

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Moisés de Freitas do Nascimento

**DESEMPENHO DO MODELO SIMANIHOT EM AMBIENTE  
TROPICAL**

Santa Maria, RS  
2021

**Moisés de Freitas do Nascimento**

**DESEMPENHO DO MODELO SIMANIHOT EM AMBIENTE TROPICAL**

Dissertação apresentada ao Curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

Orientador: Dr. Alencar Junior Zanon  
Coorientador: PhD. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS  
2021

Ficha gerada com os dados fornecidos pelo autor

Nascimento, Moisés de Freitas do  
desempenho do modelo simanipot em ambiente tropical / Moisés  
de Freitas do Nascimento.-2021.  
41 p.; 30cm

Orientador: Alencar Junior Zanon  
Coorientador: Nereu Augusto Streck  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências rurais, Programa de Pós-graduação em  
agronomia, Santa Maria, RS, 2021.

1. *Manihot Esculenta* 2. modelagem 3. potencial de  
produtividade 4. lacuna de produtividade I. Zanon, Alencar  
Junior II. Nascimento, Moisés de Freitas do .III. Streck,  
Nereu Augusto IV desempenho do modelo simanipot em ambiente  
tropical.



**Moisés de Freitas do Nascimento**

**DESEMPENHO DO MODELO SIMANIHOT EM AMBIENTE TROPICAL**

Dissertação apresentada ao Curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

**Aprovado em 05 de outubro de 2021:**

---

**Alencar Junior Zanon, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Nereu Augusto Streck, PhD. (UFSM)**

---

**Luana Fernandes Tironi, Dra. (Emater/RS-Ascar)**

---

**Diego Nicolau Follmann, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2021

## DEDICATÓRIA

*Aos meus amados familiares Tito Paulo, Tereza, Angela Maria e Marco Aurélio, e a todas as pessoas que me ajudaram e incentivaram.*

**Dedico..**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por toda a sabedoria e discernimento na realização desse trabalho.

Aos meus pais Tito Paulo e Tereza que sempre batalharam para que tivéssemos o melhor, nos ensinando a trilhar um caminho de justiça e retidão.

Aos meus queridos irmãos Angela Maria e Marco Aurélio pela dedicação, zelo e cuidado.

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos meus orientadores, Professores Nereu e Alencar, pelos ensinamentos, amizade, confiança e paciência durante toda a jornada de formação profissional.

Aos colegas e amigos das Equipes Simanihot, Field Crops e PhenoGlad pela convivência e parceria.

Enfim, o meu sincero agradecimento a todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

### DESEMPENHO DO MODELO SIMANIHOT EM AMBIENTE TROPICAL

AUTOR: Moisés de Freitas do Nascimento

ORIENTADOR: Alencar Junior Zanon

Dentro de um contexto de soberania e segurança alimentar são exigidas ferramentas e metodologias apropriadas para quantificar a capacidade de um país em produzir alimentos. O emprego de modelos ecofisiológicos possibilitam avaliar a interação do genótipo, ambiente e práticas de manejo, permitindo identificar as principais causas responsáveis por reduzirem e limitarem a produtividade dos cultivos agrícolas. O clima é uma das principais causas da variabilidade de produtividade, sendo que o principal causador da variabilidade do clima é o Fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), que apresenta uma atuação a nível mundial. A cultura da mandioca é uma importante fonte de calorias, sendo que o Brasil é um dos maiores produtores de mandioca no mundo. Dessa forma o presente estudo tem por objetivo avaliar o desempenho do modelo Simanihot para representar as regiões produtoras de mandioca do Brasil em ambiente tropical. Foram realizadas simulações na condição potencial ( $Y_p$ ) e limitada por água ( $Y_w$ ) em 20 locais do Brasil durante o período de 1980 a 2017. Foram utilizados dados de produtividade de raízes de mandioca publicados na literatura para validar o desempenho do modelo. O modelo foi exposto a testes de sensibilidade para capturar os efeitos do fenômeno ENOS e identificar os biomas brasileiros. O desempenho do modelo foi analisado por meio das estatísticas da raiz do quadrado médio do erro (RQME), raiz do quadrado médio do erro normalizado (RQMEn), o índice BIAS e o índice de concordância  $d_w$ . Foi identificado que o modelo estima de forma satisfatória o potencial de produtividade com um erro normalizado de 17,54% (RQMEn). O modelo também apresentou sensibilidade em: (i) capturar os biomas brasileiros quanto a disponibilidade hídrica; (ii) capturar a redução na produtividade devido à época de plantio e da restrição da capacidade de água disponível (CAD) para as categorias de solo arenoso, médio e argiloso; e (iii) não identificou um impacto do fenômeno ENOS na produtividade de raízes de mandioca.

Palavras-chave: *Manihot esculenta*, modelagem, potencial de produtividade, lacuna de produtividade.

## ABSTRACT

### PERFORMANCE EVALUATION OF SIMANIHOT MODEL IN A TROPICAL ENVIRONMENT

AUTHOR: Moisés de Freitas do Nascimento

ADVISOR: Alencar Junior Zanon

Appropriate tools and methodologies are required to quantify a country's ability to produce food in a context of food security. The use of crop simulation models makes possible to assess the interaction of genotype, environment and management practices, allowing the identification of the main causes responsible for reducing and limiting the productivity of agricultural crops. The climate is one of the main causes of productivity variability, and the main cause of climate variability is the El Niño Southern Oscillation (ENSO), which has a worldwide impact. Cassava is an important source of calories, and Brazil is one of the largest producers of cassava in the world. Thus, the present study aims to evaluate the performance of the Simanihot model to represent the cassava producing regions of Brazil in a tropical environment. Simulations were performed in the yield potential ( $Y_p$ ) and water-limited yield potential ( $Y_w$ ) in 20 locations in Brazil during the period from 1980 to 2017. Cassava root yield data published in the literature were used to validate the model's performance to estimate yield potential ( $Y_p$ ). The model was exposed to sensitivity tests to capture the effects of the ENSO phenomenon and to identify Brazilian biomes. The performance of the model was analyzed using the statistics of root-mean-square error (RMSE), normalized root-mean-square error (RMSE<sub>n</sub>), the BIAS index and the dw agreement index. It was identified that the model satisfactorily estimates the yield potential with a normalized error of 17.54% (RMSE<sub>n</sub>). The model also showed sensitivity in: (i) capturing Brazilian biomes in terms of apparent water balance; (ii) capture the reduction in yield due: delay in the planting date, and the lower available water capacity (AWC) for the soil types of sandy soil, loam soil and clay soil; and (iii) did not identify an impact of the ENSO phenomenon on the yield of cassava roots.

Keywords: *Manihot esculenta*, crop model, yield potential, yield gap.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Comparação da precipitação mensal acumulada (mm) de XAVIER com os dados de precipitação da estação automática do INMET A001 (considerada como referência), localizada em Brasília – DF. Cada ponto representa um determinado mês do período de 01/01/2016 a 31/12/2016, utilizando o método de regressão cumulativa por duplas massas recomendado pela FAO.....23
- Figura 2: Comparação da produtividade simulada de matéria seca de raízes de mandioca (Mg/ha), na condição potencial, utilizando os dados meteorológicos de XAVIER e os dados meteorológicos da estação meteorológica automática do INMET A001 (considerada como referência), localizada em Brasília -DF para o período de 2001 a 2016. RQME = raiz do quadrado médio do erro; RQMEn = raiz do quadrado médio do erro normalizado; dw = índice de concordância de willmott; BIAS = índice bias.....24
- Figura 3: Produtividade observada e simulada de raízes de mandioca ( $g/m^2$ ) utilizando dados independentes da literatura. RQME = raiz do quadrado médio do erro; RQMEn = raiz do quadrado médio do erro normalizado; dw = índice de concordância de willmott; BIAS = índice bias.....27
- Figura 4: Produtividade potencial ( $Y_p$ ) e limitada por água ( $Y_w$ ) de raízes de mandioca simulada para 20 locais do Brasil no período de 1980 a 2017. Cada barra representa um local. As porções em amarelo e branco representam a produtividade limitada por água ( $Y_w$ ) e a lacuna de produtividade ( $Y_g$ ), respectivamente. As linhas horizontais representam as médias do potencial de produtividade ( $Y_p$ ) e do potencial de produtividade limitado por água ( $Y_w$ ) (linha sólida e linha tracejada, respectivamente). As médias e o coeficiente de variação (CV) para o  $Y_p$  e  $Y_w$  são demonstradas na figura. As barras de erro do  $Y_w$  e do  $Y_p$  são exibidas em vermelho e preto, respectivamente.....28
- Figura 5: Sensibilidade do modelo em capturar os Biomas brasileiros na produtividade de matéria seca de raízes (Mg/ha). A identificação de cada bioma considerou a capacidade do ambiente em suprir a demanda hídrica ( $P - ETP$ , em mm/ano) em cada bioma.  $P$  = precipitação (mm) e  $ETo$  = evapotranspiração de referência (mm).....30
- Figura 6: Frequência cumulativa da produtividade de matéria seca de raízes de mandioca (Mg/ha) que apresenta a sensibilidade do modelo em capturar os efeitos da época de plantio na categoria de solo (A) arenoso, (C) médio e (E) argiloso e os efeitos das categorias de solos na (B) Época 1, (D) Época 2 e (F) Época 3. Época 1 = data no início do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC); Época 2 = data no meio do período recomendado; Época 3 = data no final do período recomendado e Potencial = simulações realizadas com o balanço hídrico desligado.....32
- Figura 7: Sensibilidade do modelo em capturar os efeitos do Fenômeno ENOS-Oscilação Sul na produtividade de matéria seca de raízes de mandioca (Mg/ha) nas Regiões geográficas do Brasil (A) Centro Oeste, (B) Norte, (C) Nordeste, (D) Sudeste e (E) Sul. Cada barra representa a fase do ENOS (El Niño, La Niña e Neutro). As porções em Amarelo e Branco representam a produtividade limitada por água ( $Y_w$ ) e a lacuna de produtividade ( $Y_g$ ), respectivamente. As linhas horizontais representam as médias de temperatura ( $^{\circ}C$ ) e radiação solar global ( $MJ/m^2$  dia) (linhas sólida e tracejada respectivamente). A precipitação, em mm, é demonstrada dentro de cada barra. As barras de erro do  $Y_w$  e do  $Y_p$  são exibidas em vermelho e preto, respectivamente.....34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição das condições meteorológicas de temperatura (°C), radiação solar (MJ / m <sup>2</sup> dia) e precipitação (mm), as datas de plantio utilizadas em cada local e a localização dos 20 locais utilizados no estudo.....	22
--	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CAD – Capacidade de água disponível (mm)

ENOS – Fenômeno El Niño-Oscilação Sul

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

GYGA - Global Yield Gap Atlas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INO – Índice Niño Oceânico

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

TSM - Anomalia da temperatura da superfície do mar

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação e a Cultura

ZARC – Zoneamento Agrícola de Risco Climático

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	HIPÓTESE.....	14
1.3	OBJETIVO GERAL.....	15
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
2.1	CULTURA DA MANDIOCA.....	16
2.2	MODELAGEM NA AGRICULTURA.....	17
<b>2.2.1</b>	<b>Modelo Simanihot.....</b>	<b>18</b>
2.3	POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NA CULTURA DA MANDIOCA.....	18
2.4	FENÔMENO EL NIÑO-OSCILAÇÃO SUL (ENOS).....	19
2.5	BIOMAS BRASILEIROS E O DESAFIO NO USO DE MODELOS AGRÍCOLAS 20	
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS, DADOS METEOROLÓGICOS E PARÂMETROS DE SOLO.....	22
3.2	MODELO DE SIMULAÇÕES E TESTE COM DADOS INDEPENDENTES.....	25
3.3	PERFORMANCE DO MODELO EM CAPTURAR EFEITOS DO FENÔMENO ENOS E OS BIOMAS BRASILEIROS.....	25
3.4	ANÁLISE DA CONFIABILIDADE E DESEMPENHO DO MODELO.....	26
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura da mandioca é considerada uma importante fonte de calorias no mundo e pode desempenhar um papel fundamental na segurança alimentar das nações (HOWELER; LUTALADIO; THOMAS, 2013; PARMAR; STURM; HENSEL, 2017). O Brasil assume uma posição de destaque em produção mundial de mandioca, sendo um dos cinco maiores produtores (FAOSTAT, 2021). No cenário nacional as regiões produtoras de mandioca em ambiente tropical representam mais de 70% da produção brasileira de mandioca (IBGE, 2021a), ressaltando a importância de estudos que visem trazer inovações para uma cultura com grande relevância no cenário mundial.

