

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
*CAMPUS* LAGOA DO SINO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
ENGENHARIA AGRONÔMICA

Robson Rodrigues Moreira

**DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA NA MICROBACIA DO ALTO DO  
PARANAPANEMA BASEADO EM MODELAGEM DE CULTURAS**

Buri  
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS LAGOA DO SINO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
ENGENHARIA AGRONÔMICA

Robson Rodrigues Moreira

**DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA NA MICROBACIA DO ALTO DO  
PARANAPANEMA BASEADO EM MODELAGEM DE CULTURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como exigência parcial para a obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Agrônômica  
na Universidade Federal de São Carlos.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Silveira Pinto  
Nassif

Financiamento: Conselho Nacional de  
Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Buri  
2022

Rodrigues Moreira, Robson

Desempenho da cultura da soja na microbacia do Alto do Paranapanema baseado em modelagem de culturas / Robson Rodrigues Moreira -- 2022.  
39f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Daniel Silveira Pinto Nassif

Banca Examinadora: Julián Andres Vargas Grajales,  
Rafael Vasconcelos Valadares

Bibliografia

1. Alto do Paranapanema. 2. Modelagem de culturas. 3. Soja. I. Rodrigues Moreira, Robson. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

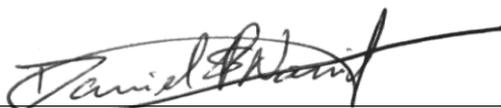
ROBSON RODRIGUES MOREIRA

**DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA NA MICROBACIA DO ALTO DO  
PARANAPANEMA BASEADO EM MODELAGEM DE CULTURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Agrônômica pela Universidade  
Federal de São Carlos.

Aprovado em: 30/03/2022

**BANCA EXAMINADORA**



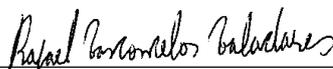
---

Prof. Dr. Daniel Silveira Pinto Nassif (Orientador)  
Universidade Federal de São Carlos  
(UFSCar)



---

Dr. Julián Andres Vargas  
GrajalesSuzano Papel e  
Celulose S.A.



---

Dr. Rafael Vasconcelos Valadares  
Tereos Açúcar e Energia S.A.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho inteiramente à minha mãe Rosângela Rodrigues Moreira e a minha avó Emília Taeko Rodrigues (*in memoriam*) pelo apoio incondicional e o amor incondicional na trajetória da minha vida.

## AGRADECIMENTO

Na improbabilidade da minha existência frente ao caos cósmico, agradeço o universo pela construção da consciência, abstração e reflexão. Isto significa liberdade de rejeitar os scripts pré-programados de modo a me condicionar aos desafios inéditos.

Agradecimentos sinceros a minha mãe Rosângela Rodrigues Moreira e ao meu pai Antônio Cândido Moreira por serem presentes em minha vida e me incentivar o meu crescimento humano como integrante da sociedade, bem como intelectual. À minha irmã Geovanna Taeko Rodrigues Moreira pelo amor fraternal incondicional e pela parceria de vida e acadêmica. À minha namorada Fabiana de Souza Moreira pela paciência e apoio.

À república Álcool-Iris pela carinhosa receptividade desde o primeiro momento e pela amizade que se estenderá por toda a vida.

Ao Dr. Daniel Silveira Pinto Nassif pela dedicação e orientação neste projeto.

À Universidade de São Carlos *campus* Lagoa do Sino e a todos os funcionários que participam para o exercício da função social da universidade.

À agência financiadora Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela Bolsa de Iniciação Científica

Em especial, a sociedade brasileira que de fato é o agente mais importante do país e que investe os recursos na educação e pesquisa.

## **EPÍGRAFE**

Demore o tempo que for para decidir o que você quer da vida, e depois que decidir não recue  
ante nenhum pretexto, porque o mundo tentará te dissuadir.

Friedrich Nietzsche

## RESUMO

MOREIRA, Robson. **Desempenho da cultura da soja na microbacia do Alto do Paranapanema baseado em modelagem de culturas**: 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Lagoa do Sino, Buri, 2022.

A soja (*Glycine max* L.) é a cultura de maior importância econômica agrícola do Brasil, visto que na safra de 2018/2019 alcançou aproximadamente 114 milhões de toneladas, sendo amplamente utilizada na alimentação humana e animal. O clima, solo e manejo são alguns dos fatores que podem limitar a produtividade. Sendo assim, as tecnologias e os manejos culturais podem contribuir para ponderar e atenuar estes fatores, tais como o uso de irrigação, diferentes épocas de semeadura e ferramentas de modelagem agrícola para tomada de decisão. A microbacia do alto do Paranapanema, é carente de informações de produtividade no setor agrícola, recorrendo a indicações genéricas do estado de São Paulo. Assim, objetivou-se avaliar a produtividade da soja em função de 8 diferentes datas de semeadura, 6 lâminas de água de irrigação e 12 municípios, por meio de modelagem agrícola. Foram utilizados dados meteorológicos da região, que foram inseridos na plataforma DSSAT v4.7.5 e, por meio do modelo *Cropgro-soybean*, analisadas as produtividades e eficiências produtivas para as safras de 2009 a 2019. Utilizou-se também produtividade real proveniente do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico do Brasil e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística respectivamente. Os resultados foram submetidos a ANOVA e Tukey, sendo elas mapeadas e georreferenciadas no mapa da região. A produtividade média atingível foi de 2540 kg ha<sup>-1</sup>, sendo o município de Apiaí mais eficiente com 64,7%. A lâmina de irrigação de 100% da CAD foi mais eficiente, bem como a semeadura entre os meses de setembro a dezembro com média de 2600 kg ha<sup>-1</sup>.

