

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

Gean Leonardo Richter

**POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM SOJA NO BRASIL:  
UMA ANÁLISE PELA METODOLOGIA DO “GLOBAL YIELD GAP  
ATLAS”**

Santa Maria, RS  
2021

**Gean Leonardo Richter**

**Potencial e lacunas de produtividade em soja no Brasil: uma análise pela metodologia do “Global Yield Gap Atlas”**

Tese 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 Doutor em Agronomia.

Orientador: PhD. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS  
2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Richter, Gean Leonardo  
POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE EM SOJA NO  
BRASIL: UMA ANÁLISE PELA METODOLOGIA DO "GLOBAL YIELD GAP  
ATLAS" / Gean Leonardo Richter.- 2021.  
60 p.; 30 cm

Orientador: Nereu Augusto Streck  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Agronomia, RS, 2021

1. Glicine max 2. Macrorregiões sojícolas 3. Época de  
semeadura 4. Aumento populacional 5. Sustentabilidade I.  
Streck, Nereu Augusto II. Título.

sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFPA. dados fornecidos pelo autor(s), sob supervisão da direção da divisão de processos técnicos da biblioteca central. bibliotecária responsável paula schoenfeldt vatta cma 10/1728.

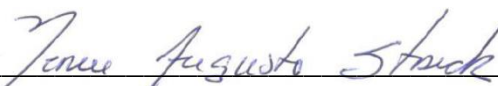
Declaro, GEAN LEONARDO RICHTER, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Gean Leonardo Richter**


**Potencial e lacunas de produtividade em soja no Brasil: uma análise pela metodologia do “Global Yield Gap Atlas”**

Tese 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 Doutor em Agronomia.

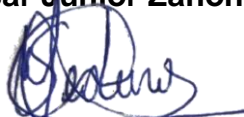
**Aprovado em 30 de agosto de 2021:**



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



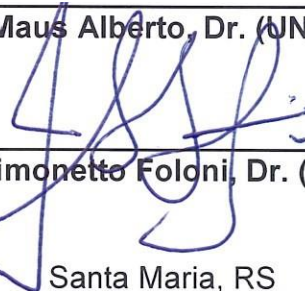
**Alencar Junior Zanon, Dr. (UFSM)**



**Sandro Luis Petter Medeiros, Dr. (UFSM)**



**Cleber Maus Alberto, Dr. (UNIPAMPA)**



**Jose Salvador Simonetto FOLONI, Dr. (EMBRAPA SOJA)**

Santa Maria, RS

2021

## DEDICATÓRIA

*A minha família, pela educação, incentivo, compreensão e apoio durante esse período.*

*A minha namorada, pelo incentivo, ajuda, compreensão e principalmente por estar ao meu lado me apoiando.*

*Aos professores Nereu Augusto Streck e Alencar Junior Zanon e toda a equipe FieldCrops pelo auxílio na elaboração do trabalho e pelo suporte durante essa jornada.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me guiar e proteger.

A minha família, em especial aos meus pais Claudemir e Elaine Richter pela educação, apoio, carinho e compreensão.

A minha namorada, Karen Vasconcelos de Campos, pelo incentivo, ajuda, carinho, compreensão e principalmente por estar sempre ao meu lado nessa jornada.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela oportunidade de realizar esse estudo.

Aos professores Nereu Augusto Streck e Alencar Junior Zanon pela orientação e ensinamentos.

Aos meus colegas e amigos da equipe FieldCrops pelo auxílio na elaboração do trabalho, pela condução dos experimentos e análises dos dados.

À CAPES pelo auxílio financeiro através de bolsa de mestrado.

Agradeço os projetos da Fapergs (Nº 17/2551-0000775-1) e Fapesp (Nº 17/20925-0) que financiaram a pesquisa bem como custos de viagens.

A todas as pessoas que não foram mencionadas, e merecem crédito.

*“A persistência é o menor caminho do êxito”.*  
*(Charles Chaplin)*

## RESUMO

### Potencial e lacunas de produtividade em soja no Brasil: uma análise pela metodologia do “Global Yield Gap Atlas”

AUTOR: Gean Leonardo Richter  
ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

Em 2050 a população mundial vai chegar próximo a 10 bilhões de habitantes. E o Brasil tem grande importância devido à produção de alimentos, principalmente com a cultura da soja, onde se encontra como o maior produtor mundial. E para isso, o potencial de produtividade é utilizado para tomada de decisões sobre políticas agrícolas, devido à crescente demanda de alimentos e de energia em muitos países. O objetivo foi de estimar o potencial e a lacuna de produtividade em soja no Brasil. E definir a perda de produtividade pelo atraso da época de semeadura para todo o Brasil. A seleção de fontes de dados e o controle de qualidade são baseados nas diretrizes fornecidas nos protocolos Global Yield Gap Atlas, utilizando modelos calibrados e os melhores dados disponíveis de área de soja colhida, dados meteorológicos, produtividades reais dos agricultores e uma estrutura espacial para os locais específicos (níveis regional e nacional). Concluímos que o Potencial de Produtividade varia de 5,7 a 7,5 Mg ha<sup>-1</sup>, e a média é de 6,7 Mg ha<sup>-1</sup>. O Potencial de Produtividade limitado por Água varia de 3,1 a 6,9 Mgha<sup>-1</sup> e a média é de 5,5 Mg ha<sup>-1</sup> e a produtividade atual está em 3,0 Mg ha<sup>-1</sup> para o Brasil. A Lacuna de produtividade (LP) varia de 2,7 a 4,6 Mg ha<sup>-1</sup>, e a média é de 3,7 Mg ha<sup>-1</sup>. Dividindo a LP em Lacuna de Manejo (LM) e Lacuna de Água (LA) obtemos valores de 2,5 Mg ha<sup>-1</sup> e de 1,2 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, para todo o Brasil. Por fim, nas 5 macrorregiões sojícolas é possível identificar a perda de produtividade com o atraso na época de semeadura para todo o Brasil.

**Palavras-chave:** *Glicine max.* Macrorregiões sojícolas. Época de semeadura. Aumento populacional. Sustentabilidade.



## ABSTRACT

### **Soybean yield potential and gaps in Brazil: an analysis by the methodology of the “Global Yield Gap Atlas”**

AUTHOR: Gean Leonardo Richter

ADVISOR: Nereu Augusto Streck

In 2050 the world population will reach close to 10 billion inhabitants. And Brazil is of great importance due to the production of food, especially with the soybean, where it is the largest producer in the world. And for that, the yield potential is used to make decisions about agricultural policies, due to the growing demand for food and energy in many countries. The objective was to estimate the yield potential and gap in soybean in Brazil. And define the loss of yield due to the delay in the sowing date for all of Brazil. Selection of data sources and quality control are based on guidelines provided in the Global Yield Gap Atlas protocols, using calibrated models and the best available data on harvested soybean area, meteorological data, actual farmer yields and a spatial framework for the specific locations (regional and national levels). We conclude that the yield potential ranges from 5.7 to 7.5 Mg ha<sup>-1</sup>, and the average is 6.7 Mg ha<sup>-1</sup>. The water limited yield potential ranges from 3.1 to 6.9 Mg ha<sup>-1</sup> and the average is 5.5 Mg ha<sup>-1</sup> and the actual yield is 3.0 Mg ha<sup>-1</sup> for Brazil. The yield gap ranges from 2.7 to 4.6 Mg ha<sup>-1</sup>, and the average is 3.7 Mg ha<sup>-1</sup>. Dividing the yield gap into management gap and water gap we obtain values of 2.5 Mg ha<sup>-1</sup> and 1.2 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively, for all of Brazil. Finally, in the 5 soybean macroregions it is possible to identify the yield lost with the delay in the sowing date for all of Brazil.

**Keywords:** *Glicine max*. Soybean macroregions. Sowing date. Population increase. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – HISTÓRICO E ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DA POPULAÇÃO MUNDIAL. FONTE: UNITED NATIONS, DESA, POPULATION DIVISION, WORLD POPULATION PROSPECT 2019. <a href="http://population.un.org/wpp/">HTTP://POPULATION.UN.ORG/WPP/</a> .....	16
FIGURA 2 – ONDE A ÁREA AGRÍCOLA ESTÁ SE EXPANDINDO NO MUNDO E O DESMATAMENTO DE FLORESTAS NATIVAS DECORRENTE DESSA EXPANSÃO QUE VEM OCORRENDO. FONTE: PATRICIO GRASSINI (UNL).....	17
FIGURA 3 – ÁREA DE PRODUÇÃO EM MILHÕES DE HA (A) E PRODUTIVIDADE EM MG HA <sup>-1</sup> (B) DE 1980 A 2019, E A RESPECTIVA LOCALIZAÇÃO DOS BIOMAS (C) DA AMAZÔNIA, CERRADO, MATA ATLÂNTICA E PAMPA NO BRASIL. ....	18
FIGURA 4 – PROTOCOLO DESENVOLVIDO PELO GLOBAL YIELD GAP ATLAS PARA ESTIMAR O POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE (PP), O POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA (PPA) E A LACUNA PRODUTIVIDADE (LP). A DESCRIÇÃO DETALHADA DA METODOLOGIA GYGA PODE SER ENCONTRADA EM GRASSINI ET AL. (2015) E VAN BUSSEL ET AL. (2015). ....	19
FIGURA 5 – EXEMPLIFICAÇÃO DAS ZONAS CLIMÁTICAS PARA O BRASIL, QUE FORAM AGRUPADAS COM BASE NO CLIMA SEGUINDO A METODOLOGIA PROPOSTA POR VAN WART ET AL. (2013). LEGENDA: AS CORES REPRESENTAM AS DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS. ....	21
FIGURA 6 – EXEMPLIFICAÇÃO DO MAPA DE COLHEITA DE SOJA PARA O BRASIL ( <a href="http://mapspam.info/">HTTP://MAPSPAM.INFO/</a> ). ....	22
FIGURA 7 – EXEMPLIFICAÇÃO DOS SOLOS DO BRASIL, DADOS FORAM RETIRADOS DO PROJETO RADAMBRASIL (COOPER ET AL., 2005). LEGENDA: AS DIFERENTES CORES REPRESENTAM OS MAIS DIVERSOS TIPOS DE SOLOS DO BRASIL. ....	24
FIGURA 8 – FIGURA TEÓRICA DA DEFINIÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE (PP), POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA (PPA), PRODUTIVIDADE ATUAL (PA), LACUNA DE PRODUTIVIDADE (LP), LACUNA DE MANEJO (LM) E LACUNA DE ÁGUA (LA).....	26
FIGURA 9 – ZONAS HOMOGÊNEA REPRESENTATIVAS DA ÁREA DE COLHEITA DE SOJA NO BRASIL, JÁ DELIMITADAS PELAS ZONAS CLIMÁTICAS E PELOS SOLOS REPRESENTATIVOS DE CADA LOCAL. ....	32
FIGURA 10 – COMPARAÇÃO DOS DADOS OBSERVADOS E SIMULADOS DE FENOLOGIA (A) E DA PRODUTIVIDADE (B) DA SOJA. AS LINHAS SOLIDAS REPRESENTAM $Y = X$ , E AS LINHAS PONTILHADAS $Y = X \pm 20\%$ . RQME = RAIZ DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO. ....	37
FIGURA 11 – EXEMPLOS DA METODOLOGIA PARA ENCONTRAR O POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE, A DATA DE INÍCIO DA PERDA DE PRODUTIVIDADE E A MAGNITUDE DA PERDA DE PRODUTIVIDADE COM O ATRASO DA SEMEADURA. ....	39
FIGURA 12 – POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE (PP), POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA (PPA) E PRODUTIVIDADE ATUAL (PA) NOS DIFERENTES LOCAIS DO BRASIL. MÉDIAS DE 20 ANOS SIMULADOS PARA O PP E PPA E 5 ANOS DE DADOS OBSERVADOS PARA A PA. ....	41
FIGURA 13 – RELAÇÃO ENTRE O PP E A LATITUDE (A), O Q E A LATITUDE (B), O PP E O Q (C) PARA OS 32 LOCAIS DO BRASIL. CRUZ ALTA (VERMELHA) E BAIXA GRANDE DO RIBEIRO (AZUL) COMO OS EXTREMOS DE POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE. ....	42
FIGURA 14 – RELAÇÃO ENTRE O PPA E A LATITUDE (A), A PRECIPITAÇÃO E A LATITUDE (B), O PPA E A PRECIPITAÇÃO (C) PARA OS 32 LOCAIS DO BRASIL. SÃO LUIZ GONZAGA (VERMELHO), CRUZ ALTA (AMARELA), IRAÍ (VERDE) E BAIXA GRANDE DO RIBEIRO (AZUL) REPRESENTADOS NO MAPA COMO LOCAIS COM DEFICIÊNCIA HÍDRICA OU COM PEQUENA LA. ....	44
FIGURA 15 – POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE (PP), POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA (PPA), PRODUTIVIDADE ATUAL (PA), LACUNA DE MANEJO (LM) E LACUNA DE ÁGUA (LA) PARA A CULTURA DA SOJA NO BRASIL. ....	45

FIGURA 16 – LACUNA DE PRODUTIVIDADE (LP) REPRESENTADAS PELO TAMANHO DOS DIAGRAMAS E A DIVISÃO EM LACUNA DE MANEJO (LM) (VERDE) E LACUNA DE ÁGUA (LA) (AZUL) EXPRESSAS EM PORCENTAGEM DA LP. ....	46
FIGURA 17 – MACRORREGIÕES SOJÍCOLAS E SUAS RESPECTIVAS REGIÕES EDAFOCLIMÁTICAS.....	48
FIGURA 18 – POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE (PP), POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA (PPA), PRODUTIVIDADE ATUAL (PA), LACUNA DE MANEJO (LM) E LACUNA DE ÁGUA (LA) PARA AS 5 MACRORREGIÕES SOJÍCOLAS. ....	49
FIGURA 19 – RELAÇÃO ENTRE PP E A DATA DE SEMEADURA, BEM COMO O INÍCIO DA PERDA DE PRODUTIVIDADE E SUA GRANDEZA EM 5 REGIÕES DO BRASIL DEFINIDAS PELA LATITUDE. ....	51

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MUNICÍPIOS, ESTADO, LATITUDE, LONGITUDE E ALTITUDE DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS SELECIONADAS. ....	31
TABELA 2 – TIPOS DE SOLO SELECIONADOS E SUA CONTRIBUIÇÃO EM PORCENTAGEM DE CADA ZONA HOMOGÊNEA, DADOS FORAM RETIRADOS DO PROJETO RADAMBRASIL (COOPER ET AL., 2005). ....	33
TABELA 3 – MANEJO (DATA DE SEMEADURA, GMR, POPULAÇÃO DE PLANTAS (HA)) UTILIZADO NO MODELO REPRESENTANDO DE CADA ZONA HOMOGÊNEA COMO ENTRADA NO MODELO PARA REALIZAR AS SIMULAÇÕES. ....	35
TABELA 4 – CLASSIFICAÇÃO DOS LOCAIS NAS 5 MACRORREGIÕES SOJÍCOLAS. ....	38
TABELA A – POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE (PP), POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA (PPA), PRODUTIVIDADE ATUAL (PA), LACUNA DE PRODUTIVIDADE (LP), LACUNA DE MANEJO (LM), LACUNA DE ÁGUA (LA) E PORCENTAGEM DA LM E LA EM RELAÇÃO A LP PARA A CULTURA DA SOJA NO BRASIL. ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PP	Potencial de Produtividade
PPA	Potencial de Produtividade limitado por Água
PA	Produtividade Atual
LP	Lacuna de Produtividade
LA	Lacuna de Água
LM	Lacuna de Manejo
GMR	Grupo de Maturidade Relativo
Q	Coeficiente Fototérmico

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	16
<b>2.1 A IMPORTÂNCIA DA CULTURA DA SOJA</b> .....	16
<b>2.2 METODOLOGIA UTILIZADA PELO “GLOBAL YIELD GAP ATLAS”</b> .....	19
<b>2.2.1 Seleção das fontes de dados</b> .....	19
<b>2.2.2 A utilização dos modelos no potencial de produtividade</b> .....	25
<b>2.3 CONCEITO DE POTENCIAIS E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE</b> .....	25
<b>2.4 POTENCIAIS E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NO BRASIL</b> .....	27
<b>2.5 MANEJO QUE MAIS IMPACTA NA PRODUTIVIDADE</b> .....	28
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	30
<b>3.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO</b> .....	36
<b>3.2 ÉPOCAS DE SEMEADURA</b> .....	37
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	40
<b>4.1 POTENCIAIS DE PRODUTIVIDADE</b> .....	40
<b>4.2 LACUNAS DE PRODUTIVIDADE</b> .....	44
<b>4.3 LACUNAS DA ÉPOCA DE SEMEADURA</b> .....	50
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	52
<b>ANEXOS</b> .....	53
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	54

## 1. INTRODUÇÃO

Estimativas indicam que em 2050 a população mundial vai alcançar aproximadamente 10 bilhões de habitantes e para isso precisamos aumentar a produção de alimentos. Neste contexto, o Brasil tem grande importância devido à produção de alimentos, principalmente com a cultura da soja, onde se encontra como o maior produtor mundial (FAOSTAT, 2021). Contudo a produtividade média se encontra próxima a  $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  (CONAB, 2021) valor bastante inferior a estimativa do potencial de produtividade (PP) de 5,6 a  $11,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  (BATTISTI et al., 2018; SENTELHAS et al., 2015) para o Brasil.

Porém, os trabalhos de Battisti et al. (2018) e Sentelhas et al. (2015) utilizam: uma baixa quantidade de estações meteorológicas (apenas 17 locais em todo território nacional), um modelo agrometeorológico simplificado da FAO (que não representa os processos das plantas), dados das áreas de competição de produção de soja no Brasil (CESB) (os quais não representam a realidade das lavouras brasileiras), e uma faixa de grupo de maturidade relativo (GMR) entre 6 e 7 (que representa uma pequena porção das cultivares usadas no Brasil).