Somado a essa questão existe a preocupação sobre o papel dos países em atender a demanda crescente de alimentos devido ao aumento da população mundial (FAO, 2018). Essa vem sendo a temática de estudos recentes publicados em periódicos com alta relevância na comunidade científica, como é o caso da autossuficiência da produção de arroz na China (DENG et al., 2019), e a capacidade dos países da África Subsaariana em serem autossuficientes na produção de alimentos (VAN ITTERSUM et al., 2016).

Para que seja possível quantificar o quanto um país pode produzir de alimentos, é necessário o emprego de ferramentas e metodologias que estimem de forma apropriada a magnitude desse potencial. Isso é fundamental para que gestores dessas nações possam direcionar e propor políticas públicas, pesquisas e investimentos em áreas e setores com maior impacto na produção. Dessa forma o uso de modelos ecofisiológicos representam o método que melhor estima o potencial de produtividade de uma cultura, pois incorporaram nas suas equações matemáticas o entendimento dos processos biológicos e a interação genótipo x ambiente x manejo para uma ampla faixa de ambientes (GRASSINI et al., 2015; VAN ITTERSUM et al., 2013).

Uma das principais etapas no processo de validação de um modelo consiste nos testes de sensibilidade, principalmente quanto ao clima. Isso por que o clima é um dos principais causadores da variabilidade na produção e produtividade das culturas. Nesse sentido é fundamental expor o desempenho das estimativas frente a eventos climáticos extremos, como o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), que é uma das principais fontes de variabilidade do clima a nível global (ANDERSON et al., 2018). Outro aspecto que deve ser contemplado nessa discussão é a habilidade do modelo em capturar um dos principais fatores climáticos limitantes em ambientes tropicais que é a sazonalidade da precipitação. Nesses ambientes a sazonalidade é representada pela ocorrência das estações de seca e chuvosa, que implica diretamente na disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da cultura.

Para a cultura da mandioca foram realizados estudos estimando o potencial e as lacunas de produtividade na África por Fermont et al. (2009) e no Brasil por Visses, Sentelhas

e Pereira (2018), porém suas estimativas não foram norteadas por modelos ecofisiológicos, mas por meio das produtividades obtidas da aplicação de questionários e de experimentos conduzidos em lavouras (FERMONT et al., 2009) e de modelos com solução mais empírica (VISSES; SENTELHAS; PEREIRA, 2018). Atualmente o Brasil possui um modelo ecofisiológico desenvolvido por Tironi et al. (2017), calibrado e validado para as condições subtropicais da região Sul do país. Porém o seu desempenho não foi avaliado para simular a produtividade de raízes de mandioca em ambiente tropical do país. Destaca-se que por meio da utilização de modelos, se torna possível avaliar a resposta de genótipos à diferentes épocas de plantio, para diferentes ambientes e práticas de manejo, com a redução de custos envolvendo a instalação e condução de múltiplos experimentos (PHONCHAROEN et al., 2021).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A adoção de um modelo ecofisiológico em estudos de potencial e lacunas de produtividade pode não ser tão simples, pois depende da disponibilidade de um modelo calibrado e validado para a cultura. O modelo Simanihot (TIRONI et al., 2017) é um modelo ecofisiológico, baseado em processos desenvolvido para a cultura da mandioca, sendo calibrado e validado para as condições Sul do Brasil. O processo de desenvolvimento desse modelo teve início com a modificação proposta por Gabriel et al. (2014) e o entendimento dos processos que estão inclusos no modelo são oriundos de mais de dez anos de pesquisas realizados pelo grupo de Agrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Somado à disponibilidade de um modelo baseado em processos existe o consenso na comunidade científica de que os modelos ecofisiológicos representam a forma mais robusta para estimar o potencial de produtividade das culturas (DENG et al., 2019; GRASSINI et al., 2015; VAN ITTERSUM et al., 2013, 2016).

Diante disso o presente trabalho soma-se aos esforços de um projeto mais abrangente e propõe-se a realizar a avaliação do desempenho do modelo Simanihot para que esse modelo possa ser utilizado nas estimativas do potencial de produtividade para as regiões produtoras de mandioca em ambiente tropical do Brasil.

### 1.2 HIPÓTESE

O modelo Simanihot possui as bases ecofisiológicas norteadoras da interação genótipo x ambiente x manejo, que permitem a sua calibração e validação para regiões produtoras de mandioca do Brasil em ambiente tropical.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho do modelo Simanihot para as regiões produtoras de mandioca em ambiente tropical do Brasil.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

(i) avaliar o desempenho do modelo Simanihot em estimar a produtividade potencial de raízes de mandioca em ambiente tropical;

(ii) simular a produtividade potencial ( $Y_p$ ) e limitada por água ( $Y_w$ ) para as regiões produtoras de mandioca;

(iii) analisar a sensibilidade do modelo em capturar os efeitos do Fenômeno ENOS e identificar os biomas brasileiros quanto a disponibilidade hídrica.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CULTURA DA MANDIOCA

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma planta perene que pertence à família Euphorbiaceae, cultivada desde as latitudes 30°N até 30°S e presente em locais com altitudes acima de 2.000 m (ALVES, 2009; HOWELER, 2012). Tem como centro de origem a América do Sul e os primeiros relatos de seu cultivo indicam que essa cultura surgiu há pelo menos 4.000 anos (HOWELER, 2012). A expansão dessa cultura para outras regiões tropicais como África e Ásia ocorreu por volta dos séculos XVI e XVII, após o descobrimento das Américas (HOWELER, 2012).

A planta de mandioca é constituída de haste, pecíolos, folhas, raízes fibrosas, raízes tuberosas e frutos, sendo que a principal forma de propagação da mandioca ocorre por meio de segmentos da haste, denominados de manivas. O produto comercial da mandioca são as raízes tuberosas, que podem ser colhidas entre 6 a 24 meses após o plantio (MAP) (ALVES, 2009). Quanto ao tipo de planta existem dois tipos distintos: um que apresenta crescimento de haste ereto (monopodial) e outro com a presença de ramificação simpodial. Algumas cultivares ainda podem apresentar brotações originadas das axilas das folhas na haste principal (ALVES, 2009).

Esses parâmetros morfológicos quanto ao tipo de planta oferecem uma alternativa na caracterização de cultivares de mandioca. Isso por que na cultura da mandioca é comum a denominação das cultivares com o emprego de nomes populares, o que pode implicar de uma cultivar receber diferentes nomes (TEIXEIRA et al., 2014). Se pensarmos em nível de Brasil que existem mais de 4.500 acessos de mandioca (TIRONI et al., 2019), essa situação pode levar a conflitos na comunicação e identificação das cultivares em diferentes regiões brasileiras.

Considerada como a cultura do século XXI para matar a fome do mundo (HOWELER; LUTALADIO; THOMAS, 2013), a mandioca está entre as cinco principais fontes de calorias, atrás do milho, arroz, trigo e batata (PARMAR; STURM; HENSEL, 2017). A produção mundial de mandioca é de 303 milhões de toneladas em uma área de 27,5 milhões de hectares, representado uma produtividade de 11,1 Mg ha<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2021).

A maior concentração da produção de mandioca está no continente da África, que representa 63,3 % do total de mandioca produzido no mundo, seguida pela Ásia com 28,0% e das Américas com 8,6% (FAOSTAT, 2021). A Nigéria, a República Democrática do Congo,



Tailândia, Gana e Brasil são os cinco maiores países produtores de mandioca e juntos representam mais 50% da produção mundial de mandioca (FAOSTAT, 2021).

No Brasil a produção de mandioca para o ano de 2020 foi de 18,2 milhões de toneladas em 1,2 milhão de hectares, e uma produtividade de 15,0 Mg ha<sup>-1</sup>. A maior região produtora de mandioca é a Norte com 34% da produção nacional, seguida da região Sul com 25%, Nordeste com 20%, Sudeste com 13% e Centro-Oeste com 8%. Os cinco maiores estados produtores de mandioca são o Pará, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Amazonas que somam mais de 50% da produção nacional (IBGE, 2021a).

## 2.2 MODELAGEM NA AGRICULTURA

Modelos matemáticos podem ser conceitualmente compreendidos como um conjunto de equações que representam o entendimento dos processos biológicos que ocorrem nos sistemas vegetais. A partir dessa visão temos que os modelos aplicados na agricultura permitem reunir dentro de um único sistema, os avanços no conhecimento científico sobre as complexas interações que ocorrem nos sistemas agrícolas. Essa abordagem sobre a aplicabilidade dos modelos pode ser expandida quando pensamos no modelo como uma ferramenta, que pode ser utilizada nas tomadas de decisões que impliquem num sistema agrícola mais eficiente (WALLACH; MAKOWSKI; JONES, 2018).

Os modelos matemáticos podem ser classificados quanto a sua natureza em empíricos ou mecanísticos. Modelos empíricos consistem de equações de regressão que fazem uma relação direta dos fatores explicando um fenômeno, como por exemplo a relação entre a precipitação anual e a produtividade (ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016). Esses modelos apresentam como características a exigência de um grande conjunto de dados experimentais para estimar os parâmetros da regressão, porém as suas predições são restritas as mesmas condições de ambiente e cultivar onde foram geradas as equações (VAN LAAR; GOUDRIAAN; VAN KEULEN, 1997).

