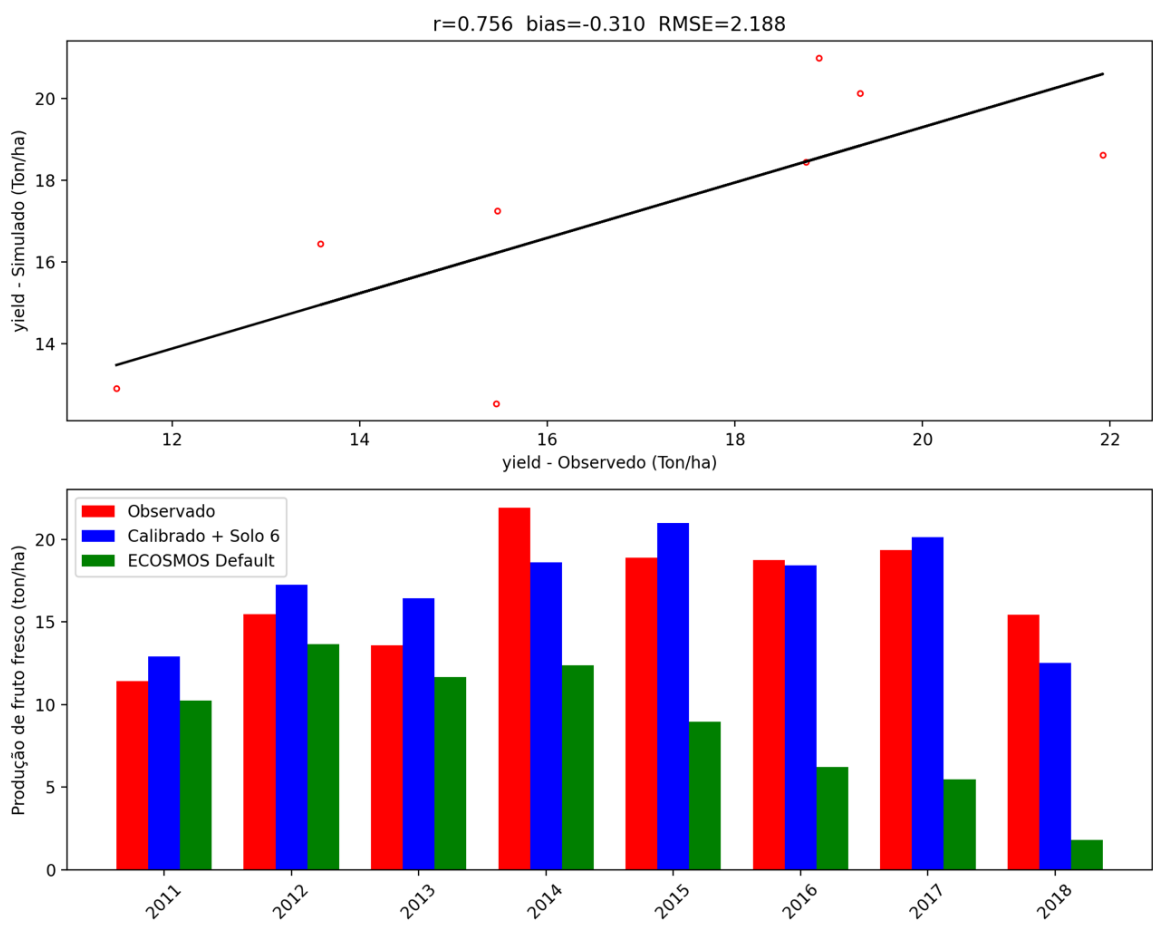


Figura - 12 Calibração para HIE do modelo ECOSMOS.
Fonte: Autor

Conclusão

Em conclusão, este artigo 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 Bibliográficas

- AMAZÔNIA, G. Perspectivas do meio ambiente na amazônia. PnUma/otca/**centro de Pesquisa da Universidad del Pacifico**, 2008.
- BARCELOS, E. et al. **Dendê: Informações básicas para o seu cultivo**. Brasília: 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-brasilera de geografia*, n. 10, 2010.
- 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, 1 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**. In: p. 155–160, 2014.
- CORLEY, R. H. V.; TINKER, P. B. H. **The oil palm**. 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.
- DE ANDRADE, V. M. S. et al. **Considerações sobre clima e aspectos edafoclimáticos da mesorregião Nordeste paraense**. Embrapa Amazônia Oriental-Capítulo em livro científico (ALICE), 2017.
- DE MIRANDA, E. E.; MARTINHO, P. R. R.; DE CARVALHO, C. A. **Nota técnica sobre queimadas, desmatamentos e imóveis rurais no bioma Amazônia em 2019**. Embrapa Territorial-Nota Técnica/Nota Científica (ALICE), 2020.
- 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**. Embrapa Amazônia Oriental-Documents (INFOTECA-E), 2014.
- 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**, 8(11), 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 New York, p. 247–272. 2014.

GOMES JUNIOR, R. A. **Bases técnicas para a cultura da palma de óleo integrado na unidade produtiva da agricultura familiar**. [s.l.] Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2010.

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

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

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.

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**. 1975.

MORTON, S.; HILL, R. **What is biodiversity, and why is it important?** In: p. 1–12. 2015.

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

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

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

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