

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

Charles Patrick de Oliveira de Freitas

**POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NA CULTURA DA
MANDIOCA EM AMBIENTE SUBTROPICAL**

Santa Maria, RS
2020

Charles Patrick de Oliveira de Freitas

**POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NA CULTURA DA MANDIOCA
EM AMBIENTE SUBTROPICAL**

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

Orientador: Ph.D. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS
2020

Freitas, Charles Patrick de Oliveira de
POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NA CULTURA DA
MANDIOCA EM AMBIENTE SUBTROPICAL / Charles Patrick de
Oliveira de Freitas.- 2020.
51 p.; 30 cm

Orientador: Nereu Augusto Streck
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Agronomia, RS, 2020

1. Manihot esculenta Crantz. 2. Potencial de
produtividade 3. Simanihot 4. Lacuna de produtividade I.
Streck, Nereu Augusto II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2020

Todos os direitos reservados a Charles Patrick de Oliveira de Freitas. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante citação da fonte.

Endereço: Av. Roraima, nº 1000, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97105-900. Fone +55 (55) 3220-8000; E-mail: charlespatrick2010@hotmail.com

Charles Patrick de Oliveira de Freitas

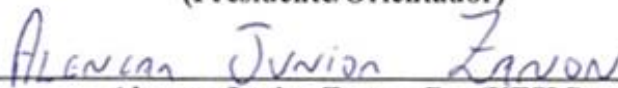
**POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NA CULTURA DA MANDIOCA
EM AMBIENTE SUBTROPICAL**

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

Aprovado em 7 de fevereiro de 2020:



Nereu Augusto Streck, PhD. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Alencar Junior Zanon, Dr. (UFSM)



Luana Fernandes Tironi, Dra. (EMATER/RS - ASCAR)

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

A minha família, meu pai Clóvis Fernando, minha mãe Leonir “Nica”, meu irmão Jorge Freitas *in memoriam* e meus sobrinhos Jordan e Laís. Dedico também à minha namorada Natalia dos Santos Rocha e a todas pessoas que sempre estiveram ao meu lado dando força e ânimo para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho teve a contribuição de algumas pessoas, as quais expresso meus sinceros agradecimentos:

A Deus, pela vida, pela escolha da Agronomia, por ter me guiado na realização desta Pós-graduação, pela certeza e fé de que daria tudo certo durante a pesquisa e por ter me dado força em momentos difíceis.

A minha família, pelo amor, incentivo ao estudo e por sempre acreditarem em mim.

A minha namorada Natalia, pelo amor, pelas palavras de ânimo e por torcer pelo meu sucesso.

Ao meu orientador Prof^o Phd Nereu Augusto Streck, pela orientação, auxílio, disponibilidade e amizade que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

A Equipe Simanihot por me acompanharem ao logo do mestrado nas visitas para coleta dos dados desse trabalho.

Aos colegas “Dudu”, “Xandão”, “Messias” e “Darling” por me auxiliar na realização deste trabalho.

Aos membros da banca pela disponibilidade e pelas considerações que acrescentarem ao trabalho.

Aos demais professores do Curso de Pós-Graduação em Agronomia pelo conhecimento transmitido.

Aos Técnicos e extensionistas da EMATER/ARCAR pelo apoio durante a realização desta pesquisa.

RESUMO

POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NA CULTURA DA MANDIOCA EM AMBIENTE SUBTROPICAL

AUTOR: Charles Patrick de Oliveira de Freitas

ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

Com o aumento substancial da população mundial, previsto para ocorrer até o final do século, surge a necessidade de aumentar a produção de alimentos. A principal alternativa para aumentar a produção, é aumentar a produtividade das culturas agrícolas, dentre as quais a mandioca tem papel fundamental. Para aumentar a produtividade, é necessário conhecer a produtividade potencial e as lacunas de produtividade das lavouras de mandioca em cada sistema de produção, bem como os fatores biofísicos e de manejo que os limitam. O objetivo com deste trabalho é estimar o potencial e as lacunas de produtividade para a cultura da mandioca em ambiente subtropical, identificando e quantificando os principais fatores bióticos e de manejo que limitam ou reduzem a produtividade. Para a estimativa do potencial de produtividade foram selecionadas as regiões climáticas com abrangência maior de 5% da área produtiva de mandioca, com as estações meteorológicas do INMET foram criadas 9 *buffers zones*. O potencial de produtividade e o potencial de produtividade limitado por água foram estimado com o modelo Simanihot, e as lacunas de produtividade foram criadas a partir das produtividades médias de 15 anos do IBGE e das produtividades médias dos produtores da região central (106 questionários). Para identificar os fatores responsáveis pelas lacunas de produtividade foi criada uma árvore de regressão. Frente aos atuais índices de produtividade do estado do Rio Grande do Sul este estudo permitiu melhor compreensão os fatores que contribuem para a redução da produtividade de mandioca. O potencial de produtividade variou de 51,9 a 61,7 ton.ha⁻¹ entre as regiões do Rio Grande do Sul, o potencial de produtividade médio para o estado foi 56,2 ton.ha⁻¹ e o potencial de produtividade limitado por água médio, 54,9 ton.ha⁻¹. A lacuna de produtividade potencial variou de 66 a 78% do PP, onde a contribuição da lacuna de produtividade potencial de água (%LPPA) foi 1,3 ton.ha⁻¹ (3%) e a contribuição causada pela lacuna de produtividade de manejo (%LPM) foi de 39,8 ton.ha⁻¹ (97%). A região central do RS apresentou a menor lacuna de produtividade de manejo, sendo a densidade de plantas o principal fator causador da lacuna, somado a época de plantio e número de controle de plantas daninhas.

Palavras-chave: *Manihot esculenta* Crantz. Potencial de produtividade. Simanihot. Lacuna de produtividade

ABSTRACT

YIELD GAP OF CASSAVA CROP IN SUBTROPICAL ENVIRONMENT

AUTHOR: Charles Patrick de Oliveira de Freitas

ADVISOR: Nereu Augusto Streck

With the increase in the world population, expected to occur by the end of the century, there is a need to boost food production. The sustainable alternative to achieve higher production is to improve yield of agricultural crops, among which cassava has a fundamental role. Knowledge of potential yield and yield gap, as well the biophysical and management factors in each agricultural system, is critical to obtain success in this challenge. The aim of this work is to estimate the potential yield and yield gap for cassava crop in a subtropical environment by identifying and quantifying the main biotic and management factors that limit or reduce crop yield. For the estimation of the potential yield, 9 buffer zones (climatic regions) were created, taken in consideration a coverage area greater than 5% of the cassava production, and the meteorological data were obtain from INMET stations. The yield potential and the water-limited yield potential were estimated using the Simanihot model, and the yield gaps were calculated from the average yield of 15 years of IBGE data, and the average yield of farmers in the Central Region (106 surveys). A regression tree was created in order to identifying the factors responsible for the yied gaps. In view of the current yield levels in the state of Rio Grande do Sul, this study allowed a better understanding of the factors that contribute to the reduction of cassava yield. The yield potential ranged from 51.9 to 61.7 ton.ha⁻¹ between the regions of Rio Grande do Sul, where the mean obtain for the state was 56.2 and 54.9 ton.ha⁻¹ for yield potential and water-limited yield potential, respectively. The yield gap varied from 66 to 78% of the PP, where the contribution of water-limited gap (% LPPA) was 1.3 ton.ha⁻¹ (3%) and the contribution caused by the gap of management (% LPM) was 39.8 ton.ha⁻¹ (97%). The Central Region of RS showed the smallest management gap, where plant density can be the main factor causing this gap. Others factors such as planting date and weed control number, also can be added to plant density as factors that drive the management gap.

Keywords: Manihot esculenta Crantz. Yield potential. Simanihot. Water-limited potential.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Divisão do estado do Rio Grande de Sul em Regiões Climáticas. Divisão do estado em relação ao acúmulo de graus dias (A), índice de aridez (precipitação/evapotranspiração) (B), sazonalidade de temperatura (C) e 14 Regiões Climáticas presentes no Rio Grande do Sul (D).....21
- Figura 2. Mapa da área colhida (hectares) de mandioca do Rio Grande de Sul nos últimos cinco anos (2014 – 2019). Fonte: IBGE, 2020.....22
- Figura 3. Regiões Climáticas representativas das áreas cultivadas com mandioca no Rio Grande de Sul – Brasil.....23
- Figura 4. *Buffer Zones* representativas da área produtiva (hectares) de mandioca no Rio Grande de Sul – Brasil.....24
- Figura 5: Mapa do Rio Grande do Sul com a localização dos questionários aplicados nas lavouras de produtores rurais nos anos agrícolas 2017/2018 e 2018/2019.....27
- Figura 6: Lacunas de produtividade de culturas agrícolas segundo Lobell et al. (2009). O PP e o PPA estimado pelo modelo Simanihot; produtividade média dos produtores da região central (PMPMP) e produtividade média (PM) do Rio Grande do Sul (IBGE, 2019). (1) LPP é a lacuna de produtividade potencial, (2) LPPA é a lacuna de produtividade potencial limitado por água, (3) LPM é a lacuna de produtividade de manejo e (4) LPMPMP é a lacuna de produtividade de manejo da região central.....28
- Figura 7: (A) Potencial de produtividade (PP), (B) potencial de produtividade limitado por água (PPA) e (C) Produtividade média (PM) de mandioca nos últimos 15 anos (2004-2019) nas diferentes *buffers zones* do Rio Grande do Sul.....32
- Figura 8: Dados meteorológicos médios (2004 – 2019), (A) Temperatura máxima (°C), (B) Temperatura mínima (°C), (C) Temperatura média (°C), (D) radiação solar (MJ dia⁻¹), (E) precipitação (mm) para o período de 21.08 – 15/06 (BZs I e IX) e 11.09 – 15/06 (BZs II, III, IV, V, VI, VII e VIII), nas diferentes *buffers zones* do Rio Grande do Sul. Os diagramas de Box-hisker incluem o intervalo de 50% das observações (caixa retangular), a mediana (barra transversal) e o min. e max. valores (linhas verticais).....34
- Figura 9: (A) Lacuna de produtividade potencial (%LPP), (B) Lacuna de produtividade de água (%LPPA) e (C) lacuna de produtividade manejo (%LPM) nas diferentes *buffers zones* do Rio Grande do Sul.....35
- Figura 10: Potenciais de produtividade e produtividades médias do Rio Grande do Sul – Brasil. Coluna preta é o potencial de produtividade estimado pelo modelo (PP), coluna azul é o potencial de produtividade de produtividade limitado por água (PPA), coluna verde é a produtividade média dos produtores (PMP)da região central do RS (n= 106 lavouras) e a coluna vermelha é a produtividade média (PM) do RS nos últimos 15 anos (2004 – 2019).....37
- Figura 11: Árvore de regressão mostrando fontes de variação na produtividade de mandioca devido aos fatores de manejo. Caixas são nós de divisão, com caixas inferiores representando nós de terminal. Os valores dentro de cada nó terminal indicam a

média da produção de raízes e a porcentagem de observações em cada nó terminal.....39

- Figura 12: Produtividade de raízes de mandioca (ton.ha^{-1}) em relação a densidade de plantio (pl.ha^{-1}) dos 106 questionários realizados nas lavouras de mandioca da região central do Rio Grande do Sul, durante os dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019). Linha sólida preta representa a função limite e linha tracejada vermelha representa o ponto onde a adição de 1 pl.ha^{-1} tem incremento $> 1,15 \text{ Kg.pl}^{-1}$ 40
- Figura 13: Produtividade de raízes de mandioca (ton.ha^{-1}) em relação a época de plantio dos 106 questionários realizados nas lavouras de mandioca da região central do Rio Grande do Sul, durante os dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019). Linha sólida preta representa a função limite, a linha solidas vermelha representa a data de plantio (03/10) a partir da qual ocorre perda de produtividade e a linha tracejada vermelha representa a linear de perda de produtividade.....41
- Figura 14: Produtividade de raízes de mandioca (ton.ha^{-1}) em relação ao número de controle de plantas daninhas dos 106 questionários realizados nas lavouras de mandioca da região central do Rio Grande do Sul, durante os dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019).....42
- Figura 15: Potencial de produção de mandioca (toneladas) do Rio Grande do Sul quando o estado atingir a produtividade explorável de raízes de mandioca (ton.ha^{-1}) (80% do PP).....44

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1: Caracterização das variáveis utilizadas para simulação do potencial de produtividade e potencial de produtividade limitado por água para as *buffers zones* no Rio Grande do Sul – Brasil.....25
- Tabela 2: Unidades de mapeamento dos solos e suas respectivas classificações correspondentes no Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2006), utilizadas para simulação do potencial de produtividade limitado por água para as *buffers zones* no Rio Grande do Sul – Brasil.....26
- Tabela 3: Variáveis utilizadas para simulação do potencial de produtividade limitado por água: profundidade da camada de solo, porcentagens de areia, silte e argila, e conteúdo de água no solo em 10, 650 e 1500 kPa dos perfis modais das unidades de mapeamento do estado do Rio Grande do Sul, para as *buffers zones* no Rio Grande do Sul – Brasil.....26
- Tabela 4: Questionários aplicados nas entrevistas realizadas nas lavouras de produtores de mandioca contendo os parâmetros e variáveis de manejos nas lavouras do Rio Grande do Sul durante os anos agrícolas 2017/2018 e 2018/2019..... 29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1.	A CULTURA DA MANDIOCA.....	15
2.2.	POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E PRODUTIVIDADE LIMITADA POR ÁGUA.....	16
2.3.	PRODUTIVIDADE MÉDIA.....	17
2.4.	ESTUDOS DE LACUNAS DE PRODUTIVIDADE.....	17
2.5.	MODELOS AGRÍCOLAS.....	18
3	MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1	DIVISÃO EM ZONAS CLIMÁTICAS.....	20
3.1.1	Acúmulo anual de graus dias (GDD)	20
3.1.2	Índice de aridez anual.....	20
3.1.3	Sazonalidade da temperatura.....	21
3.2	ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE, DO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA E DAS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE.....	24
3.2.1	Potencial de Produtividade e Potencial de Produtividade limitado por Água:.....	24
3.2.2	Estimativa das lacunas de produtividade para as <i>Buffers Zones</i> :.....	27
3.2.3	Estimativa das lacunas de produtividade para o Rio Grande do Sul:.....	28
3.3	IDENTIFICAÇÃO DE FATORES QUE CAUSAM AS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM MANDIOCA.....	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE, POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DE MANDIOCA NAS <i>BUFFERS ZONES</i> NO RIO GRANDE DO SUL.....	31
4.2	POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM MANDIOCA NO RIO GRANDE DO SUL	36
4.3	FATORES CAUSADORES DAS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM LAVOU- RAS DE MANDIOCA NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL.....	38
4.4	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE MANDIOCA NO ESTADO DO DO RIO GRANDE DO SUL.....	43
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A população mundial vem crescendo significativamente, estima-se que durante as próximas décadas passará dos atuais 7,6 bilhões, para aproximadamente 9,8 bilhões de habitantes até 2050, impulsionando a demanda por alimentos em 50% (BRUINSMA, 2009), pressionando os produtores a ter maior eficiência no seu sistema produtivo, através do aumento da produtividade (MARCON et al., 2017). Neste cenário, aumenta a importância da produção de alimentos que compõem a base alimentar em países subdesenvolvidos, como a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). A exemplo disso, a cultura foi eleita o alimento do século XXI, através do projeto “Save and Grow: Cassava” (FAO, 2013). Além de ser importante para a segurança e soberania alimentar, a mandioca apresenta impactos socioeconômicos nos países em desenvolvimento, pois é considerada a principal cultura da agricultura familiar (BEZERRA, 2014).