Modelos mecanísticos têm uma solução mais complexa, sendo baseada no entendimento dos processos, como a assimilação de CO<sub>2</sub> e respiração, considerando a influência do ambiente na interação dos processos na descrição do crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas. Essa característica deve-se ao modelo reunir o conhecimento construído ao decorrer dos anos sobre a interação e funcionamento dos mecanismos que regulam o desempenho das culturas agrícolas (VAN LAAR; GOUDRIAAN; VAN KEULEN, 1997).

No uso de modelos agrícolas é comum a prática da avaliação da robustez dos seus resultados por meio de testes de sensibilidades. Essa etapa possibilita que os modeladores possam identificar a importância dos dados de entrada (clima, manejo e solo) na determinação do resultado final gerada por esse modelo. Outra possibilidade refere-se à oportunidade de identificar erros técnicos que possam existir na estrutura do modelo, além de permitir que possam ser apontadas novas direções nas pesquisas para aprimoramento no desenvolvimento de um modelo (SALTELLI et al., 2008).

### **2.2.1 Modelo Simanihot**

O modelo Simanihot (GABRIEL et al., 2014; TIRONI et al., 2017) é um modelo matemático ecofisiológico dinâmico, baseado em processos, que simula no passo de um dia, o crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura da mandioca no estado do Rio Grande do Sul, RS - Brasil. Os dados meteorológicos necessários para realizar as simulações são: temperatura mínima, máxima e média diária do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ), radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ), precipitação (mm) e evapotranspiração (mm). O software e sua documentação estão disponíveis para a comunidade e podem ser acessados no site do Simanihot (<http://w3.ufsm.br/simanihot/>). Na sua versão 1.2, o modelo dispõe de seis cultivares (FEPAGRO RS13, FEPAGRO RS 14, Estrangeira, Cascuda, Paraguaia e São José) calibradas e validadas para a região sul do Brasil (TIRONI et al. 2017).

No modelo são descritos processos ecofisiológicos que descrevem o crescimento e desenvolvimento vegetal como a ocorrência dos estágios fenológicos (emergência, início da tuberização, ramificações simpodiais e colheita), a duração das fases de desenvolvimento, acúmulo e particionamento de biomassa, emissão e expansão de folhas e hastes e o sistema radicular (raízes fibrosas e tuberosas) (TIRONI et al., 2017). Dois métodos estão disponíveis no modelo para o cálculo do balanço hídrico. O primeiro utiliza a abordagem proposta por Thornthwaite and Mather, que tem como característica exigir poucas informações relacionadas as condições do solo; o segundo método é o proposto por Ritchie, que descreve as interações e dinâmica da água no solo para as diferentes camadas, exigindo um maior conjunto de informações sobre as propriedades físicas do solo (TIRONI et al., 2017).

## **2.3 POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NA CULTURA DA MANDIOCA**

Estudos envolvendo o potencial e as lacunas de produtividade das culturas vem sendo um dos temas mais abordados quanto a segurança alimentar das nações ao redor do mundo (DENG et al., 2019; VAN ITTERSUM et al., 2016). A grande questão que impulsiona essa discussão são as projeções do aumento da demanda mundial de alimentos até 2050, devido ao aumento da população, renda e o acelerado processo de urbanização (FAO, 2018).

Um dos principais pontos desses estudos refere-se aos métodos empregados na estimativa do potencial de produtividade, que segue a metodologia do projeto Global Yield Gap Atlas (GYGA) ([www.yieldgap.org](http://www.yieldgap.org)). Dessa forma as estimativas do potencial de produtividade das culturas são realizadas com a utilização de modelos ecofisiológicos, baseado em processos, sendo considerados como a forma que melhor representa o potencial de produtividade (GRASSINI et al., 2015; VAN ITTERSUM et al., 2013).

Um dos estudos pioneiros em estimar o potencial de produtividade para a cultura da mandioca foi realizado por Cock et al. (1979), onde a produtividade máxima estaria ente 70 a 90 ton ha<sup>-1</sup>, nas condições de ambiente tropical da Colômbia. De acordo com Cock et al. (1979), para se atingir essas elevadas produtividades é necessário um tipo de planta ideal, que reúne características determinantes na construção da produtividade, como tamanho e tempo de duração da folha associado com um comportamento de ramificação tardia. O potencial para a região Sul do Brasil foi estimado por Gabriel et al. (2014), onde a produtividade seria em torno de 55 ton ha<sup>-1</sup>.

Fermont et al. (2009) e Visses, Sentelhas e Pereira (2018) realizaram estudos explorando as lacunas de produtividade para a cultura da mandioca na África e no Brasil, respectivamente. Fermont et al. (2009) encontrou que as produtividades poderiam ser elevas em mais de 50% com a adoção cultivares com genética superior, melhoria nas práticas de manejo e utilização de fertilizantes (NPK). Visses, Sentelhas e Pereira (2018) estimaram um potencial de produtividade para o Brasil que variou de 44 a 67 ton ha<sup>-1</sup>, utilizando o modelo FAO Agroecological Zone crop simulation para quantificar o potencial e as lacunas de produtividade.

#### 2.4 FENÔMENO EL NIÑO-OSCILAÇÃO SUL (ENOS)

O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é uma das principais fontes de variabilidade do clima no mundo, afetando assim a produção das culturas (ANDERSON et al., 2018). Isso porque a atuação do fenômeno ENOS está associada a anomalias na precipitação, como descrito por Grimm, Ferraz e Gomes (1998) para a região Sul e Araújo et

al. (2013) para as regiões Norte e Nordeste do Brasil. Para a cultura da mandioca Oluwole (2015) encontrou que a produção de mandioca em diferentes regiões da África e do Brasil mostraram correlação com mudanças na precipitação devido a atuação do fenômeno ENOS.

Por se tratar de um fenômeno oceânico-atmosférico de larga escala, o fenômeno ENOS afeta o regime térmico e de precipitação de diferentes regiões do globo, tendo como local de atuação a região do oceano pacífico equatorial, sendo composto de uma fase quente (El Niño) e outra fase fria (La Niña) (CUNHA, 2001; STRECK et al., 2008).

As fases e as intensidades de cada episódio são definidas pelo critério estabelecido pela National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA (<http://www.noaa.gov>), que tem como referência o monitoramento do Índice Niño oceânico (INO). A definição desse parâmetro é caracterizada pela média móvel trimestral da anomalia da temperatura da superfície do mar (TSM). Dessa forma um evento de El Niño é caracterizado quando o INO é  $0,5^{\circ}\text{C}$  ou superior e para condições de La Niña deve ser  $-0,5^{\circ}\text{C}$  ou inferior durante cinco meses consecutivos (CUNHA, 2001).

## 2.5 BIOMAS BRASILEIROS E O DESAFIO NO USO DE MODELOS AGRÍCOLAS

Os modelos agrícolas são uma simplificação da realidade e que são postos a prova quando expostos a condições de heterogeneidade e variabilidade das condições edafo-climáticas em análises de cunho macrorregional. O território Brasileiro é um exemplo de desafio no campo da modelagem devido a sua grande extensão territorial e a presença de seis grandes biomas que possuem características distintas, sendo de suma importância que o modelo capture tais condições.

Por definição o bioma é um grande sistema ecológico que é definido principalmente pelo clima. O Brasil conta com seis biomas continentais: a Mata Atlântica, a Amazônia, o Cerrado, a Caatinga, o Pantanal e o Pampa (IBGE, 2021b).

O bioma com maior extensão territorial é a Amazônia com 4,2 milhões de quilômetros quadrados, que corresponde a quase a metade de todo o território nacional. Esse bioma representa a maior biodiversidade mundial e desempenha um papel fundamental na regulação do clima mundial devido a produzir imensa quantidade de água (BUAINAIN et al., 2020; IBGE, 2021b).

O bioma Caatinga ocupa em torno de 10% do território sendo o único bioma exclusivamente brasileiro. Apresenta um clima semiárido com temperaturas próximas a  $30^{\circ}\text{C}$

e um sistema de chuvas complexo que impõe restrições ambientais de água e solo para a agricultura (BUAINAIN et al., 2020).

O Cerrado brasileiro é uma das regiões mais importantes para a produção agrícola do Brasil, ocupando 22% do território nacional. Outro aspecto de grande importância é o potencial aquífero, pois abriga as nascentes de três grandes bacias hidrográficas da América do Sul: Amazônia/Tocantins, São Francisco e Prata (BUAINAIN et al., 2020).

A Mata Atlântica ocupa 13% do território e apresenta grande diversidade de vegetação. É um dos biomas mais degradados, restando apenas 15% de sua vegetação original. Além da ocupação rural destaca-se que 56% da área urbana brasileira está concentrada no bioma Mata Atlântica (BUAINAIN et al., 2020; IBGE, 2021b).

O bioma Pampa representa aproximadamente 2% do território nacional e apresenta planícies de relevo suave recobertas com mais de 450 espécies de gramíneas e 150 de leguminosas. O clima predominante na região é o temperado com verões quentes e invernos rigorosos, podendo ter ocorrência de geadas e neve (BUAINAIN et al., 2020).

O sexto e último bioma é o Pantanal que ocupa 1,8% do território nacional sendo uma das maiores extensões de área alagada do mundo. Esse bioma é considerado pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) como Patrimônio Natural Mundial e Reserva da Biosfera (BUAINAIN et al., 2020; IBGE, 2021b).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS, DADOS METEOROLÓGICOS E PARÂMETROS DE SOLO

Os locais de estudo dentro das regiões produtoras de mandioca em ambiente tropical, foram escolhidos seguindo a metodologia Global Yield Gap Atlas - GYGA (<http://www.yieldgap.org/>) e são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1: Descrição das condições meteorológicas de temperatura (°C), radiação solar (MJ / m<sup>2</sup> dia) e precipitação (mm), as datas de plantio utilizadas em cada local e a localização dos 20 locais utilizados no estudo.

Região	Local	Lat	Lon	Alt (m)	Data de plantio			Temperatura (°C)	Radiação solar (MJ/m <sup>2</sup> dia)	Precipitação (mm)
					início	meio	fim			
Nordeste	Cruz das Almas - BA	12° S	39° W	220	21/03	30/04	10/06	25,3	17,8	958,1
	São Luís - MA	2° S	44° W	55	01/01	19/02	10/04	27,9	19,4	1899,9
	Acarauí - CE	3° S	40° W	67	01/02	14/02	28/02	28,1	19,7	880,4
	Campos Sales - CE	7° S	40° W	578	11/01	21/01	31/01	26,0	20,7	537,9
Norte	Óbidos - PA	1° S	55° W	90	01/10	24/01	20/05	27,9	18,3	2203,7
	Paragominas - PA	2° S	47° W	113	01/12	30/01	31/03	27,4	18,7	1888,2
	Porto Velho - RO	8° S	63° W	87	11/09	05/12	28/02	27,4	16,2	2245,2
	Manacapuru - AM	3° S	60° W	37	01/01	30/06	31/12	28,1	16,9	1994,4
Centro	Brasília - DF	15° S	47° W	1161	11/10	30/11	20/01	22,0	18,6	1441,8
	Sinop - MT	11° S	55° W	367	01/10	31/10	30/11	26,6	17,9	1958,8
Oeste	Cuiabá - MT	15° S	56° W	242	01/10	01/12	31/01	27,0	17,6	1544,0
	Dourados - MS	22° S	54° W	463	21/09	26/10	30/11	23,7	17,8	1467,2
Sudeste	Rio Pardo de Minas - MG	15° S	42° W	850	21/03	30/04	10/06	23,3	19,5	814,5
	Uberlândia - MG	18° S	48° W	875	01/01	19/02	10/04	23,0	19,0	1459,7
	Presidente Prudente - SP	22° S	51° W	432	01/02	14/02	28/02	23,9	17,7	1345,6
	Campos dos Goytacazes - RJ	21° S	41° W	17	11/01	21/01	31/01	25,2	17,6	1039,8
Sul	Icaraíma - PR	23° S	53° W	381	01/09	11/10	20/11	24,1	18,0	1531,8
	Marechal Cândido Rondon - PR	24° S	54° W	392	01/09	01/10	31/10	23,0	17,7	1768,1
	Itapoá - SC	26° S	48° W	6	11/06	15/09	20/12	22,4	14,6	2277,1
	Rio Pardo - RS	29° S	52° W	107	21/08	25/09	31/10	22,3	17,6	1214,5

Dessa forma foram considerados locais que atendessem dois critérios: (i) representem no mínimo 5% da área colhida de mandioca (média dos últimos 5 anos) disponíveis no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE; (ii) esteja dentro de um raio de 100 km de uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (GRASSINI et al., 2015; VAN BUSSEL et al., 2015).