A estimativa do PP requer uma metodologia robusta e uma seleção de fontes de dados e controle de qualidade muito precisas, sendo que este trabalho utiliza as diretrizes fornecidas nos protocolos Global Yield Gap Atlas (GYGA - [www.yieldgap.org](http://www.yieldgap.org)) (GRASSINI et al., 2014; VAN BUSSEL et al., 2015; VAN WART et al., 2013), as quais já foram aplicadas em mais de 15 culturas e 50 países (DE GROOT et al., 2017; MARIN et al., 2015; ARAMBURU MERLOS et al., 2015; WOLF, et al., 2015). A metodologia vem sendo utilizada para tomada de decisões sobre políticas agrícolas devido à crescente demanda de alimentos e de energia ante o aumento populacional e de renda em muitos países (DENG et al., 2019; CASSMAN e GRASSINI, 2020; FERMONT et al., 2009; GRASSINI et al., 2015).

As recomendações para calcular o PP são de modelos de simulação das culturas baseados em processos ecofisiológicos utilizando variáveis meteorológicas diárias, condições de solo e atributos ecofisiológicos, para assim ter amplitude para simular práticas de manejo (data de semeadura, densidade de plantas e grupo de maturação de cultivares específicas) (VAN ITTERSUM et al., 2013). A metodologia padrão usa o

modelo CROPGRO–Soybean (BOOTE et al., 1998) da plataforma DSSAT (HOOGENBOOM et al., 2004) para estimar o PP para a cultura da soja.

Nesse contexto, foi realizado um trabalho em conjunto com a equipe do Global Yield Gap Atlas (<http://www.yieldgap.org/>), com o objetivo de estimar o potencial e a lacuna de produtividade em soja utilizando a metodologia GYGA e definir a perda de produtividade pelo atraso da época de semeadura para todo o Brasil.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 A IMPORTÂNCIA DA CULTURA DA SOJA

Estima-se que em 2050, a população mundial chegará próximo a marca de 10 bilhões de pessoas (Figura 1). Com isso, é preciso aumentar a produção de alimentos em 50 a 70% para conseguir alimentar a todos devido à crescente demanda de alimentos, energia e de renda em muitos países, os quais estão substituindo o carboidrato por proteína (carne) (FERMONT et al., 2009; GRASSINI et al., 2015; VAN ITTERSUM et al., 2016). Contudo, existem dois meios de aumentar a produção: expandir a área ou aumentar a produtividade.

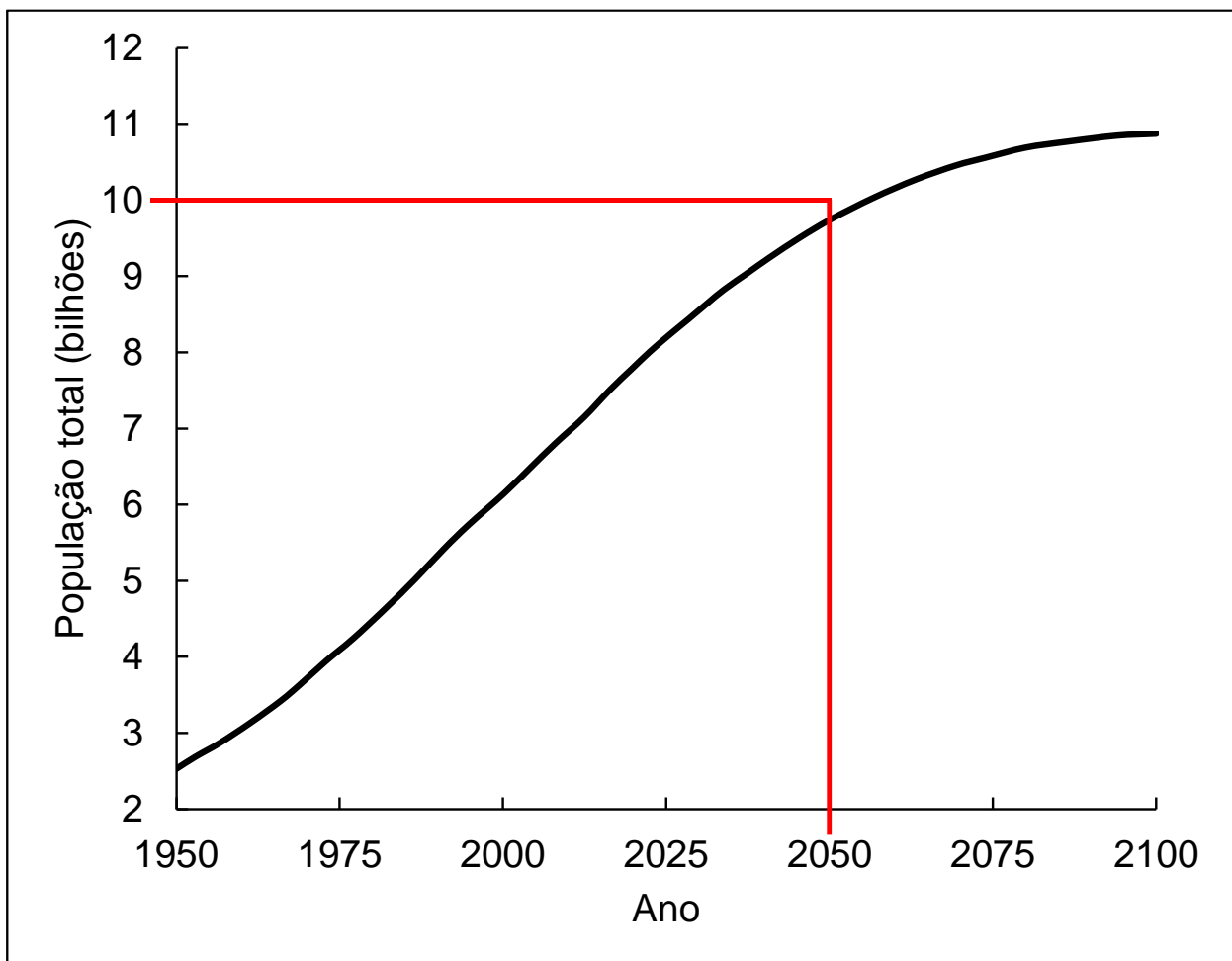


Figura 1 – Histórico e estimativa do crescimento da população mundial. Fonte: United Nations, DESA, Population Division, World Population Prospect 2019. <http://population.un.org/wpp/>.

Ao expandir de área agrícola tem-se uma alternativa para o aumento da produção de alimentos, entretanto, a adoção dessa medida gera grande impacto ambiental e a migração para locais com menor aptidão ao cultivo, e maior risco climático ou então em áreas florestais (FAO e DWFI, 2015), como representado na Figura 2 os principais locais que se pode expandir em área e suas consequências. Outra alternativa seria aumentar a produtividade, pela redução da lacuna de produtividade, através da intensificação da área agricultável atual, aumentar a produtividade, com eficiência no uso de recursos e reduzindo o impacto ambiental (FAO e DWFI, 2015).

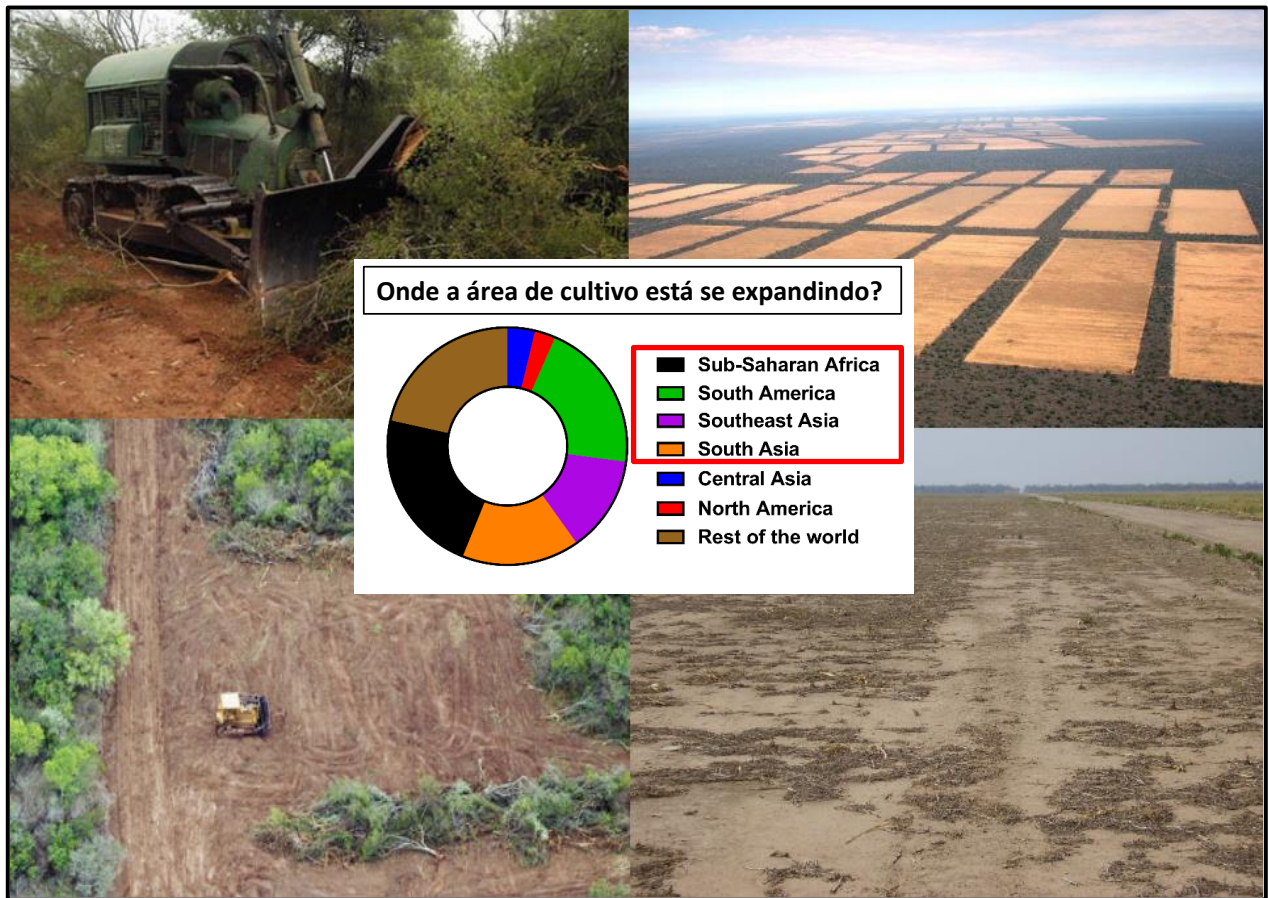


Figura 2 – Onde a área agrícola está se expandindo no mundo e o desmatamento de florestas nativas decorrente dessa expansão que vem ocorrendo. Fonte: Patricio Grassini (UNL).

A cultura da soja tem grande importância no cenário mundial, como principal oleaginosa cultivada, representando 56% da produção total de sementes oleaginosas no mundo (FAOSTAT, 2019). É considerada uma cultura chave na segurança alimentar global, pois é importante fonte para a alimentação animal devido ao elevado teor de

proteína em seus grãos (cerca de 40%) (CAFARO LA MENZA et al., 2017). Devido à crescente demanda mundial de alimentos e de energia, bem como, o aumento de renda em muitos países, a busca por alimentos ricos em proteína torna a soja uma das mais importantes commodities (FERMONT et al., 2009; GRASSINI et al., 2015).

O Brasil está em destaque entre os maiores produtores mundiais de soja (*Glycine max L.*), em que ocupa a posição de primeiro lugar com uma produção de 136 milhões de toneladas em 38 milhões de hectares (CONAB, 2021). Na figura 3 observa-se um incremento de área e produtividade nos diferentes biomas, sendo que a partir dos anos 2000 ocorreu um aumento na expansão das áreas, principalmente com o aumento da soja no bioma amazônico. A produtividade tem um incremento com o passar dos anos devido ao melhoramento e novas tecnologias, porém, quanto mais ao sul do país, maior é a variação da produtividade devido ao déficit hídrico.

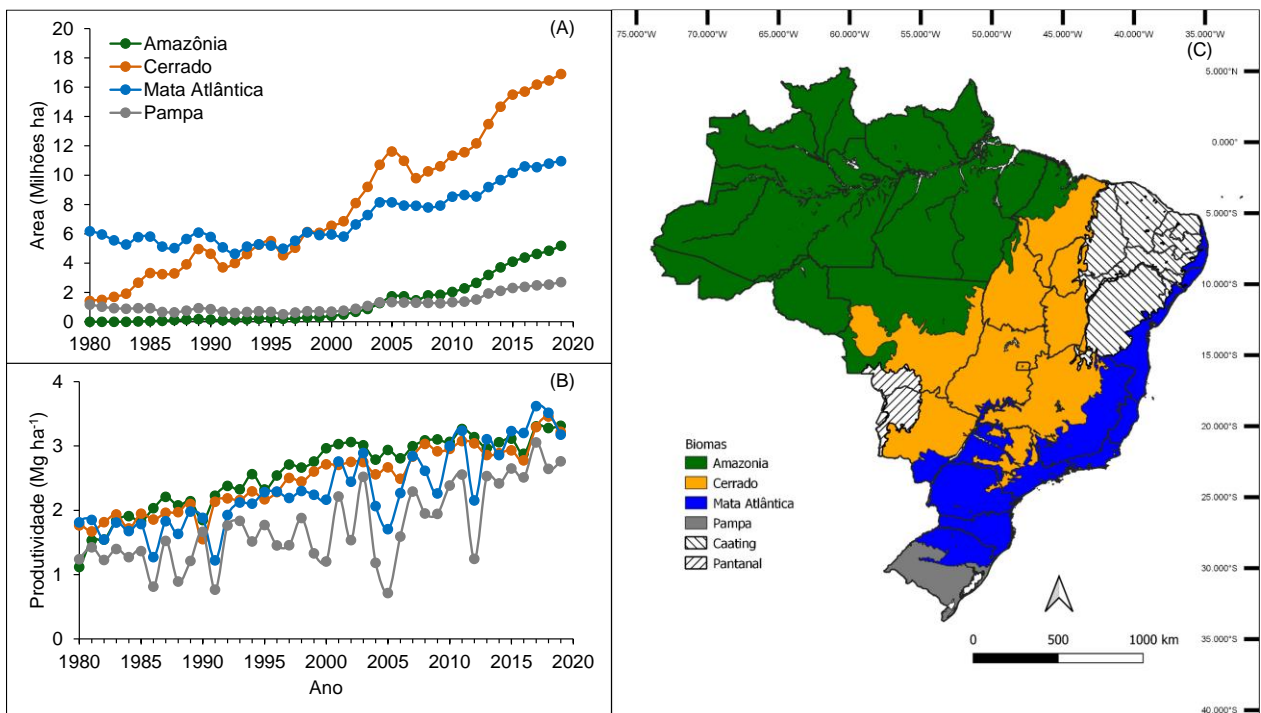


Figura 3 – Área de produção em milhões de ha (A) e produtividade em Mg ha<sup>-1</sup> (B) de 1980 a 2019, e a respectiva localização dos biomas (C) da Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica e Pampa no Brasil.

O incremento da produtividade vem reduzindo com o passar dos anos. De acordo com Ray et al., (2013) precisamos de um incremento anual maior de 1,3 % em produtividade até 2050 para alimentar a população na área de produção atual.

## 2.2 METODOLOGIA UTILIZADA PELO “GLOBAL YIELD GAP ATLAS”

### 2.2.1 Seleção das fontes de dados

A seleção de fontes de dados e o controle de qualidade baseado nas diretrizes fornecidas nos protocolos GYGA (GRASSINI et al., 2014; VAN BUSSEL et al., 2015; VAN WART et al., 2013) que utiliza modelos calibrados e os melhores dados disponíveis de área de soja colhida, dados meteorológicos, produtividades reais dos agricultores e uma estrutura espacial para os locais específicos (níveis regional e nacional) (Figura 4).

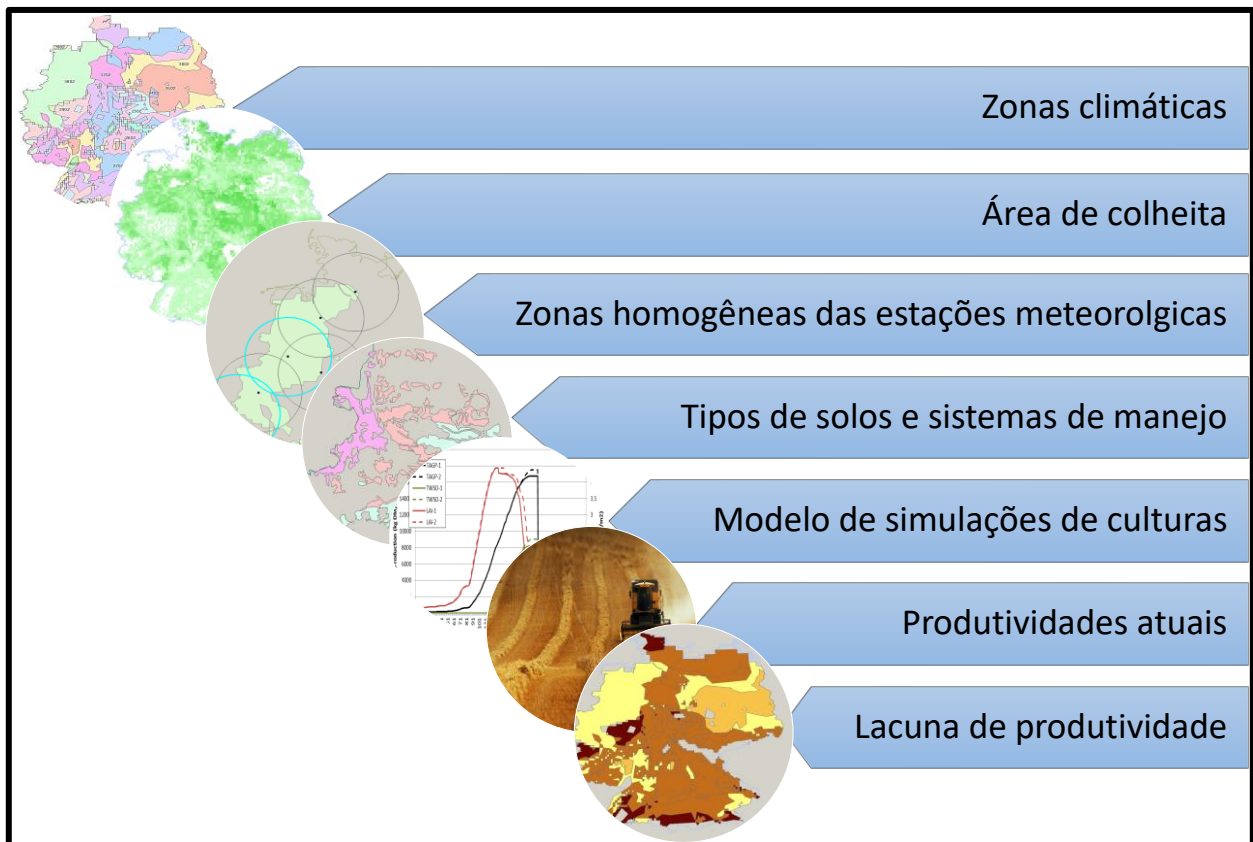


Figura 4 – Protocolo desenvolvido pelo Global Yield Gap Atlas para estimar o potencial de produtividade (PP), o potencial de produtividade limitado por água (PPA) e a lacuna de produtividade (LP). A descrição detalhada da metodologia GYGA pode ser encontrada em Grassini et al. (2015) e Van Bussel et al. (2015).