Palavras-chave: Dssat, Lâmina de irrigação, Produtividade, Semeadura

## ABSTRACT.

The soybean crop (*Glycine max* L.) is the main agricultural economic crop in Brazil. In 2018/2019 harvest it reached almost 114million of tons. Due to the physicochemical characteristics of the grains, it is widely used in human food, especially animals. However environmental variables and crop management are factors that can limit crop yield. Thus, technologies can help to increase crop yield, such as irrigation, different sowing periods and crop models tools. The region of interest, the upper Paranapanema micro basin, lacks data on crop yield in the agricultural sector, using generic indications from the state of São Paulo. Therefore, this proposal aims to evaluate soybean crop yield according to the different sowing dates, irrigation management and different sites based on DSSAT Cropgro-soybean crop model using 12 weather databases from different sites in the micro basin. These will be used to found potential crop yield for each site from 2009 to 2019 harvests. It was analyzed, in order to consider 12 different sites, 8 sowing dates and 6 water depths with available water capacity (CAD) parameter in the soil. The results were submitted to ANOVA and Tukey, which were mapped and georeferenced on the region map. The average yield achievable was 2540 kg ha<sup>-1</sup>, with the municipality of Apiaí being the most efficient with 64.7%. The irrigation depth of 100% of the CAD was more efficient, as well as the sowing between the months of September and December, with an average of 2600 kg ha<sup>-1</sup>.

Keywords: Dssat, Irrigation blade, Productivity, Seeding

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As divisões e as subdivisões dos modelos .....	19
Figura 2 - Níveis de produtividades e seus respectivos fatores de influências .....	20
Figura 3 – Classe de solos na microbacia do Alto do Paranapanema.....	22
Figura 4 - Comportamento de precipitação médio dos municípios estudados .....	27
Figura 5 - Modelo de regressão linear na produtividade potencial atingível médio .....	31
Figura 6 - Distribuição espacial de produtividade média de grãos de soja .....	32
Figura 7 - Produtividade de soja em função da CAD e tempo. ....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente genético do grupo de maturação 6 do modelo CROPGRO-Soybean..	23
Tabela 2 - Datas da simulação de semeadura da soja .....	24
Tabela 3 - Simulação de irrigação em função da CAD.....	24
Tabela 4 - Caracterização climática dos municípios estudados. ....	25
Tabela 5 - Dados médios de produtividade de soja por diferentes datas de semeadura .....	28
Tabela 6 - Dados médios de produtividade de soja de diferentes municípios da região .....	29
Tabela 7 - Eficiência de produtividade de soja nos municípios da região .....	30
Tabela 8 - Dados médios de produtividade de soja em diferentes CAD .....	33

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	25
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

## 1. INTRODUÇÃO

A cultura da soja é responsável por 35,3 % da receita gerada pelo setor agrícola brasileiro (IBGE, 2020). A sua relevância econômica se deve pelas inúmeras maneiras do seu aproveitamento desde alimentação animal até indústrias de processamento alimentício. Tanta importância que, o Brasil produziu aproximadamente 114 milhões de toneladas na safra 2018/2019 com consideráveis reflexos na economia.

A microbacia do Alto do Paranapanema está localizada no sudoeste do Estado de São Paulo que, abrange 36 municípios, sendo a agricultura a principal atividade. No setor agrícola destaca na produção agrícola de milho, feijão, cana de açúcar e a produção de soja corresponde com 16,6% do volume estadual. No entanto, a falta de pesquisas e indicadores de produtividade da região são alguns dos entraves, visto que os fatores determinantes e limitantes em função dos dados meteorológicos são desconhecidos (STEINMETZ, 2000).

Tradicionalmente, a cultura da soja é praticada sob sequeiro, porém com os adventos da instabilidade meteorológica (veranico, variabilidade da chuva, atraso no plantio, etc.) associado ao acesso à tecnologia de irrigação, esta realidade tem alterado (EMBRAPA, 2016). Além do aumento da produtividade e qualidade dos produtos, esse sistema reduz perdas por deficiências hídricas acarretada pelo fenômeno de veranico, que causam perdas consideráveis em determinadas fases fenológicas. Logo, o sistema de irrigação pode contribuir de forma a suplementar a necessidade hídrica da cultura, com base nas características agrometeorológicas da região.

A época de semeadura está diretamente relacionada com as condições de fotoperíodo, temperatura média, umidade no ciclo de produção, entre outros. Sendo assim, é um manejo que requer atenção. Além disso, pode alterar algumas características agrônomicas fundamentais, como altura e arquitetura de planta, que pode influenciar na qualidade final dos grãos de soja (MEOTTI et al., 2012).

Os modelos de simulação de culturas visam contribuir e aperfeiçoar as tomadas de decisões do sistema de produção. A plataforma DSSAT (do inglês *Decision Support System for Agrotechnology*) é uma das principais ferramentas de modelagem, que tem como finalidade prever fatores de produtividade, baseado nos aspectos físicos e fisiológicos da cultura. Portanto, a presente proposta, objetiva avaliar a produtividade da soja em função das diferentes datas de semeadura, lâminas de irrigação e municípios, por meio de modelagem na região da microbacia do Alto do Paranapanema.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Brasil é reconhecido internacionalmente como potência agrícola. A localização geográfica, extensas áreas e a incorporação de tecnologia colocam o país em evidência neste setor. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017) a produção agrícola nacional ultrapassa 400 itens, sendo destaque na exportação de açúcar, café, concentrado de laranja, soja, milho, entre outros.

Essa mesma instituição correlacionou a taxa de produção em função do retorno financeiro e concluiu que a soja, milho e cana de açúcar representam 62,4% da receita total gerada pelo setor agrícola brasileiro, com destaque para a soja com 35,3 % alcançando um montante de R\$ 112,2 bilhões de reais (IBGE, 2020).