Os dados meteorológicos de temperatura mínima, máxima e média diária do ar (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>), radiação solar global (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), precipitação e evapotranspiração (mm), necessários para realizar as simulações, foram obtidos a partir de Xavier, King, Scanlon (2016) (XAVIER), para o período de 1980 até 2017. Foram realizadas análises para verificar a homogeneidade e variabilidade por meio da visualização

gráfica (PETERSON et al., 1998), com dois objetivos: (i) de identificar falhas, valores extremos e dados ausentes; (ii) garantir a qualidade e isenção dos dados meteorológicos nos resultados estimados pelo modelo. Os dados de precipitação foram analisados seguindo o método de regressão cumulativo com duplas massas da FAO (ALLEN et al., 1998) conforme exemplo demonstrado na Figura 1 para o local de Brasília, DF. As demais variáveis meteorológicas foram analisadas por meio da comparação entre a produtividade simulada de matéria seca de raízes, na condição potencial, utilizando os dados de XAVIER e os dados da estação meteorológica do INMET, conforme o exemplo demonstrado na Figura 2 para o local de Brasília, DF.

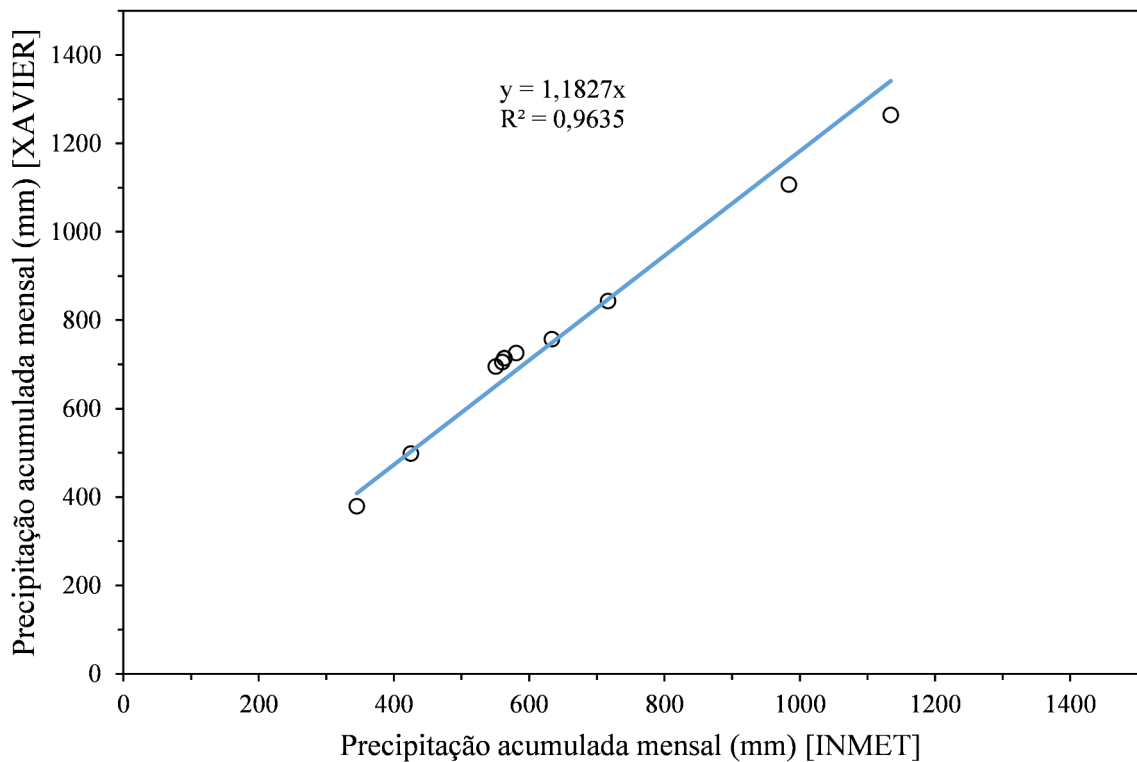


Figura 1: Comparação da precipitação mensal acumulada (mm) de XAVIER com os dados de precipitação da estação automática do INMET A001 (considerada como referência), localizada em Brasília – DF. Cada ponto representa um determinado mês do período de 01/01/2016 a 31/12/2016, utilizando o método de regressão cumulativa por duplas massas recomendado pela FAO.

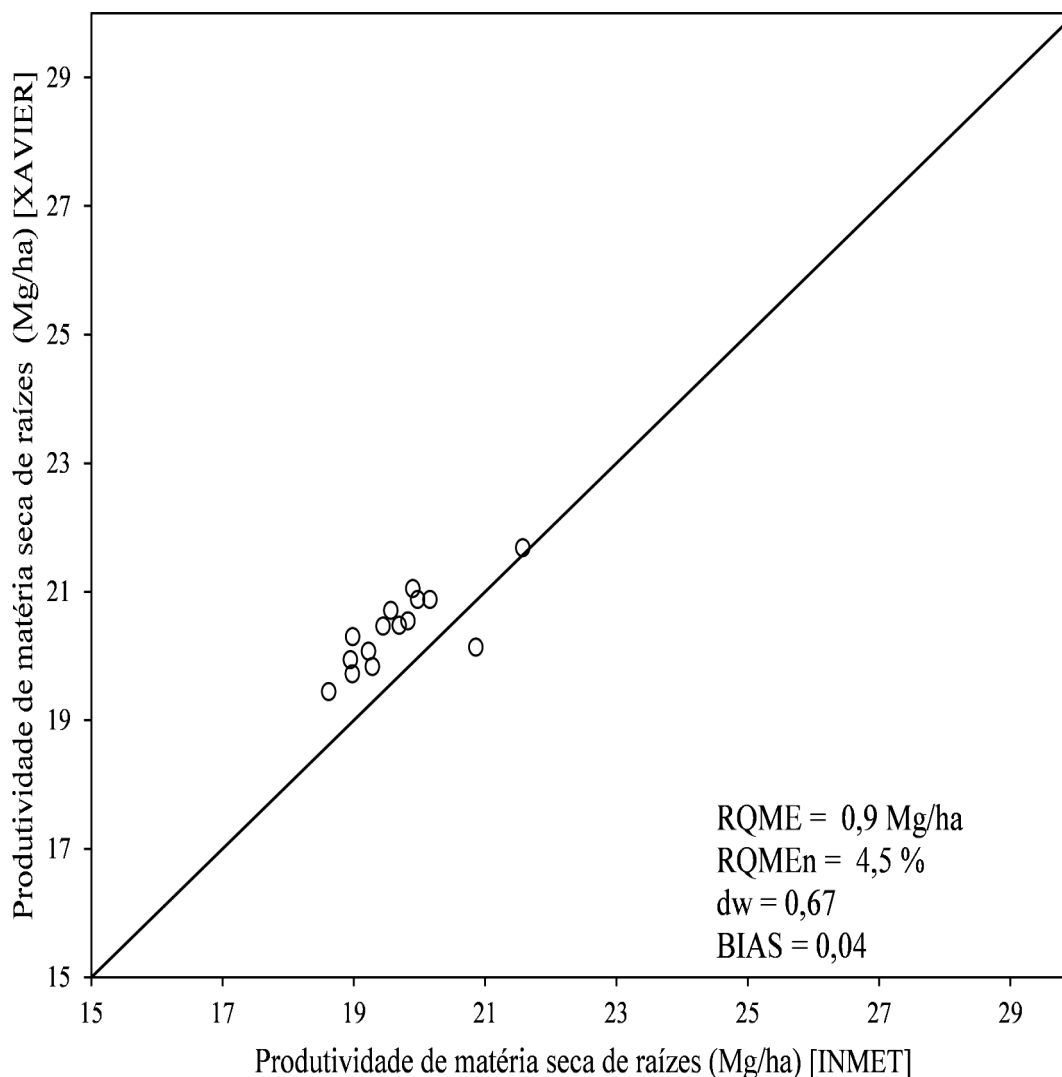


Figura 2: Comparação da produtividade simulada de matéria seca de raízes de mandioca (Mg/ha), na condição potencial, utilizando os dados meteorológicos de XAVIER e os dados meteorológicos da estação meteorológica automática do INMET A001 (considerada como referência), localizada em Brasília -DF para o período de 2001 a 2016. RQME = raiz do quadrado médio do erro; RQMEn = raiz do quadrado médio do erro normalizado; dw = índice de concordância de willmott; BIAS = índice bias.

Os dados de solo utilizados para as simulações com o modelo de balanço hídrico ativado foram obtidos por meio da base de dados de Cooper et al. (2005). Foram selecionadas três categorias de solo: Solo Tipo I e CAD de até 42 mm (textura arenosa), Solo Tipo II e CAD de até 66 mm (textura média) e Solo Tipo III e CAD de até 90 mm (textura argilosa), de acordo com o disposto em instrução normativa do Zoneamento Agrícola de Risco Climático – ZARC.



### 3.2 MODELO DE SIMULAÇÕES E TESTE COM DADOS INDEPENDENTES

Foi utilizado no estudo o modelo Simanihot (TIRONI et al., 2017) que simula o crescimento desenvolvimento e produtividade na cultura da mandioca. Atualmente o modelo possui seis cultivares calibradas, que representam as mais utilizadas no Rio Grande do Sul. O desempenho do modelo foi testado com dados independentes disponíveis na literatura, que atendam ao requisito de reportar a produtividade de matéria seca de raízes.