O Brasil é o quinto maior produtor mundial de mandioca (FAO, 2020), apesar do destaque na produção, os níveis de produtividade de mandioca no Brasil são baixos (14,7 ton.ha⁻¹). Experimentos realizados no Rio Grande do Sul encontraram valores de produtividade próximo a 33 ton.ha⁻¹ (TIRONI et al., 2015), duas vezes mais que a produtividade média estadual, que é de 17,3 ton.ha⁻¹ no período de 2013-2020 (IBGE, 2020). Cock et al. (1979) relataram produtividades potencial de 75 a 90 ton.ha⁻¹, na Colômbia e na Índia. O potencial produtivo ou potencial de produtividade (PP) é a produtividade influenciada apenas por radiação solar, temperatura, CO₂ atmosférico e características genéticas, sem restrição de nutrientes e água e sem estresses bióticos (VAN ITTERSUM et al., 2013; GRASSINI et al., 2015). Comparando a produtividade média de mandioca nas últimas safras no estado do Rio Grande do Sul, com o potencial de produtividade da cultura, observa-se que existe uma diferença, conhecida como lacuna de produtividade (LOBELL et al., 2009).

Estudos sobre potencial e lacunas de produtividade vêm aumentando nos últimos anos, motivados pela crescente demanda mundial de alimentos e de energia para atender ao aumento populacional e de renda em muitos países (GRASSINI et al., 2015). Os estudos de lacunas de produtividade permitem identificar os principais fatores de manejo que limitam o aumento da produtividade dos agricultores e direcionar novas linhas de pesquisa, além de aprimorar as atuais práticas de manejo (VAN ITTERSUM et al., 2013). Essa nova abordagem motivou a criação do projeto Global Yield Gap Atlas - GYGA (www.yieldgap.org), um esforço mundial

para reduzir a lacuna de produtividade de várias culturas ao redor do planeta. Nesse sentido, no Rio Grande do Sul, a cultura da mandioca é cultivada sob nível tecnológico baixo ocupando áreas marginais das propriedades, além de receber poucas práticas de manejos (adubação, densidade de plantas, controle de plantas daninhas, data de plantio), o que resulta em baixas produtividades, pois é considerada uma cultura com alta capacidade de estabelecimento em solos pouco fértil, ácido e apresentar tolerância à seca (SCHONS et al., 2009; FAGUNDES et al., 2010; LAGO et al., 2011; TIRONI et al., 2015). Sendo assim, para aumentar as produtividades dos produtores rurais e reduzir a lacuna de produtividade, é necessário determinar o potencial de produtividade e compreender melhor os fatores que contribuem para a baixa produtividade mandioca no estado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi estimar o potencial produtivo e as lacunas de produtividade para a cultura da mandioca, identificando os principais fatores de manejo que limitam ou reduzem a produtividade em ambiente subtropical.

1.1.2 Objetivos específicos

Estimar o potencial de produtividade de mandioca para o Rio Grande do Sul;

Estimar as lacunas de produtividade da mandioca no Rio Grande do Sul;

Identificar os fatores de manejo que explicam as perdas do potencial de produtividade para a cultura da mandioca na Região Central do Rio Grande do Sul;

Quantificar o potencial de produção de mandioca do Rio Grande do Sul;

Propor práticas de manejo que permitam aumentar a eficiência no uso de recursos nos sistemas de produção de mandioca no Brasil minimizando o impacto ambiental, garantindo a segurança alimentar e maximizando o lucro do produtor.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A CULTURA DA MANDIOCA

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), pertence à família Euphorbiaceae, tem como centro de origem o Brasil, e atualmente está presente na maioria dos países tropicais, devido à extensa disseminação pelos portugueses para África, Ásia e Caribe nos séculos XVI e XVII (FAGUNDES et al., 2009). No Brasil, está presente em todos os estados, e na sua maioria em pequenas propriedades rurais, onde é utilizada para a alimentação humana e animal, devido a mandioca apresentar desempenho satisfatório em condições de solos ácidos, de baixa fertilidade e tolerância a secas (SCHONS et al., 2009; FAGUNDES et al., 2010; LAGO et al., 2011; TIRONI et al., 2015), o que permite dizer que a cultura da mandioca possui elevada importância social (SCHONS et al., 2007).

A planta de mandioca é perene, possui porte arbustivo e hábito de crescimento indeterminado. A estrutura morfológica da planta pode diferir de acordo com o genótipo. As flores são monoicas, formadas nas extremidades das ramificações simpodiais da planta, mas algumas não apresentam ramificações e o caule é ereto (monopodial) (CARVALHO & FUKUDA, 2006). O principal método de propagação para a mandioca é a vegetativa, utilizando estacas das hastes, chamadas de “manivas” (SÉIBOU et al., 2015). Nas regiões subtropicais e tropicais de altitude, onde as temperaturas são baixas no inverno, as hastes são guardadas em local protegido de ventos e frio durante o período de inverno. A época de plantio da mandioca é variável entre as regiões do Brasil, dependendo principalmente da temperatura e disponibilidade pluviométrica (ALVES, 2006; SAMBORANHA, 2013), sendo que nas regiões tropicais o plantio é realizado no início do período de chuvas e na primavera em regiões subtropicais (GABRIEL, 2014). No Rio Grande do Sul o plantio deve ser realizado nos meses de setembro a novembro, para que a cultura se posicione fora do período de riscos climáticos, que são as baixas temperaturas “geada” e baixas temperatura do solo para a brotação (MALUF, et al., 2011). As raízes tuberosas, dependendo do genótipo, destino e das condições de cultivo, podem ser colhidas com 6 a 24 meses após o plantio (SAMBORANHA, 2013).

O crescimento e o desenvolvimento da mandioca são influenciados por variáveis meteorológicas, como a temperatura, o fotoperíodo, a radiação solar e disponibilidade hídrica, dependendo do ambiente (MALUF et al., 2011). As temperaturas abaixo de 16°C atrasam a brotação das manivas, reduzindo o peso das raízes e a taxa de crescimento foliar, enquanto que

temperaturas acima de 37°C inibem a brotação (ALVES, 2002; ALVES, 2006). A mandioca necessita precipitações de 1000 a 2000 mm anuais, bem distribuídos, para obter boas produtividades. Normalmente por ser cultivada em ambientes que oferecem baixas precipitações, menos de 800 mm anual, fato que permitiu à planta adquirir tolerância a estes ambientes (MALUF et al., 2011).

2.2 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E PRODUTIVIDADE LIMITADA POR ÁGUA

O potencial de produtividade (PP) é a produtividade de uma cultura que se desenvolve sem restrição de nutrientes, sem estresses bióticos (plantas daninhas, insetos e doenças) e sem deficiência de água. Quando a produtividade potencial é expressa, os fatores que determinam o crescimento são apenas a radiação solar, temperatura, CO₂ atmosférico e características genéticas (EVANS, 1993; VAN ITTERSUM & RABBINGE, 1997). O potencial de produtividade é restrito ao local de estudo e é sitio específico devido ao clima, não dependendo de propriedades do solo, admitindo que a disponibilidade necessária de água e nutrientes podem ser manejadas, o que não é prático ou economicamente viável quando o solo apresenta restrições físicas para o crescimento das raízes. Portanto, em áreas onde o solo não apresenta restrições para a cultura, à produtividade potencial pode ser utilizada como referência (VAN ITTERSUM et al., 2013).

O potencial de produtividade limitada por água (PPA) é semelhante ao PP, a diferença é que a água é um fator limitante, no qual a produtividade dependerá da quantidade de abastecimento, distribuição e das características do solo (capacidade de retenção de água e profundidade de enraizamento) e do terreno, como a textura, profundidade e inclinação do solo (VAN ITTERSUM et al., 2013). A metodologia para determinar o PP e o PPA é baseada em épocas de plantio ideais, densidade de plantio e cultivares recomendadas para determinada região e utilizadas pelos produtores (GRASSINI et al., 2011).

Para a determinação do PP e do PPA pode-se utilizar dados de experimentos de campo, lavouras em condições ideais (maiores produtividades da região) e modelos matemáticos que descrevam a produtividade em função das condições meteorológicas as quais as plantas são submetidas, sendo os modelos previamente calibrados e validados para a região de estudo (VAN ITTERSUM et al., 2013).

2.3 PRODUTIVIDADE MÉDIA

A produtividade média alcançada numa determinada região, representa uma certa homogeneidade nas práticas de manejo (data de plantio, cultivar, espaçamento entre plantas, adubação e manejo fitossanitário). O número de anos utilizados para estimar a produtividade média de um determinado local, deve compreender a variabilidade anual de produtividade (VAN ITTERSUM et al., 2013). Quando se utilizam dados de produtividade média de órgãos governamentais, estes, podem não representar a maioria das lavouras do local, devido à complexidade da realidade de cada lavoura, mas muitas vezes é a única fonte de informação. Para isso, Grassini et al. (2014) recomendam que os dados de produtividade média para cálculo da lacuna de produtividade sejam determinados diretamente com os produtores nas lavouras, valendo-se de questionários padronizados para levantar informações técnicas e de manejo empregados em cada lavoura.

2.4 ESTUDOS DE LACUNAS DE PRODUTIVIDADE

Ao redor do mundo existem muitos estudos sobre lacunas de produtividade (GLOBAL YIELD GAP ATLAS, 2016). Cada vez mais a preocupação com o aumento na demanda por alimentos, faz pesquisadores voltarem sua atenção para este assunto. Na África Oriental, nos países Quênia e Uganda, foi realizado um estudo sobre lacunas de produtividade com a cultura da mandioca. O estudo baseia-se em dados de experimentos e questionários aplicados aos produtores (nº=108 questionários). Neste estudo foram quantificadas as produtividades médias e atingíveis para os pequenos agricultores para cada nível de manejo, comparando: a prática atual dos agricultores; (nível 2) estabelecimento de colheita melhorada; (nível 3) genótipos melhorados + nível 2; (nível 4) fertilizante NPK + nível 3. Os resultados mostram que os fatores que limitaram a produtividade de mandioca foram associados ao menor acesso ao trabalho (menor mão-de-obra disponível), solos mais pobres, colheita prematura por agricultores com nível tecnológico baixo, estresse hídrico precoce, adubação e o manejo inadequado de plantas daninhas (FERMONT et al., 2009).

Na República Democrática do Congo (África Central) foi realizado um estudo com o efeito da frequência da poda na cultura da mandioca, relacionando com aplicação de fertilizante NPK. Os resultados mostraram que não houve efeito da poda para nenhum tratamento, mas o uso de fertilizantes foi significativo para todos níveis de poda, mostrando que a aplicação de fertilizante é um fator que limita a produtividade, e seu uso reduz a lacuna de produtividade na

cultura da mandioca (MUNYAHALI, 2017). Ainda na África Central Kintché et al. (2017) realizaram um estudo que visou identificar e compreender os fatores que explicam a lacuna de produtividade da região, através do uso de função limite. As lacunas encontradas variaram de 48 a 64% e os fatores que explicaram a perda de produtividade nas lavouras de mandioca da África Central foram fertilidade do solo, controle de plantas daninhas, época de plantio e preparo do solo.

No Brasil foi realizado um estudo com o objetivo de avaliar a produção de raízes de mandioca e as taxas de produtividade nas principais regiões produtoras brasileiras nos últimos 24 anos. O potencial de produtividade e a produtividade limitada por água foram estimados a partir do modelo Agroecológico da FAO calibrado e validado comparando com dados reais de produtividades. Portanto como resultado foi encontrado uma grande variação das lacunas (22 a 51 ton.ha⁻¹), entre as regiões do país. A região nordeste, o fator que mais limitou a produtividade é a deficiência hídrica, logo na região norte existe deficiência hídrica, mas a maior lacuna foi devido a práticas inadequadas de manejo da cultura. Na região centro-sul mostrou-se a melhor eficiência agrônômica e climática, com as menores lacunas de produtividade. Foram apontadas as principais práticas para fechar a lacuna de produtividade na cultura da mandioca no Brasil, dentre elas está o uso de genótipos tolerantes à seca, melhor preparo do solo, melhor adubação e o controle de pragas, doenças e plantas daninhas (VISSES et al., 2018).

2.5 MODELOS AGRÍCOLAS

Os modelos agrícolas são ferramentas que através de equações matemáticas, são capazes de descrever o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas agrícolas (STRECK et al., 2008). Modelos agrícolas, quando devidamente calibrados e testados para as condições locais, são ferramentas importantes, pois auxiliam extensionistas e produtores na tomada de decisão de práticas de manejo (STRECK et al., 2003,a,b). Os modelos utilizados para simular a produtividade de culturas agrícolas podem ser divididos em empíricos e mecanísticos. Os modelos empíricos são baseados em relações estatísticas e obtidos, por exemplo, através de técnicas de regressão linear ou múltipla, e estabelecem ou não uma relação de causa/efeito, incluindo análise de probabilidades (SILVA; BERGAMASCO, 2001). Por vez, modelos mecanísticos são representados por equações matemáticas que descrevem os processos, mas existe a necessidade de entender os processos envolvidos no fenômeno de estudo, após deve-se

encontrar relações matemáticas baseadas em soluções analíticas ou numéricas (STRECK et al., 2013).

Para a cultura da mandioca existem alguns modelos que estimam o PP, um exemplo é o modelo Agroecológico da FAO, adaptado por Visses et al., (2018), este modelo empírico considera interações entre radiação solar, temperatura, duração do fotoperíodo e genótipo, onde é expresso:

$$Y_p = \sum_{i=1}^m GPP_i \times C_{LAI} \times LAI_i \times C_{R_i} \times C_H \times (1 - 0.01 M\%)^{-1} \quad (1)$$

Onde o GPPi é o valor bruto padrão fotossíntese potencial (kg de matéria seca ha⁻¹dia⁻¹); C_{LAI} é o fator de correção para o índice de área foliar (IAF); CR é o cor-fator de retorno devido à respiração de manutenção; CH é a índice de colheita; M% é a umidade da parte colhida da planta (%); e m são os períodos gerais de dez dias (i) da estação de crescimento.

Outro exemplo é de modelo para a cultura da mandioca é o Simanihot, que é um modelo matemático dinâmico baseado em processos (*process – based model*), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Agrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria, que simula diversos processos ecofisiológicos da cultura da mandioca no estado do Rio Grande do Sul (TIRONI et al., 2017). O modelo Simanihot possui uma interface gráfica e para iniciar a simulação é necessário inserir os dados meteorológicos: Temperatura Mínima (Tmin), Temperatura Máxima (Tmax), Radiação Solar (RadSol), Umidade Relativa do Ar (UR), Velocidade do Vento (Vel.Ven), Evapotranspiração (Evapo) e Precipitação (prec). Também é necessário informar dados de cultivar, local, concentração de CO₂, densidade, data de plantio ou data de emergência, data de colheita e a opção de rodar com ou sem balanço hídrico). Após inserir todos os dados corretamente, a simulação é efetuada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DIVISÃO EM REGIÕES CLIMÁTICAS

A área analisada neste estudo corresponde às regiões produtoras de mandioca no Rio Grande do Sul, onde foram agrupadas com base no clima, para melhor representar a variabilidade existente, seguindo a metodologia proposta por Van Wart et al. (2013) e utilizada pelo Global Yield Atlas (<http://www.yieldgap.org>). Essa classificação leva em consideração três variáveis categóricas, sendo elas: (1) acúmulo anual de graus dias (Figura 1A), (2) índice de aridez anual (Figura 1B) e (3) sazonalidade da temperatura (Figura 1C).