A soja (*Glycine Max* L.) é uma planta pertencente à família das leguminosas originária da Ásia. Iniciou-se o processo de domesticação e melhoramento ainda no local de origem (EMBRAPA, 2004). As navegações comerciais contribuíram para dispersar os resultantes dos primeiros ensaios de melhoramento para a Europa, que deu continuidade no processo. O primeiro registro da soja no Brasil foi em 1882, na Bahia. No entanto, a expansão da soja pelo país teve início a partir da década de 1970, sendo hoje segundo maior produtor mundial (EMBRAPA, 2004). É uma dicotiledônia, na qual requer condições climáticas ideais para o seu pleno desenvolvimento, entre elas: precipitação, temperatura e fotoperíodo favoráveis (GIANLUPPI et al., 2009).

Aproximadamente 90% do peso da planta é composto por água, sendo de grande relevância em dois períodos do desenvolvimento da soja: A fase de germinação/emergência e floração/enchimento de grãos (FARIAS et al., 2007). Neste primeiro período, a soja é sensível quanto ao volume de água ofertada, isto é, requer no mínimo 50% de seu peso em água para garantir o pleno processo de germinação, bem como a capacidade de campo disponível (CAD) não deve extrapolar a faixa de 50 a 85 % (FARIA et al., 2007). No segundo período, é considerado o ápice da necessidade hídrica com aproximadamente 7 a 8 mm/dia, sendo entre 450 a 800 mm por ciclo. O não atendimento destas exigências acarreta alterações fisiológicas, fechamento estomático, dobramento foliar, entre outros, de modo a refletir no rendimento de grãos (EMBRAPA, 2011).

A faixa de temperatura ótima para a cultura da soja encontra-se entre 20 a 30°C e a temperatura do solo ideal de aproximadamente 25°C, que garante germinação rápida e uniforme. (GIANLUPPI et al., 2009). Temperaturas de solo inferior a 20°C pode comprometer a taxa de germinação e conseqüentemente a produtividade. Segundo Farias et al. (2007) regiões com temperaturas médias inferiores a 10°C e superior a 40°C são considerados

locais impróprio para a cultura, de modo a comprometer o crescimento, desenvolvimento, tombamento fisiológico e danos à floração.

A soja é uma cultura altamente sensível ao fotoperíodo, considerada planta de dias curtos, sendo um fator de restrição da cultura no Brasil. Isto porque, a latitude do país proporciona dias longos, atrasando assim o florescimento. É importante salientar que o fotoperíodo é um parâmetro quantitativo, ou seja, a floração ocorre, porém o momento de indução é dependente da taxa de dias curtos (RODRIGUES et al., 2001). Posto isto, pesquisas brasileiras desenvolveram cultivares denominadas de período juvenil longo, na qual mostrou-se menos sensível ao fotoperíodo, tendo como resultante florescimento mais cedo (FARIAS et al., 2007).

Segundo a Associação dos Produtores de Soja e Milho de Mato Grosso (APROSOJA-MT, 2015), a soja brasileira participa de variados bens de consumo, por exemplo, setores industriais como cosméticos, farmacêutica, tintas e plásticos que representam apenas 7 % da demanda e 49 % são destinados para alimentação humana e animal através dos processamentos de óleos e farelos. Por fim, 44 % são exportados in natura, sendo a China a maior importadora deste produto.

No entanto, o volume exportado in natura chama atenção em relação aos produtos processados de soja, como já referido anteriormente. Esta conduta política comercial acarreta variados efeitos negativos ao Brasil, pois fragiliza o rendimento do produto e diminui a absorção de mão de obra qualificada salienta o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (2017). Além de que, o crescimento do setor agroindustrial está fortemente correlacionado com aumento da produtividade agrícola, consequentemente, a taxa de crescimento do PIB (KALDOR, 1996). Logo, em virtude deste entrave, o país desvaloriza a possibilidade de agregar valor e desfrutar dos benefícios da industrialização da soja.

Um outro obstáculo a considerar é a deficiência logística, bem como profissionais qualificados neste ramo. A subutilização das hidrovias, das malhas ferroviárias e rodovias são visíveis, porém as melhorias são exequíveis de modo a impactar profundamente tanto na qualidade do produto como no custo de produção (RODRIGUES et al., 2014).

Outro fator relevante para sojicultura brasileira é o aumento da temperatura média do planeta, que pode refletir negativamente na produção brasileira (EMBRAPA, 2008). É importante ressaltar a responsabilidade do agronegócio juntamente com variados setores encarregados na tentativa de mitigar tal efeito. Pois, simulações têm-se mostrado pessimistas nas projeções produtivas, com perdas de até 40% em 2070 (PILAU, 2018). Logo, é imprescindível esforços provenientes de toda a sociedade, sobretudo dos setores políticos no

incentivo a pesquisas científicas, sendo ela, responsável por 60% da produtividade agropecuária do país de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2018).

A microbacia do Alto Paranapanema situado a sudoeste do Estado de São Paulo, abrange 36 municípios, sendo a agricultura a principal atividade econômica da região, com destaque a cultura de soja, milho, feijão, batata e cana de açúcar conforme salientar o comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (CBH-ALPA, 2015). A produção de soja nesta região representa 16,6% do volume estadual, sendo o município de Itapeva maior produtor do estado.

Neste território, a concentração de tecnologia de irrigação do tipo pivô central é bastante difundida. Segundo a Agência Nacional de Águas (2019) 1668 pivôs centrais estão registrados na UGRHI 14. Isto porque a ocorrência de veranicos tanto na fase de germinação-emergência e floração-enchimento de grãos pode causar até perda total da lavoura. (CRUSCIOL et al., 2003).