Foi escolhida a cultivar Estrangeira para avaliar o desempenho do modelo em ambiente tropical. Essa cultivar foi calibrada por Tironi et al. (2017) e está disponível na versão 1.2 do modelo Simanihot. A cultivar Estrangeira apresenta como características principais: a sua finalidade de uso para mesa e o caule do tipo monopodial e ereto (TIRONI et al., 2015). Tal decisão deve-se a necessidade de uma cultivar que apresentasse características que permitissem a sua utilização em diferentes ambientes e devido ao modelo simular apenas um ciclo com duração máxima de 12 meses. A principal característica foi a duração do ciclo do plantio até a colheita que apresenta variação de 10 a 12 meses. A densidade de plantas utilizada foi 12.500 pl m<sup>2</sup> e a concentração de CO<sub>2</sub> definida em 400 ppm.

Outras cultivares que tem a finalidade de uso para indústria apresentam uma duração de ciclo superior a 12 meses podendo se estender até 24 meses quando cultivada em ambiente tropical, porém em ambiente subtropical o ciclo sofre uma redução devido as geadas e baixas temperaturas do inverno.

### 3.3 PERFORMANCE DO MODELO EM CAPTURAR EFEITOS DO FENÔMENO ENOS E OS BIOMAS BRASILEIROS

Foi analisada a sensibilidade do modelo Simanihot em capturar os efeitos do Fenômeno ENOS e dos biomas brasileiros. Foram realizadas rodadas na condição potencial e na condição limitada por água, selecionando o modelo de Thornthwaite e Mather para o cálculo do balanço hídrico. As simulações foram realizadas para um período que compreende os anos de 1980 até 2017. Esse período longo foi necessário para analisar a variabilidade interanual na produtividade e identificar tendências no comportamento devido a ação do clima.

As datas de plantio para cada local foi definida de acordo com o Zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) para a cultura da mandioca disponibilizado pelo Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA (<http://www.agricultura.gov.br>). Considerou-

se três datas de plantio sendo uma no início, outra na metade e a última data no final do período recomendado pelo zoneamento.

Foram analisados os impactos do fenômeno ENOS na produtividade simulada de raízes de mandioca, sendo que essas produtividades foram classificadas de acordo com a fase do ENOS (El Niño, La Niña e Neutro), seguindo os critérios do NOAA (<http://www.noaa.gov>).

A performance do modelo em capturar os biomas brasileiros foi analisada por meio do método estatístico exploratório de clustering, utilizado em algoritmos de aprendizado e inteligência artificial (machine learning) (JAMES et al., 2013).

### 3.4 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE E DESEMPENHO DO MODELO

A análise da performance do modelo foi avaliada pelas estatísticas da raiz do quadrado médio do erro (RQME) – Equação 1, da raiz do quadrado médio do erro normalizado (RQMEn) – Equação 2, do índice BIAS – Equação 3 e do índice de concordância dw – Equação 4. O RQME indica o erro médio absoluto do modelo e quanto menor o valor de RQME melhor o desempenho do modelo (JANSSEN; HEUBERGER, 1995). O RQMEn expressa o erro médio relativo (%) e o índice BIAS mostra o desvio dos dados simulados em relação aos dados observados, sendo que os valores positivos indicam uma superestimativa dos dados simulados em relação aos dados observados e valores negativos indicam uma subestimativa. O índice de concordância dw (WILLMOTT, 1981) representa o grau de acurácia do modelo, variando de zero (sem concordância) até um (concordância perfeita). As equações utilizadas para calcular cada uma das estatísticas são:

$$RQME = [\sum(S_i - O_i)^2/n]^{0,5} \quad (1)$$

$$RQMEn = 100 * (RQME \bar{O}^{-1}) \quad (2)$$

$$BIAS = (\sum S_i - \sum O_i) / \sum O_i \quad (3)$$

$$dw = 1 - [\sum (S_i - O_i)^2] / [\sum (|S_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)]^2 \quad (4)$$

onde  $S_i$  representa valores simulados,  $S$  os valores médios simulados,  $O_i$  os valores observados,  $O$  os valores médios observados,  $\bar{O}$  é a média dos valores observados e  $n$  o número de observações.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A capacidade do modelo Simanihot em estimar a produtividade potencial de raízes de mandioca em condições de ambiente tropical e subtropical do Brasil é demonstrada na Figura 3. Foram utilizados os dados independentes da literatura dos autores El-Sharkaway; Hernández; Hershey (1992), Rós et al. (2011) e Gabriel et al. (2014). O modelo apresentou um desempenho satisfatório em estimar a produtividade potencial de raízes com valores de 270,81 g/m<sup>2</sup>, 17,53 %, 0,794 e 0,14 para o RQME, RQMEn, dw e BIAS, respectivamente.

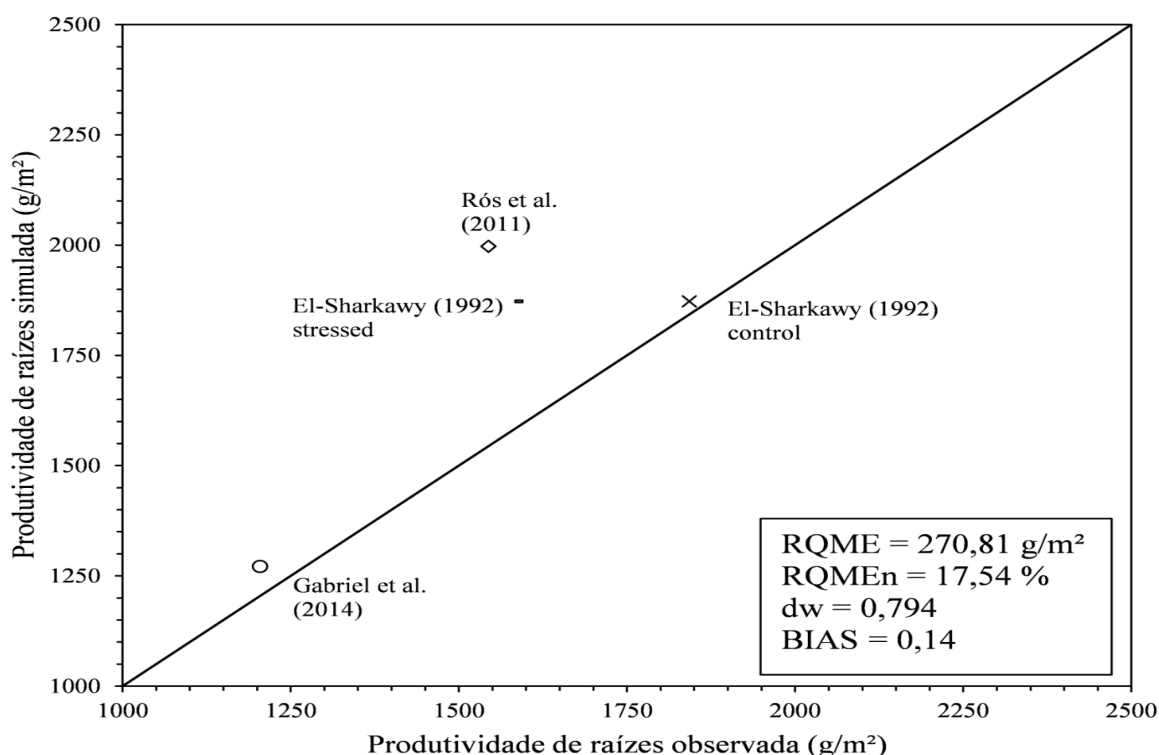


Figura 3: Produtividade observada e simulada de raízes de mandioca (g/m<sup>2</sup>) utilizando dados independentes da literatura. RQME = raiz do quadrado médio do erro; RQMEn = raiz do quadrado médio do erro normalizado; dw = índice de concordância de willmott; BIAS = índice bias.

Esse desempenho indica que as bases ecofisiológicas, presentes nos processos de crescimento e desenvolvimento, são suficientes para que o modelo Simanihot possa representar a produtividade em condições distintas das quais foi inicialmente calibrado e validado. O valor do RQME normalizado está dentro da faixa de 10 a 20% reportado no estudo de Basso; Liu; Ritchie (2016) que avaliou o desempenho de modelos para as culturas do trigo, milho e arroz. De forma similar, o índice de concordância de willmott (dw) indica um bom desempenho da eficiência do modelo, pois foi encontrado um valor superior a 0,5

que foi indicado em estudo de Lee, Dang (2020), que avaliou o desempenho do modelo AquaCrop para a cultura da mandioca no Vietnam.

A produtividade potencial ( $Y_p$ ), limitada por água ( $Y_w$ ) e a lacuna de produtividade ( $Y_g$ ) simulada pelo modelo Simanihot é apresentada na Figura 4. As médias de  $Y_p$ ,  $Y_w$  e  $Y_g$  foram  $59,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ,  $44,4 \text{ Mg ha}^{-1}$  e  $15,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Os resultados encontrados de  $Y_p$  estão de acordo com os valores reportados no estudo de Visses, Sentelhas e Pereira (2018) para a cultura da mandioca no Brasil, utilizando o modelo FAO Agroecological Zone crop simulation, que estimou  $54,2 \text{ t ha}^{-1}$ . Já as médias de  $Y_w$  e  $Y_g$  reportados no estudo citado acima, foram de 32 e  $22,3 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente, indicando uma diferença, principalmente na produtividade limitada por água ( $Y_w$ ) que foi estimada pelo modelo Simanihot.

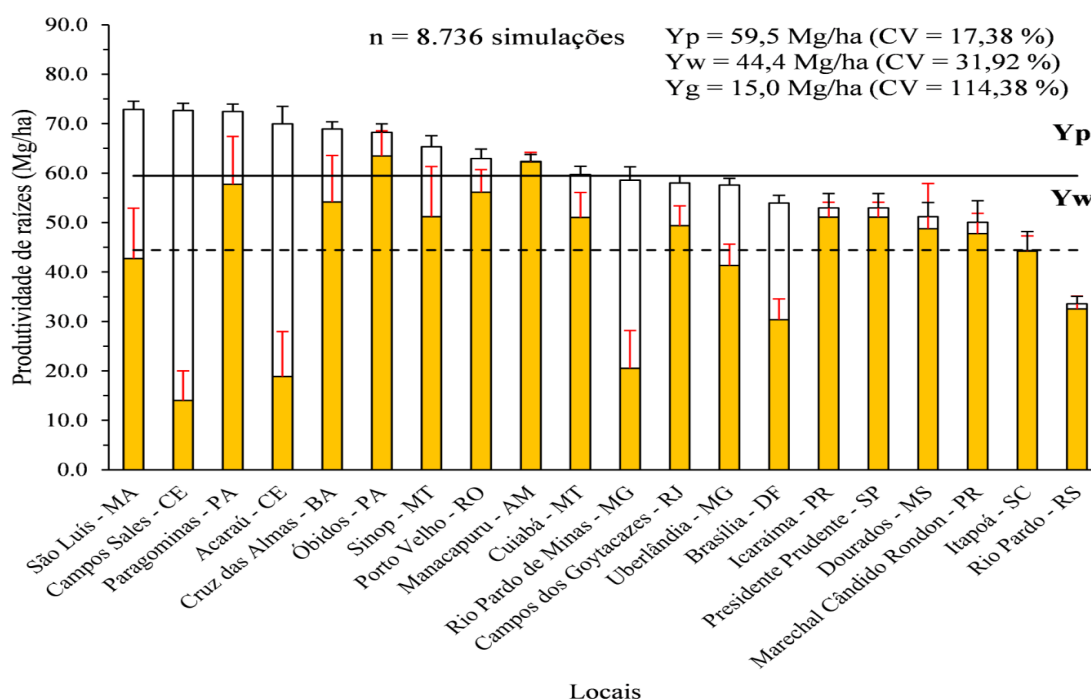


Figura 4: Produtividade potencial ( $Y_p$ ) e limitada por água ( $Y_w$ ) de raízes de mandioca simulada para 20 locais do Brasil no período de 1980 a 2017. Cada barra representa um local. As porções em amarelo e branco representam a produtividade limitada por água ( $Y_w$ ) e a lacuna de produtividade ( $Y_g$ ), respectivamente. As linhas horizontais representam as médias do potencial de produtividade ( $Y_p$ ) e do potencial de produtividade limitado por água ( $Y_w$ ) (linha sólida e linha tracejada, respectivamente). As médias e o coeficiente de variação (CV) para o  $Y_p$  e  $Y_w$  são demonstradas na figura. As barras de erro do  $Y_w$  e do  $Y_p$  são exibidas em vermelho e preto, respectivamente.