3.1.1 Acúmulo anual de graus dias (GDD)

O acúmulo anual de graus dias (Figura 1A) foi calculado através da seguinte equação (LICKER et al., 2010):

$$\text{GDD} = \sum_{i=1}^{365} \max(0, T_i - T_b) \quad (2)$$

em que T_i é a temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) e T_b é a temperatura base (0°C), onde as temperaturas médias mensais utilizados, foram para o período 1961-1990 do conjunto de dados CRU CL v. 2.0 na grade de 10 pés (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/tmc/>, (NEW et al., 2002)).

3.1.2 Índice de aridez anual

O índice de aridez anual (Figura 1B) foi obtido no CGIAR-CSI (<http://www.cgiar-csi.org/data/global-aridity-and-pet-database>) (TRABUCCO et al., 2008; ZOMER et al., 2008), calculado com a seguinte equação:

$$\text{AI} = \frac{\text{MAP}}{\text{MAE}} \quad (3)$$

em que MAP é a precipitação média anual ($\text{mm} \times 100$) e MAE a evapotranspiração potencial média anual ($\text{mm} \times 100$).

3.1.3 Sazonalidade da temperatura

Para a determinação da sazonalidade da temperatura (Figura 1C) foi obtida no WorldClim (<http://www.worldclim.org/current>) com dados das condições atuais (~1950-2000), conforme Hijmans et al., (2005), calculado através do desvio padrão (DP) de 12 temperaturas médias mensais $\times 100$.

$$\overline{X} = \text{DP (12 Temperatura mensais)} \quad (4)$$

Seguindo a classificação destas três variáveis, o estado do Rio Grande do Sul foi desmembrado em 14 Regiões Climáticas (RC) homogêneas (Figura 1D).

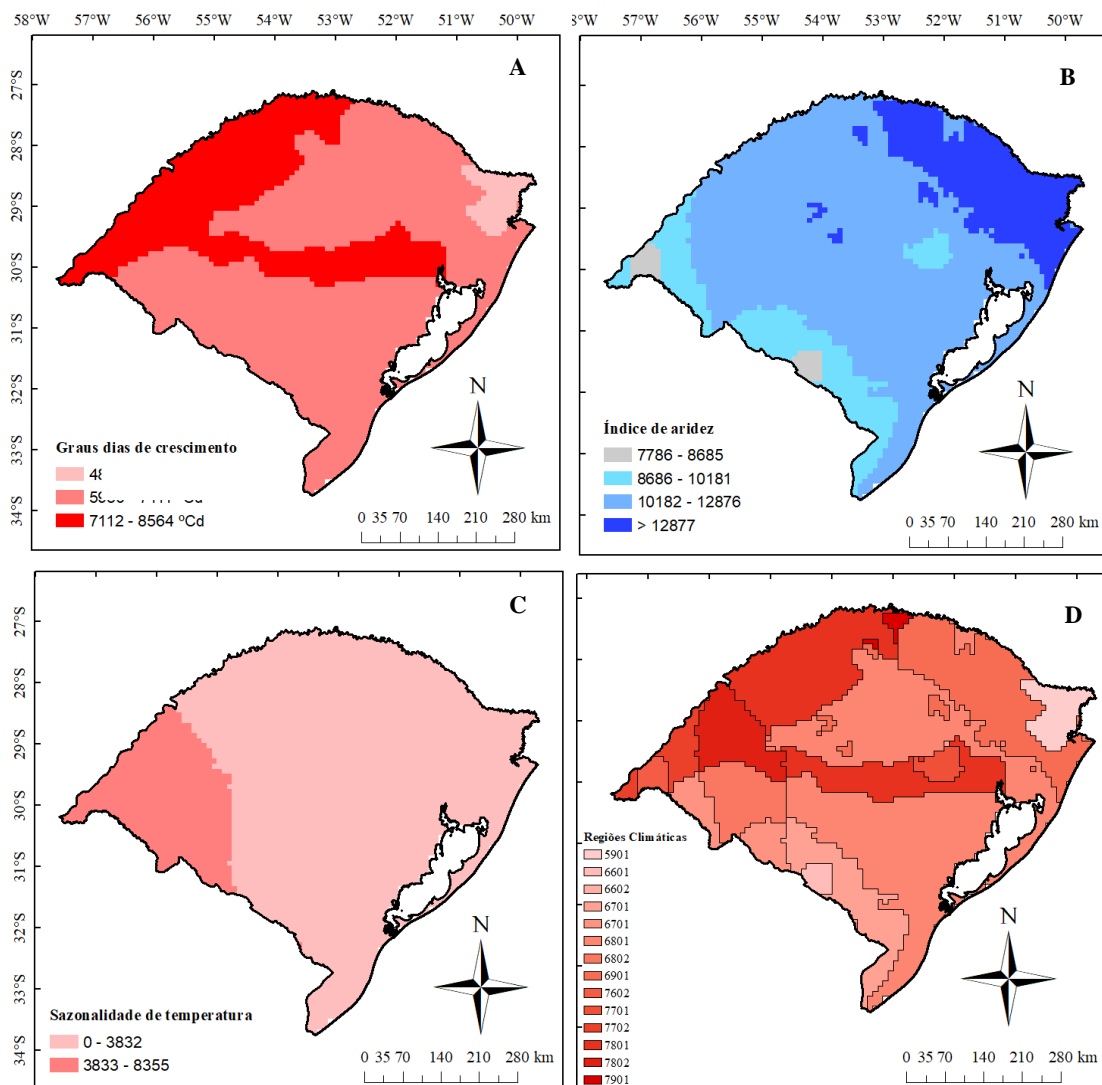


Figura 1. Divisão do estado do Rio Grande de Sul em Regiões Climáticas. Divisão do estado em relação ao acúmulo de graus dias (A), índice de aridez (precipitação/evapotranspiração) (B), sazonalidade de temperatura (C) e 14 Regiões Climáticas presentes no Rio Grande do Sul (D).

Foi elaborado um mapa de colheita de mandioca (hectares) dos últimos 5 anos agrícolas (2014-2019) e sobreposto as zonas climáticas, para identificação das RC que apresentam participação na produção de mandioca do estado (Figura 2). Selecionou-se todas RC que apresentaram mais de 5% de abrangência da área de colheita, assim totalizando 6 RC selecionadas, representando 94 % da área produtiva com a cultura da mandioca (Figura 3).

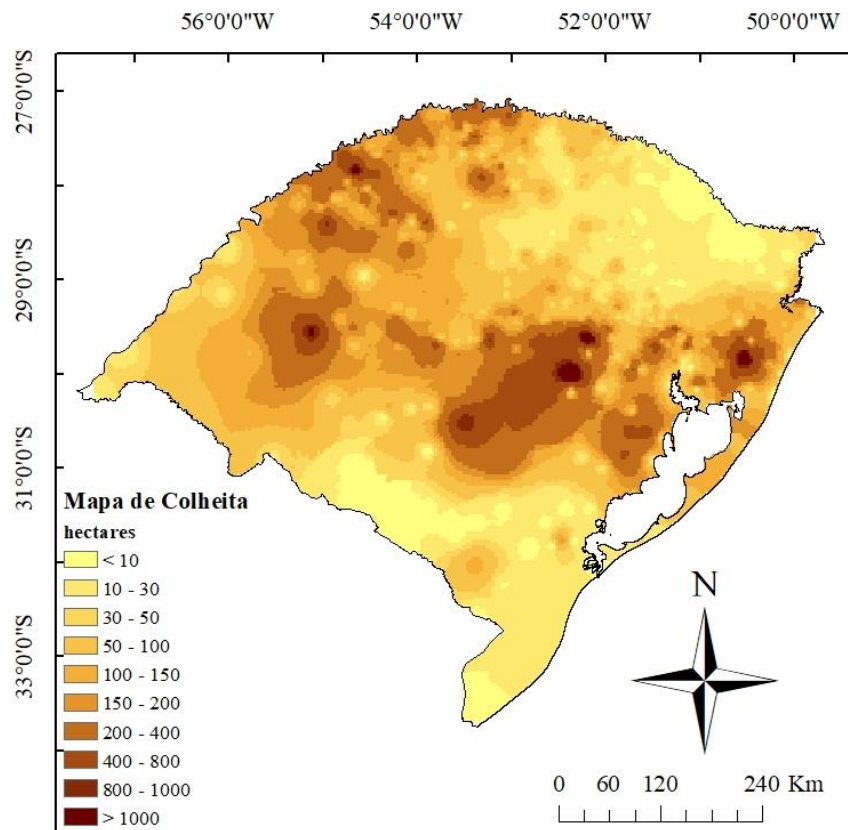


Figura 2. Mapa da área colhida (hectares) de mandioca do Rio Grande de Sul nos últimos cinco anos (2014 – 2019). Fonte: IBGE, 2020.

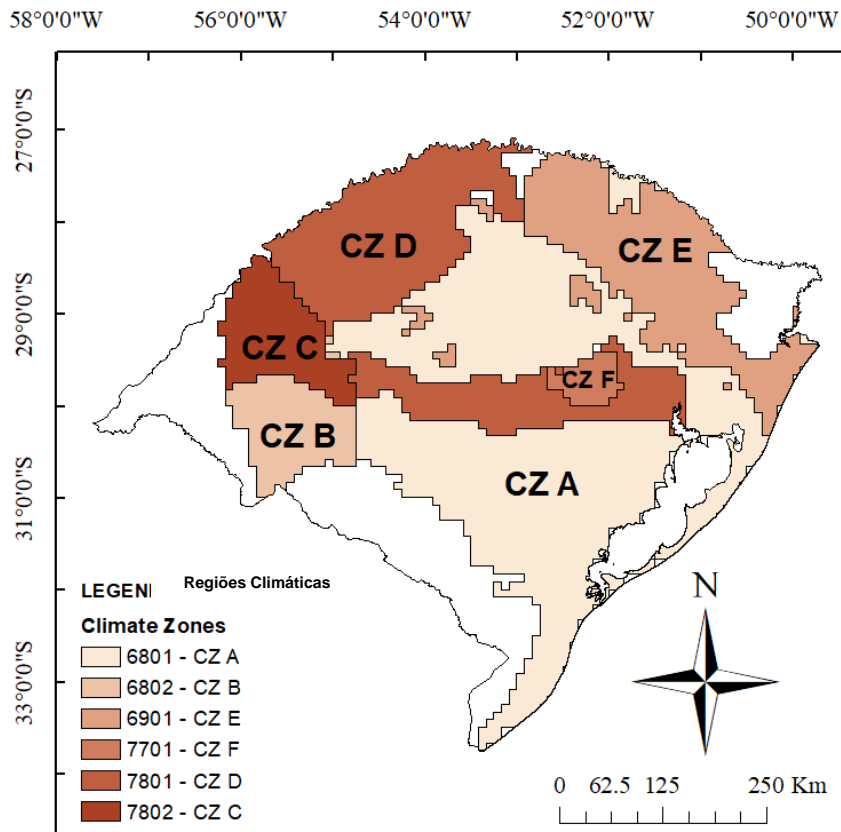


Figura 3. Regiões Climáticas representativas das áreas cultivadas com mandioca no Rio Grande de Sul – Brasil.

Para a estimativa do PP foram utilizadas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), deste modo constituíram as *buffers zones* (Regiões de abrangência das estações) numa área de 100 Km de diâmetro, sendo elas delimitados pelos limites das RC (Figura 4). Foram selecionados das *buffers zones* (BZs) com mais de 5% da área de colheita, evitando mais de 20% de sobreposição entre elas. Dessa forma, 9 BZs (I a IX) foram selecionadas, totalizando 69% da área produtora de mandioca.

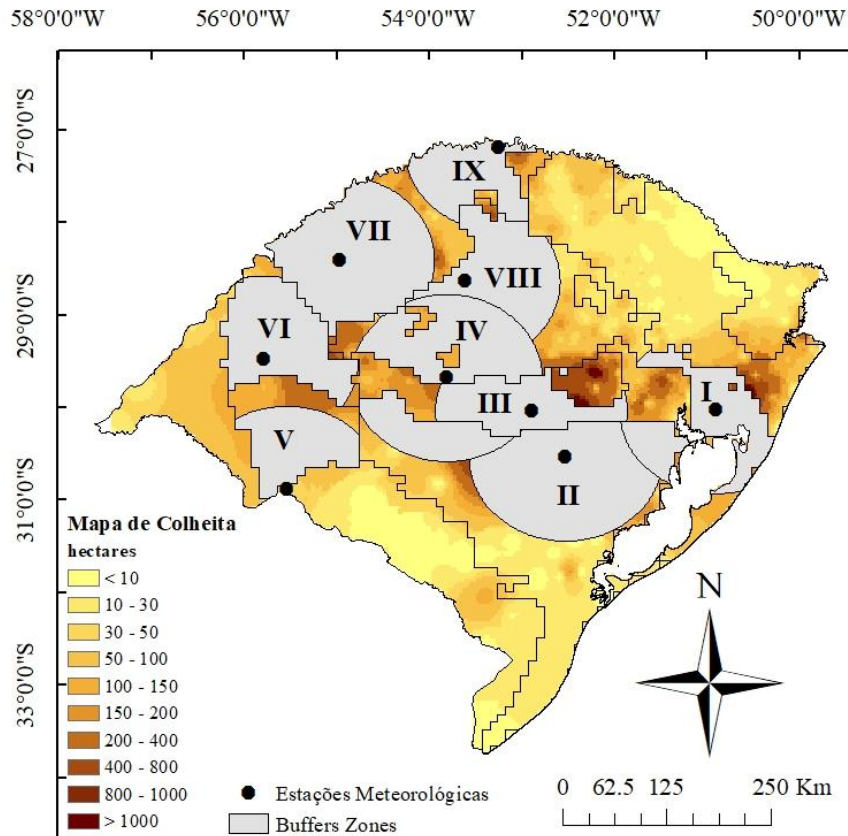


Figura 4. *Buffer Zones* representativas da área produtiva (hectares) de mandioca no Rio Grande de Sul – Brasil.

3.2 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE, DO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA E DAS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE

3.2.1 Potencial de Produtividade e Potencial de Produtividade limitado por Água:

Na estimativa do PP e o PPA por foi estimado modelos agrícolas, conforme descrito por Lobell et al. (2009). Foi utilizado o modelo de mandioca SIMANIHOT (<http://w3.ufsm.br/simanihot/>) (TIRONI, et al, 2017). As simulações foram realizadas utilizando os dados das estações meteorológicas do INMET nas BZs do Rio Grande do Sul (Figura 4). Foi utilizada a concentração de CO₂ de 400 ppm, a densidade de plantas de 15.625 pl.ha⁻¹, pois apresenta maior potencial produtivo (STRECK et al., 2014) e a data de plantio nas simulações se deram a partir de 21/08 até 30/11 (MAPA, 2011), com datas de plantio de dez em dez dias, desse modo, a data de plantio selecionada para cada BZs seguiu a recomendação do Zoneamento agrícola de Risco Climático (ZARC) (tabela 1) para 15 anos (2004 – 2019), uma vez que para uma estimativa do PP segura e confiável é necessários no mínimo 15 anos

(GRASSINI et al., 2015). Para a simulação do PPA foi empregado como camada de abrangência do sistema radicular de 40 centímetros e profundidade de plantio da maniva de 8 centímetros. As características de solo e variáveis utilizadas para simulação dos potenciais de produtividade e potenciais limitado por água nas diferentes *buffers zones* estão descritas na tabela 1, 2 e 3.