As regiões produtoras são 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 Gap Atlas (<http://www.yieldgap.org>). Essa classificação em zonas climáticas leva em consideração três variáveis agroclimáticas que governam a produção das culturas, sendo elas: (i) total anual de acúmulo de graus dias, (ii) índice de aridez anual e (iii) sazonalidade de temperatura (Figura 5).

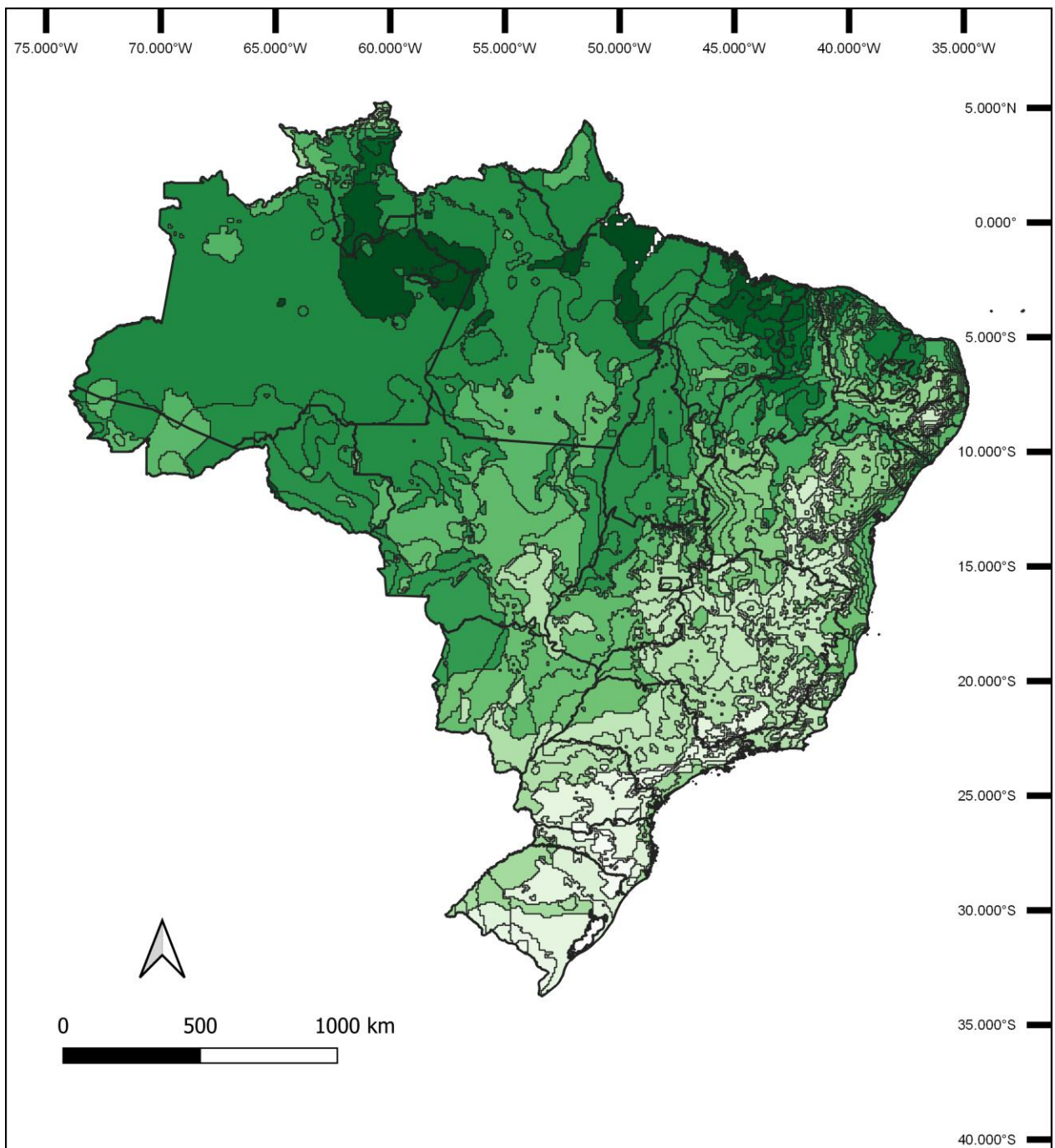


Figura 5 – Exemplificação das zonas climáticas para o Brasil, que foram agrupadas com base no clima seguindo a metodologia proposta por Van Wart et al. (2013). Legenda: As cores representam as diferentes zonas climáticas.

A distribuição geoespacial da área colhida da cultura é recuperada do banco de dados SPAM (You et al., 2006, 2009). O SPAM fornece dados em grade (resolução aproximadamente 10 x 10 km) na área colhida em torno do ano 2000 (<http://mapspam.info/>) (Figura 6).

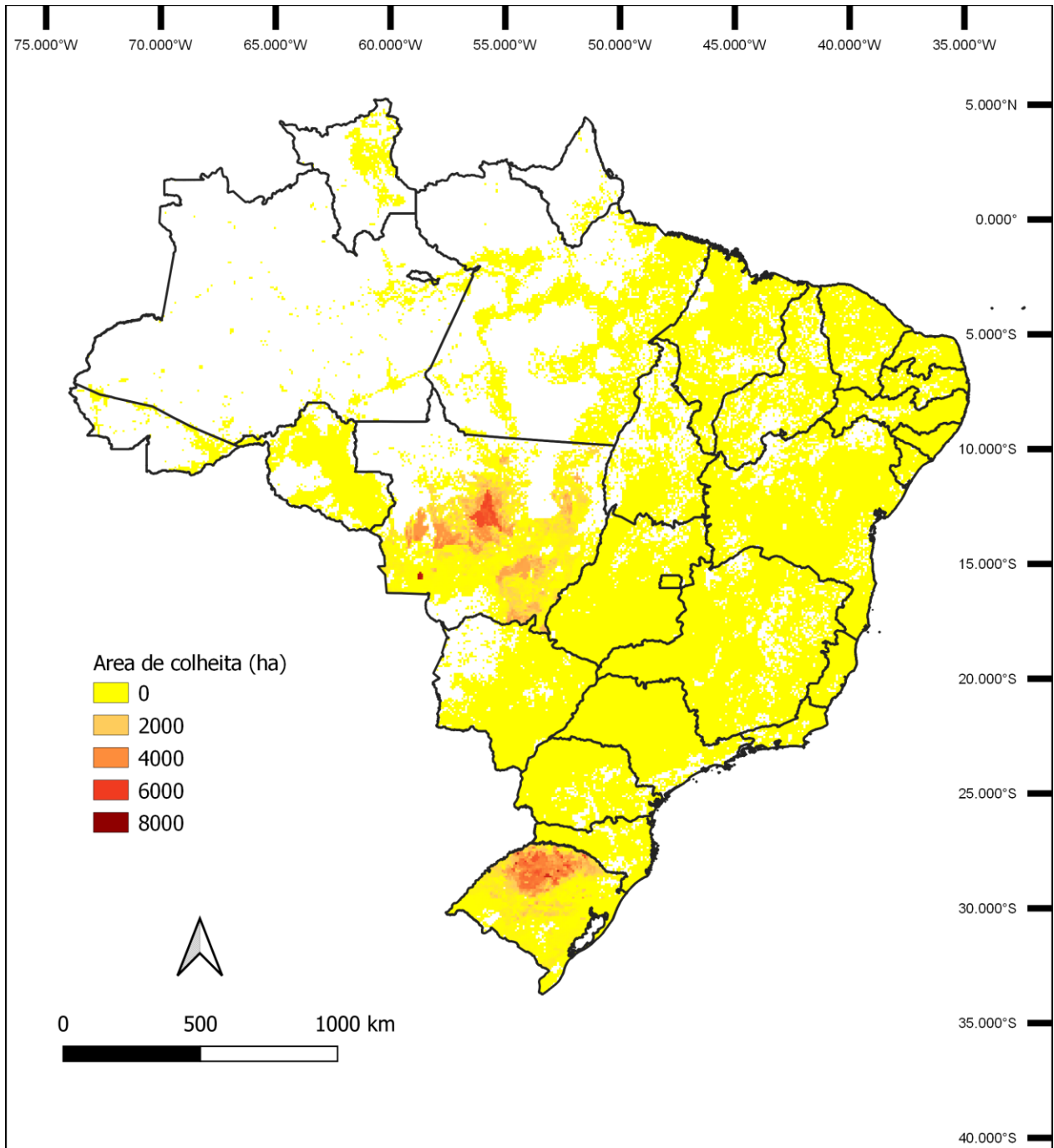


Figura 6 – Exemplificação do mapa de colheita de soja para o Brasil (<http://mapspam.info/>).

As estações meteorológicas com dados disponíveis de um período de 20 anos são selecionadas para criar as zonas homogêneas, numa área de 100 km de diâmetro ao redor da estação, sendo delimitadas pelas zonas climáticas. Segundo Grassini et al.,

2015 um número de 20 anos é considerado suficiente para uma estimativa robusta do PPA.

Após definidos as zonas homogêneas, é necessário identificar às propriedades hidráulicas do solo que governam as características de retenção de água disponível para as plantas e às propriedades da paisagem e do solo que influenciam a taxa de infiltração e escoamento. Para isso precisa-se determinar as unidades de solo dominantes e derivar os parâmetros exigidos pelos modelos de simulação de cultura para simular o PPA. As principais questões discutidas neste protocolo são: as fontes de dados do solo e os procedimentos para derivar as unidades de solo dominantes e os parâmetros do solo. Os solos são selecionados de acordo com a proporção em cada zona homogênea, bem como sua utilização para o cultivo (RATALINO EDREIRA et al., 2017). Os dados de solo para o Brasil têm como exemplo o Projeto Radambrasil (COOPER et al., 2005) (Figura 7).



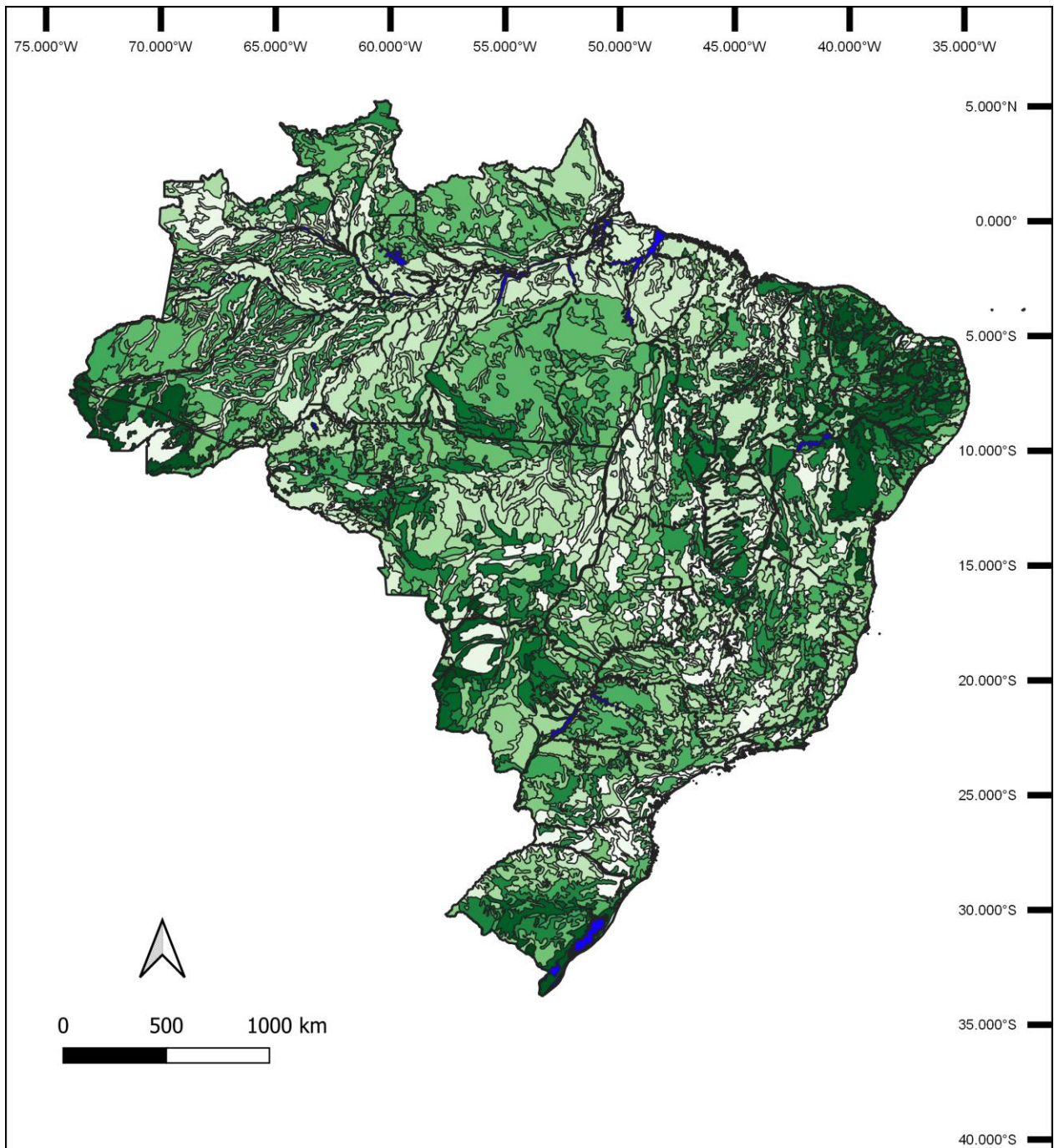


Figura 7 – Exemplificação dos solos do Brasil, dados foram retirados do Projeto RadamBrasil (COOPER et al., 2005). Legenda: As diferentes cores representam os mais diversos tipos de solos do Brasil.

A metodologia para determinar o PP e o PPA é baseada nas épocas de semeadura ideais, na densidade de plantio e nas cultivares recomendadas para determinada região (GRASSINI et al., 2011). Em condições em que a realidade da maior parte dos produtores compreende alguma exceção às condições ideais de manejo e data

de semeadura, devem-se levar em consideração essas modificações para a determinação dos potenciais de produtividade. (VAN ITTERSUM et al., 2013).

### **2.2.2 A utilização dos modelos no potencial de produtividade**

O modelo CSM-CROPGRO-Soybean é um modelo ecofisiológico dinâmico baseado em processos, sendo desenvolvido para simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade de soja no intervalo de tempo de um dia. O modelo permite a simulação dos principais processos ecofisiológicos da cultura, tais como fotossíntese, respiração, acúmulo e partição da biomassa, fenologia, índice de área foliar, extração de água do solo, evapotranspiração e produtividade da soja. Este modelo consegue captar as características de cultivar, condições do solo, do clima e diferentes métodos de manejo (BOOTE et al., 2002; JONES et al., 2003).

O CSM-CROPGRO-Soybean trata-se do modelo de soja mais usado ao redor do mundo, o qual está inserido na plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) que agrupa diversos modelos de diversas culturas, tendo vários programas na plataforma que auxiliam na utilização, bem como programas para confecção de dados meteorológicos, calibração de coeficientes genéticos, entre outros (HOOGENBOOM et al., 2004).

## **2.3 CONCEITO DE POTENCIAIS E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE**

O potencial de produtividade (PP) pode ser definido como a produtividade de uma cultura que cresce sem limitações de água e nutrientes, livre de estresses bióticos (doenças, pragas e plantas daninhas), ou seja, a taxa de crescimento da planta ou da cultura é determinada pela radiação solar interceptada pelo dossel, temperatura, CO<sub>2</sub> atmosférico e características genéticas (EVANS, 1993; VAN ITTERSUM e RABBINGE, 1997) (Figura 8). O potencial de produtividade limitado por água (PPA) é semelhante ao PP, com a diferença de que, além dos fatores que determinam o PP, o PPA é limitado pela quantidade e distribuição de água e pelas características do solo e do terreno, os quais impactam na capacidade de armazenamento de água no solo para a cultura (VAN

ITTERSUM et al., 2013; FAO e DWFI, 2015) (Figura 8). A produtividade atual (PA) é determinada em cada região pelas práticas de manejo (época de semeadura, grupo de maturidade, densidade de planta, adubação e manejo fitossanitário) (Figura 8). A produtividade atual deve ser representativa de determinado local pelo mínimo de número de anos para sua estimativa compreender a variabilidade anual produtividade (VAN ITTERSUM et al., 2013).