O propósito da irrigação almeja alta produtividade, maior qualidade aos produtos e redução das perdas por deficiência hídrica (COUTO, 2003). As áreas irrigadas da cultura de arroz (CRUSCIOL et al., 2003), soja (HERZOG et al., 2004), cana de açúcar (GAVA et al., 2011), entre outras, mostraram aumento na produção de até 37% em comparação com as áreas de cultivo em sequeiro. Em consonância, Couto et al. (2003) cita aumento de produtividade média da agricultura irrigada mundial de 2,4 vezes superior em relação a agricultura sequeira.

Nessa região, o cultivo da soja é praticado sob sequeiro. Porém, diante a acessibilidade tecnológica e advento de alguns fatores tangíveis e intangíveis pertinentes a cultura (veranico, variabilidade da chuva, atraso no plantio, entre outros), esta realidade tem-se alterado (EMBRAPA, 2016). De acordo com a classificação climática Köppen Brasil de Alvares et al. (2013), a região é caracterizada como clima subtropical Cfa. Ou seja, em virtude disto, o sistema de produção de soja atrelado a irrigação tem-se foco suplementar, que significa que o maior volume de água consumida pela cultura é proveniente da chuva.

Segundo Cupolillo (2008) veranico é caracterizado como um período de ausência de precipitação durante a estação chuvosa, característico de áreas subúmidas e úmidas. Ou seja, sequências de dias secos que constitui consideráveis risco e impactos negativos devido a imprevisibilidade deste fenômeno. Hernandez et al. (2003) cita as quedas de produção agrícola em virtude do veranico, que variam conforme a intensidade e duração do estresse hídrico, com também o estágio fenológico da cultura. Por exemplo, Espinoza et al. (1980) observou queda produtiva de até 60 % na cultura do milho em estágio de floração. Este

mesmo autor, encontrou rendimento de até 55% superior na cultura da soja irrigada em comparação aos cultivos conduzidos no sequeiro.

A época de semeadura também é uma variável que requer atenção (PEIXOTO et al., 2000). Martins et al. (1999) lembra que, de forma isolada, o manejo cultural em questão, é o que mais causa impacto na produção. Barros et al. (2003) define como conjunturas de fatores ambientais que acarreta efeitos na planta. Ou seja, a época de semeadura está atrelada diretamente com as condições de fotoperíodo, temperatura média, umidade no ciclo de produção, associado as características genótípicas para determinadas circunstâncias (BARNI e BERGAMASCHI, 1981). Portanto, altas produtividades é possível, ao culminar condições favoráveis em todos os estágios de desenvolvimento da planta. A época de semeadura também é passível de alterar algumas características agronômicas fundamentais, como altura de planta, altura de inserção da primeira vagem, número de ramificações, diâmetro de caule, acamamento, e arquitetura de planta (EMBRAPA, 1996).

Motta et al. (2002) salienta que para obtenção de grãos de soja com melhor qualidade, a semeadura deve ser realizada no período de 03 a 20 de novembro nas condições brasileiras. Nakagawa et al. (1983) amplia para outubro a dezembro para o estado de São Paulo, porém com destaque para novembro. Já Pereira et al. (1979) no Paraná, Paolinelli et al. (1984) em Minas Gerais e Tragnago e Bonetti (1984) no Rio grande do Sul concluíram, de modo geral, que os grãos de melhores qualidades são semeados a partir do início de dezembro. Cruz et al. (2010) observou que no Recôncavo da Bahia os melhores rendimentos de grãos foram obtidos em período de semeadura anterior a 14 de dezembro, pois em datas posteriores, houve redução na fase fenológica em virtude do atraso da semeadura, que também, foi observado por Fietz e Rangel (2008) na região de Dourados – MS.

Outro fator a considerar é a variabilidade da chuva, no qual Conti (2005) explica como um produto proveniente da interação espaço – tempo e fatores edafoclimático, sendo que sua ação é observada em prazos aleatórios. Carmello (2013) analisou este fator em função a produtividade da soja na bacia do rio Paranapanema e observou consideráveis interferências na produtividade da soja em consequência das distribuições das chuvas. Em consonância, Silva (2013) enfatizou que a distribuição da precipitação influenciou a produtividade da soja, sobretudo durante a fase de emergência, reprodutiva e enchimento de grãos.

Além disto, com o advento de cultivares mais precoces, as semeaduras antecipadas obtiveram mais atenção, pois assim, minimiza a pressão proveniente de pragas e doenças da soja, como também as condições climáticas são mais favoráveis pela baixa incidência de geadas para o milho de segunda safra que é realizado em sequência. Por outro lado, a

semeadura antecipada deflagra risco em virtude da baixa disponibilidade de água no solo neste período (FIETZ et al., 2013). Portanto, o sistema de irrigação proporciona melhores condições para ampliar a produtividade da soja e a cultura em sucessão, com possibilidade de terceira safra no mesmo ano agrícola, bem como mitigar os impactos do veranico e variabilidade de chuvas (EMBRAPA, 2015).

Para que seja possível usufruir dos recursos hídricos disponíveis através de rios, lagos ou subterrâneas faz-se necessário solicitar licença ao poder público. Desta forma, garante boa administração e promove à compatibilização harmônica entre os anseios da sociedade, lembra o Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE, 2018).

Vinculado a isto, a agricultura irrigada precisa ser eficiente no uso da água por meio da estruturação de irrigação, manejo adequado, gestão do uso de água, bem como associar técnicas que permitem aumento da eficiência (COELHO et al., 2005). Infelizmente, existem variados projetos de irrigação que não levam em consideração as necessidades das culturas, em razão disto, podem tanto exceder as necessidades, como não serem suficientes, resultando em uma baixa eficiência (THEISEN et al., 2009), que causa desequilíbrio no custo-benefício da produção (CARLESSO et al., 2000).