Tabela 1: Caracterização das variáveis utilizadas para simulação do potencial de produtividade e potencial de produtividade limitado por água para as *buffers zones* no Rio Grande do Sul – Brasil.

Buffers Zones	Local	Região Climática (CZ)	Data de Plantio	Data de Colheita
I	Porto Alegre	6801 - CZ A	21 de agosto	15 de junho
II	Encruzilhada do Sul	6801 - CZ A	11 de setembro	15 de junho
III	Cachoeira do Sul	7801 - CZ D	11 de setembro	15 de junho
IV	Santa Maria	6801 - CZ A	11 de setembro	15 de junho
V	Santana do Livramento	6802 - CZ B	11 de setembro	15 de junho
VI	Alegrete	7802 - CZ C	11 de setembro	15 de junho
VII	São Luíz Gonzaga	7801 - CZ D	11 de setembro	15 de junho
VIII	Cruz Alta	6801 - CZ A	11 de setembro	15 de junho
IX	Iraí	7801 - CZ D	21 de agosto	15 de junho

Tabela 2: Unidades de mapeamento dos solos e suas respectivas classificações correspondentes no Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2006), utilizadas para simulação do potencial de produtividade limitado por água para as *buffers zones* no Rio Grande do Sul – Brasil.

Buffers Zones	Unidade de mapeamento	SiBCS
I	Gravataí	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico úmbrico
II	Camaquã	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico úmbrico
III	Rio Pardo	Argissolo vermelho amarelo distrofico típico
IV	São Pedro	Argissolo Vermelho Distrófico arênico
V e VI	Livramento	Argissolo Bruno-Acinzentado Alítico abruptico
VII	Santo Ângelo	Latossolo Vermelho Distroférico típico
VIII	Cruz Alta	Latossolo Vermelho Distrófico típico
IX	Charrua	Neossolo Regolítico eutrofico típico

Fonte: SiBCS (EMBRAPA, 2006)

Tabela 3: Variáveis utilizadas para simulação do potencial de produtividade limitado por água: profundidade da camada de solo, porcentagens de areia, silte e argila, e conteúdo de água no solo em 10, 650 e 1500 kPa dos perfis modais das unidades de mapeamento do estado do Rio Grande do Sul, para as *buffers zones* no Rio Grande do Sul – Brasil.

Buffers Zones	Local	U.M.*	Prof. de camada (cm)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Θ10 kPa (cm ³ .cm ⁻³)	Θ650 kPa (cm ³ .cm ⁻³)	Θ1500 kPa (cm ³ .cm ⁻³)
I	Porto Alegre	Gravataí	0-16	54	28	18	0,289	0,106	0,092
			16-35	50	25	25	0,304	0,125	0,110
			35-67	44	24	32	0,324	0,145	0,129
II	Encruzilhada do Sul	Camaquã	0-30	69	20	11	0,24	0,081	0,07
			30-42	56	24	20	0,286	0,112	0,098
			42-58	43	19	38	0,334	0,168	0,15
III	Cachoeira do Sul	Rio Pardo	0-50	56	15	29	0,301	0,137	0,122
			50-70	52	13	35	0,314	0,163	0,147
			0-25	73	12	15	0,243	0,088	0,077
IV	Santa Maria	São Pedro	25-65	78	10	12	0,215	0,07	0,063
			65-100	60	11	29	0,296	0,144	0,129
			0-25	81	11	8	0,177	0,054	0,050
V	Santana do Livramento	Livramento	25-45	75	12	13	0,230	0,078	0,069
			45-60	62	13	25	0,286	0,129	0,115
			60-90	43	13	44	0,344	0,193	0,175
VI	Alegrete	Livramento	0-25	81	11	8	0,177	0,054	0,050
			25-45	75	12	13	0,230	0,078	0,069
			45-60	62	13	25	0,286	0,129	0,115
VII	São Luiz Gonzaga	Santo Ângelo	60-90	43	13	44	0,344	0,193	0,175
			0-40	13	25	62	0,425	0,239	0,216
			40-80	9	19	72	0,44	0,268	0,244
VIII	Cruz Alta	Cruz Alta	80-120	9	17	74	0,442	0,273	0,25
			0-13	70	9	21	0,268	0,113	0,1
			13-35	70	8	22	0,271	0,117	0,103
IX	Iraí	Charrua	35-55	66	8	26	0,285	0,133	0,119
			0-20	28	61	11	0,394	0,087	0,071

* Unidade de Mapeamento correspondente a SiBCS

A produtividade média dos produtores (PMP) foi estimada a partir do banco de dados obtidos em dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019) através da aplicação de questionários junto aos produtores agrícolas da região central do Rio Grande do Sul (Figura 5), apresentando 106 combinações genótipos x ambiente. A estimativa das lacunas de produtividade foi determinada pela diferença entre os potenciais de produtividade (PP e PPA) e a produtividade Média dos produtores (PMP) e produtividade média (PM) disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

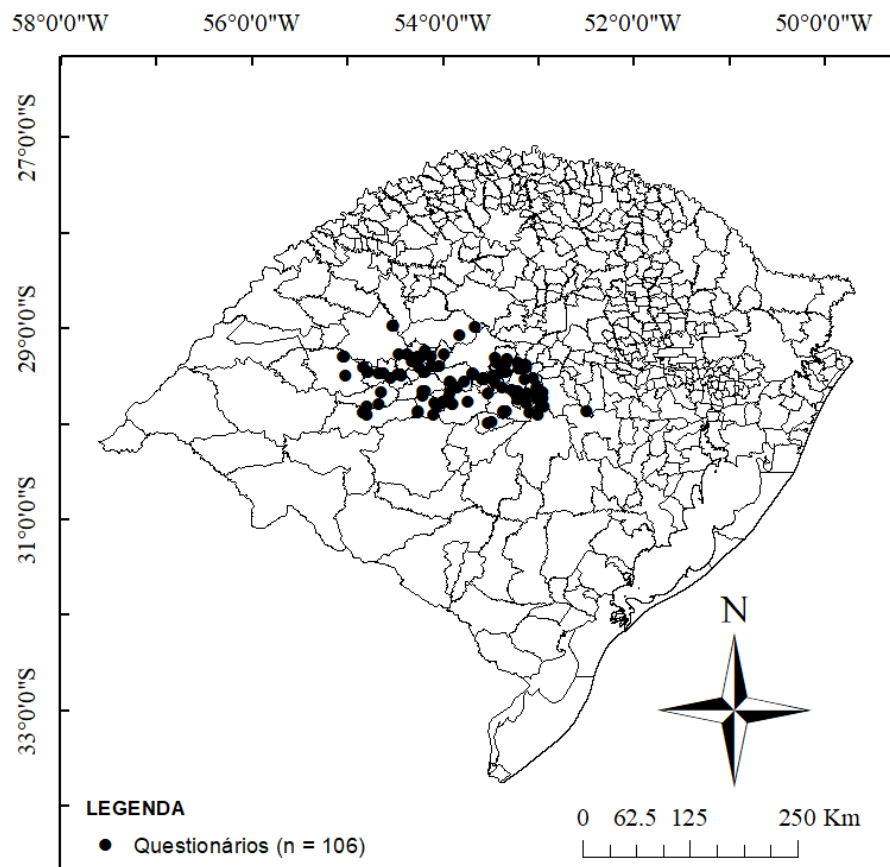


Figura 5: Mapa do Rio Grande do Sul com a localização dos questionários aplicados nas lavouras de produtores rurais nos anos agrícolas 2017/2018 e 2018/2019.

3.2.2 Estimativa das lacunas de produtividade para as *Buffers Zones*:

As estimativas das lacunas de produtividade nas BZs foram determinadas:

$$\%LPP = [((PP - PM) * 100) / PP] \quad (5)$$

$$\%LPPA = [((PP - PPA) * 100) / PP] \quad (6)$$

$$\%LPM = [((PPA - PM) * 100) / PPA] \quad (7)$$

Onde, %LPP é o percentual da lacuna de produtividade potencial, % LPPA é a percentual da lacuna de produtividade potencial limitado por água e %LPM é o percentual da lacuna de produtividade de manejo.

3.2.3 Estimativa das lacunas de produtividade para o Rio Grande do Sul:

A estimativa das lacunas de produtividade para o Rio Grande do Sul foram determinada pelas diferenças entre os potenciais de produtividades (PP e PPA) e a produtividade média (PM). Criou-se quatro lacunas de produtividade para melhor entendimento (figura 6), sendo elas:

$$LPP = PP - PM \quad (8)$$

$$LPPA = PP - PPA \quad (9)$$

$$LPM = PPA - PM \quad (10)$$

$$LPM_{PMP} = PPA - PM_{PMP} \quad (11)$$

Onde, LPP é a lacuna de produtividade potencial, LPPA é a lacuna de produtividade potencial limitado por água, LPM é a lacuna de produtividade de manejo e LPM_{PMP} é a lacuna de produtividade de manejo da região central.

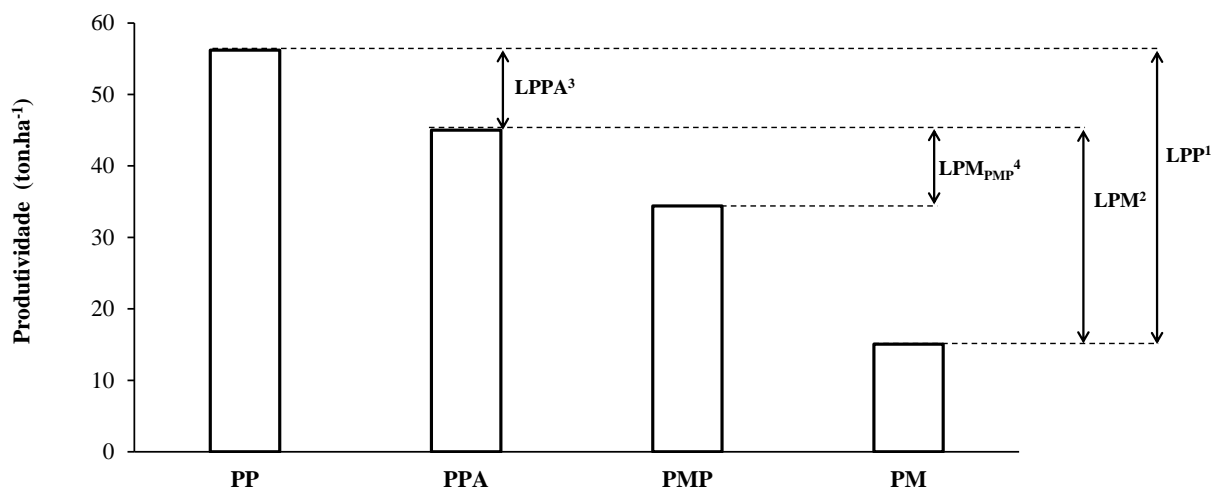


Figura 6: Lacunas de produtividade de culturas agrícolas segundo Lobell et al. (2009). O PP e o PPA estimado pelo modelo Simanihot; produtividade média dos produtores da região central (PM_{PMP}) e produtividade média (PM) do Rio Grande do Sul (IBGE, 2019). (1) LPP é a lacuna

de produtividade potencial, (2) LPPA é a lacuna de produtividade potencial limitado por água, (3) LPM é a lacuna de produtividade de manejo e (4) LPM_{PMP} é a lacuna de produtividade de manejo da região central

3.3 IDENTIFICAÇÃO DE FATORES QUE CAUSAM AS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM MANDIOCA

Durante dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019) foram acompanhadas 106 lavouras de produtores de mandioca na região central do estado do Rio Grande do Sul (Figura 5). As entrevistas realizadas nas lavouras das propriedades rurais contaram com a parceria da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Sul (Emater/RS-ASCAR), onde foram levantados dados de produtividade e de manejo de mandioca, como data de plantio, cultivar, irrigação, fertilização, sistema de preparo da área, manejo fitossanitário entre outras práticas realizadas nas lavouras (Tabela 4).

Tabela 4: Questionários aplicados nas entrevistas realizadas nas lavouras de produtores de mandioca contendo os parâmetros e variáveis de manejos nas lavouras do Rio Grande do Sul durante os anos agrícolas 2017/2018 e 2018/2019.

Parâmetros	Variáveis solicitadas	Informações fornecidas
Dados da lavoura de mandioca	Coordenadas da lavoura	Latitude, longitude
	Cultivar	Nome da cultivar
	Finalidade da lavoura	Subsistência, agroindústria e mercado
	Data de plantio	Data
	Densidade	Espaçamento
	Ramas*	Origem
	Manivas*	Número de gemas, classificação
	Rotação de culturas	Sim/Não
	Histórico da Lavoura/Talhão	Culturas anteriores de verão e inverno
	Condução da lavoura	Monocultivo ou Consórcio
	Sistema de preparo de solo	Tração animal ou mecanizado Conveicoal/Camalhão
	Estágios de desenvolvimento	Data
	Relevo	Plano, ondulado, íngreme
	Irrigação	Sim / não
	Análise de solo	Sim / não
	Insumos	Características do Solo
Colheita		Data
Produtividade		ton.ha ⁻¹
Fertilizante		Sim / não
Agrotóxicos	NPK	dose e formulação
	Nitrogênio	dose e número de aplicações em cobertura
	Calcário	Sim / não / quanto em quanto tempo
	Herbicida	Sim / não (quantas aplicações;dose)
	Fungicida	Sim / não (quantas aplicações;dose)
Outros fatores	Inseticida	Sim / não (quantas aplicações;dose)
	Excesso hídrico ou déficit hídrico	Sim / não
	Drenagem	Sim / não
	Outros	descrição

A análise de correlação foi o primeiro passo para identificar qualquer relação entre a produtividade média das lavouras (PM) e as variáveis reportadas nestas lavouras (data de plantio, densidade de plantas, controle de plantas daninhas e outros parâmetros das lavouras). Foi realizada uma análise de árvore de regressão para determinar as práticas de manejo que estão causando as lacunas de produtividade na cultura da mandioca, utilizando o pacote “rpart” em R. A análise de árvore de regressão é um método não paramétrico, que separa recursivamente os dados em grupos sucessivamente menores com divisões binárias baseadas em uma única variável preditora contínua (produtividade) (BREIMAN et al., 1984). Como resposta a árvore de regressão produz um diagrama em árvore, com ramificações determinadas pelas regras de divisão e uma série de nós terminais que contêm a produtividade média (“Yield”) e o número de observações contido em cada nó terminal.