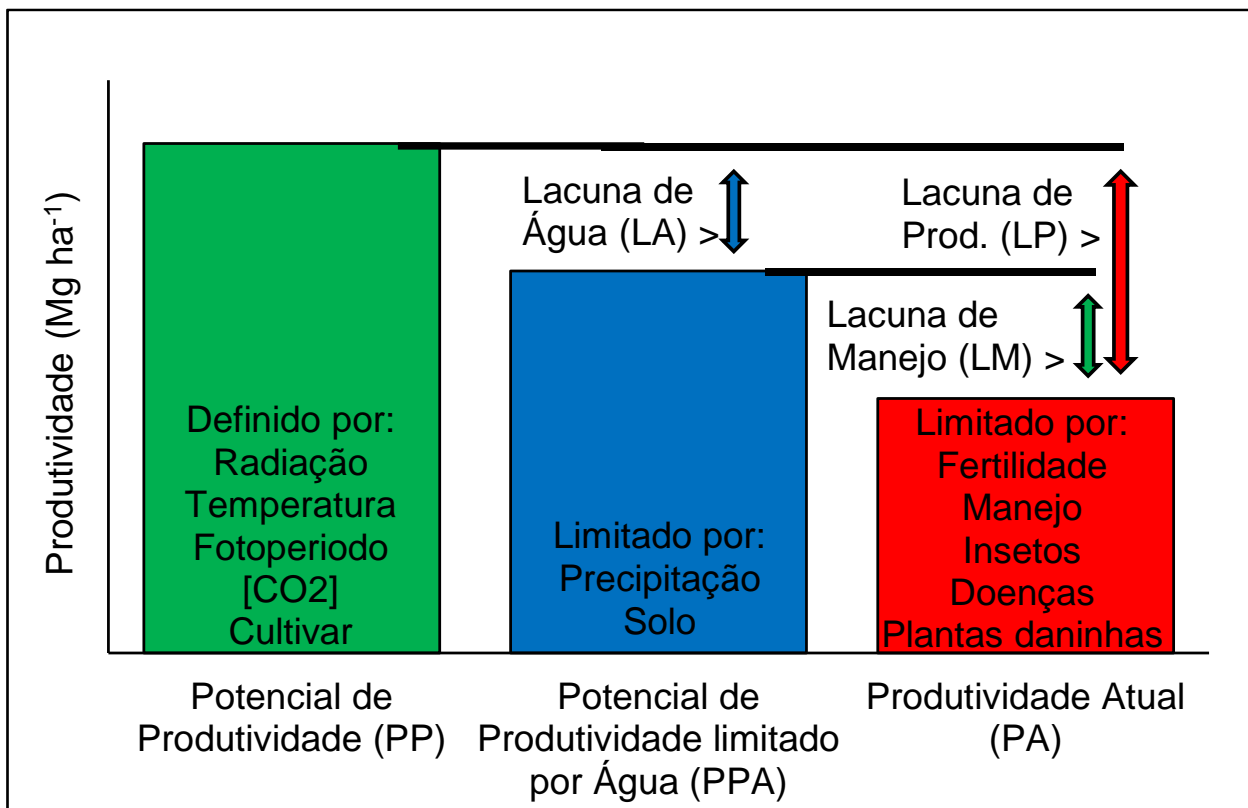


Figura 8 – Figura teórica da definição do Potencial de Produtividade (PP), Potencial de Produtividade limitado por Água (PPA), Produtividade Atual (PA), Lacuna de Produtividade (LP), Lacuna de Manejo (LM) e Lacuna de Água (LA).

O PP pode ser determinado através dos seguintes métodos: O primeiro é utilizando modelos matemáticos baseados em processos ecofisiológicos que descrevam a produtividade em função das condições meteorológicas, eles devem ser previamente testados para determinada região de estudo. Outra maneira de determinar o PP é através de dados de experimentos de campo ou lavouras comerciais com aplicações de questionários, neste caso deve ser levado em consideração o tercil superior das

produtividades para a estimativa (GRASSINI et al., 2015. LOBBEL et al., 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013;).

É importante conhecer o PP e o PPA para as diferentes regiões climáticas e características de solos, pois possibilita aos produtores o planejamento mais eficiente de suas lavouras, podendo assim o investimento de recursos ser ajustado para atingir produtividades próximas de 80% sobre o PP (para áreas irrigadas) ou sobre o PPA (para áreas de sequeiro), maximizando a eficiência do uso de recursos e o lucro do produtor, aumentando a sustentabilidade do sistema produtivo (VAN ITTERSUM e RABBINGE, 1997). Para se ter uma ideia do potencial de crescimento da produção da soja no Brasil, apenas 11% de 200 áreas avaliadas (safras 2014/15 a 2016/17) no desafio de máxima produtividade, do Comitê Estratégico Soja Brasil, apresentaram produtividade acima de 80% de PPA (BATTISTI et al., 2018).

A razão ou diferença entre a PA, obtida em lavouras comerciais, e a PP ou a PPA é um robusto método para identificar a eficiência produtiva (LOBELL, et al., 2009). Como o modelo CROPGRO–Soybean considera o balanço hídrico da cultura para descrever o crescimento e desenvolvimento em função da disponibilidade hídrica no solo é possível estimar a PPA e a lacuna de produtividade (LP). Dividindo a LP em duas lacunas: A lacuna de água (LA) e a lacuna de manejo (LM). A primeira é obtida pelo PP subtraído pelo PPA, em que ocorre somente a deficiência hídrica. Por outro lado, a segunda é obtida pelo PPA subtraído de PA, sendo que dentro dela se encontram as perdas pelo manejo, isto é, época de semeadura, cultivar, adubação, perdas por doenças, pragas e plantas daninhas e outros.

## **2.4 POTENCIAIS E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE NO BRASIL**

No Brasil estudos sobre lacunas de produtividade foram realizados para as culturas da cana-de-açúcar, milho, (MONTEIRO; SENDELHAS, 2014) arroz e soja (BATTISTI et al., 2018; SENDELHAS et al., 2015; TAGLIAPIETRA et al., 2021).

No trabalho realizado por Sentelhas et al. (2015), o número de locais amostrados no Brasil é baixo (apenas 17 locais em todo território nacional) seria necessário que 50% da área de colheita esteja dentro dos locais amostrados, foi utilizado um modelo

agrometeorológico simples da FAO que não leva em conta os processos ecofisiológicos realizados pelas plantas e para uma faixa de grupo de maturação relativo (GMR) entre 6 e 7, porém no Brasil são cultivados GMR de 4.5 até 9. E o trabalho de Battisti et al. (2018) utilizou dados das áreas de competição de produção de soja no Brasil (CESB), as quais não representam a realidade das lavouras brasileiras.

De acordo com Sentelhas et al. (2015) o PP é de 5,6 Mg ha<sup>-1</sup>. Porém Tagliapietra et al. (2021) utilizando a metodologia do GYGA no Rio Grande do Sul, mostra que o PP está subestimado, e encontrou o valor de 6,6 Mg ha<sup>-1</sup>. Essa subestimativa remete a uma grande lacuna de produtividade, a qual pode ser reduzida com manejo, tendo como exemplo 1,0 Mg ha<sup>-1</sup> numa área de 6 milhões de hectares no RS que representa 6 milhões de toneladas de grãos.

## 2.5 MANEJO QUE MAIS IMPACTA NA PRODUTIVIDADE

Desenvolvimento e crescimento vegetal são processos distintos, mas relacionados entre si, podendo ocorrer ao mesmo tempo ou não. O desenvolvimento pode ser quantificado pelo número de partes de uma planta, como por exemplo, o número de folhas, o número de nós e o número de ramificações durante o desenvolvimento vegetativo, e pelo surgimento de órgãos como flores, legumes e grãos durante o desenvolvimento reprodutivo (FEHR; CAVINESS, 1977). Crescimento pode ser definido de diversas maneiras, sendo frequentemente definido como o aumento irreversível em alguma dimensão física de alguma parte ou de toda a planta, e pode ser quantificado através do comprimento, largura, altura, massa, volume ou diâmetro de órgãos (McMASTER, 1997).

O sistema de descrição dos estágios de desenvolvimento da cultura da soja mais utilizado a nível mundial é a escala proposta por Fehr e Caviness (1977). Os estágios vegetativos (V1 a Vn) são determinados pela contagem do número de nós, iniciando pelo par de folhas unifoliadas (V1). Os estágios reprodutivos são representados pela letra R. No estágio R1 (início do florescimento) ocorre o aparecimento da primeira flor aberta na haste principal. O R2 (florescimento pleno) é a presença de uma flor aberta em um dos dois últimos nós da haste principal. Os estágios R3 (início de formação do legume), R4

(legumes completamente desenvolvidos), R5 (início do enchimento de grão) e R6 (legume cheio) são determinados nos últimos quatro nós da haste principal. A maturação fisiológica é o R7 (um legume na cor madura) e ponto de colheita é o R8 (95% dos legumes na cor madura) (FARIAS et al., 2009).

A germinação-emergência, florescimento e enchimento de grãos são os períodos mais sensíveis à deficiência hídrica (FARIAS et al., 2009; MARCHEZAN, 1982), nesse sentido, a distribuição uniforme das chuvas durante as fases de maior demanda e períodos críticos à ocorrência de déficits hídricos determina o rendimento de grãos (FARIAS et al., 2009). Para altas produtividades é importante também que os estágios mais críticos coincidam com as condições de ambiente mais favoráveis, como exemplo, temperatura próxima da ótima e alta disponibilidade de radiação solar (KANTOLIC et al., 2008; MARTIGNONE et al., 2006). Nesse contexto, a época de semeadura faz com que o ciclo de cultivo se submeta a diferentes condições meteorológicas, e que ocorram melhores condições nos principais estágio de desenvolvimento da cultura. Zanon et al., (2016), Tagliapietra et al., (2019) e Tagliapietra et al., (2021) descrevem que o atraso na época de semeadura é o principal fator de perda de produtividade, devido às modificações das condições meteorológicas que a soja recebe durante o ciclo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O mapa da área de colheita (Figura 6) (<http://mapspam.info/>) foi sobreposta com as zonas climáticas (Figuras 5) (<http://www.yieldgap.org/web/guest/cz-ted>), para a identificação daquelas que apresentam participação na produção de soja maior que 5% de abrangência da área de colheita do Brasil, em que 86% da área de colheita ficaram dentro das zonas climáticas utilizadas. Aquelas que não apresentarem essa sobreposição devem ser removidas, para fins de se evitar a utilização de zonas climáticas que não tenham grande importância para a sojicultura ou que sejam de alto risco para cultivo.

Foram selecionadas as zonas homogêneas (*buffer zones*) com mais de 1% da área de colheita. Dessa forma, 22 estações meteorológicas foram selecionadas da área produtora de soja, e, outras 10 foram geradas através de dados hipotéticos da NASA-POWER (<http://power.larc.nasa.gov/>) para cobrir no mínimo 50% da área colhida necessária para se obter uma boa estimativa dos potenciais. A PA foi calculada pela série de 2012-2017 retirados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE - <https://www.ibge.gov.br/>).

Na Tabela 1 e Figura 9, as estações meteorológicas (INMET - <https://portal.inmet.gov.br/>) com dados disponíveis de um período de 20 anos foram selecionadas para criar as zonas homogêneas, numa área de 100 km de diâmetro ao redor da estação, sendo delimitadas pelas zonas climáticas. Os dados de temperatura máxima e mínima e precipitação são oriundas dos dados originais, porém a umidade relativa, evapotranspiração e temperatura do ponto de orvalho foram estimados seguindo a metodologia de Allen et al., (1998), devido às falhas e problemas com os dados meteorológicos. A radiação solar foi retirada do banco de dados da NASA-POWER, a qual demonstrou boa correlação com os dados medidos (BENDER E SENTELHAS, 2018; MONTEIRO et al., 2018; DUARTE et al., 2019). O controle de qualidade, preenchimento e correção dos dados meteorológicos foram baseados nas técnicas de propagação desenvolvida por Van Wart et al. (2015).

Tabela 1 – Municípios, estado, latitude, longitude e altitude das estações meteorológicas selecionadas.

<b>Município</b>	<b>Estado</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Altitude</b>
Baixa Grande do Ribeiro	PI	-8.3	-45.1	357
Brasilândia do Sul	PR	-24.1	-53.5	371
Campo Mourão	PR	-24.1	-52.4	561
Campo Verde	MT	-15.8	-55.4	786
Canarana	MT	-13.5	-52.3	409
Capinópolis	MG	-18.7	-49.6	594
Catalão	GO	-18.2	-48.0	860
Cruz Alta	RS	-28.6	-53.6	429
Gleba Celeste	MT	-12.2	-56.5	324
Ibirubá	RS	-28.7	-53.1	444
Iraí	RS	-27.2	-53.2	262
Irati	PR	-25.5	-50.6	815
Ivinhema	MS	-22.3	-53.8	338
Lagoa Vermelha	RS	-28.2	-51.5	769
Lucas do Rio Verde	MT	-13.4	-55.5	377
Maringá	PR	-23.4	-51.9	514
Mineiros	GO	-18.0	-52.6	721
Paracatu	MG	-17.2	-46.9	666
Pato Branco	PR	-26.3	-52.6	726
Ponta Porã	MS	-22.5	-55.5	547
Poxoréo	MT	-15.8	-54.4	334
Primavera do Leste	MT	-15.0	-54.2	738
Quedas do Iguaçu	PR	-25.5	-53.0	815
Rio Verde	GO	-17.8	-50.9	750
Santa Carmem	MT	-12.0	-55.0	360
São José do Rio Claro	MT	-13.4	-56.7	352
São Luiz Gonzaga	RS	-28.4	-55.0	196
São Pedro do Iguaçu	PR	-25.0	-53.7	296
Sapezal	MT	-13.5	-58.4	463
Taguatinga	TO	-12.4	-46.4	579
Tarumã	SP	-22.8	-50.6	401
Uberaba	MG	-19.7	-48.0	750



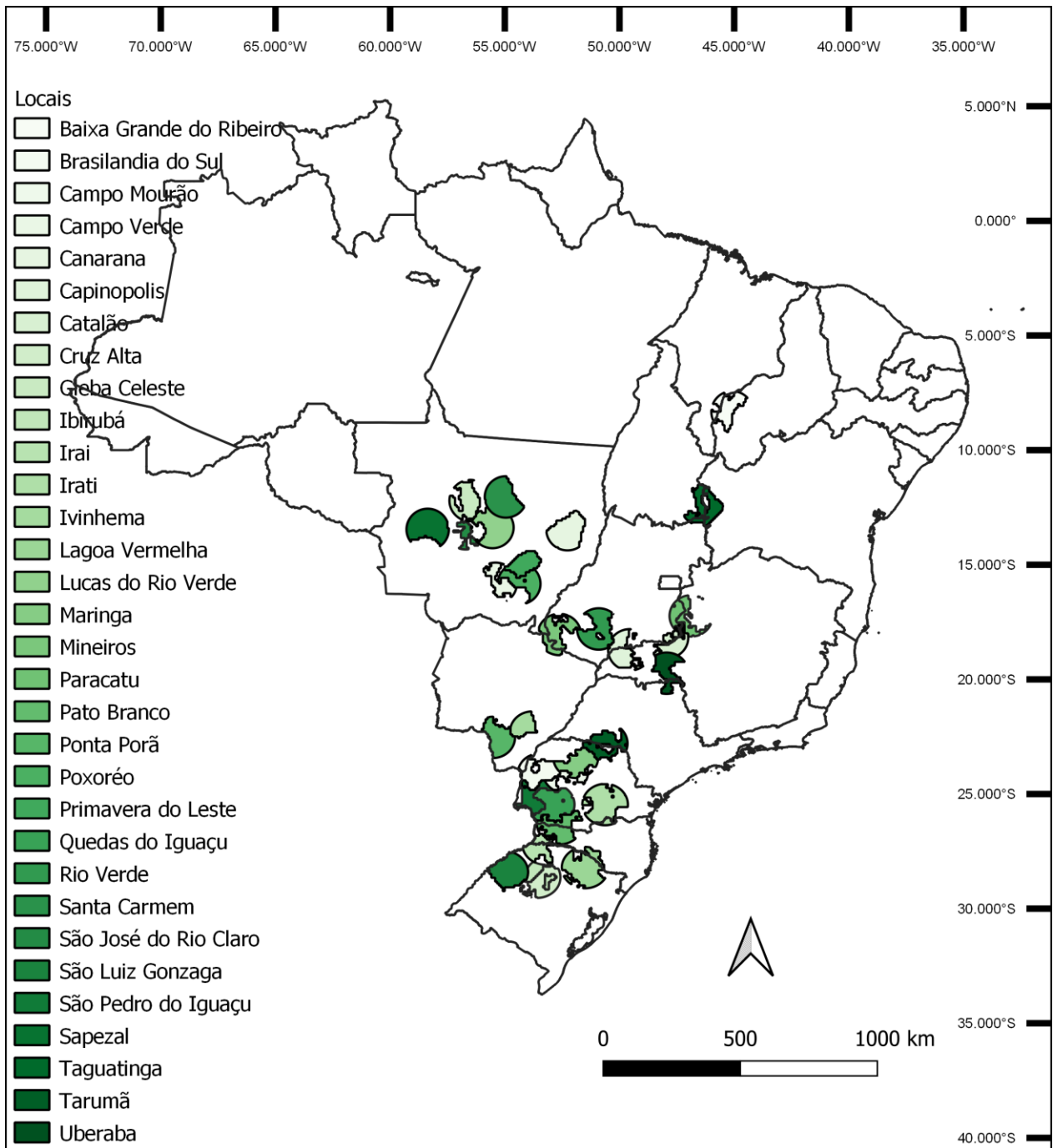


Figura 9 – Zonas homogênea representativas da área de colheita de soja no Brasil, já delimitadas pelas zonas climáticas e pelos solos representativos de cada local.

Os solos foram selecionados de acordo com a proporção em cada zona homogênea, bem como sua utilização para o cultivo (RATALINO EDREIRA et al., 2017). Os dados de solo foram retirados do Projeto Radambrasil (COOPER et al., 2005) (Figura 7), e foram selecionados os solos para cobrir no mínimo 30% da zona homogênea e

somente solos com mais de 10% de área de colheita. Os solos selecionados foram confirmados com especialistas locais e modificados quando preciso para garantir que as simulações tivessem solos representativos dos solos mais comuns no cultivo da soja em cada local (Tabela 2).