Essa diferença pode ser atribuída ao modelo Simanihot ser um modelo baseado em processos, que representa interações mais complexas na simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade. De forma similar, as médias do coeficiente de variação (CV) de  $Y_p$ ,  $Y_w$  e  $Y_g$  foram 17,38%, 31,92% e 114,38%, indicando a variabilidade devido às

condições meteorológicas de cada local, das características de solo e a variabilidade interanual. Esses valores estão de acordo com os encontrados no estudo de van Ittersum et al. (2013), que comparou as produtividades simuladas para a cultura do milho em Nebraska (USA) e para a cultura do trigo em Victoria (Austrália), em sistemas produtivos irrigados e de sequeiro, com médias do coeficiente de variação (CV) de  $Y_p$ ,  $Y_w$  e  $Y_g$  sendo: 7%, 26 à 31,92% e 36 à 95%, respectivamente. Quando analisamos os locais da Região Nordeste: São Luís (MA), Cruz das Almas (BA), Acaraú (CE) e Campos Sales (CE) (Figura 4) observamos uma amplitude na produtividade limitada por água ( $Y_w$ ), que variou de 14,0 à 54,1 Mg ha<sup>-1</sup>. Essa amplitude elevada pode ser explicada pela variabilidade da precipitação anual nesses locais, com uma variação de 537,9 à 1899,9 mm (Tabela 1). Dessa forma destacamos que o modelo capturou a disponibilidade hídrica como sendo o principal fator responsável pela variabilidade da produtividade limitada por água ( $Y_w$ ), em ambiente tropical do Brasil.

O modelo foi analisado quanto a sensibilidade em capturar os biomas brasileiros e os resultados são apresentados na Figura 5. Essa análise indica que o modelo identificou os biomas brasileiros, baseado no critério climático que considera a capacidade do ambiente em suprir a demanda hídrica (considerando as variáveis precipitação e evapotranspiração, em mm).

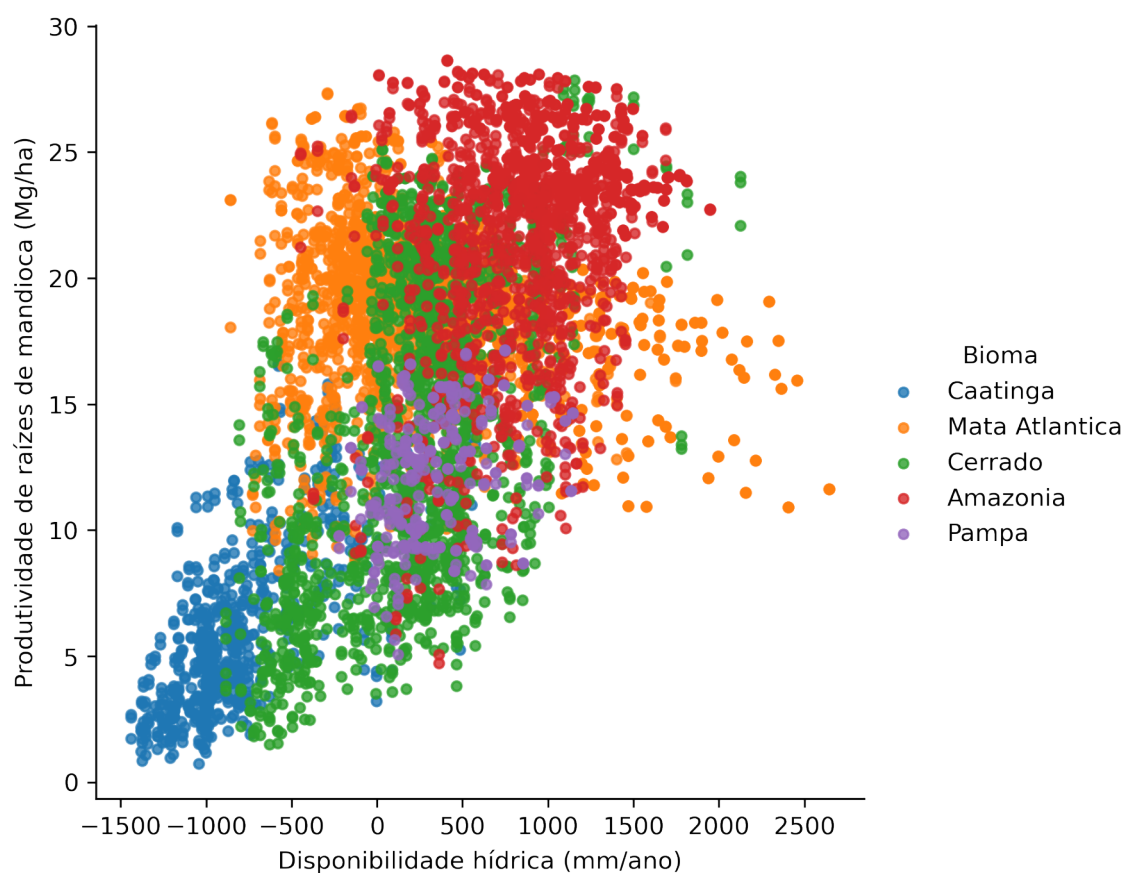


Figura 5: Sensibilidade do modelo em capturar os Biomas brasileiros na produtividade de matéria seca de raízes (Mg/ha). A identificação de cada bioma considerou a capacidade do ambiente em suprir a demanda hídrica ( $P - ETP$ , em mm/ano) em cada bioma.  $P$  = precipitação (mm) e  $ETo$  = evapotranspiração de referência (mm).

Essa abordagem é similar ao descrito por van Wart et al. (2013) que comparou a utilização de diferentes métodos para agrupar regiões com características climáticas homogêneas, destacando a importância da utilização de critérios que permitam a extrapolação das estimativas de  $Yp$  e  $Yw$ . Essa capacidade do modelo em representar os grandes biomas do Brasil permite que as suas estimativas tenham maior confiabilidade e robustez, podendo ser utilizadas nas tomadas de decisões e na elaboração de políticas para uma intensificação sustentável da produção de mandioca no país. Esse objetivo sustentável foi destacado por Monfreda, Ramankutty, Foley (2008) em estudo que mapeou a distribuição geográfica da produção de alimentos e o uso da terra, como um importante fator para conservação dos recursos naturais.

O desempenho do modelo em representar as categorias de solo (arenoso, médio e argiloso) e as épocas de plantio (início, meio e fim do período recomendado pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático - ZARC), são apresentados na Figura 6. A redução de

produtividade de raízes devido a limitação de água foi representada pelo modelo nas Figuras 6B, 6D e 6F, para as três épocas de plantio. Por exemplo, nos plantios realizados na época 1 (início de período recomendado), verifica-se que 50% das simulações obtiveram produtividades de raízes superior a  $23,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , na condição potencial (simulações com o balanço hídrico desligado), e  $21,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ,  $20,8 \text{ Mg ha}^{-1}$  e  $19,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  nas categorias de solo argiloso, médio e arenoso, respectivamente. O principal fator que explica as diferenças em produtividade de raízes está relacionado com a capacidade de armazenamento de água (CAD) em cada categoria de solo, sendo de até 42 mm, 66 mm e 90 mm para um solo arenoso, médio e argiloso, respectivamente.