O procedimento inicialmente cria árvores máximas e, em seguida, utiliza-se a técnica de validação cruzada para podar a árvore para um tamanho ideal (THERNEAU e ATKINSON, 1997). Um pacote de "acento circunflexo" em R foi usado para dividir o conjunto de dados em conjuntos de dados de calibração (80%) e validação (20%). O conjunto de dados de calibração foi usado para executar a análise da árvore de regressão, enquanto o conjunto de dados de validação foi utilizado para estimar o erro quadrático médio da raiz (RMSE) entre a produtividade observada e a prevista. A análise em árvore de regressão tratou os valores ausentes nos fatores explicativos (função `na.rpart`), excluindo os casos apenas se a variável de resposta (isto é, produtividade) ou todos os fatores explicativos estavam ausentes. Quando foram encontrados valores perdidos ao considerar uma divisão, eles foram ignorados e as previsões são calculadas a partir dos valores não ausentes desse fator (VENABLES e RIPLEY, 2002). Para quantificar a influência da densidade de plantas e da data de plantio no potencial de produtividade foi adotado a metodologia da *Boundary Function* (Função Limite) proposta por French e Schultz (1984).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE, POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DE MANDIOCA NAS *BUFFERS ZONES* NO RIO GRANDE DO SUL

O Potencial de produtividade (PP) do Rio Grande do Sul variou de 51,9 a 61,7 ton.ha⁻¹ nas diferentes BZs (Figura 7A), as quais representam 69% da área produtiva de mandioca no estado. O PP encontrado para o RS foi similar ao encontrado na África Oriental, por Obiero (2004) e Ntawuruhuga (2006) que reportaram potenciais de produtividade variando de 50 a 60 ton.ha⁻¹. Além disso, Cock et al. (1979) relataram que o genótipo de mandioca ideal para atingir o PP tem que apresentar ramificação tardia, folhas grandes e com baixa taxa de senescência, resultando em produtividades entre 75 a 90 ton.ha⁻¹.

Os maiores PP foram encontrados na BZ IX (61,7 ton.ha⁻¹), VIII (60,6 ton.ha⁻¹) e na BZ III (59,3 ton.ha⁻¹), representando 19,2% da área produtora de mandioca do estado, em plantios no terceiro decêndio de agosto. Visses et al. (2018) simulou o PP para o Rio Grande do Sul utilizando o modelo de simulação “Agroecological Zone crop” da FAO e encontrou um PP de 48,3 ton.ha⁻¹, abaixo do encontrado neste estudo. “Agroecological Zone crop” é um modelo empírico, é baseado em relações estatísticas, por vez, o Simanihot é um modelo mecanístico, e é baseado em processos (*process – based model*), descrevendo melhor o crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura da mandioca.

Os menores PP foram identificados nas BZs I (51,9 ton.ha⁻¹), VII (52,8 ton.ha⁻¹) e IV (53,6 ton.ha⁻¹) que representam 22,8% da área cultivada com mandioca no estado (Figura 7A). Os menores PP estão relacionados com temperaturas e radiação solar (Figura 8A, 8B, 8C e 8D), temperaturas baixas, $\leq 14^{\circ}\text{C}$ na fase de emergência a colheita (SCHONS et al., 2007) e temperaturas $\leq 17^{\circ}\text{C}$ na fase de plantio a emergência (EL-SHARKAWY, 2004), retardam o crescimento e desenvolvimento da cultura da mandioca. A radiação solar, somado a temperatura ditam o crescimento e desenvolvimento da cultura da mandioca (Figura 8A, 8B, 8C e 8D), por consequência quanto menor a radiação solar, menor o PP da cultura (TIRONI et al., 2019).

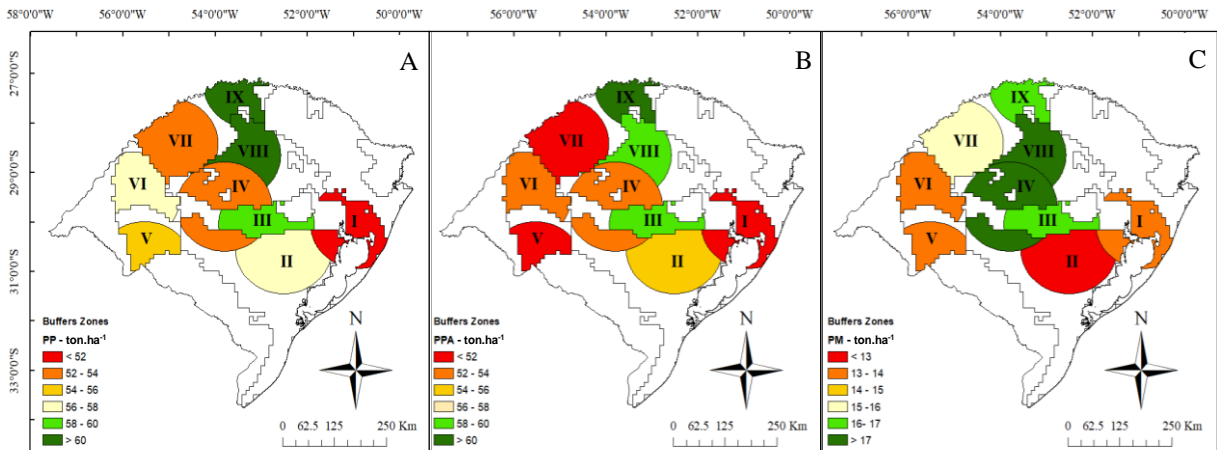


Figura 7: (A) Potencial de produtividade (PP), (B) potencial de produtividade limitado por água (PPA) e (C) Produtividade média de mandioca nos últimos 15 anos (2004-2019) nas diferentes *buffers zones* do Rio Grande do Sul.

O Potencial de produtividade limitado por água (PPA) apresentou uma variação entre as BZs de $9,7 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($50,5$ até $60,2 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) (Figura 7B), variação similar à do PP ($9,8 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$). Neste estudo é observado que a perda de produtividade pelo déficit hídrico foi pequena na média dos últimos 15 anos para o estado, fato este que se deu devido a precipitações dos últimos anos suprirem as exigências da cultura (Figura 8E), com variação de 1100 a $1700 \text{ mm}\cdot\text{ciclo}^{-1}$, segundo EL-SHARKAWY (2012) o cultivo de mandioca é possível em índices pluviométricos $\leq 400 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ até $\geq 2.000 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. Plantios em ambiente com índices pluviométricos $\leq 400 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ é importante que a água seja distribuída uniforme durante o ciclo (SCHWENGBER et al, 2005; FRANCISCO et al., 2017; MALUF et al., 2011), pois o período crítico da cultura ao déficit hídrico é do plantio ao início de acumulação de amido (IAA), podendo sofrer perdas no número de plantas e peso de raízes (TIRONI et al., 2019). Esta plasticidade do índice pluviométrico para a cultura da mandioca resulta na alta taxa de adaptabilidade a diversos ambientes. Em virtude disto, foi considerada o alimento do século XXI (FAO, 2013), principalmente em países em desenvolvimento. Analisando este cenário é notório que os produtores de mandioca do estado não necessitam investimento (custo) com a implantação de sistemas de irrigação para o cultivo.

A produtividade média (PM) de mandioca no estado do Rio Grande do Sul, sob a prática de manejo atual nos últimos 15 anos (2004 -2019), variou entre as BZs de $12,6$ a $18,6 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Figura 6C). As BZs VIII, IV, IX, III e XII apresentaram as maiores PMs ($18,6 - 18,0 - 16,6 - 16,5$ e $16,0 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente). Já as BZs VI, I, V e II apresentaram as menores PMs ($13,5 - 13,4 - 13,3$ e $12,6 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente). O comportamento da PM foi similar ao

do PP para as diferentes BZs para o Rio Grande do Sul, porém os valores PM para os últimos anos são baixos, resultando em valores expressivos de lacuna de produtividade (Figura 9).

A Figura 8, mostra as variáveis meteorológicas de 15 anos (2004 – 2019) das BZs durante ciclo da cultura, o que representa o período de 21.08 – 15/06 (BZs I e IX) e 11.09 – 15/06 (BZs II, III, IV, V, VI, VII e VIII), nas diferentes *buffers zones* do Rio Grande do Sul. As BZs de maiores PP (Figura 7A, BZs IX, VIII e III) apresentaram valores de temperatura média $>20,5^{\circ}\text{C}$ (Figura 8C), temperatura acima da temperatura base para a fase de emergência a colheita da cultura (SCHONS et al., 2007). A associação da temperatura com a radiação solar de 18,4, 18,4 e 18,3 MJ dia⁻¹ (BZs IX, VIII e III) (Figura 8D) explicam os maiores potenciais produtivos (Figura 7A). Quando os valores de radiação solar são $\geq 24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ a planta apresenta a máxima taxa de crescimento diário (TIRONI et al., 2019).

Na figura 7A as BZs I, VII e IV proporcionaram menor PP em resposta as variáveis meteorológicas, em que as BZs I e IV tiveram menor radiação solar, resultando em menor taxa de crescimento diário e a BZ VII apresentou temperaturas mínimas e médias elevadas ($16,9^{\circ}\text{C}$ e $22,8^{\circ}\text{C}$, respectivamente) (Figura 8B e 8C), o que resulta em um maior gasto de água pela planta através da transpiração noturna (TAIZ; ZEIGER, 2017).

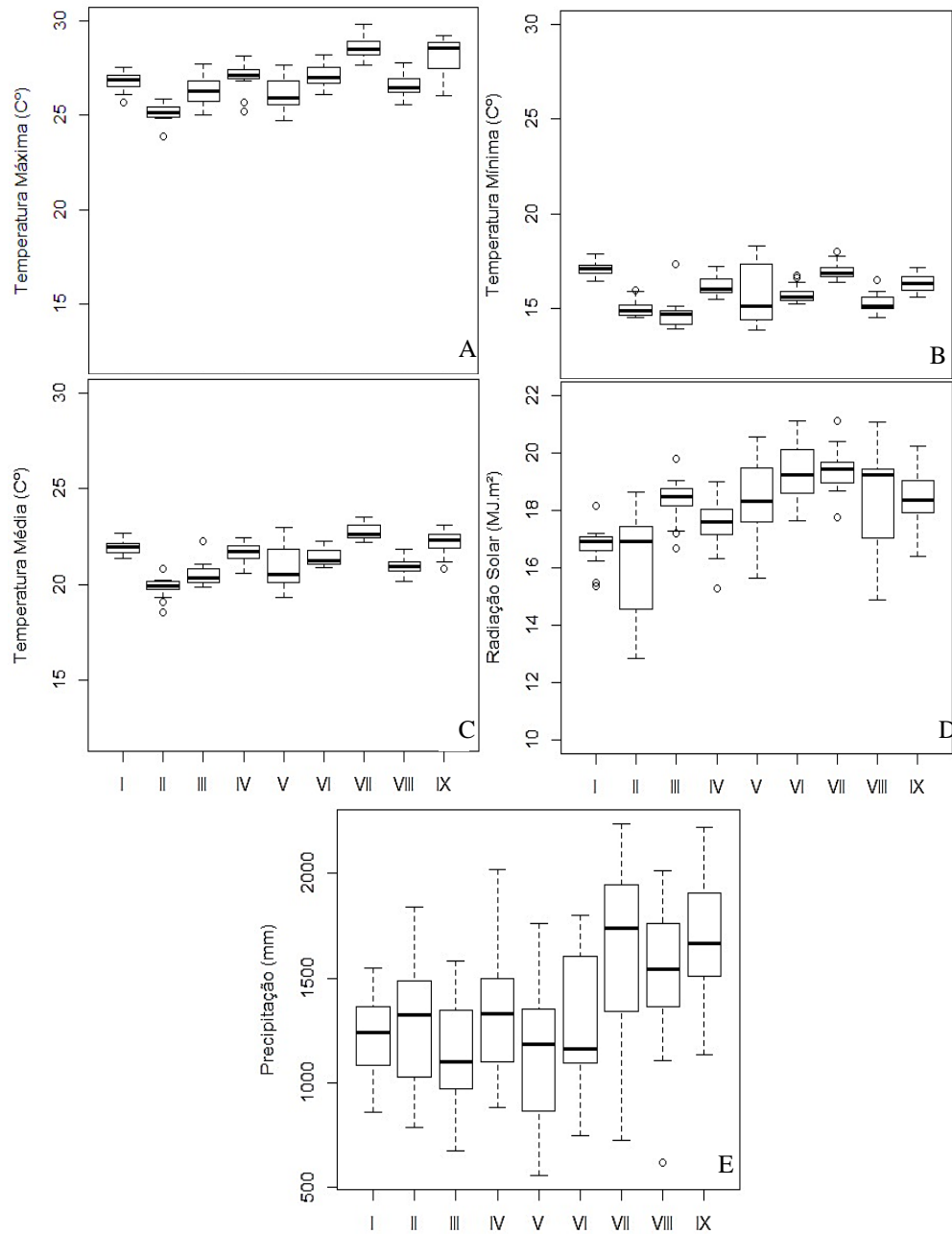


Figura 8: Dados meteorológicos médios (2004 – 2019), (A) Temperatura máxima (°C), (B) Temperatura mínima (°C), (C) Temperatura média (°C), (D) radiação solar (MJ dia-1), (E) precipitação (mm) para o período de 21.08 – 15/06 (BZs I e IX) e 11.09 – 15/06 (BZs II, III, IV, V, VI, VII e VIII), nas diferentes *buffer zones* do Rio Grande do Sul. Os diagramas de Box-hisker incluem o intervalo de 50% das observações (caixa retangular), a mediana (barra transversal) e o min. e max. valores (linhas verticais).

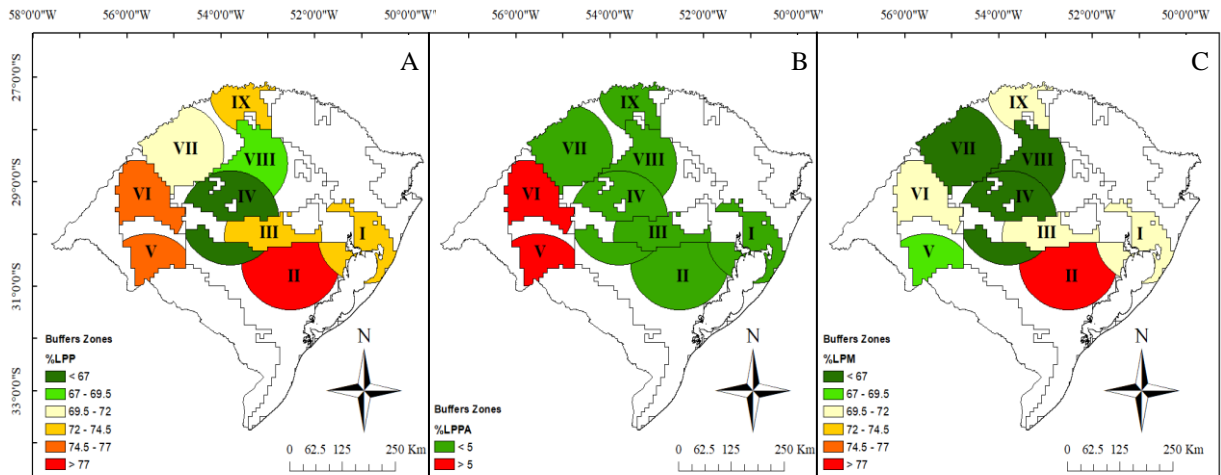


Figura 9: (A) Lacuna de produtividade potencial (%LPP), (B) Lacuna de produtividade de água (%LPPA) e (C) lacuna de produtividade manejo (%LPM) nas diferentes *buffers zones* do Rio Grande do Sul.