Tabela 2 – Tipos de solo selecionados e sua contribuição em porcentagem de cada zona homogênea, dados foram retirados do Projeto Radambrasil (COOPER et al., 2005).

<b>Município</b>	<b>Estado</b>	<b>Solo</b>	<b>% Solo</b>
Baixa Grande do Ribeiro	PI	Latossolo amarelo distrófico	62%
		Latossolo vermelho distrófico	20%
Brasilândia do Sul	PR	Nitossolo	12%
		Argissolo acinzentado distrófico	40%
Campo Mourão	PR	Latossolo vermelho alíco	10%
		Nitossolo	22%
		Argissolo acinzentado distrófico	20%
Campo Verde	MT	Latossolo vermelho distrófico	19%
		Argissolo vermelho-amarelo eutrófico	16%
Canarana	MT	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	44%
Capinópolis	MG	Latossolo vermelho distrófico	41%
		Latossolo vermelho alíco	18%
Catalão	GO	Latossolo vermelho distrófico	48%
Cruz Alta	RS	Latossolo vermelho alíco	24%
		Argissolo acinzentado distrófico	11%
Gleba celeste	MT	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	96%
Ibirubá	RS	Latossolo vermelho distrófico	13%
		Latossolo vermelho alíco	69%
Iraí	RS	Latossolo vermelho distrófico	15%
		Latossolo vermelho alíco	55%
Irati	PR	Latossolo amarelo distrófico	10%
		Latossolo vermelho distrófico	15%
Ivinhema	MS	Latossolo vermelho distrófico	47%
		Latossolo vermelho alíco	42%
Lagoa Vermelha	RS	Latossolo amarelo distrófico	17%
		Nitossolo	15%
Lucas do Rio Verde	MT	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	86%
		Latossolo vermelho distrófico	12%
Maringá	PR	Nitossolo	26%
		Argissolo acinzentado distrófico	29%
Mineiros	GO	Latossolo vermelho distrófico	30%
		Argissolo vermelho-amarelo distrófico	16%
Paracatu	MG	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	30%
		Latossolo vermelho distrófico	18%
Pato Branco	PR	Latossolo amarelo distrófico	12%

Continuação Tabela 2 – Tipos de solo selecionados e sua contribuição em porcentagem de cada zona homogênea, dados foram retirados do Projeto Radambrasil (COOPER et al., 2005).

<b>Município</b>	<b>Estado</b>	<b>Solo</b>	<b>% Solo</b>
Ponta Porã	MS	Latossolo vermelho alíco	73%
		Latossolo vermelho distrófico	15%
Poxoréo	MT	Latossolo vermelho distrófico	23%
		Argissolo vermelho-amarelo eutrófico	17%
Primavera do Leste	MT	Latossolo vermelho distrófico	23%
Quedas do Iguaçu	PR	Latossolo amarelo distrófico	17%
		Nitossolo	22%
Rio Verde	GO	Latossolo vermelho alíco	31%
		Latossolo vermelho distrófico	27%
Santa Carmem	MT	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	98%
São Jose do Rio Claro	MT	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	73%
São Luiz Gonzaga	RS	Latossolo vermelho alíco	63%
São Pedro do Iguaçu	PR	Latossolo vermelho alíco	13%
		Nitossolo	27%
Sapezal	MT	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	49%
		Latossolo vermelho distrófico	31%
Taguatinga	TO	Latossolo amarelo distrófico	33%
Tarumã	SP	Nitossolo	21%
		Argissolo vermelho-amarelo eutrófico	49%
Uberaba	MG	Latossolo vermelho alíco	29%
		Latossolo vermelho distrófico	25%

A profundidade dos solos utilizada foi no máximo de 80 cm, ou menos caso o tipo de solo tenha uma limitação, para refletir a limitação do crescimento radicular no horizonte devido ao menor pH ou característica de crescimento da cultura (PIVETTA et al., 2011, BATTISTI et al., 2017; FRANCHINI et al., 2017). Funções de pedotransferência calibradas para solos tropicais foram usadas para derivar os limites de água do solo (TOMASELLA et al., 2000). A capacidade de campo foi setada em -10 kPa seguindo as observações para solos tropicais de Reichardt (1998) e Tomasella e Hodnett (2004).

A metodologia para determinar o PP e o PPA é baseada nas épocas de semeadura ideais, na densidade de plantio e nas cultivares recomendadas para determinada região (GRASSINI et al., 2011). Em condições em que a realidade da maior parte dos produtores compreende alguma exceção às condições ideais de manejo e data de semeadura, devem-se levar em consideração essas modificações para a determinação dos potenciais de produtividade. (VAN ITTERSUM et al., 2013). O manejo foi pesquisado com agrônomos e especialistas em cada região, através de informações como rotação de culturas e a proporção de utilização, data de semeadura, cultivar

dominante e GMR, população de plantas. Após a reunião de todos esses dados foi realizada uma checagem dos valores recebidos (Tabela 3).

Tabela 3 – Manejo (Data de semeadura, GMR, População de plantas (ha)) utilizado no modelo representando de cada zona homogênea como entrada no modelo para realizar as simulações.

<b>Município</b>	<b>Estado</b>	<b>Data de semeadura</b>	<b>GMR</b>	<b>População de plantas</b>
Baixa Grande do Ribeiro	PI	15/out	9.0	300000
Brasilândia do Sul	PR	05/out	6.5	275000
Campo Mourão	PR	05/out	6.5	275000
Campo Verde	MT	15/out	8.0	300000
Canarana	MT	05/nov	8.0	250000
Capinópolis	MG	15/out	7.0	280000
Catalão	GO	15/out	8.0	280000
Cruz Alta	RS	10/out	6.0	300000
Gleba Celeste	MT	15/out	8.0	300000
Ibirubá	RS	15/out	5.5	250000
Iraí	RS	10/out	6.0	270000
Irati	PR	05/nov	6.0	250000
Ivinhema	MS	15/out	6.5	300000
Lagoa Vermelha	RS	01/nov	5.5	250000
Lucas do Rio Verde	MT	15/out	8.0	300000
Maringá	PR	05/out	6.5	300000
Mineiros	GO	15/out	7.0	300000
Paracatu	MG	15/out	7.0	280000
Pato Branco	PR	05/nov	6.0	250000
Ponta Porã	MS	15/out	6.5	325000
Poxoréo	MT	15/out	8.0	300000
Primavera do Leste	MT	15/out	8.0	300000
Quedas do Iguaçu	PR	05/out	6.5	275000
Rio Verde	GO	15/out	7.0	300000
Santa Carmem	MT	15/out	8.0	300000
São José do Rio Claro	MT	05/out	8.0	300000
São Luiz Gonzaga	RS	10/out	6.0	300000
São Pedro do Iguaçu	PR	05/out	6.5	275000
Sapezal	MT	15/out	8.0	300000
Taguatinga	TO	03/nov	8.0	230000
Tarumã	SP	05/out	6.5	300000
Uberaba	MG	15/out	7.0	280000

A PA foi calculada para cada zona homogênea da estação meteorológica baseada nos dados anuais de cada local. Seguindo a metodologia de Van Bussel et al.

(2015), cada combinação de tipos de solo teve contribuição relativa à sua área dentro da zona homogênea da estação meteorológica para calcular o PP e PPA. Após ter o PP, PPA e PA de cada local foram calculados os valores das LP, LM e LA para cada local.

### 3.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo CSM-CROPGRO-Soybean foi utilizado para simular o PP e o PPA, sendo que, nas simulações foram utilizados os dados de manejo representativo em cada local. Portanto, para cada zona homogênea foi selecionada uma data de semeadura, um grupo de maturidade relativa (GMR) e a população de plantas que representam a região (Tabela 3). Os coeficientes genéticos para a soja foram derivados de Mercau et al. (2007) e Monzon et al. (2007), que utilizaram experimentos bem manejados de sequeiro e irrigados na Argentina. O modelo foi validado com dados de experimentos de sequeiro e irrigados realizados com variação na data de semeadura, GMR, diferentes locais do Brasil e diferentes anos. Sendo que os dados observados eram de Santa Maria (29° 41' 02" S - 53° 48' 25" O), Cruz Alta (28° 38' 19" S - 53° 36' 23" O), Piracicaba (22° 43' 30" S - 47° 38' 56" O) e Sorriso (12° 32' 42" S - 55° 42' 39" O). A raiz do erro médio quadrático (RQME) encontrada na validação da fenologia foi de 5 dias e para a produtividade foi de 0,6 Mg ha<sup>-1</sup>, mostrando performance satisfatória (Figura 10).

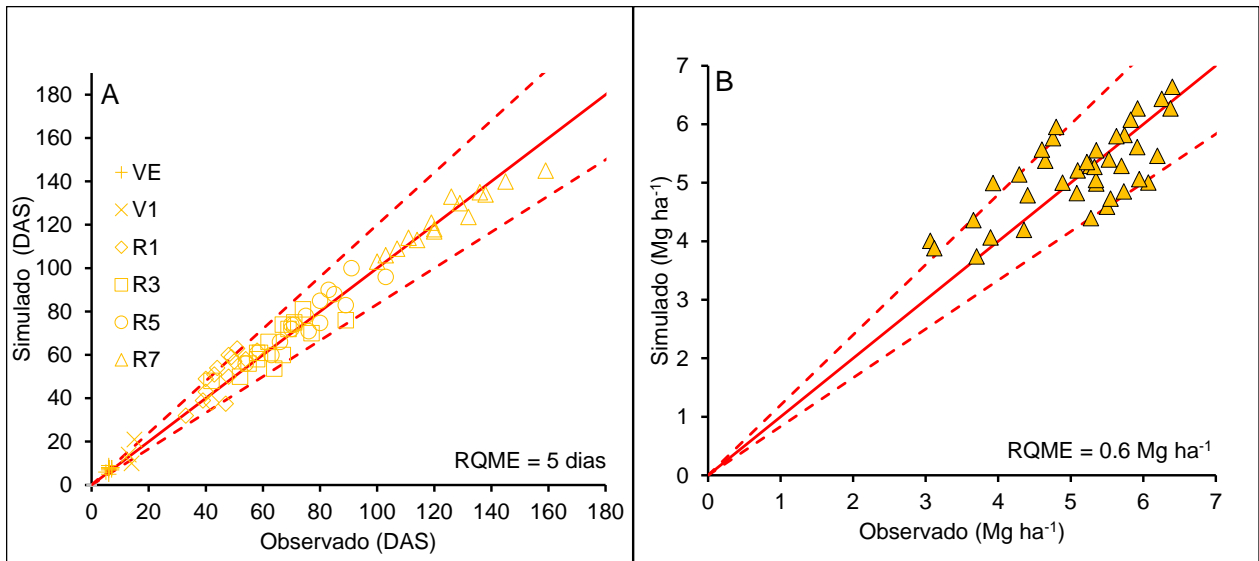


Figura 10 – Comparação dos dados observados e simulados de fenologia (A) e da produtividade (B) da soja. As linhas solidas representam  $y = x$ , e as linhas pontilhadas  $y = x \pm 20\%$ . RQME = raiz do erro médio quadrático.

### 3.2 ÉPOCAS DE SEMEADURA

Para calcular a perda de produtividade causada pela época de semeadura no Brasil, uma das principais lacunas de produtividade causada pelo manejo (TAGLIAPIETRA et al., 2021), foi utilizado o modelo CSM-CROPGRO-Soybean para calcular a média do PP de 20 anos com os dados já descritos anteriormente em cada local, com simulações da data de semeadura a partir de 01 de outubro a 31 de dezembro diariamente. Cada local gerou uma curva que foi agrupada nas Macrorregiões Sojícolas (KASTER e FARIAS, 2012) (Tabela 4).

Tabela 4 – Classificação dos locais nas 5 macrorregiões sojícolas.

<b>Município</b>	<b>Estado</b>	<b>Macrorregião</b>
Baixa Grande do Ribeiro	PI	5
Santa Carmem	MT	4
Gleba Celeste	MT	4
Taguatinga	TO	4
Lucas do Rio Verde	MT	4
São José do Rio Claro	MT	4
Sapezal	MT	4
Canarana	MT	4
Primavera do Leste	MT	4
Campo Verde	MT	4
Poxoréo	MT	4
Paracatu	MG	3
Rio Verde	GO	3
Mineiros	GO	3
Catalão	GO	3
Capinópolis	MG	3
Uberaba	MG	3
Ivinhema	MS	2
Ponta Porã	MS	2
Tarumã	SP	3
Maringá	PR	2
Campo Mourão	PR	2
Brasilândia do Sul	PR	2
São Pedro do Iguaçu	PR	2
Quedas do Iguaçu	PR	1
Irati	PR	1
Pato Branco	PR	1
Iraí	RS	1
Lagoa Vermelha	RS	1
São Luiz Gonzaga	RS	1
Cruz Alta	RS	1
Ibirubá	RS	1

O platô de produtividade para cada curva foi calculado usando a média das produtividades menores a 5% da maior produtividade de cada local (Figura 11A). Já a perda de produtividade foi calculada pela equação linear resultante do restante dos valores, em que a perda é definida pela inclinação da curva (Figura 11B). Após isso, juntou-se os dados no mesmo gráfico (Figura 11C). E para definir a data de início da perda de produtividade foi realizado o encontro entre as duas equações em que o valor corresponde a última data do potencial de produtividade antes do encontra da equação linear ( $y = ax + b$ ).

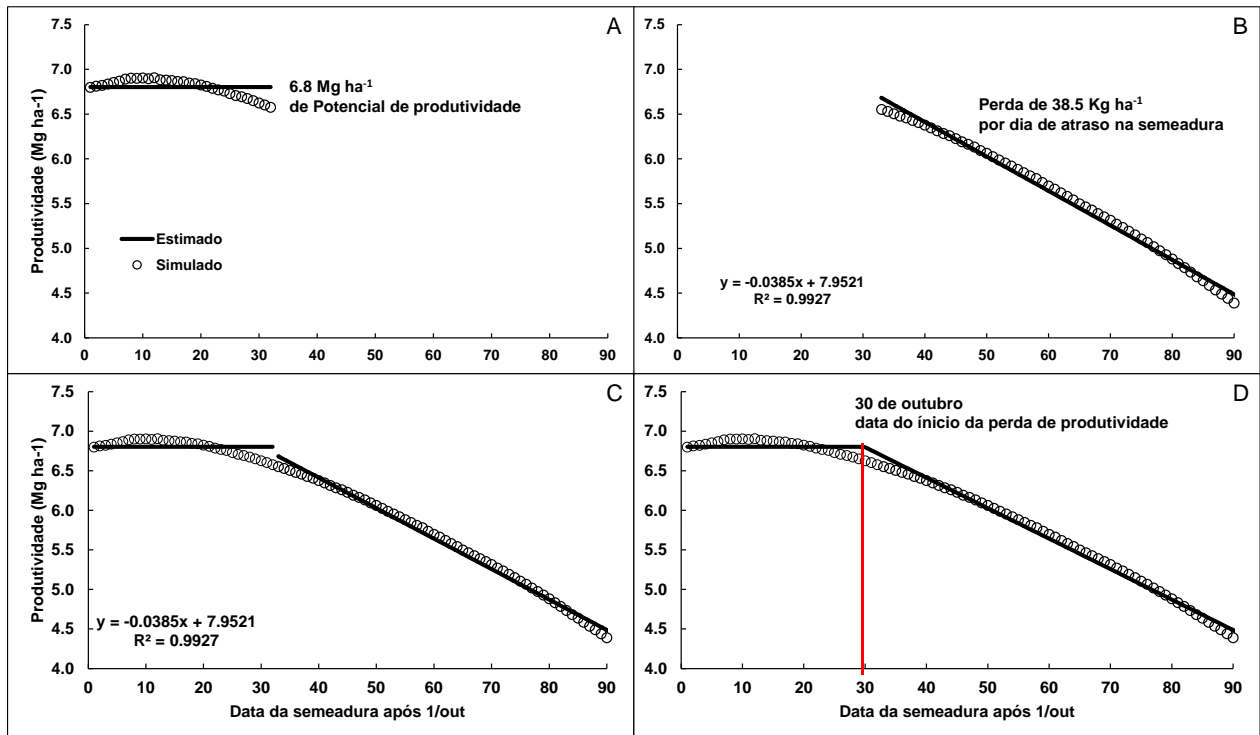


Figura 11 – Exemplos da metodologia para encontrar o potencial de produtividade, a data de início da perda de produtividade e a magnitude da perda de produtividade com o atraso da sementeira.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 POTENCIAIS DE PRODUTIVIDADE

O potencial de produtividade (PP) variou de 5,7 (Baixa Grande do Ribeiro/PI) a 7,5 Mg ha<sup>-1</sup> (Cruz Alta/RS) (Figura 12). Essa faixa de PP ficou entre as estimativas de potencial de produtividade utilizando modelo agrometeorológico realizado por Sentelhas et al., 2015 (4,2 a 5,6 Mg ha<sup>-1</sup>) e Battisti et al., 2018 (7,6 a 13,4 Mg ha<sup>-1</sup>) para o Brasil. Em virtude de ter sido utilizada uma metodologia padrão do GYGA (VAN ITTERSUM et al., 2013) é possível verificar que o PP de soja no Brasil é superior aos valores encontrados por Grassini et al., 2015 (4,4 a 7,1 Mg ha<sup>-1</sup>) e Ratalino Edreira et al., 2017 (5,4 a 6,1 Mg ha<sup>-1</sup>) nos EUA.

Podemos observar que os PP têm os maiores valores em maiores latitudes (30° S), em Cruz Alta/RS (7,5 Mg ha<sup>-1</sup>), e vão reduzindo quando mais próximo da linha do Equador, onde a menor produtividade ocorreu em Baixa Grande do Ribeiro/PI (5,7 Mg ha<sup>-1</sup>) (Figura 12). Esta relação pode ser observada na Figura 13A onde a cada grau de latitude ao sul ocorre um aumento de 63,3 kg ha<sup>-1</sup> no PP, as maiores latitudes estão relacionadas ao maior comprimento do dia, e, portanto, maior incidência de radiação solar.