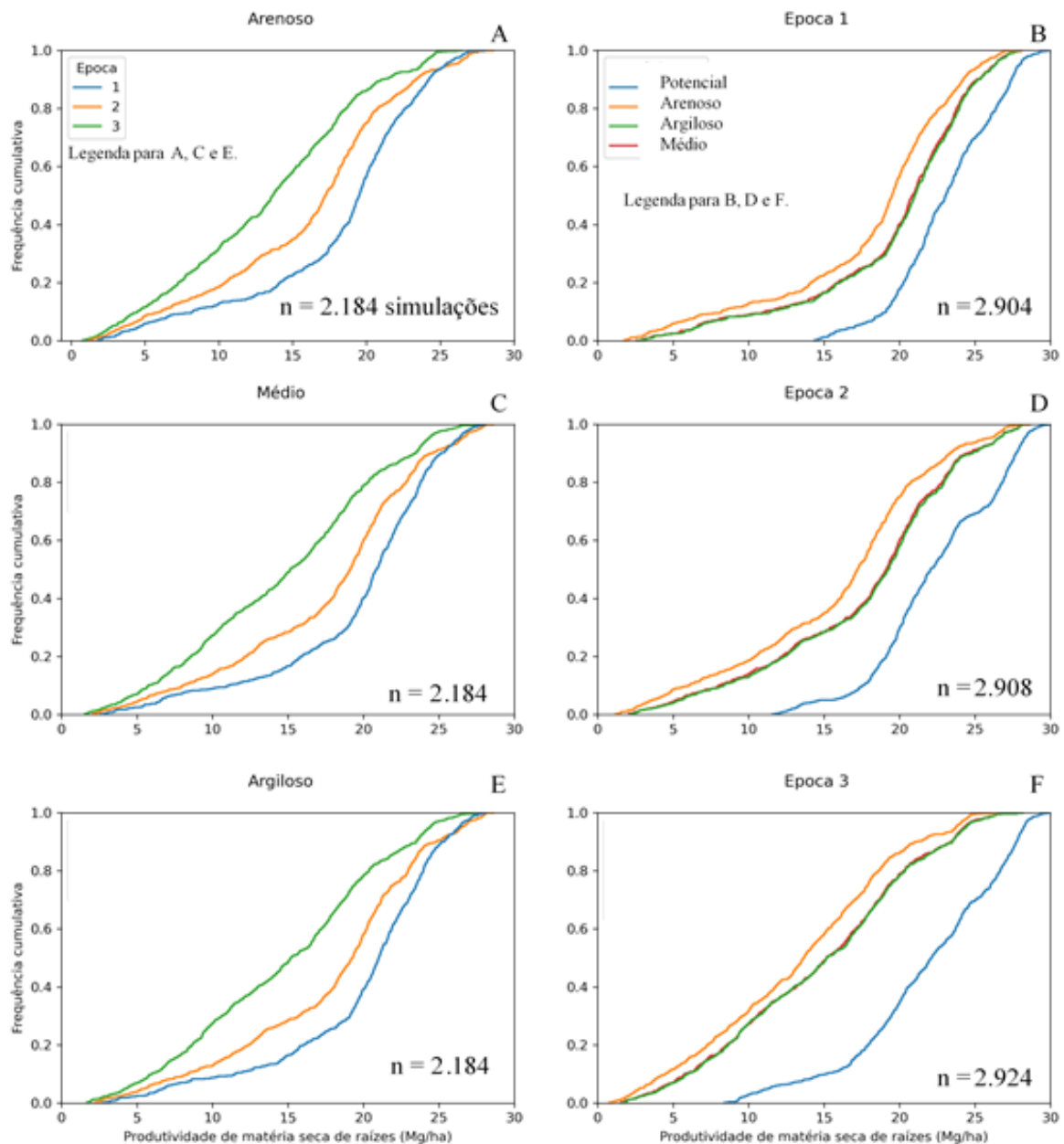


Figura 6: Frequência cumulativa da produtividade de matéria seca de raízes de mandioca (Mg/ha) que apresenta a sensibilidade do modelo em capturar os efeitos da época de plantio na categoria de solo (A) arenoso, (C) médio e (E) argiloso e os efeitos das categorias de solos na (B) Época 1, (D) Época 2 e (F) Época 3. Época 1 = data no início do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC); Época 2 = data no meio do período recomendado; Época 3 = data no final do período recomendado e Potencial = simulações realizadas com o balanço hídrico desligado.

A redução na produtividade de raízes devido ao atraso na data de plantio foi representada pelo modelo nas três categorias de solo (Figuras 6A, 6C e 6E). Por exemplo, na categoria de Solo arenoso verifica-se que 50% das simulações obtiveram produtividades acima de 19,5 Mg ha<sup>-1</sup>, 17,2 Mg ha<sup>-1</sup> e 13,6 Mg ha<sup>-1</sup>, nas épocas 1, 2 e 3, respectivamente. A explicação para isso deve-se que os plantios realizados do meio e principalmente no fim do período recomendado, apresentam maior risco de enfrentar condições de ambiente não ótimas



(risco de ocorrência de geadas e baixas temperaturas, menor disponibilidade de radiação solar, ocorrência de déficit hídrico, etc). No estudo de Duarte et al. (2021) para a cultura do arroz no Brasil, foram utilizados os modelos SimulArroz e Oryza para estimar a perda de produtividade devido ao atraso na semeadura, encontrando uma redução que variou de 0,08 t ha dia<sup>-1</sup> até 0,29 t ha dia<sup>-1</sup>. Para a cultura da soja, Tagliapietra et al. (2021) utilizando o modelo CSM CROPGRO, identificou uma redução na produtividade que variou de 9% a 39% devido aos fatores de manejo, sendo que a data de semeadura foi apontada como um dos principais fatores. Para a cultura da mandioca, em ambiente subtropical do Brasil, Borges et al. (2020) observou uma redução na produtividade de raízes que variou de 0,282 Mg ha dia<sup>-1</sup> a 0,364 Mg ha dia<sup>-1</sup> devido ao atraso na data de plantio.

Os resultados da Figura 6 indicam que o modelo identifica de forma satisfatória as penalizações na produtividade limitada por água (Yw) devido ao (i) atraso na época de plantio e (ii) restrição na capacidade de armazenamento de água nas categorias de solo analisadas.

A sensibilidade do modelo em capturar os efeitos do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) na produtividade potencial ( $Y_p$ ) e limitada por água ( $Y_w$ ) é apresentada na Figura 7. O modelo não identificou o impacto das fases El Niño, La Niña e Neutro na produtividade de matéria seca de raízes para as cinco regiões geográficas brasileiras (Centro Oeste, Norte, Nordeste, Sudeste e Sul). Por exemplo na região Centro Oeste do Brasil (Figura 7A), as médias de  $Y_w$  foram  $17,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ,  $17,2 \text{ Mg ha}^{-1}$  e  $18,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  para as fases El Niño, La Niña e Neutro, respectivamente., indicando valores de produtividade similares. O principal fator

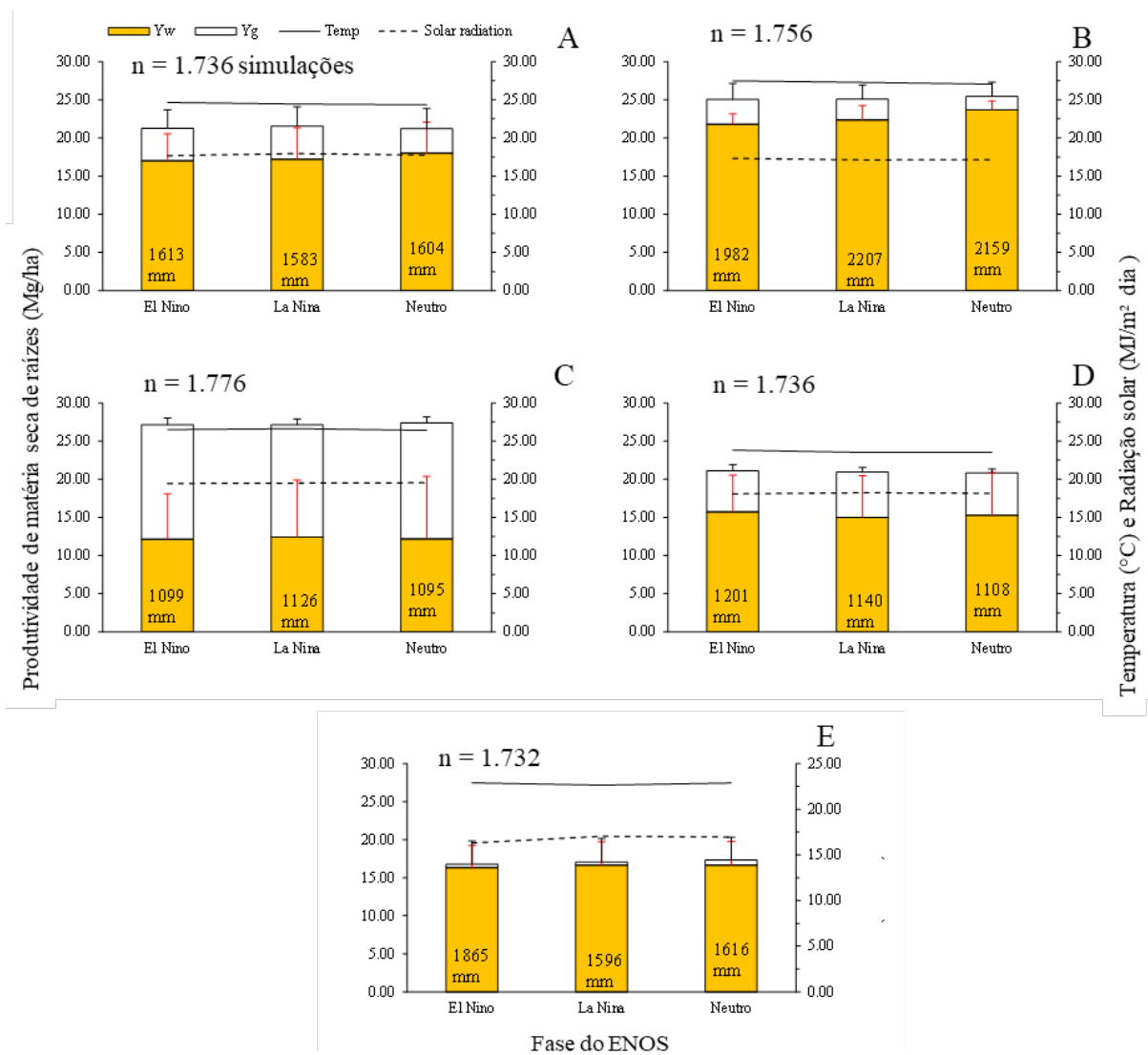


Figura 7: Sensibilidade do modelo em capturar os efeitos do Fenômeno ENOS-Oscilação Sul na produtividade de matéria seca de raízes de mandioca (Mg/ha) nas Regiões geográficas do Brasil (A) Centro Oeste, (B) Norte, (C) Nordeste, (D) Sudeste e (E) Sul. Cada barra representa a fase do ENOS (El Niño, La Niña e Neutro). As porções em Amarelo e Branco representam a produtividade limitada por água ( $Y_w$ ) e a lacuna de produtividade ( $Y_g$ ), respectivamente. As linhas horizontais representam as médias de temperatura (°C) e radiação solar global ( $\text{MJ/m}^2 \text{ dia}$ ) (linhas sólida e tracejada respectivamente). A precipitação, em mm, é demonstrada dentro de cada barra. As barras de erro do  $Y_w$  e do  $Y_p$  são exibidas em vermelho e preto, respectivamente.

que explica essa resposta na região Centro Oeste está relacionado com as variáveis meteorológicas de temperatura, radiação solar e precipitação que, respectivamente, apresentaram médias de: 24,6 °C, 17,7 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e 1.613 mm ano<sup>-1</sup> (El Niño); 24,4 °C, 18,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e 1.583 mm ano<sup>-1</sup> (La Niña) e 24,4 °C, 17,8 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e 1.604 mm ano<sup>-1</sup> (Neutro) (Figura 7A).

Estudos envolvendo o impacto do fenômeno ENOS para a cultura da mandioca ainda são incipientes, sendo que Oluwole (2015) analisou a produção de mandioca no Brasil e Tanzânia associados ao fenômeno ENOS e a Oscilação decadal do Pacífico (ODP), encontrando tendência de aumento da produção durante as fases frias da ODP e períodos com produção abaixo da média na fase quente do ENOS no Brasil. Porém os resultados do autor citado anteriormente não analisaram a variável produtividade (Mg ha<sup>-1</sup>) e sim a variável produção (em toneladas ano<sup>-1</sup>). Para a cultura do arroz cultivado na região central do Brasil, Heinemann et al. (2020) encontrou uma redução na duração do período de semeadura de arroz associado com os anos de La Niña. Para as culturas da soja e milho cultivados no Brasil, Nóia Junior, Sentelhas (2019) encontrou que os anos de El Niño impactaram de forma negativa as produtividades dessas culturas na região Norte do país; nas regiões Centro-Sul, a produtividade foi beneficiada nos anos de El Niño. Uma hipótese que formulamos para explicar o fato do modelo não identificar os efeitos do fenômeno ENOS na produtividade de raízes de mandioca, está fundamentada em: (i) características da planta que garantem uma resiliência da cultura quando exposta à condições de estresses bióticos e abióticos, conforme a revisão de Pushpalatha, Gangadharan (2020); (ii) o aspecto meteorológico relacionado ao impacto do Fenômeno ENOS, na variabilidade climática da América do Sul, apresentar um sinal mais forte na região Sul do Brasil, principalmente nas anomalias de precipitação (GRIMM, BARROS, DOYLE, 2000; CUNHA, DAMALGO, ESTEFANEL, 2001).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A agricultura é uma atividade fundamental para a sociedade pois tem a função de produzir alimentos. Porém é uma atividade que está diante de um dos maiores desafios da atualidade: aumentar a produção de alimentos de forma economicamente viável, sustentavelmente correta e socialmente justa. Atingir esses objetivos é uma tarefa que exigirá um esforço de toda a sociedade, pois não existe uma solução única. A pandemia do novo coronavírus (SARS-COV2), que afligiu o mundo no ano de 2020, revelou o importante papel da ciência no desenvolvimento de um vacina segura e eficaz no enfrentamento do vírus. Na agricultura não será diferente, pois acreditamos que a ciência terá um papel decisivo na solução do aumento da produção de alimentos.