Através da estimativa dos Potenciais Produtividades (Figura 7) foram ajustadas as Lacunas de Produtividade, deste modo possibilitando o entendimento das regiões produtoras de mandioca e quais são os fatores causadores dessas lacunas. Utilizando o PP como referência, nota-se uma grande lacuna, variando de 66% (BZ IV) à 78% (BZ II) (35,6 a 45,1 ton.ha⁻¹)(Figura 9A). Buscando o entendimento da deficiência hídrica e do manejo sob a cultura, este estudo traz na Figura 9B e 9C as perdas de produtividade causadas pelo déficit hídrico, ou seja a lacuna de produtividade de água (%LPPA) e traz pelas práticas de manejo, conhecida por lacuna de produtividade de manejo (%LPM) respectivamente. Foi observado que a %LPPA durante o ciclo da mandioca é pequeno, variando apenas 0 à 7% (0,0 a 3,8 ton.ha⁻¹)(Figura 9B), sendo as BZ V e VI que apresentaram a maior perda do PP devido a deficiência hídrica (%LPPA). Na figura 8E, pode-se observar que nas BZ V e VI as precipitações em alguns ciclo ficam proximas a 500 mm.ciclo⁻¹, além disso a %LPPA está ligada a distribuição heterogênea das chuvas durante o ciclo de cultivo, uma vez que a precipitação média das BZs são suficientes para a cultura da mandioca expressar altas produtividades.

A lacuna de produtividade de manejo (%LPM) apresentou maior variação, 66 a 78% da PP, ou seja, 34,9 a 43,6 ton.ha⁻¹ (Figura 9C), sendo assim, o manejo foi uma das causas da limitação do PP, representando 97 % da %LPP. Visses et al. (2018) corroboram para esta tendência no Rio Grande do Sul, onde estimaram lacuna de produtividade de 26.5 ton.ha⁻¹, onde a %LPPA foi 40,4% e a %LPM foi 59,6 %. Nota-se nestes estudos que existe uma grande lacuna de produtividade a ser preenchida, porém salienta-se a importância de utilizar um modelo

baseado em processos como o Simanihot, pois a estimativa do PP por estes modelos é mais precisa, pois simula sem nenhum tipo de limitação biótica, somente com as condições climáticas (LOBELL et al., 2009).

4.2 POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM MANDIOCA NO RIO GRANDE DO SUL

Através do uso do modelo Simanihot foi estimado o potencial de produtividade para a cultura da mandioca para as 9 BZs (I a IX) no RS. Para estimar o potencial de produtividade médio (PPmédio), potencial de produtividade limitado por água médio (PPAmédio), a produtividade média (PM) (IBGE, 2020) e as produtividade média do produtores (PMP), foi realizada a média ponderada das áreas de colheita das BZs. O Pontecial de produtividade médio para a cultura da mandioca no RS foi 56,2 ton.ha⁻¹, já o PPAmédio encontrado foram 54,9 ton.ha⁻¹, com desvio padrão de 3,8 ton.ha⁻¹.

Levantou-se a PMP de mandioca da região central do Rio Grande do Sul, através de questionários (n = 106), resultando na PMP de 34,4 ton.ha⁻¹, com desvio padrão de 12,4 ton.ha⁻¹, evidenciando grande variabilidade na produtividade da região. A produtividade média do RS durante os últimos 15 anos (2004 – 2015) foi de 15,1 ton.ha⁻¹ (IBGE, 2020). É notório a diferença entre a PMP (Figura 10) e a PM da região central do estado (34,4 ton.ha⁻¹ para 18,0 ton.ha⁻¹ (Figura 7C)), este fato acende um alerta para os órgãos gorvanamentais quanto a estimativa da produtividade média para cultura da mandioca, pois o levantamento das produtividades (PMPs) através dos questionários, foram realizados lavoura a lavoura, colhendo e aferindo a massa de raízes por plantas de mandioca, dentro da lavoura amostrada. O emprego desta metodologia de coleta de dados, torna a estimativa da PMP mais robusta e confiável.

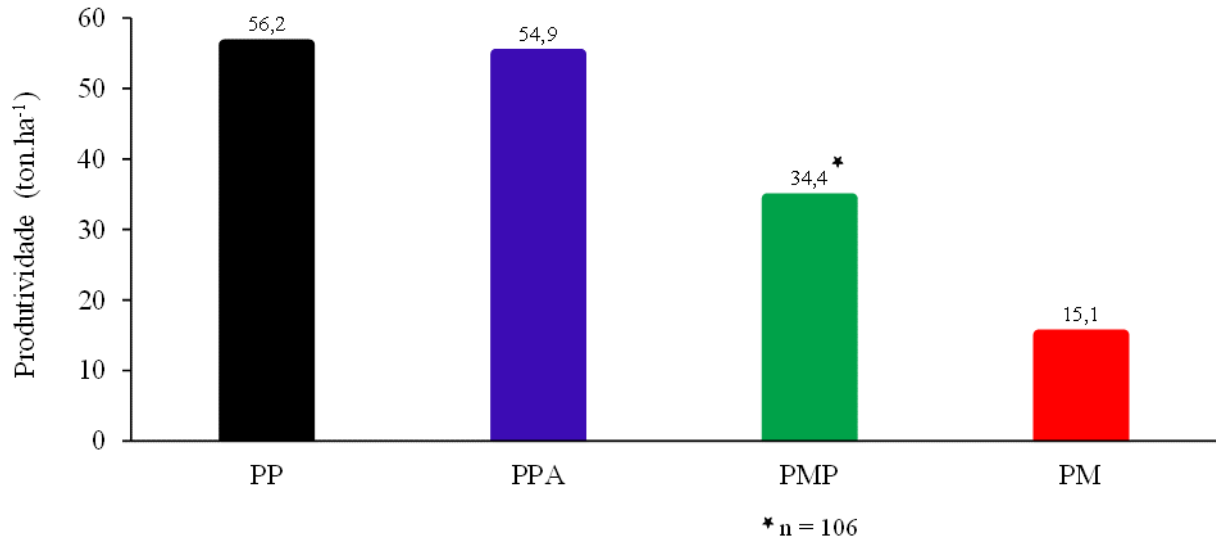


Figura 10: Potenciais de produtividade e produtividades médias do Rio Grande do Sul – Brasil. Coluna preta é o potencial de produtividade estimado pelo modelo (PP), coluna azul é o potencial de produtividade de produtividade limitado por água (PPA), coluna verde é a produtividade média dos produtores (PMP) da região central do RS (n= 106 lavouras) e a coluna vermelha é a produtividade média (PM) do RS nos últimos 15 anos (2004 – 2019).

Foram observado lacunas que variaram de 20,5 ton.ha⁻¹ a 41,1 ton.ha⁻¹ (37,3 a 73,2%) em relação a produtividade média do RS (Figura 10), expondo a necessidade de estudo e melhorias no manejo das lavouras de mandioca do estado do RS para aumentar a PM. Para melhor entendimento foram criadas quatro lacunas de produtividade para melhor entendimento, conforme descrito na figura 6. A primeira, foi a Lacuna de Produtividade Potencial (LPP) que apresentou a maior lacuna, 41,1 ton.ha⁻¹ (73,2%). Os valores reportados na literatura se aproximam com os encontrados neste estudo, onde no Quênia e Uganda, Fermont et al. (2009) estimaram uma LPP de 18,6 ton.ha⁻¹ (67,6%), na República Democrática do Congo, Kintché et al. (2017) encontraram uma LPP de 12,4 ton.ha⁻¹ (56%) e no Brasil (RS), Visses et al. (2018) estimou uma LPP de 26,5 ton.ha⁻¹ (54,9%).

A segunda, foi a Lacuna de Produtividade Água (LPPA), a qual incidiu na menor lacuna, com 1,3 ton.ha⁻¹ (3%). Este resultado é contrario ao encontrado para ambiente tropical, onde Fermont et al. (2009) estimaram uma LPPA de 5,4 ton.ha⁻¹ (29%) e a LPPA estimada por Visses et al. (2018) para o Rio Grande do Sul, onde foi de 10,7 ton.ha⁻¹ (40,4%). Este estudo mostra que existe uma grande discrepância na LPPA entre locais de estudo, devido principalmente a variação no índice pluviométrico de cada ambiente, onde no Rio Grande do Sul, os índices são suficientes para altas produtividades na cultura da mandioca (TIRONI et al., 2019).

A Lacuna de Produtividade de Manejo (LPM) foi de 39,8 ton.ha⁻¹ ou 71%. Está, dentre as quatro, é considerada a mais adequada e realística para o estado do Rio Grande do Sul, tendo em vista que as áreas cultivadas com mandioca não possuem sistema de irrigação. A quarta, é a Lacuna de Produtividade de Manejo dos produtores da região central (LPM_{PMP}), a qual apontou uma lacuna de 20,5 ton.ha⁻¹ (37%). Toda via é notório que a LPM_{PMP} é menor do que a LPM, tais resultados configuram a região central como a menor lacuna de manejo, inferindo que as práticas de manejo utilizadas pelos agricultores nesta região, são melhores empregadas no cultivo de mandioca (densidade de plantas, adubação, época de plantio e controle de plantas daninhas). Embora exista esta superioridade é verificado que tem grande variabilidade na produtividade (PMP), apresentando um desvio padrão de ±12,4 ton.ha⁻¹. Os valores de lacunas de produtividade potencial encontradas neste estudo apresentam-se próximas as mencionadas por Lobell et al. (2009) em diferentes culturas, que variaram de 20 à 80%. Com este estudo é possível inferir que o Rio Grande do Sul apresenta uma grande lacuna a ser explorada até atingir os valores de 80% do PP, valor este considerado o ponto de máxima eficiência econômica (VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997).

4.3 FATORES CAUSADORES DAS LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM LAVOURAS DE MANDIOCA NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

Uma árvore de regressão foi criada e quatro fatores explicaram a variação de produtividade na região central do RS, sendo elas: densidade de plantas, data de plantio e frequência de controle de plantas daninhas (Figura 11). Destaca-se que, a densidade de plantas foi fator mais importante na variação de produtividade, estando como principal fator da árvore.

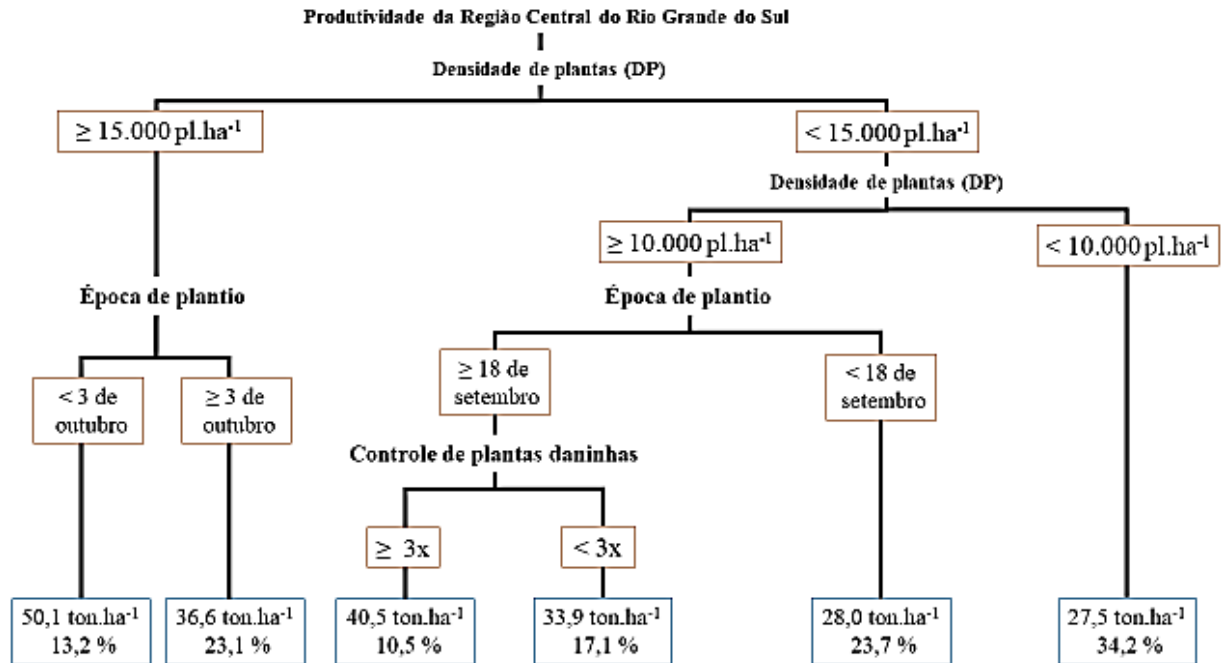


Figura 11: Árvore de regressão mostrando fontes de variação na produtividade de mandioca devido aos fatores de manejo. Caixas são nós de divisão, com caixas inferiores representando nós de terminal. Os valores dentro de cada nó terminal indicam a média da produção de raízes e a porcentagem de observações em cada nó terminal.

Na figura 11 a árvore de regressão destacou que densidades de plantas (DP) maiores ($\geq 15.000 \text{ pl.ha}^{-1}$), os produtores obtêm produtividades superiores variando de 36,6 a 50,1 ton.ha^{-1} , quando comparado com densidades de plantas $< 15.000 \text{ pl.ha}^{-1}$, que mostra uma variação de menor proporção (23,1 a 40,1 ton.ha^{-1}). Este comportamento é compreendido na figura 12, na qual indica que os produtores da região central do estado, têm maiores produtividades quando optam por $DP \approx 16.500 \text{ pl.ha}^{-1}$, resultando em espaçamentos de 1,0 m x 0,6 m e 0,8 m x 0,8 m (metros entre linhas e metros entre plantas). Esta evidência é dividida a densidade de plantas ser o primeiro e mais importante componente de produtividade da lavoura de mandioca (TIRONI et al., 2019). Estudos que identificam a melhor densidade de plantas salientam que faixa onde a cultura expressa as maiores produtividades é de $15.000 \text{ pl.ha}^{-1}$ e $18.000 \text{ pl.ha}^{-1}$ e a DP depende das características de crescimento de cada cultivar de mandioca, tais como: Número de haste e ramificações (STRECK et al., 2014). Porém Aguiar et al. (2011) destaca que ao utilizar DP elevadas, o número de raízes comerciais diminui.

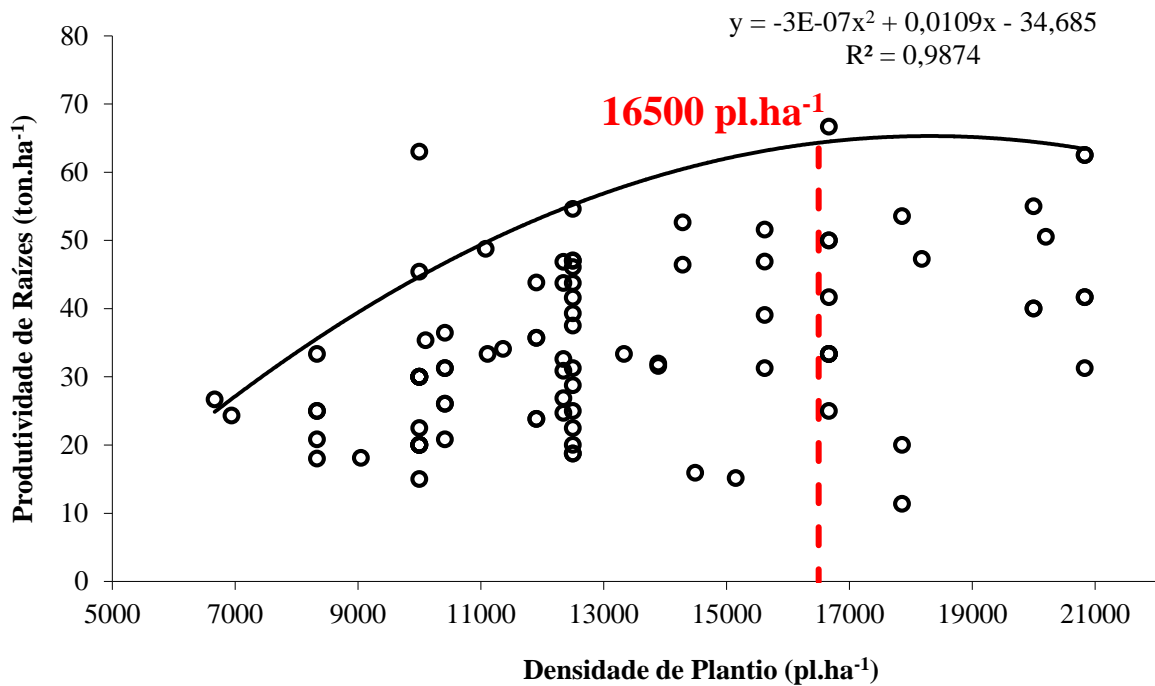


Figura 12: Produtividade de raízes de mandioca (ton.ha⁻¹) em relação a densidade de plantio (pl.ha⁻¹) dos 106 questionários realizados nas lavouras de mandioca da região central do Rio Grande do Sul, durante os dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019). Linha sólida preta representa a função limite e linha tracejada vermelha representa o ponto onde a adição de 1 pl.ha⁻¹ tem incremento > 1,15 Kg.pl⁻¹.