Por isso existe uma correlação entre a latitude e o coeficiente fototérmico (Q) (FISCHER, 1985) (Figura 13B), o qual é um parâmetro ecofisiológico que relaciona a radiação solar e a temperatura. Calculado através da divisão da radiação solar pela temperatura média do ar obtida no período de R1 a R7 calculado pelo modelo subtraído da temperatura base da cultura. Para calcular o Q, assume-se uma Tb de 0 °C para a fase reprodutiva (SETIYONO et al., 2007). Assim, podemos explicar a forte relação entre o PP e o Q (Figura 13C), em que o incremento de produtividade está relacionado a maior incidência de radiação na região sul do país.

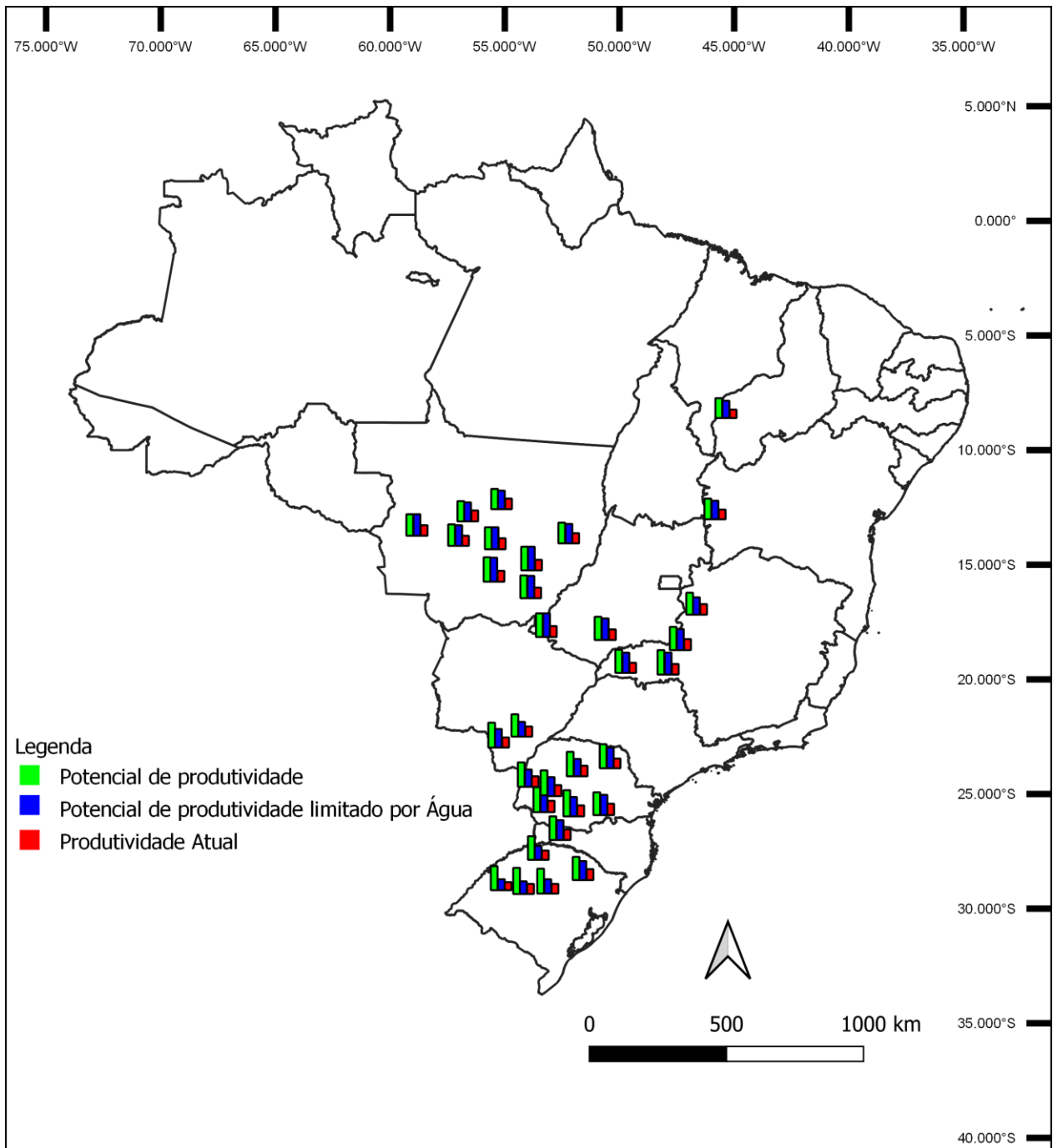


Figura 12 – Potencial de Produtividade (PP), Potencial de Produtividade limitado por Água (PPA) e Produtividade Atual (PA) nos diferentes locais do Brasil. Médias de 20 anos simulados para o PP e PPA e 5 anos de dados observados para a PA.

Os resultados estão de acordo com Zanon et al., 2016, que descreveu pela primeira vez a relação direta entre produtividade e o coeficiente fototérmico em soja, demonstrando que o atraso na época de semeadura reduz o potencial de produtividade pela menor disponibilidade de radiação solar. Associada a esta condição, o ajuste de

grupo de maturação e data de semeadura pode auxiliar no aumento do potencial produtivo em função da região, uma vez que o momento de máxima área foliar pode ser ajustado com o momento de maior disponibilidade de radiação solar, o qual ocorre ao final do mês de dezembro.

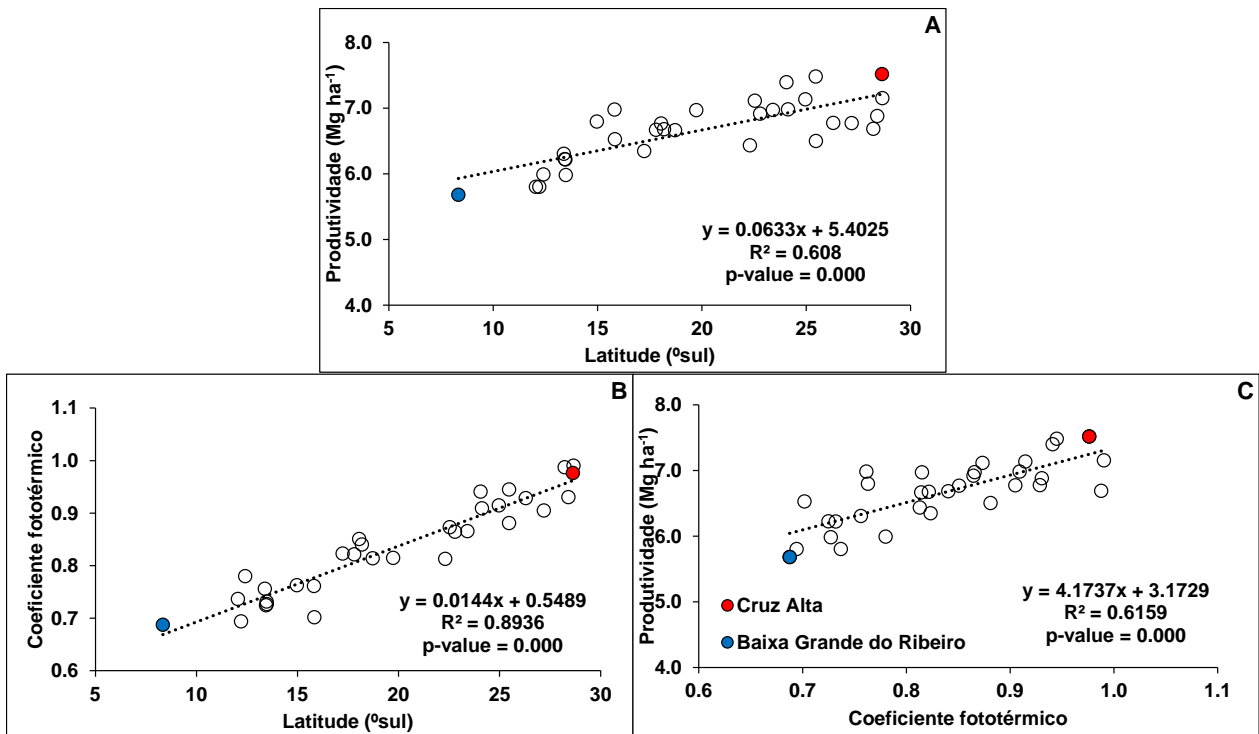


Figura 13 – Relação entre o PP e a latitude (A), o Q e a latitude (B), o PP e o Q (C) para os 32 locais do Brasil. Cruz Alta (Vermelha) e Baixa Grande do Ribeiro (Azul) como os extremos de Potencial de produtividade.

O Potencial de Produtividade limitado por Água (PPA) variou de 3,1 (São Luiz Gonzaga/RS) a 6,9 Mg ha<sup>-1</sup> (Campo Verde/MT) (Figura 12), valores próximos dos encontrados por Aramburu Merlos et al., 2015 (2,2 a 5,2 Mg ha<sup>-1</sup>) na Argentina. Aqui os valores se comportam de maneira diferente do PP, demonstrando que ocorre a redução da produtividade pelo aumento da latitude (Figura 14A).

A variação da produtividade pela latitude ocorre devido aos diferentes regimes hídricos encontrados no Brasil, em que, no centro-oeste prevalece o regime monçônico, onde as precipitações ocorrem no verão quando é estabelecido o cultivo da soja. Na região sul prevalece o regime isoigro, quando a precipitação é distribuída ao longo do ano, sendo que, a região sul sofre mais com secas devido a fenômenos meteorológicos,

como exemplo o ENOS (ARSEGO et al., 2018; NOIA JUNIOR et al., 2020) (Figura 11B). Outro local de destaque é Baixa Grande do Ribeiro/PI que tem uma baixa disponibilidade hídrica pela maior proximidade da região nordeste do Brasil, porém, não tem muita penalização na PPA em relação ao PP devido ele ser menor (Figura 14).

A má distribuição da chuva pode ser vista nos 3 pontos com menor produtividade, que são Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Iraí, todos localizados no Rio Grande de Sul (Figura 14C), onde a chuva acumulada é superior a 800 mm, valor que pode permitir que sejam alcançadas altas produtividades (ZANON et al., 2016), demonstrando a importância da distribuição das chuvas ao longo do ciclo. Porém esse fator pode ser minimizado por práticas de manejo que condicionam o aumento do armazenamento de água no solo, como exemplo maior profundidade de raízes (BATTISTI e SENDELHAS, 2017) , ou ainda a seleção de cultivares adaptadas à limitação hídrica, no caso de São Luiz Gonzaga/RS (BATTISTI e SENDELHAS, 2015).

A produtividade atual (PA) apresentou uma variação pequena entre os locais com média em  $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ . São Luiz Gonzaga/RS foi o município que ficou com a menor produtividade de  $2,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  e Irati/PR o município que apresentou a maior produtividade de  $3,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Figura 14), valores estes muito próximos dos  $2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$  encontrados na média dos últimos 20 anos na Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021).

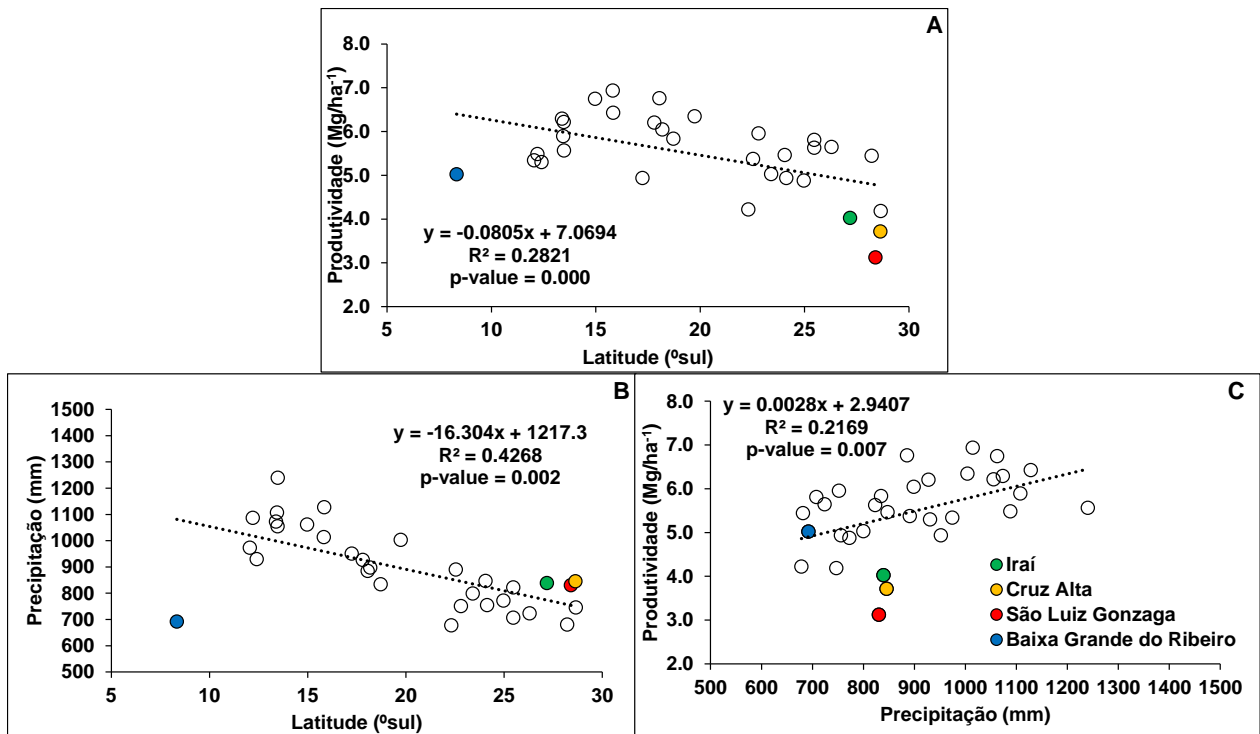


Figura 14 – Relação entre o PPA e a latitude (A), a precipitação e a latitude (B), o PPA e a precipitação (C) para os 32 locais do Brasil. São Luiz Gonzaga (Vermelho), Cruz Alta (Amarela), Iraí (Verde) e Baixa Grande do Ribeiro (Azul) representados no mapa como locais com deficiência hídrica ou com pequena LA.

## 4.2 LACUNAS DE PRODUTIVIDADE

A lacuna de produtividade (LP) ( $PP - PA$ ) foi de  $3,7 \text{ Mg ha}^{-1}$  para todo o Brasil (Figura 15), sendo que variou de  $2,7$  (Gleba Celeste/MT) a  $4,6 \text{ Mg ha}^{-1}$  (São Luiz Gonzaga/RS). Ao decompor a LP em: 1) lacuna de produtividade pelo manejo (LM) ( $PPA - PA$ ), representada pela área verde dos diagramas na Figura 16, obteve-se um valor de  $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  correspondente ao manejo adotado pelo produtor; esses valores são maiores do que aqueles encontrados por Grassini et al., 2015 nos EUA ( $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e por Aramburu Merlos et al., 2015 na Argentina ( $1,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Figura 12). E 2) lacuna de produtividade de água (LA) ( $PP - PPA$ ), representada pela área azul dos diagramas na Figura 16, obteve-se um valor de  $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$  correspondente ao déficit hídrico (Figura 16). No trabalho realizado por Sentelhas et al., (2015) a lacuna de manejo foi de apenas  $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  e a lacuna de deficiência hídrica de  $1,4 \text{ Mg ha}^{-1}$  para o Brasil.

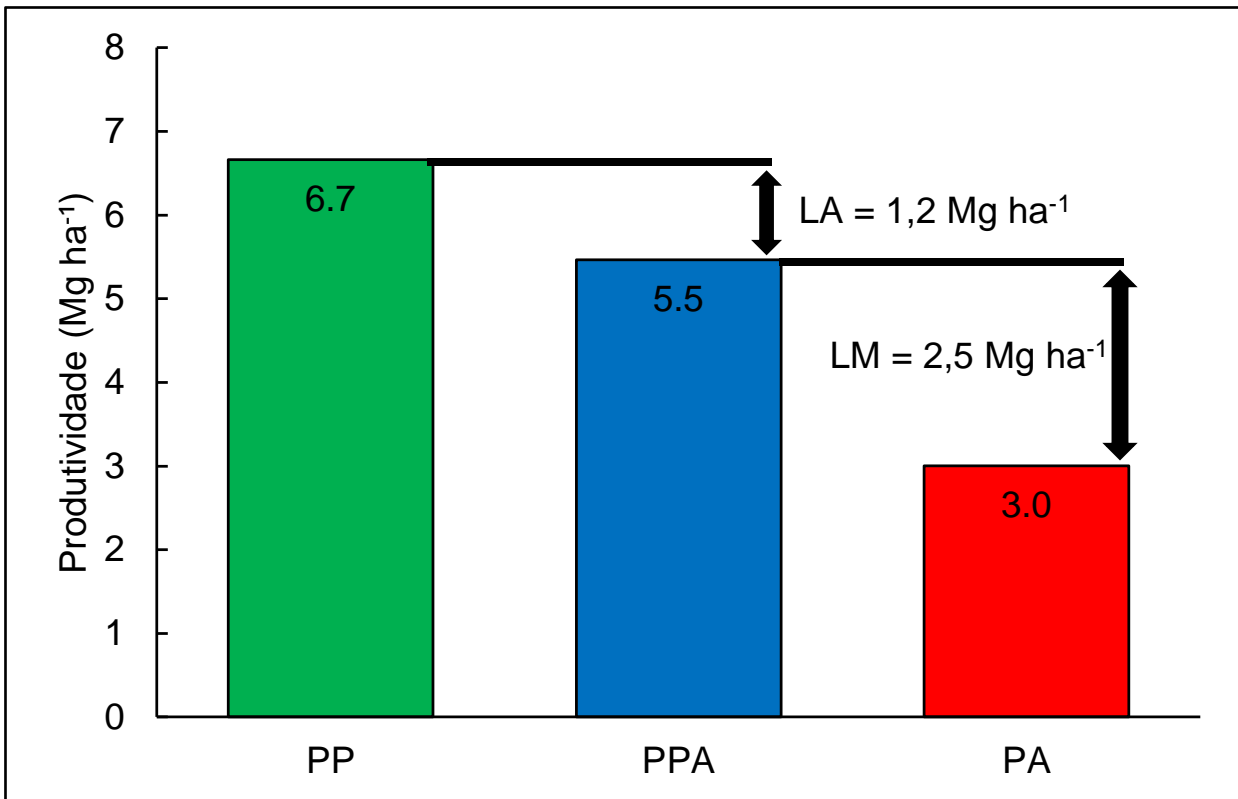


Figura 15 – Potencial de produtividade (PP), Potencial de produtividade limitado por água (PPA), Produtividade atual (PA), Lacuna de manejo (LM) e Lacuna de água (LA) para a cultura da soja no Brasil.