O manejo de irrigação consiste na aplicação de água no momento correto e na quantidade exigida pela cultura, ou seja, avaliar o sistema planta-solo-atmosfera para obter panorama da situação (SOARES, 2010). Sendo assim, para ampliar a eficiência da irrigação, o produtor precisa-se basear em turno de rega, através da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) e da lâmina real necessária (ARAÚJO et al., 2006).

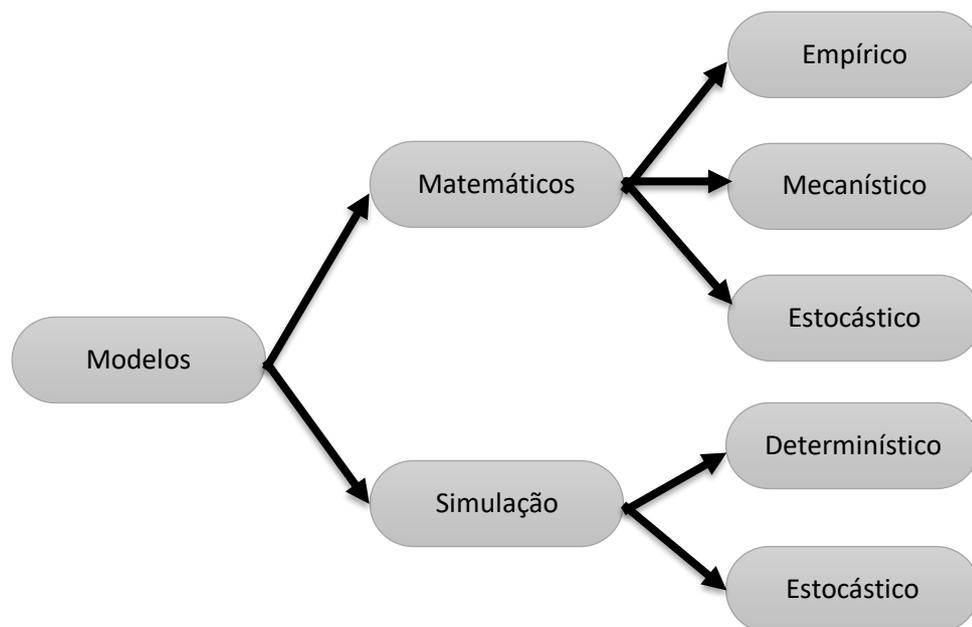
Também, alguns sensores podem contribuir na formação de parâmetros acurados para irrigação, por exemplo, sonda de nêutrons, sonda de capacitância, refletômetros de TDR, tensiômetros, equipamentos agrometeorológicos; e sistemas de planejamentos com auxílio de aplicativos computacionais, como também, sistema de modelagem de produção agrícola (MOREIRA et al., 2007).

Inevitavelmente, o setor primário é dependente dos recursos naturais e dos processos biológicos, sendo que tais características representam riscos aos investidores e produtores. Em virtude disto, a modelagem pode atenuar esse entrave, através do auxílio na tomada de decisão, eficiência no uso hídrico, previsão de produtividade e informações referente a limites de produções de diversas regiões (LISSON et al., 2005). Outras utilidades como compreender o comportamento da cultura em um determinado ambiente (ITTEKSUM et al., 2003) e comprovação de teorias (BOOTE et al., 1996), também podem ser observados.

Os modelos atuais geralmente estão atrelados ao balanço do carbono e hídrico, sendo eles associados a absorção dos nutrientes, presença de pragas, doenças e plantas daninhas (PENNING DE VRIES, 1982). Logo, um modelo tem a ideia de caracterizar um sistema real por meio de um conjunto de equações para estimar crescimento, desenvolvimento, produtividade, interação entre variáveis ambientais e coeficiente genético e por fim, representá-las em componentes de produção (MONTEITH, 1996).

Os modelos podem ser divididos em duas vertentes, sendo elas, matemáticos e simulações (Figura 1). A primeira vertente do modelo objetiva-se descrever por meio de expressões matemáticas um determinado fenômeno, subdividido em empírico, mecânico e estocástico (PAUTIAN et al., 1992), enquanto que a segunda vertente busca interpretar estes fenômenos em função do tempo, ou seja, a longo prazo que também são subdivididos em determinístico e estocástico.

Figura 1 - As divisões e as subdivisões dos modelos



Fonte: adaptado de Corrêa et al. (2011)