Para as DP ≥ 15.000 pl.ha⁻¹, as lavouras que apresentaram altas produtividades (50,1 ton.ha⁻¹), realizam o plantio antes do dia 03/10, tendo um ganho médio produtivo de 13,5 ton.ha⁻¹ (+ 26%), em relação as lavouras plantaram depois do dia 3/10, os quais obtiveram uma produtividade média de 36,6 ton.ha⁻¹. A época de plantio é o fator muito importante no crescimento, desenvolvimento, influenciando diretamente a produtividade da cultura da mandioca (FAGUNDES et al., 2010). Na figura 13 fica evidente este comportamento, onde as lavouras com plantios realizados após 3 de outubro tem uma perda diária de 575 kg.ha⁻¹. Tironi et al. (2019) afirmam que plantios antecipados de mandioca no Rio Grande do Sul, resultam em maiores produtividades. Isso está ligado ao RS apresentar temperatura baixa nos meses de junho a setembro, o que impossibilita o cultivo de mandioca nesse período, limitando o ciclo de desenvolvimento na maior parte do estado. Em razão desta limitação, plantios antecipados tem o ciclo produtivo mais longo, ou seja, há maior soma térmica, o que reflete em maior produtividade quando comparado a plantios tardios.

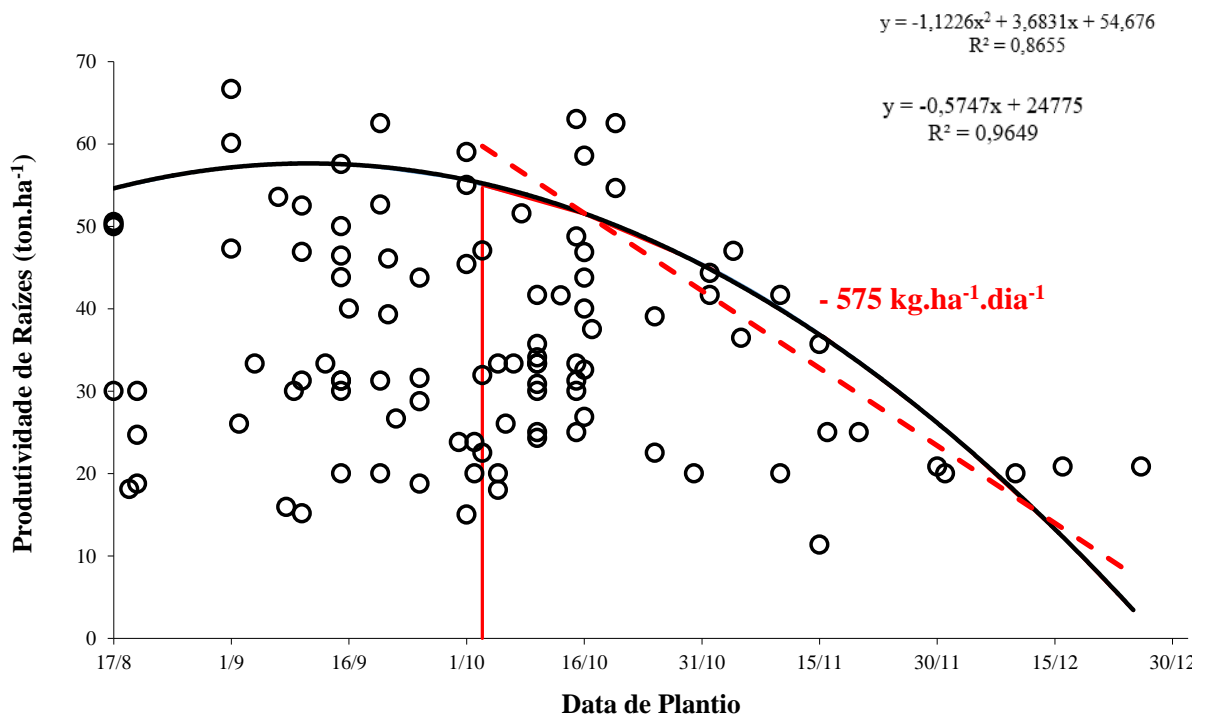


Figura 13: Produtividade de raízes de mandioca (ton.ha^{-1}) em relação a época de plantio dos 106 questionários realizados nas lavouras de mandioca da região central do Rio Grande do Sul, durante os dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019). Linha sólida preta representa a função limite, a linha sólida vermelha representa a data de plantio (03/10) a partir da qual ocorre perda de produtividade e a linha tracejada vermelha representa a linear de perda de produtividade.

Na árvore de regressão, para a $DP < 15.000 \text{ pl.ha}^{-1}$, ocorreu uma divisão em duas classes de densidade, $DP < 10.000 \text{ pl.ha}^{-1}$ e $DP \geq 10.000 \text{ pl.ha}^{-1}$ (Figura 11), onde as que utilizam DP entre 10.000 e $15.000 \text{ pl.ha}^{-1}$ e realizam o plantio depois do dia 18/09, o fator controle de plantas daninhas foi limitante, no qual as lavouras que realizaram ≥ 3 controles de plantas daninhas, proporcionaram bons índices de produtividades ($40,1 \text{ ton.ha}^{-1}$, 71,3 % do PP do RS), evitando a perda de 16,3% da produtividade, em relação as lavouras que realizam < 3 controles de plantas daninhas durante o ciclo de cultivo (Figura 14).

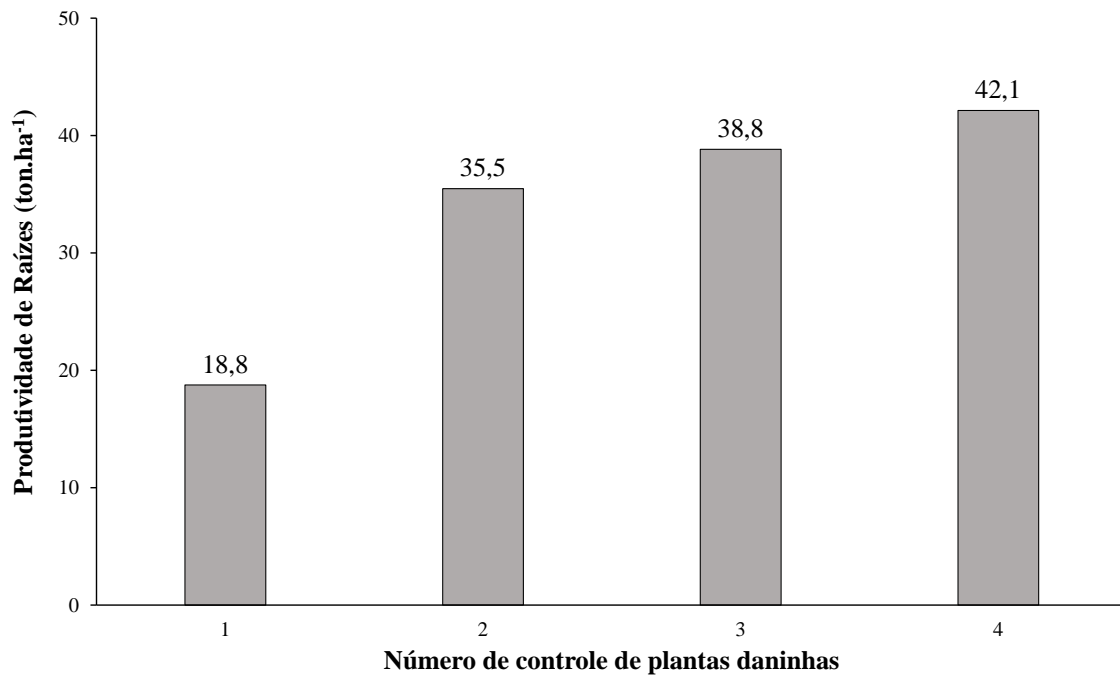


Figura 14: Produtividade de raízes de mandioca (ton.ha⁻¹) em relação ao número de controle de plantas daninhas dos 106 questionários realizados nas lavouras de mandioca da região central do Rio Grande do Sul, durante os dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019).

O controle de plantas daninhas é considerado um fator muito importante para a construção de altas produtividades, pois as perdas de produtividade devido a competição por plantas daninhas podem chegar a 90-95% (ALBUQUERQUE et al., 2008; BIFFE et al., 2010; SILVA et al., 2012). Fermont et al., (2009) aprontaram que o número de controle de plantas daninhas, na África Oriental é um fator causador da lacuna, com redução do potencial de produtividade de 5 a 11,6 ton.ha⁻¹, dependendo da região, e relatou aumento na produtividade com 6 controles de plantas daninhas, já na República Democrática do Congo, Kintchéa et al. (2017) apresentou ganhos em produtividade com apenas 2-3 controles de plantas daninhas, o que confirma os resultados encontrados nesse estudo. Portanto as lavouras da região central do estado que estão realizando menos que três controles de plantas daninhas, estão perdendo 6,6 ton.ha⁻¹ (16,3%).

As áreas de produção de mandioca que utilizam DP ≥ 10.000 pl.ha⁻¹ e plantam antes do dia 18/09 apresentam níveis de produtividade baixos, (28,0 ton.ha⁻¹), equivalente as lavouras que apresentam baixa população de plantas (10.000 pl.ha⁻¹). No Rio Grande do Sul, o fenômeno ENOS apresenta forte influência, afetando principalmente a precipitação pluvial e a temperatura (BERLATO; FONTANA, 2003). Portanto em plantio realizado no início do período

recomendado pelo ZARC, que visam alcançar altas produtividades, o preparo do solo é uma prática de manejo muito importante (uso de drenos e/ou camalhões), pois nessa época a temperatura do solo é baixa e ocorre altos índices pluviométricos. Cera & Ferraz (2015) confirmam um maior número de eventos de precipitação ocorridos nos meses de setembro, outubro e novembro, corroborando com Brito et al., (2006), que traz que os maiores índices de precipitação na região central ocorrem no inverno, somado ao mês de setembro. Os plantios realizados nestas condições ambientais ficam suscetíveis a ocorrência de excesso hídrico e favorecem a infecção de doenças nas raízes (TIRONI et al., 2019), podendo resultar em morte de plantas e consequentemente baixas densidade de plantas na lavoura (baixas produtividades). Já as lavouras que obtiveram as menores produtividade ($27,5 \text{ ton.ha}^{-1}$) foram aquelas que apresentam a menor população de plantas ($DP < 10.000 \text{ pl.ha}^{-1}$) (Figura 11), tais níveis de densidade favorecem o aumento de raízes comerciais, ou seja, maior peso de raízes por planta (AGUIAR et al. 2011; STRECK et al., 2014).

4.4 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE MANDIOCA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Através deste estudo é possível inferir que o Rio Grande do Sul apresenta uma grande lacuna de manejo a ser explorada ($39,8 \text{ ton.ha}^{-1}$ ou 71%). Para Van Ittersum; Rabbinge (1997) quando a produtividade de uma cultura alcança valores aproximado a 80% do potencial de produtividade, é onde o valor de máxima eficiência econômica. Na figura 15 é destacado a lacuna de produtividade explorável do Rio Grande do Sul, observa-se que para alcançar os 80% do PP é necessário aumentar a PM dos atuais $17,3 \text{ ton.ha}^{-1}$ para $43,9 \text{ ton.ha}^{-1}$, com este incremento em produtividade, o potencial de produção de mandioca do Rio Grande do Sul será equivalente a 154%, passando das atuais 1.091.161 toneladas para 2.773.550 de toneladas de raízes de mandioca.

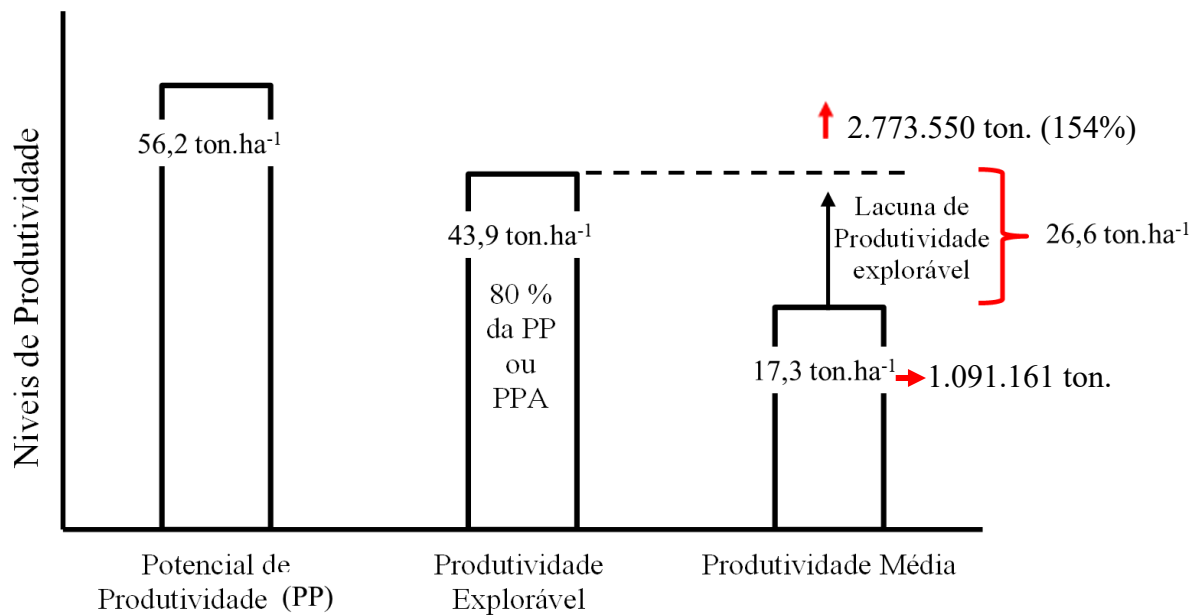


Figura 15: Produtividade de raízes de mandioca (ton.ha⁻¹) em relação ao número de controle de plantas daninhas dos 106 questionários realizados nas lavouras de mandioca da região central do Rio Grande do Sul, durante os dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019).