Como exemplo da variação entre os locais, Campo verde/MT tem a maior LM com 3,8 Mg ha<sup>-1</sup>, enquanto que a menor se encontra em Cruz Alta/RS de 0,8 Mg ha<sup>-1</sup>. Já a LA foi menor na média, porém, a variação foi maior, com valores de 3,8 Mg ha<sup>-1</sup> em Cruz Alta/RS devido a sua maior PP (maior radiação solar e menor presença de nuvens), enquanto que em alguns locais do MT e de GO as LA são menores do que 0,1 Mg ha<sup>-1</sup>, ou seja, o déficit hídrico é mínimo ao longo do ciclo da soja.

Na figura 18 o tamanho dos diagramas representa a lacuna de produtividade total, onde as maiores lacunas estão na região Sul com os maiores diagramas no mapa, sendo que isso se deve à existência de maiores potenciais de produtividade e a lacuna de déficit hídrico corresponde a mais de 50% na maioria dos locais, havendo inversão na região centro oeste do país em que mais de 90% da produtividade corresponde ao manejo devido à alta quantidade de chuva bem distribuída.

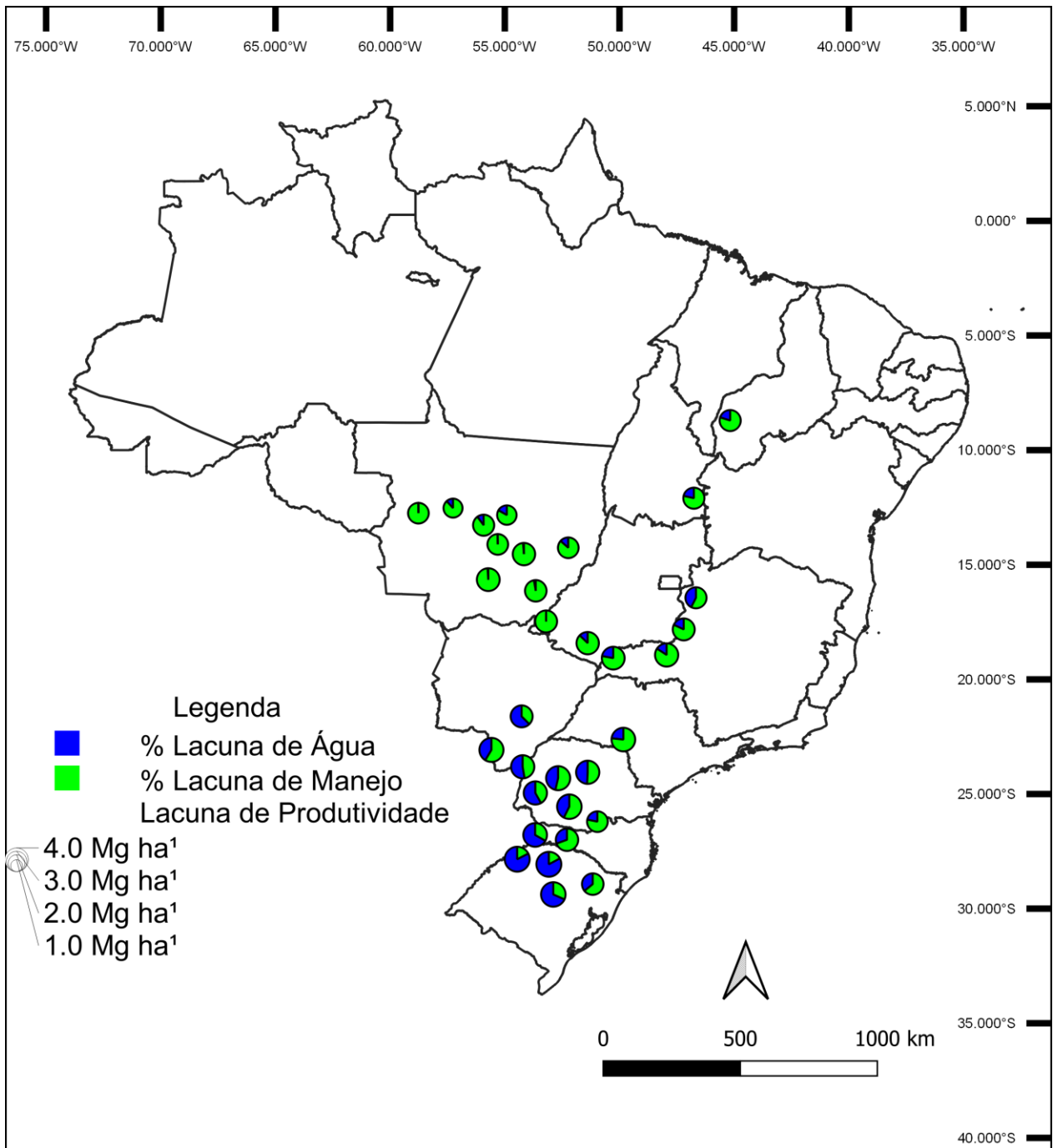


Figura 16 – Lacuna de Produtividade (LP) representadas pelo tamanho dos diagramas e a divisão em Lacuna de Manejo (LM) (Verde) e Lacuna de Água (LA) (Azul) expressas em porcentagem da LP.

Considerando a média nacional dos locais avaliados no Brasil, a lacuna de manejo equivale a 67% da lacuna total. Nesse cenário, a melhoria de práticas de manejo acrescentaria 2,5 Mg ha<sup>-1</sup>, neste caso hipotético seria possível aumentar a média de produtividade nacional em 82% e quase dobrar a produção de soja do Brasil, ou seja, um

incremento de 90 milhões de toneladas a mais de soja. Este incremento de produtividade seria o equivalente a uma expansão de área cultivada de 27 milhões de hectares, que seria evitada seguindo os pilares da intensificação agrícola sustentável no Brasil. Dessa forma, aliado à preservação de biomas tropicais, a soja brasileira continuaria contribuindo com a segurança alimentar mundial.

Nos locais com maior lacuna de manejo investir em manejo, como exemplo, ajustando a época de semeadura, haverá uma resposta em produtividade. Por outro lado, nos locais com menor LM, como no caso do RS, não há o que se incrementar no manejo, pois como pode-se observar a LA é maior, e assim uma solução seria investir em irrigação.

Para facilitar a identificação do potencial e lacuna para o agricultor, é possível fazer uma divisão dos locais das estações meteorológicas pelas suas localizações dentro das macrorregiões sojícolas (Figura 17).



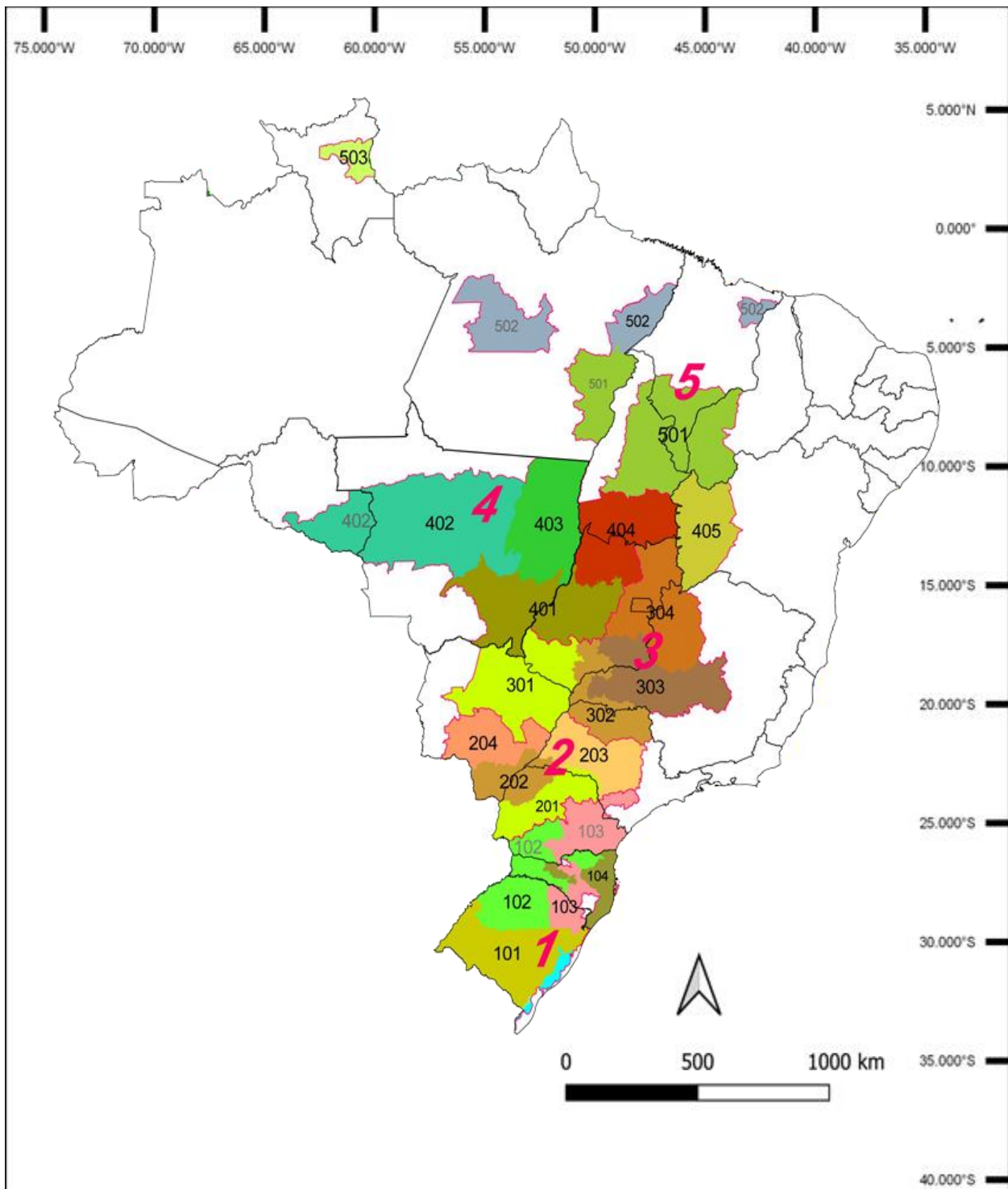


Figura 17 – Macrorregiões sojícolas e suas respectivas regiões edafoclimáticas.

Na Figura 18 observa-se que a Macrorregião 1 e 2 tem os maiores PP, porém, o PPA é menor devido a distribuição irregular das chuvas. Fazendo com que as lacunas

das duas regiões sejam próximas e equidistantes entre a deficiência hídrica e o manejo. Nas Macrorregiões 3, 4 e 5 o PP reduz, porém o PPA aumenta, fazendo com que a LA seja mínima e o principal fator de redução da produtividade seja o manejo.

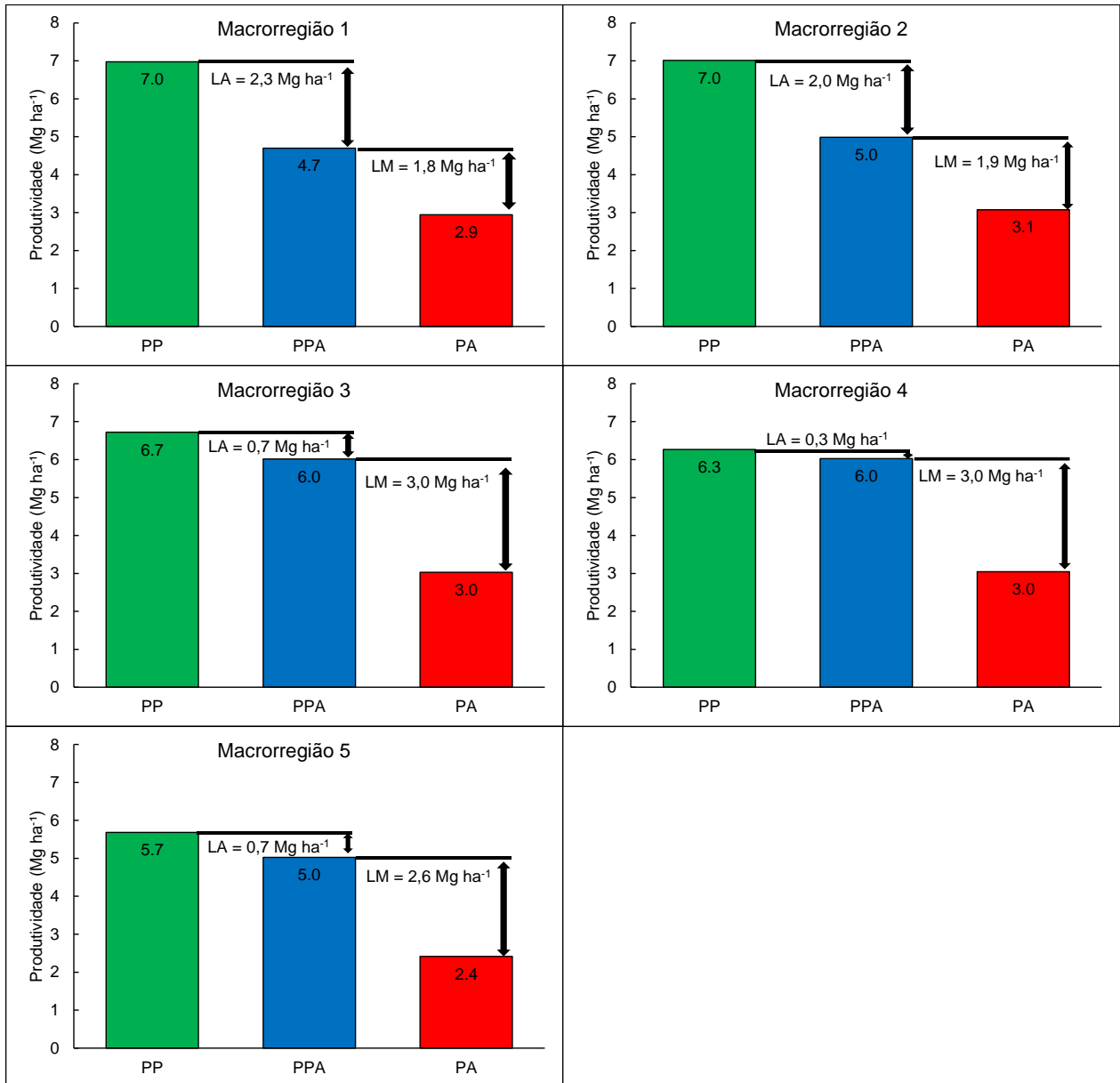


Figura 18 – Potencial de produtividade (PP), Potencial de produtividade limitado por água (PPA), Produtividade atual (PA), Lacuna de manejo (LM) e Lacuna de água (LA) para as 5 Macrorregiões sojícolas.

### 4.3 LACUNAS DA ÉPOCA DE SEMEADURA

Uma prática de manejo que pode ser adotada pelos agricultores, sem causar aumento no custo de produção é realizar a semeadura dentro da faixa de potencial de produtividade, como já descrita no Rio Grande do Sul (Zanon et al., 2016; Tagliapietra et al., 2021). Porém temos que ter cuidado com o zoneamento agrícola da região, pois o PP não leva em conta o déficit hídrico.

Na figura 19 podemos observar que o Brasil foi dividido nas 5 macrorregiões sojícolas. A macrorregião 1 tem um potencial de produtividade que pode chegar a  $5,6 \text{ Mg ha}^{-1}$  e a mesmo inicia a perda de produtividade em 18/11 e reduz o potencial em  $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . A macrorregião 2 tem potencial de produtividade variando de  $5,6$  a  $6,7 \text{ Mg ha}^{-1}$  e a perda de produtividade inicia entre 03/11 e 16/11 sendo que reduz o potencial entre  $24$  e  $33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . A macrorregião 3 tem potencial de produtividade variando de  $6,1$  a  $6,7 \text{ Mg ha}^{-1}$  e a perda de produtividade inicia entre 03/11 e 15/11 sendo que a redução do potencial ficou entre  $37$  e  $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . A macrorregião 4 tem potencial de produtividade varia de  $6,3$  a  $7,1 \text{ Mg ha}^{-1}$  e a perda de produtividade inicia entre 30/10 e 07/11 sendo que reduz o potencial em  $39$  e  $42 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . A macrorregião 5 tem potencial de produtividade varia de  $6,5$  a  $7,2 \text{ Mg ha}^{-1}$  e a perda de produtividade inicia entre 23/10 e 06/11 sendo que o potencial reduz em  $36$  e  $42 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ .

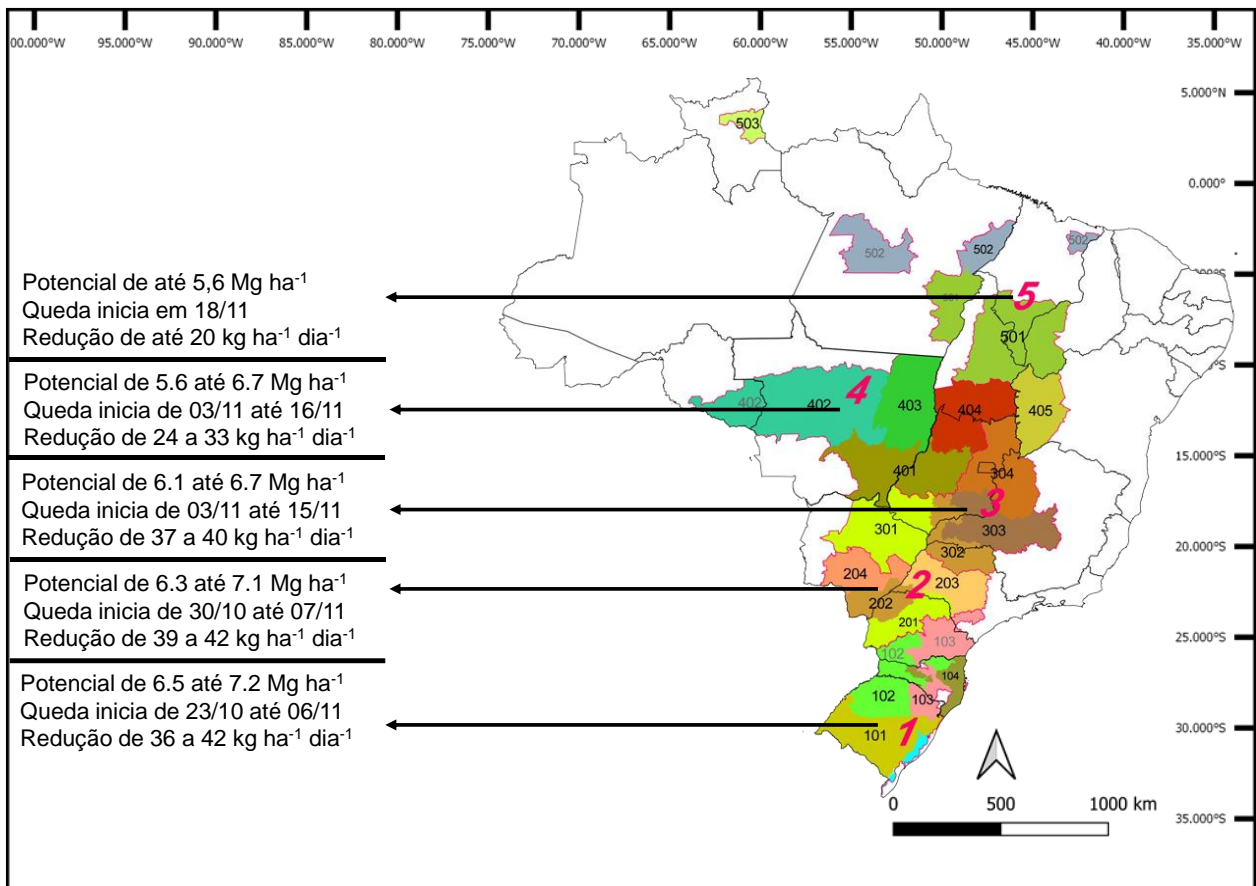


Figura 19 – Relação entre PP e a data de semeadura, bem como o inicia da perda de produtividade e sua grandeza em 5 regiões do Brasil definidas pela latitude.

Podemos observar na Figura 19 que o potencial vai aumentando nas faixas quanto mais ao sul do país, devido ao aumento do potencial pela radiação solar. E em faixas com maior potencial, maior é a perda de produtividade devido ao atraso da época de semeadura, bem como maior é a antecipação da queda da curva. Na quinta faixa podemos observar uma faixa maior entre os potenciais, e isso é devido às maiores temperaturas em relação a quarta faixa, como exemplo a região de São Luiz Gonzaga que tem altas temperaturas.

## 5. CONCLUSÃO

Ao final da pesquisa é possível concluir que o Potencial de Produtividade (PP) varia de 5,7 a 7,5 Mg ha<sup>-1</sup>, e a média é de 6,7 Mg ha<sup>-1</sup>. O Potencial de Produtividade limitado por Água varia de 3,1 a 6,9 Mgha<sup>-1</sup> e a média é de 5,5 Mg ha<sup>-1</sup> e a produtividade atual está em 3,0 Mg ha<sup>-1</sup> para o Brasil. Sendo que é possível constatar que o PP aumenta quanto mais ao Sul, devido à maior disponibilidade de radiação solar. Por outro lado, o PPA reduz quanto mais as Sul, ocasionado pelo déficit hídrico devido à veranicos.

A Lacuna de produtividade (LP) varia de 2,7 a 4,6 Mg ha<sup>-1</sup>, e a média é de 3,7 Mg ha<sup>-1</sup>. Dividindo a LP em Lacuna de Manejo (LM) e Lacuna de Água (LA) obtemos valores de 2,5 Mg ha<sup>-1</sup> e de 1,2 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, para todo o Brasil. Sendo que a variação da LM é de 0,8 Mg ha<sup>-1</sup> a 3,8 Mg ha<sup>-1</sup>, onde quanto mais próximo da linha do equador maior é a lacuna. Já a LA varia de 0,0 Mg ha<sup>-1</sup> a 3,8 Mg ha<sup>-1</sup>, e o comportamento é ao contrário da LM, isto é, menor quanto mais próximo da linha do equador. Assim é possível constatar que no Norte do país pode-se investir em manejo para aumentar a produtividade e no Sul deve-se investir em irrigação e aprofundar o perfil do solo para armazenar mais água.

Por fim, nas 5 Macrorregiões sojícolas é possível identificar a perda do potencial de produtividade com o atraso na época de semeadura para todo o Brasil. Em que, quanto mais ao sul, maior é o potencial de produtividade, porém, mais cedo inicia a redução do potencial e tem uma maior perda no mesmo com o atraso da semeadura.

## ANEXOS

Tabelas A – Potencial de produtividade (PP), Potencial de produtividade limitado por água (PPA), Produtividade atual (PA), Lacuna de Produtividade (LP), Lacuna de manejo (LM), Lacuna de água (LA) e porcentagem da LM e LA em relação a LP para a cultura da soja no Brasil.

<b>Buffer</b>	<b>PP</b>	<b>PPA</b>	<b>PA</b>	<b>LP</b>	<b>LA</b>	<b>LM</b>	<b>% LA</b>	<b>% LM</b>
Baixa Grande do Ribeiro	5.7	5.0	2.4	3.3	0.7	2.6	20	80
Brasilândia do Sul	7.0	4.9	3.1	3.9	2.0	1.8	53	47
Campo Mourão	7.4	5.5	3.2	4.2	1.9	2.2	46	54
Campo Verde	7.0	6.9	3.1	3.8	0.0	3.8	1	99
Canarana	6.0	5.6	2.9	3.1	0.4	2.7	13	87
Capinópolis	6.7	5.8	2.9	3.8	0.8	2.9	22	78
Catalão	6.7	6.1	3.2	3.5	0.6	2.9	18	82
Cruz Alta	7.5	3.7	2.9	4.6	3.8	0.8	83	17
Gleba Celeste	5.8	5.5	3.1	2.7	0.3	2.4	12	88
Ibirubá	7.2	4.2	2.8	4.3	3.0	1.4	68	32
Iraí	6.8	4.0	2.7	4.1	2.7	1.4	67	33
Irati	6.5	5.8	3.3	3.2	0.7	2.5	22	78
Ivinhema	6.4	4.2	2.9	3.5	2.2	1.3	63	37
Lagoa Vermelha	6.7	5.4	3.2	3.5	1.2	2.2	36	64
Lucas do Rio Verde	6.3	6.3	3.2	3.1	0.0	3.1	0	100
Maringá	7.0	5.0	3.0	3.9	1.9	2.0	49	51
Mineiros	6.8	6.8	3.2	3.5	0.0	3.5	0	100
Paracatu	6.4	4.9	3.0	3.3	1.4	1.9	43	57
Pato Branco	6.8	5.6	3.1	3.7	1.1	2.6	31	69
Ponta Porã	7.1	5.4	2.9	4.2	1.7	2.5	41	59
Poxoréo	6.5	6.4	3.1	3.4	0.1	3.3	3	97
Primavera do Leste	6.8	6.7	3.1	3.7	0.0	3.7	1	99
Quedas do Iguaçu	7.5	5.6	3.1	4.3	1.9	2.5	43	57
Rio Verde	6.7	6.2	3.0	3.6	0.5	3.2	13	87
Santa Carmem	5.8	5.3	3.1	2.7	0.5	2.3	17	83
São José do Rio Claro	6.2	5.9	3.0	3.2	0.3	2.9	10	90
São Luiz Gonzaga	6.9	3.1	2.3	4.6	3.8	0.8	83	17
São Pedro do Iguaçu	7.1	4.9	3.3	3.9	2.3	1.6	58	42
Sapezal	6.2	6.2	3.1	3.2	0.0	3.2	0	100
Taguatinga	6.0	5.3	2.8	3.2	0.7	2.5	21	79
Tarumã	6.9	6.0	2.8	4.1	1.0	3.2	23	77
Uberaba	7.0	6.4	3.0	3.9	0.6	3.3	16	84

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G., LUIS, S.P., RAES, D., SMITH, M., 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper No.56. **Crop Evapotranspiration**, Rome, Italy
- ARAMBURU MERLOS, F., MONZON, J.P., MERCAU, J.L., TABOADA, M., ANDRADE, F., HALL, A.J., JOBBAGY, E., CASSMAN, K.G., GRASSINI, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. **Field Crops Research** 184, 145-154.
- ARSEGO, DIOGO & FERRAZ, SIMONE & STRECK, NEREU & CARDOSO, ANDREA & ZANON, ALENCAR. (2018). Estudo do impacto de diferentes índices associados ao El Niño oscilação sul na produtividade de soja no Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**. 40. 82. 10.5902/2179460X30684.
- BATTISTI, R. et al. Assessment of soybean yield with altered water-related genetic improvement traits under climate change in Southern Brazil. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 83, p. 1–14, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.004>>
- BATTISTI, R. et al. Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 159–168, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>>
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Drought Tolerance of Brazilian Soybean Cultivars Simulated By a Simple Agrometeorological Yield Model. **Experimental Agriculture**, [s. l.], v. 51, n. 2, p. 285–298, 2015.
- BATTISTI, R. e SENTELHAS, P. C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. **Agronomy Journal**, 109, 1612-1622. 2017. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0023>
- BENDER, F.D., SENTELHAS, P.C., 2018. Solar Radiation Models and Gridded Databases to Fill Gaps in Weather Series and to Project Climate Change in Brazil. **Advances in Meteorology**, 2018, 1-15.
- BOOTE, K.J. et al. Simulation of crop growth: CROPGRO, model. In: Peart, R.M., Curry, R.B. (Eds.), **Agricultural Systems Modeling and Simulation**. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, p.651–692, 1998.
- BOOTE, K.J.; MÍNGUEZ, M.I.; SAU, F. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. **Agronomy Journal**, v.94, p.743–756, 2002.
- CASSMAN, Kenneth G.; GRASSINI, Patricio. A global perspective on sustainable intensification research. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 4, p. 262-268, 2020.

CAFARO LA MENZA, N. et al. Is soybean yield limited by nitrogen supply? **Field Crops Research**, [s. l.], v. 213, n. August, p. 204–212, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.009>>

COOPER, M., MENDES, L.M.S., SILVA, W.L.C., SPAROVEK, G., 2005. A national soil profile database for Brazil available to international scientists. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 69, 649-652.

CONAB - **Companhia Nacional de Abastecimento. Soja** - Brasil: Série histórica de área plantada e de produtividade. Brasília, 2021. Online. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>>. Acesso em: 26 de jul. de 2021.

DE GROOT, H. et al. Kenya public weather processed by the Global Yield Gap Atlas project. Open Data **Journal for Agricultural Research**, v. 3, n. 1, 2017.

DENG, N. et al. Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. **Nature Communications**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 1–9, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-09447-9>>

DUARTE, Y.C.N., SENTELHAS, P.C., 2019. NASA / POWER and DailyGridded weather datasets — how good they are for estimating maize yields in Brazil ? **Int. J. Biometeorol.** doi: 10.1007/s00484-019-01810-1

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

FAO. FAOSTAT: **Agricultural production**. [Database.] FAO, Rome. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 26 de jul. de 2021.

FAO and DWFI. Yield gap analysis of field crops – Methods and case studies, by Sadras. **FAO Water Reports**, n 41, Roma – Italia, 2015.

FARIAS, J. R. B. et al. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. et al. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. p.109-130

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 15p., (Special Report, 80), 1977.

FERMONT, A. M. et al. Closing the cassava yield gap: an analysis from small holder farms in East Africa. **Field Crops Research**, v. 112, p. 24–36, 2009.

FISCHER, R. A. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. **Journal of Agricultural Science**, v.105, p.447–461, 1985.

FRANCHINI, J.C., ANTONIO, A., JUNIOR, B., DEBIASI, H., NEPOMUCENO, A.L., 2017. Root growth of soybean cultivars under different water availability conditions Crescimento



radicular de cultivares de soja em campo em diferentes disponibilidades hídricas. **Ciências Agrárias**, Londrina, 38, 715–724.

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. 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. a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>>

GRASSINI, P. et al. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 179, p. 150–163, 2015. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.015>>

HOOGENBOO, M.G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W.; PORTER, C.H.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; GIJSMAN, A.J. **Decision support system for agrotechnology transfer version 4.0**. University of Hawaii, Honolulu, HI (CDROM). 2004.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v.18, p. 235–265, 2003.

KANTOLIC, A. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genótipos. **Revista da Facultad de Agronomía UBA**, v. 28, n. 1, p. 63-88, 2008.

KASTER, M., FARIAS J. R. B. **Regionalização dos testes de valor de cultivo e uso e da indicação de cultivares de soja – terceira aproximação** / Milton Kaster, José Renato Bouças Farias. – Londrina: Embrapa Soja, 2012.

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.

MARCHESAN, E. **Produção e fixação de flores e legumes, por nó do caule e dos ramos, em três cultivares de soja**. 1982. 105 f. Dissertação de Mestrado-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.

MARIN, F. R. et al. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. **Environmental Modelling & Software**, v. 72, p. 372–386, 2015.

McMASTER, G. S. Phenology, development, and growth of the wheat (*Triticum aestivum* L.) shoot apex: a review. **Advances in Agronomy**. v.59, p.63-118, 1997.

MERCAU, J.L. J.L. DARDANELLI, D.J. COLLINO, J.M. ANDRIANI, A. IRIGOYEN, E.H. SATORRE, Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean, **Field Crops Research**, Volume 100, Issues 2–3, 2007, Pages 200-209, ISSN 0378-4290, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.006>.

MONTEIRO, L.A., SENTELHAS, C., PEDRA, G.U., 2018. Assessment of NASA / POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. **Int. J. Climatol.** 38, 1571–1581.

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. **Acta Scientiarum.** v. 36, n. 3, p. 265-272, 2014.

MONZON, J.P. V.O. SADRAS, P.A. ABBATE, O.P. CAVIGLIA, Modelling management strategies for wheat–soybean double crops in the south-eastern Pampas, **Field Crops Research**, Volume 101, Issue 1, 2007, Pages 44-52, ISSN 0378-4290, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.09.007>.

NÓIA JÚNIOR, ROGÉRIO DE SOUZA, CLYDE WILLIAM FRAISSE, MAURICIO ALEX ZIENTARSKI KARREI, VINÍCIUS ANDREI CERBARO, DANIEL PERONDI, Effects of the El Niño Southern Oscillation phenomenon and sowing dates on soybean yield and on the occurrence of extreme weather events in southern Brazil, **Agricultural and Forest Meteorology**, Volume 290, 2020, 108038, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108038>.

PIVETTA, L.A., G. CASTOLDI, G. SANTOS, AND C.A. ROSOLEM. 2011. Soybean root growth and activity as affected by the production system. **Pesquisa Agropecu. Bras.** 46, 1547–1554.

RATTALINO EDREIRA, J. I. et al. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 247, n. July, p. 170–180, 2017.

RAY DK, MUELLER ND, WEST PC, FOLEY JA. **Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production** by 2050. PLOS ONE 8(6): e66428. 2013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>

REICHARDT, K., 1988. Capacidade de campo. **R. Bras. Ci. Solo** 12, 211–216

SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil–magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.

SETIYONO, T. D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 100, n. 2–3, p. 257–271, 2007.

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. Optimum leaf area index to reach soybean yield potential in subtropical environment. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 110, n. 3, p. 932–938, 2018.

TAGLIAPIETRA, E. L., ZANON, A. J., STRECK, N. A., BALEST, D. S., DA ROSA, S. L., BEXAIRA, K. P., RICHTER, G. L., RIBAS, G. G., DA SILVA, M. R. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**. 2021; 113:1–13. <https://doi.org/10.1002/agj2.20586>

TEIXEIRA, W.W.R., BATTISTI, R, SENTELHAS, P.C., de MORAES, M.F., de OLIVEIRA JUNIOR, A. Uncertainty assessment of soya bean yield gaps using DSSAT-CSM-CROPGRO-Soybean calibrated by cultivar maturity groups. **J Agro Crop Sci.**; 205: 533–544 2019.

TOMASELLA, J, HODNETT, MG, ROSSATO, L, 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Sci Soc Am J** 69, 649-652.

TOMASELLA, J, HODNETT, 2004. Pedotransfer functions for tropical soils. In: **Developments in Soil Science**, pp. 415-429.

VAN BUSSEL, L. G. J. et al. From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. **Field Crops Research**, v. 177, p. 98–108, 2015.

VAN ITTERSUM, M. K. et al. 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 ITTERSUM, Martin K. et al. Can sub-Saharan Africa feed itself?. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 52, p. 14964-14969, 2016.

VAN WART, J., GRASSINI, P., YANG, H.S., CLAESSENS, L., JARVIS, A., CASSMAN, K.G., Creating long-term weather data from the thin air for crop simulation modelling. **Agric. For. Meteorol.** 209-210, 45-58. 2015.

VAN WART, J. et al. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. **Field crops research**, v. 143, p. 44–55, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.023>>

WOLF, J.; OUATTARA, K.; SUPIT, I. Sowing rules for estimating rainfed yield potential of sorghum and maize in Burkina Faso. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214, p. 208–218, 2015.

YOU, L., WOOD, S., WOOD-SICHRU, U. Generating global crop maps: from census to grid Selected paper, **IAAE (International Association of Agricultural Economists) Annual Conference**, Gold Coast, Australia. 2006.

YOU, L., CRESPO, S., GUO, Z., KOO, J., SEBASTIAN, K., TENORIO, M.T., WOOD, S., WOOD-SICHTA, U. **Spatial Production Allocation Model (SPAM)** 2000 Version 3 Release 6. 2009.

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.