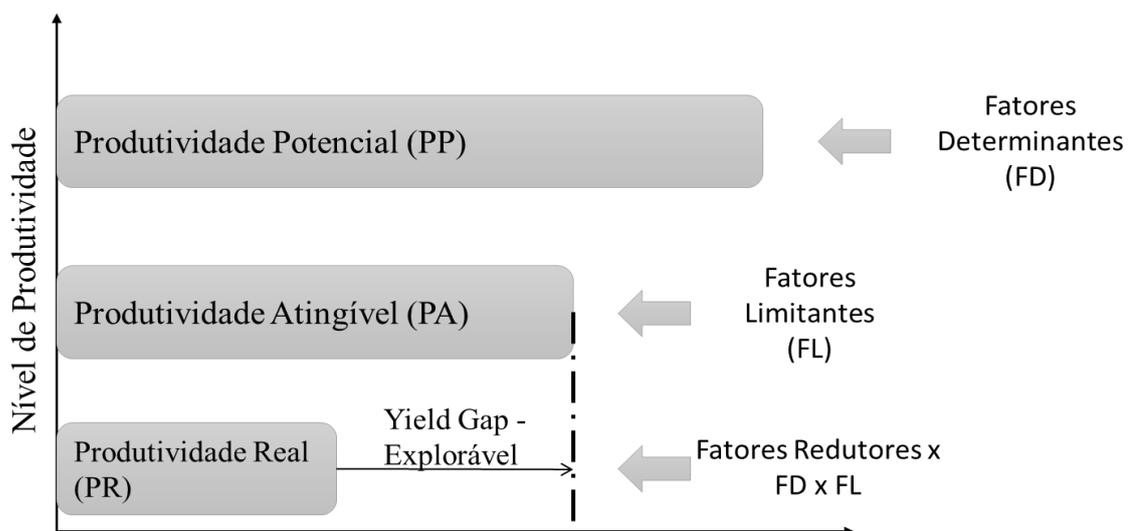
Segundo Corrêa et al. (2011), os modelos empíricos observam os dados provenientes das análises de regressões, sem o interesse em investigar e compreender as causas pormenores. Este mesmo autor cita que os modelos mecânicos buscam descrever as causas do processo por meio de princípios físicos, químicos e biológicos. Os modelos estocásticos introduzem no sistema a aleatoriedade, ou seja, os resultados são permeados pela probabilidade (LAW e KELTON, 1991). Por fim, os modelos determinísticos preocupam-se em convergir variados eventos em um único fator de comportamento previsível pela ausência da natureza randômica.

As vantagens proporcionadas pela modelagem são os baixos custos, velocidade de processamento, qualidade das informações, criação de cenários inéditos, ideais e personalizados. Porém, além de vantagens, apresentam algumas limitações, por exemplo, conhecimento altamente especializado, processo de validação dos modelos são onerosos, fidedignidade e custos dos dados em campos e presença de equipes multidisciplinares em virtude da complexidade da agricultura (PESSOA et al., 1997).

Estimar e compreender a produtividade é o ponto chave da modelagem. Sendo assim, a produtividade da cultura é dividida em: produtividade potencial (PP), produtividade atingível (PA) e produtividade real (PR) (Figura 2) (SENTELHAS et al., 2015).

A produtividade potencial (PP) é a máxima produtividade da cultura determinada pelos fatores determinantes (material genético, população de plantas, radiação solar, fotoperíodo e temperatura) sem a presença de fatores limitantes (limitação hídrica e nutricionais) e fatores redutores (pragas, doenças e plantas daninhas). Já a produtividade atingível é influenciada pelos fatores determinantes e fatores limitantes, ou seja, reflete os déficits hídricos e nutricionais. Por fim, a produtividade real é a interação dos três fatores supracitados, determinantes, limitantes e redutores. Sendo assim, a lacuna de produtividade (do inglês Yield Gap) explorável é o máximo de incremento de produtividade real que um produtor pode alcançar por meio de tecnologias e manejos acurados.

Figura 2 - Níveis de produtividades e seus respectivos fatores de influências



Fonte: adaptado de Sentelhas et al. (2015) e Marin et al. (2018)

Isto posto, o Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia, (DSSAT do inglês Decision Support System for Agrotechnology Transfer) é um conglomerado de modelos agrícolas em uma plataforma computacional amplamente utilizado

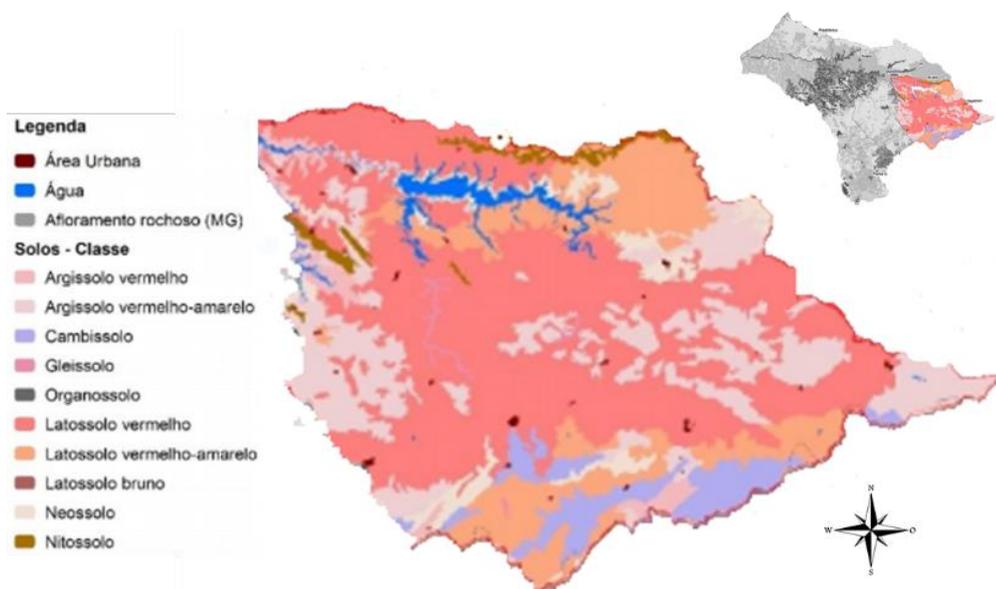
no mundo (MARIN, 2014) que simula crescimento, desenvolvimento e produtividade de mais 42 culturas em função da dinâmica solo-planta-atmosfera (HOOGENBOOM et al., 2015). A maioria dos modelos são mecanicistas e determinísticos que simula o tempo dos estágios vegetativos, acúmulo de biomassa e produção de grãos (DEJONGE et al., 2012) em função características específicas da cultura (duração dos estágios fenológicos, estruturas, tamanho e formato de folhas, etc.), condições do solo, do clima e do manejo (cultivar, espaçamento, densidade, data da semeadura, fertilização e irrigação) (JONES et al., 2003).