5. CONCLUSÃO

Frente aos atuais índices de produtividade do estado do Rio Grande do Sul este estudo permitiu melhor compreender os fatores que contribuem para a redução da produtividade de mandioca, pois isso irá auxiliar técnicos e agricultores na tomada de decisão quanto à escolha do manejo mais favorável para no futuro buscar intensificação sustentável das lavouras de mandioca na agricultura familiar. Os principais resultados deste estudo foram:

O potencial de produtividade variou de 51,9 a 61,7 ton.ha⁻¹ entre as *Buffers Zones*, apresentando pequena variação para o potencial de produtividade limitado por água (50,5 a 60,2 ton.ha⁻¹), e o PPMédio para o Rio Grande do Sul foi 56,2 ton.ha⁻¹ e o PPA médio 54,9 ton.ha⁻¹;

As lacunas de produtividade potencial (%*Buffers Zones* LPP) variaram entre 66 a 78% do PP (35,6 a 45,1 ton.ha⁻¹) nas diferentes *Buffers Zones*. Onde para o Rio Grande do Sul a contribuição da lacuna de produtividade potencial de água (%LPPA) foi 1,3 ton.ha⁻¹ (3%) e a contribuição causada pela lacuna de produtividade de manejo (%LPM) foi de 39,8 ton.ha⁻¹ (71%), para o Rio Grande do Sul.

A região central do estado apresentou uma PMP (questionários) de 34,4 ton.ha⁻¹, resultando na menor lacuna de produtividade de manejo (LPM_{PMP}), 19,8 ton.ha⁻¹ (57,2%).

A densidade de plantas foi o principal fator causador da lacuna de manejo na região central do Rio Grande do Sul, somado a época de plantio e número de controle de plantas daninhas.

Através deste estudo ficou claro que existe uma grande lacuna de manejo a ser explorada, isto possibilita aos técnicos, produtores e pesquisadores somarem esforços para fomentar a cadeia produtiva da mandioca (produção, industrialização e comercialização) em regiões onde existe alto potencial de produtividade e área para produção, buscando eficiência da produção de mandioca, somado o aumento da sustentabilidade da agricultura familiar.

As recomendações para futuras pesquisas são aumentar a área de aplicação de questionários para as demais regiões do Rio Grande do Sul, possibilitando assim identificar quais os fatores que estão causando a %LPM estimada neste estudo.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, E. B. et al. **Efeito da densidade populacional e época de colheita na produção de raízes de mandioca de mesa.** *Bragantia*, Campinas, v. 70, n. 3, p.561-569, 2011.
- ALBUQUERQUE, J.A.A.; SEDIYAMA, T.; SILVA, A.A.; CARNEIRO, J.E.S.; CECON, P.R. & ALVES, J.M.A. **Interferência de plantas daninhas sobre a produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*).** *Planta Daninha*, vol. 26, n. 2, p. 279-289, 2008.
- ALVES, A. A. C. **Cassava botany and physiology.** In: Hillocks, R. J.; Thresh, J. M.; Bellotti, A. C. *Cassava: Biology, production and utilization.* Oxon: CABI Publishing, p.67-89, 2002.
- ALVES, A. A. C. **Fisiologia da mandioca.** In: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. **Aspectos socioeconômicos da mandioca.** Cruz das Almas, BA; EMBRAPA, Cap.7, p. 138-169, 2006.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña: Impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura.** Porto Alegre: Ed. Da UFRGS, 110p. 2003.
- BEZERRA, F., P., A. **Declínio da produção de mandioca: os impactos econômicos no município de Santa Izabel, estado do Pará.** *Agroecossistemas*, v. 6, n. 1, p. 17-41, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/agroecossistemas/article/download/1480/2290>.
- BIFFE, D.F.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA JÚNIOR, R.S., FRANCHINI, L.H.N.; RIOS, F.A.; BLAINSKI, E.; ARANTES, J.G.Z.; ALONSO, D.G. & CAVALIERI, S.D. **Período de interferência de plantas daninhas em mandioca (*Manihot esculenta*) no Noroeste do Paraná.** *Planta Daninha*, vol. 28, n. 3, p. 471-478, 2010).
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J., OLSHEN, R., STONE, C., 1984. **Classification and Regression Trees.** WADSWORTH, BELMONT, CA. CLARK, L.A., PREGIBON, D., 1992. **TREE- BASED MODELS.** IN: CHAMBERS, J.M., HASTIE, T.J. (Eds.), *Statistical Models in S.* Wadsworth.
- BRITTO, F. P.; BARLETTA, R.; MENDONÇA M. **Regionalização sazonal e mensal da precipitação pluvial máxima no estado do Rio Grande do Sul.** *Revista Brasileira de Climatologia*, Vol. 2, p. 35-51.
- BRUINSMA, J. **The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050?** In: *FAO expert meeting on how to feed the world in 2050*, Rome. *Proceedings...* Rome: FAO. 2009.
- CARVALHO, J. E.; FUKUDA, W.M. G. **Estrutura da planta e morfologia.** *Aspectos socioeconômicos e agrônômicos da mandioca.* Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, p. 126-137, 2006.

CERA, J. C.; FERRAZ, S. E. T. **Variações climáticas na precipitação no sul do Brasil no clima presente e futuro.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 30, p. 81-88, 2015.

COCK, J. H. et al. **The ideal cassava plant for maximum yield.** Crop Science, v19. p.271-279, 1979.

EL-SHARKAWY, M. A. **Cassava biology and physiology.** Plant Molecular Biology, n.56, p.481-501, 2004.

EL-SHARKAWY, M. A. **Stress-tolerant cassava: the role of integrative ecophysiology-breeding research in crop improvement.** Open Journal of Soil Science, v. 2, n. 02, p. 162, 2012.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo.** 2ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.

EVANS, L.T. Crop Evolution, Adaptation, and Yield. **Cambridge University Press, Cambridge, UK,** p.283-291,1993.

FAGUNDES, L. K. et al. **Desenvolvimento vegetativo em diferentes hastes da planta de mandioca em função da época de plantio.** Ciência Rural, v.39, n.3, p.657-663, 2009.

FAGUNDES, L.K.; STRECK, N.A.; ROSA, H.T.; WALER, L.C.; ZANON, A.J.; LOPES, S.J. **Desenvolvimento, crescimento e produtividade de mandioca em diferentes datas de plantio em região subtropical.** Ciência Rural, v.40, p.2460-2466, 2010.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2013). Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/save-and-grow/cassava/pt/index.html>>. Acesso em 07 de Janeiro FAde 2020.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT Statistical Database, Statistical Division.** (2020). <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/>>. Acesso em 05 de janeiro de 2020.

FERMONT, A.M.; VAN ASTEN, P.J.A.; TITTONELL, P.; VAN WIJK, M.T.; GILLER, K.E. **Closing the cassava yield gap: an analysis from small holder farms in East Africa.** Field Crops Research, v.112, p. 24–36, 2009.

FRANCISCO, P. R. N. et al. **Aptidão climática da mandioca (*manihot esculenta crantz*) para o estado da Paraíba.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v.11, nº.4, Fortaleza, p. 1651 - 1661, 2017.

FRENCH, R. J.; SCHULTZ, J. E. **Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate.** Australian Journal of Agricultural Research, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 743–764, 1984.

GABRIEL, L. F.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; SILVA, M.R.; SILVA, S. D. **Mudança climática e seus efeitos na cultura da mandioca.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online), v. 18, p. 90-98, 2014.

GLOBAL YIELD GAP ATLAS, 2016. **Global Yield Gap and Water Productivity Atlas.** Disponível em: <http://www.yieldgap.org/>. Acesso: 01 de Janeiro de 2020.

GRASSINI, P. et al. **High yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II. Irrigation management and crop water productivity.** Field Crops Research. v.120, p.133–144. 2011.

GRASSINI, P.; TORRION, J.A.; CASSMAN, K.G.; YANG, H.S.; SPECHT, J.E. **Drivers of spatial and temporal variation in soybean yield and irrigation requirements.** Field Crops Research, v. 163, p. 32–46, 2014.

GRASSINI, P.; TORRION, J.A.; YANG, H.S.; REES, J.; ANDERSEN, D.; CASSMAN, K.G.; SPECHT, J.E. **Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt.** Field Crops Research, v.179, p.150-163, 2015.

HIJMANS, RJ, CAMERON, SE, PARRA, JL, JONES, PG E JARVIS, A. **Superfícies climáticas interpoladas de alta resolução para áreas terrestres globais.** International Journal of Climatology, 25 , 1965-1978, 2005.

IBGE [Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística]. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola.** Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>>. Acesso em 03 de Janeiro de 2020.

KINTCHÉ, K. et al., **Cassava yield loss in farmer fields was mainly caused by low soil fertility and suboptimal management practices in two provinces of the Democratic Republic of Congo.** European Journal of Agronomy, v.89, p. 107-123, 2017.

LAGO, I.; STRECK, N.A.; BISOGNIN, D.A.; SOUZA, A.T.; SILVA, M.R. **Transpiração e crescimento foliar de plantas de mandioca em resposta ao déficit hídrico no solo.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.46, p.1415-1423, 2011.

LICKER, R., JOHNSTON, M., FOLEY, J.A., BARFORD, C., KUCHARIK, C.J., MONFREDA, C. & RAMANKUTTY, N. **Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the ‘yield gap’ of croplands around the world?** Global Ecology and Biogeography, 19, 769-782, 2010.

LOBELL, D.B.; CASSMAN, K.G.; FIELD C.B. **Crop yield gaps: their importance, magnitudes and causes.** Review of Environment and Resources, v. 34, p. 179-204, 2009.

MALUF, J.R.T.; MATZENAUER, R.; MALUF, D.E. **Zoneamento Agroclimático da Mandioca no Estado do Rio Grande do Sul – Uma alternativa para a produção de etanol.** Boletim Fepagro. Fepagro, Porto Alegre, n. 22p. 60, 2011

MAPA. Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura da mandioca no Estado do Rio Grande do Sul, **Portaria nº 130**, de 28 de abril de 2011. Online. MAPA - Ministério da

Agricultura, Pecuária e Abastecimento. p.10, 2011. Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=1886957506>>. Acesso em: 22 de junho de 2019.

MARCON, E. C.; ROMIO, S. C.; MACCARI, V. M.; KLEIN, C.; LÁJUS, C. R. **Uso de diferentes fontes de nitrogênio na cultura da soja.** Revista Them, v. 14, n. 2, p. 298-308, 2017.

MUNYAHALI, W. et al. **Responses of cassava growth and yield to leaf harvesting frequency and NPK fertilizer in South Kivu, Democratic Republic of Congo.** Field Crops Research, v.214, p. 194-201, 2017.

NEW, M., LISTER, D., HULME, M. & MAKIN, I. **A high-resolution data set of surface climate over global land areas.** Climate Research, 21, 1-25, 2002.

NTAWURUHUNGA, P., SSEMAKULA, G., OJULONG, H., BUA, A., RAGAMA, P., KANOBE, C., WHYTE, J. **Evaluation of advanced cassava genotypes in Uganda.** Crop Science. J. 14, 15–27, 2006.

OBIERO, H. M. **Multiplicação acelerada da mandioca e distribuição de materiais de plantio no oeste do Quênia. Em: Programa de Emergência para Combater o Pandemia do Mosaico da Mandioca na África Oriental e Central.** Procedimentos do Quinta Reunião Regional de Partes Interessadas, Bukoba, Tanzânia, 10-12, pp. 15-23. 2004.

SAMBORANHA, F. K. et al. **Mathematical modeling of leaf development in the cassava.** Revista Ciência Agronômica, v. 44, n. 4, p. 815-824, 2013.

SCHWENGBER, D. R. **Mandioca: recomendações para plantio em Roraima.** Embrapa Roraima, Boa Vista, Roraima. 30 pp. (Circular técnica, 5),2005.

SCHONS, A. **Emissão de folhas e início de acumulação de amido em raízes de uma variedade de mandioca em função da época de plantio.** Ciência Rural, v.37, n.6, p.1586-1592, 2007.

SCHONS, A. et al. **Arranjos de plantas de mandioca e milho em cultivo solteiro e consorciado: crescimento, desenvolvimento e produtividade.** Bragantia, v. 68, n. 1, p. 165-177, 2009.

SÉIBOU, T. M. S. et al. **Cassava roots: perspectives of a traditional staple for bio-solvents production.** Czech Journal of Food Sciences, v.33, n. 2, p. 186-194, 2015.

SILVA, D.V.; SANTOS, J.B.; FERREIRA, E.A.; SILVA, A.A.; FRANÇA, A.C. & SEDIYAMA, T. **Manejo de plantas daninhas na cultura da mandioca.** Planta Daninha, vol. 30, n. 4, p. 901-910, 2012.

SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A. F. **Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar.** Revista Biociência, v.7, n.1, p.7-14, 2001.

- STRECK, N. A.; PAULA, G. M.; CAMERA, C.; MENEZES, N. L.; LAGO, I. Estimativa do plastocrono em cultivares de soja. **Bragantia**, v.67, n.1, p.67-73, 2008.
- STRECK, N. A.; WEISS, A.; XUE, Q.; BAENZIGER, S. **Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model.** *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 115, p. 139-150, 2003b.
- STRECK, N. A.; WEISS, A.; XUE, Q.; BAENZIGER, S. **Incorporating a chronology response into prediction of leaf appearance rate in winter wheat.** *Annals of Botany*, v. 92, p. 181-190, 2003a.
- STRECK, N.A. et al. Efeito do espaçamento de plantio no crescimento, desenvolvimento e produtividade da mandioca em ambiente subtropical. *Bragantia*, v. 73, p.407-415, 2014.
- STRECK, N.A. et al. SimulArroz: um aplicativo para estimar a produtividade de arroz no Rio Grande do Sul. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO**. v. 8, p. 1618-1627, 2013.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre:Artemed, 2017.
- THERNEAU, T.M., ATKINSON, E.J. An Introduction to Recursive Partitioning Using the RPART Routine. Technical Report 61, Mayo Clinic, Section of Statistics, 1997.
- TRABUCCO, A., ZOMER, R.J., BOSSIO, D.A., VAN STRAATEN, O. & VERCHOT, L.V. **Climate change mitigation through afforestation/reforestation: A global analysis of hydrologic impacts with four case studies.** *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 126, 81-97, 2008.
- TIRONI, L. F. et al. Desempenho de cultivares de mandioca em ambiente subtropical. **Bragantia**, v.74, n. 1, p.58-66, 2015.
- TIRONI, L. F. et al. SIMANIHOT: um modelo baseado em processos para simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade da mandioca. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 3, p.471-482, 2017.
- TIRONI, LUANA F.; FREITAS, C. P. O.; ALVES, A. F.; ZANON, A. J.; SANTOS, A. T. L.; CARDOZO, P. S; TONEL, G. P.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, M. N; STRECK, NEREU A. **Ecofisiologia da Mandioca Visando Altas Produtividades**. 1. ed. Santa Maria: GR, 2019. v. 1. 136p.
- VAN ITTERSUM A, M.K.; CASSMAN, K.G.; GRASSINI, P.; WOLF J.; TITTONELL; P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance - A review. **Field Crops Research**, v.143, p.4-17, 2013.
- VAN ITTERSUM, M.K. & RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, v. 52, p. 197-208, 1997.

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

VENABLES, W.N., RIPLEY, B.D. *Modern Applied Statistics With S*, fourth edition. Springer-Verlag, Fourth edition, Springer, New York, 2002.

VISSES, F. 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*, p. 1191-1202. 2018.

ZOMER, R.J., TRABUCCO, A., BOSSIO, D.A. & VERCHOT, L.V. **Climate change mitigation: A spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation.** *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 126, 67-80, 2008.