Entendemos que a principal contribuição do presente estudo foi identificar que a utilização do modelo Simanihot pode ser expandida para as regiões produtoras de mandioca em ambiente tropical do Brasil. Isso representa um avanço para que seja possível entender quais são os principais impedimentos que estão limitando e reduzindo a produtividade de raízes de mandioca no país. Destacamos que a utilização do modelo em ambiente tropical torna-se possível devido: (i) ao modelo ter capturado a disponibilidade hídrica como o principal fator limitante da produtividade de raízes, em ambiente tropical. Esse aspecto é fundamental devido à ocorrência de estação seca e chuvosa nas principais regiões produtoras de mandioca; (ii) o modelo foi sensível em identificar os grandes biomas brasileiros, demonstrando a robustez da sua capacidade preditiva em representar um ambiente distinto do qual ele foi originalmente desenvolvido.

Ressaltamos que a realização de estudos futuros são requeridos para que as estimativas do modelo se tornem cada vez mais próximas da realidade. Nesse sentido destacamos: (i) a calibração e validação de cultivares de mandioca que são utilizadas em ambiente tropical; (ii) estudos que visem implementar no modelo a sensibilidade quanto aos efeitos do excesso hídrico durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

## 6 CONCLUSÕES

Levando em consideração a capacidade do modelo Simanihot em estimar a produtividade de raízes de mandioca potencial e limitada por água em ambiente tropical do Brasil, identificamos que: (i) o modelo estima de forma adequada a produtividade potencial com um erro normalizado (RQMEn) de 17,54%; (ii) o modelo capturou os biomas brasileiros quanto a disponibilidade hídrica; (iii) foi sensível em capturar a redução na produtividade devido ao atraso na época de plantio e da restrição na capacidade de armazenamento de água para as categorias de solo arenoso, médio e argiloso; e (iv) não identificou um impacto do Fenômeno ENOS na produtividade de raízes de mandioca.

Portanto o modelo pode ser utilizado em ambiente tropical, requerendo a realização de estudos com os objetivos de calibrar e validar o modelo para aprimorar a sua capacidade de representar as condições de cada região produtora de mandioca.

## 7 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G et al. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrig. and Drain. Paper No. 56, FAO, Rome, Italy. p. 327. 1998.
- ALVES, A. A. C. Cassava botany and physiology. In: Cassava: biology, production and utilization, [s. l.], p. 67–89, 2009.
- ANDERSON, W. et al. Trans-Pacific ENSO teleconnections pose a correlated risk to agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 262, n. July, p. 298–309, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.07.023>
- ARAÚJO, R. G. et al. A influência do evento El Niño - Oscilação Sul e Atlântico equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 469–480, 2013.
- BASSO, B.; LIU, L.; RITCHIE, J.T. A comprehensive Review of the CERES-Wheat, -Maize and -Rice Models' Performance. *Advances in Agronomy*, v. 136, p. 27 – 132, 2016.
- BORGES, J. M et al. Yield potential of Cassava Crop in a function of planting date in a subtropical environment. **Science of Plants and Derived Products**. v. 19, n. 3, p. 263 – 269, 2020.
- BUAINAIN, M. A. et al. Desafios para a agricultura nos biomas brasileiros. Brasília, DF: Embrapa, 69p, 2020.
- COCK, J. H. et al. The ideal cassava plant for maximum yield. **Crop Science**. v. 19, n. 2, p. 271-279, 1979.
- COOPER, M. et al. A national soil profile database for Brazil available to international scientists. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 69, n. 3, p. 649–652, 2005.
- CUNHA, G. R. El Niño Southern Oscillation and climate forecasts applied to crops management southern Brazil. In *Applications of Climate Forecasting for Better Decision-Making Processes in Agriculture*, GR Cunha, JC Haas, MA Berlatto (eds). Embrapa Trigo: Passo Fundo, Brazil, p 181– 201. 2001.
- CUNHA, G. R.; DAMALGO, G.A.; ESTEFANEL, V. El Nino — Southern Oscillation Influences on Wheat Crop in Brazil. In: Bedö Z., Láng L. (eds) *Wheat in a Global Environment*. *Developments in Plant Breeding*, vol 9. Springer, Dordrecht., p 445– 450. 2001.
- DENG, N. et al. Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. **Nature Communications**, [s. l.], v. 10, n. 1, 2019.
- DUARTE, A. J et al. Rice yield potential as a function of sowing date in southern Brazil. **Agronomy Journal**. *Article in Press*, DOI: 10.1002/agj2.20610, 2021.
- EL-SHARKAWY, M.A.; HERNÁNDEZ, A. P.; HERSHEY, C. Yield stability of cassava during prolonged mid-season water stress. **Expl. Agric**, v.28, p165-174, 1992.

FAO - Food and Agriculture Organization. The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. Summary version. Rome. 60 pp. 2018.

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations: Statistics Division – Crops Disponível em <<http://www.fao.org/faostat/en/#home>> acesso em 22/10/2021.

FERMONT, A. M. et al. Closing the cassava yield gap: An analysis from smallholder farms in East Africa. **Field Crops Research**, [s. l.], 2009.

GABRIEL, L. F. et al. Simulating cassava growth and yield under potential conditions in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 106, n. 4, p. 1119-1137, 2014.

GRASSINI, P. et al. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 177, p. 49–63, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 2863–2880, 1998.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 35–58, 2000.

HEINEMANN, A. B et al. The impact of El Niño Southern Oscillation on cropping season rainfall variability across Central Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. 283-304, 2020.

HOWELER, R.; LUTALADIO, N.; THOMAS, G. **Save and Grow: Cassava: a Guide to Sustainable Production Intensification** (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2013.

HOWELER, R. H. (ed.). **The cassava handbook: A reference manual based on the Asian Regional Cassava Training Course, held in Thailand**. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Bangkok, TH. 801 p.; 2012.

JAMES, G. et al. **An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R**. Springer-Verlag New York, 426p.; 2013.

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, [s. l.], 1995.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Produção agrícola municipal. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/pt/inicio.html>> acesso em 22/10/2021a.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Brasil em síntese - território Disponível em <<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html>> acesso em 20/04/2021b.

LEE, S. K; DANG, T. A. Crop calendar shift as a climate change adaptation solution for cassava cultivation area of Binh Thuan Province, Vietnam. *Pak. J. Biol. Sci.*, 23 (7), p. 946-952, 2020.

MONFREDA, C.; RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. A. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 22, GB 1022, 2008.

NÓIA JÚNIOR, R. S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. *Agricultural Systems*, v. 173, p. 254-267, 2019.

OLUWOLE, O. S. A. El Niño-southern oscillation and cassava production in Tanzania and Brazil. *Climatic Change*, [s. l.], v. 131, n. 2, p. 273–285, 2015.

PARMAR, A.; STURM, B.; HENSEL, O. Crops that feed the world: Production and improvement of cassava for food, feed, and industrial uses. *Food Security*, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 907–927, 2017.

PETERSON, T. C. et al. Homogeneity adjustments of *in situ* atmospheric climate data: a review. *International Journal of Climatology*, v. 18, n. 13, p. 1493-1517, 1998.

PHONCHAROEN, P. et al. Performance of the CSM–MANIHOT–Cassava model for simulating planting date response of cassava genotypes. *Field Crops Research*, v.264, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108073>.

PUSHPALATHA, R.; GANGADHARAN, B. Is Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) a Climate“Smart”Crop? A Review in the Context of Bridging Future Food Demand Gap. *Tropical Plant Biol.* n.13, p. 201-211, 2020.

RÓS, A. B et al. Crescimento, fenologia e produtividade de cultivares de mandioca. *Pesq. Agropec. Trop.*, v.41, n.4, p 552-558, out/dez, 2011

SALTELLI, A et al. Global sensitivity analysis: The Premir. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 2008.

STRECK, N. A. et al . O fenômeno El Niño Oscilação Sul e a variabilidade interanual da evaporação do tanque Classe A e da umidade relativa do ar em Santa Maria, RS. *Cienc. Rural*, Santa Maria, v. 38, n. 5, p. 1452-1455. 2008.

TAGLIAPIETRA, E.L et al. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. *Agronomy Journal*. *Article in Press*, DOI: 10.1002/agj2.20586, 2021.

TEIXEIRA, P.R.G. et al. Características Morfológicas de Quatro Variedades de Mandioca de Mesa Cultivadas em Vitória da Conquista-BA. *Revista Raízes e Amidos Tropicais*, v.10, p.1-8, 2014.



TIRONI, L. F. et al. SIMANIHOT: A PROCESS-BASED MODEL FOR SIMULATING GROWTH, DEVELOPMENT AND PRODUCTIVITY OF CASSAVA. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 37, n. 3, p. 471-483, June 2017.

TIRONI, L. F. et al. Desempenho de cultivares de mandioca em ambiente subtropical. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 1, p. 58-66, 2015.

TIRONI, L. F. et al. Ecofisiologia da mandioca Visando Altas Produtividades. Santa Maria: [s.n.], 136p. 2019.

VAN BUSSEL, L. G. J. et al. From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. **Field Crops Research**, [s. l.], 2015.

VAN ITTERSUM, M. K. et al. Can sub-Saharan Africa feed itself? **Proceedings of the National academy of Sciences**, [s. l.], v. 113, n. 52, p. 14964–14969, 2016.

VAN ITTERSUM, M. K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 143, p. 4–17, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>

VAN LAAR, H.H.; GOUDRIAAN, J.; VAN KEULEN, H. (Eds.). **SUCROS97: Simulation of Crop Growth for Potential and Water-Limited Production Situations. Quantitative Approaches in Systems Analysis**, vol. 14, C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and AB-DLO, Wageningen, Netherlands, p. 52. 1997

VAN WART, J et al. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. **Field Crops Research**, n. 143, p. 44-55, 2013.

VISSES, F. de A.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. B. Yield gap of cassava crop as a measure of food security - an example for the main Brazilian producing regions. **Food Security**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 1191–1202, 2018.

WALLACH, D., D. MAKOWSKI, AND J. W. JONES. **Working with Dynamic Crop Models: Methods, Tools and Examples for Agriculture and Environment**. Elsevier. New York. ISBN 9780128117569, 2018.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence Soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 108, n. 4, p. 1447–1454, 2016.