O modelo de simulação mecanístico Cropgro-soybean (BOOTE et al., 1997) incluído na plataforma do DSSAT, tem como finalidade prever fatores de produtividade da soja, tendo como base os aspectos físicos e fisiológicos da cultura, sendo elas: fotossíntese, respiração, taxa de biomassa, fenologia, crescimento vegetativo, evapotranspiração, etc (DALLACORT et al., 2006). Este modelo também, é sensível as variações meteorológicas, bem como permite a inserção de outros modelos que simula efeito de pragas, doenças, técnicas de preparo e correção do solo, entre outros, com intuito de aumentar sua eficiência (HOOGENBOOM et al., 2015). Batisti (2016) observaram tal eficiência para o crescimento, desenvolvimento e rendimento de soja irrigada mediante as calibrações necessárias.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido na região da microbacia do Alto do Paranapanema, composto por 38 municípios, localizado no Sudoeste Paulista. Foram utilizados dados meteorológicos de 14 municípios, sendo eles: Apiaí, Avaré, Capão bonito, Ipaussu, Iporanga, Itaberá, Itapeva, Itararé, Itapetininga, Paranapanema, Riversul, Sarutaiá, Taquarituba, Manduri. O clima, segundo a classificação climática Köppen Brasil de Alvares et al. (2013) é de Cfa clima subtropical úmido com precipitação superior a 30 mm no mês mais seco. O solo predominante é Latossolo vermelho com textura argilosa como pode ser observada na Figura 3 (EMBRAPA, 2013).

Figura 3 – Classe de solos na microbacia do Alto do Paranapanema



Fonte: adaptado do IAC/SP & Embrapa (2000)

As simulações de produtividades foram realizadas por meio do modelo Cropgro-soybean, que faz parte do sistema DSSAT v4.7.5., de modo a analisar as safras de 2009 a 2019. Os coeficientes de desenvolvimento da cultura utilizadas como parâmetro foram: índice de área foliar, evapotranspiração, transpiração, estágio fenológico e produtividade de grãos. Foram também realizadas ajustes de calibração de granulometria, atributos do solo na camada superficial e subsuperficial com parâmetros propostos pela EMBRAPA (2003) do Sudoeste Paulista, estimativa da capacidade de campo e ponto de murcha permanente em solo por meio das funções de pedotransferência proposta por SILVA (2018) e densidade de solo (MARCOLIN E KLEIN, 2011). Por fim, a calibração referente ao material genético, denominado de Grupo de maturação 6 do modelo CROPGRO-Soybean dos coeficientes mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficiente genético do grupo de maturação 6 do modelo CROPGRO-Soybean

Coeficiente	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF	
	12,58	0,311	20,2	9,0	16,0	35,60	18,00	
	SFDUR	PODUR	LFMAX	SLAVAR	SIZLF	XFRT	WTPSD	SDPDV
	23,00	10,0	1,030	375,0	180,0	1,00	0,18	2,05

Fonte: FERREIRA (2018)

\*CSDL-Comprimento crítico do dia, PPSEN-Inclinação da resposta relativa do desenvolvimento para com o fotoperíodo (1/h); EM-FL-Período entre a emergência da planta e o aparecimento da primeira flor (dias fototermais); FL-SH-Período aparecimento da primeira flor; FL-SD-Período entre o aparecimento da primeira flor e o início da formação de grãos (grau-dias); SD-PM - Período entre o início da formação de grãos e a maturidade fisiológica (grau-dias); FL-LF - Período entre o aparecimento da primeira flor e o final da expansão foliar (grau-dias); SFDUR - Duração do período de enchimento de grãos nas vagens em condições normais de desenvolvimento (grau-dias); PODUR - Tempo necessário para a cultivar atingir condições ideais de legumes (grau-dias); LFMAX - Taxa máxima de fotossíntese da folha em taxa ótima de temperatura (30 °C, 350 ppm CO<sub>2</sub>, alta luz) (mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>); SLAVAR - Área foliar específica sob condições de crescimento padrão (cm<sup>2</sup>); SIZLF - Tamanho máximo da folha completamente expandida (cm<sup>2</sup>); XFRT - Máxima fração do crescimento diário particionada para legume e grão; WTPSD - Peso máximo por grão (g); SDPDV - Número médio de grãos por vagem sob condições de crescimento padrão (unidade vagem-1).

As simulações foram conduzidas de forma a atender as especificidades da região através das variáveis meteorológicas diárias, obtidas através do Sistema de Monitoramento Agrometeorológica do Brasil – Agritempo (2021), como temperatura máxima e mínima do ar (°C) e precipitação pluviométrica diária (mm). Em dados faltantes, foram realizados a interpolação em função do dia anterior e seguintes para a estimativa. Já a radiação solar global foi estimada com o método Hargreaves e Samani (1985) conforme a equação (1).

$$Qg = k \sqrt{(T \max - T \min)} Qo \quad (1)$$

Onde:

- $Qg$  - radiação solar estimada (MJ . m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)
- $Qo$  - radiação solar extraterrestre (MJ . m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)
- $T$  - temperatura (°C)
- $K$  - Adotado 0,16 °C<sup>-0,5</sup> para localidade distante do oceano e 0,19°C<sup>-0,5</sup> para litorâneas, número adimensional.

O cálculo da  $Qo$  foi realizado conforme as características locais, segundo a metodologia da FAO-56 (Allen et al. 1998) com a equação (2).

$$Qo = 37,6 J0 \left[ \left( \frac{\pi}{180} \right) hn * \sin\phi * \sin\delta + \cos\phi * \sin\delta * hn \right] \quad (2)$$

Onde:

- $Qo$  - radiação solar extraterrestre (MJ/m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)
- $J0$  - constante solar (MJ/m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)
- $\delta$  - declinação solar
- $\phi$  - latitude
- $hn$  - Ângulo horário do nascer do sol (Graus).

A quantificação real produtiva observada entre 2009 e 2019 nos respectivos municípios investigados foram auferidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no Sistema de Recuperação Automática ([www.sidra.ibge.gov.br](http://www.sidra.ibge.gov.br)), que contribuíram para parear a eficiência de produtividades dos municípios e consequentemente quebra de rendimento (MARIN et al., 2000).

Além dos diferentes municípios que compuseram a simulação, considerou-se também diferentes datas de semeaduras e lâminas d'água. Em consonância com a lei 4.218 de 11 de julho de 2012 que estabelece diretrizes do vazio sanitário para o estado de São Paulo, a semeadura foi realizada em 8 datas distintas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Datas da simulação de semeadura da soja

Mês	Dia de semeadura
Setembro	15°
	29°
Outubro	13°
	27°
Novembro	10°
	24°
Dezembro	8°
	22°

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Em relação as lâminas d'água, utiliza-se como parâmetro a capacidade de água disponível (CAD) do solo com base na profundidade efetiva 0,54 m mostrada na Tabela 3. A CAD 100% é o referencial para a estimativa da produtividade potencial do trabalho.

Tabela 3 - Simulação de irrigação em função da CAD

Tratamentos em função da capacidade de água disponível no solo						
x	T1	T2	T3	T4	T5	T6
CAD	50%	60%	70%	80%	90%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Os dados referentes a produtividade de grãos foram submetidos à ANOVA com probabilidade de erro de 5%. Em caso de significância para os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, e para eficiência da microbacia do Alto do Paranapanema os resultados foram submetidos à análise de regressão. O programa estatístico utilizado foi o R Core Team (2019). Por fim, por meio de *softwares* de georreferenciamento *Source Geographic Information System* (SAGA GIS 2.3.2) foi desenvolvido o mapa de produtividade

da região através do método geostatístico de krigagem (EMBRAPA, 2015) a fim de extrapolar a produtividade aos demais municípios da microbacia do Alto do Paranapanema.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A região da microbacia do Alto do Paranapanema tem variação sazonal tanto em regime térmico, quanto precipitação. A precipitação média mensal da região é de 119,8 mm, sendo a média mínima no mês de agosto (48,4 mm) e máxima em janeiro (224,3 mm). Já a temperatura média é de 20,3 °C, enquanto que o mês de julho apresenta a temperatura média mínima (8,3 °C) e o mês de fevereiro a máxima (31,3 °C). A Tabela 4 apresenta as médias de precipitação e temperatura do período por municípios.

Tabela 4 - Caracterização climática dos municípios estudados.

	Temp. med (°C)	Temp. min (°C)	Temp. max (°C)	Med. Precip. anual (mm)	Precip. Med. Mensal	Precip. med. Min (mm)	Precip. med. max (mm)
Apiáí	18,7	7,4	30	1531,4	127,6	70,7	195,6
Avaré	21,4	10,7	31,1	1486,3	123,8	37,9	268,9
Capão Bonito	19,4	8,2	29,9	1261,5	105,1	37,0	215
Ipaussu	22,5	10,4	33	1372,5	127,6	36,6	233,8
Iporanga	21,9	10,5	34,1	1497,9	124,8	65,5	190,7
Itaberá	20,7	8,6	31,5	1354,7	112,9	46,6	200,4
Itapetininga	20,2	6,3	31,5	1357,5	113,1	34,7	219,5
Itapeva	20,7	9,3	31,3	1426,4	118,8	45,5	205,9
Itararé	16,8	6	27,3	1672,6	139,4	66,7	280,3
Manduri	20,9	7	32,1	1421,5	118,4	44,2	241,8
Paranapanema	20	8,4	30,4	1367	113,9	43,1	194,7
Riversul	21	8,7	31,9	1422,7	118,5	58,5	245,1
Sarutaiá	20,1	9,1	29,6	1456,1	121,3	46,4	243,1
Taquarituba	20,7	7,7	31,7	1346	112,1	44,7	205,8
<b>Média</b>	<b>20,4</b>	<b>8,5</b>	<b>31,1</b>	<b>1426,7</b>	<b>119,8</b>	<b>49,3</b>	<b>224,3</b>

O período de análise corresponde a 10 anos (2009 a 2019) e a unidade de precipitação é apresentada em mm, enquanto de temperatura em °C. Temp.med: Temperatura média do período; Temp.min: Temperatura média mínima do período; Temp.max: Temperatura média máxima do período; Precip.total: Soma da precipitação anual média do período; Precip.med: Precipitação média mensal do período; Precip.min: Precipitação média mínima do período; Precip.max: Precipitação média máxima do período.

Apiáí tem o segundo maior volume total médio de precipitação da região (1531,3 mm), segunda precipitação média mensal (127,65 mm) e no mês de agosto é o município com maior volume de chuva (70,7 mm). Avaré tem o segundo maior volume máximo de chuva (268 mm) no mês de janeiro, segunda maior temperatura média (21,4 °C) e também a maior temperatura mínima (10,7 °C).

Capão Bonito apresenta o menor volume total de chuva da região (1261,5 mm), conseqüentemente a menor média anual (105,1 mm) e a segunda menor temperatura média (19,4 °C). O município de Ipaussu tem a terceira maior precipitação média anual (127,61 mm) e também a maior temperatura média (22,5 °C). Já Iporanga, maior temperatura média máxima (34,1 °C), enquanto que Itapetininga a menor precipitação mínima da região (34,7 mm).

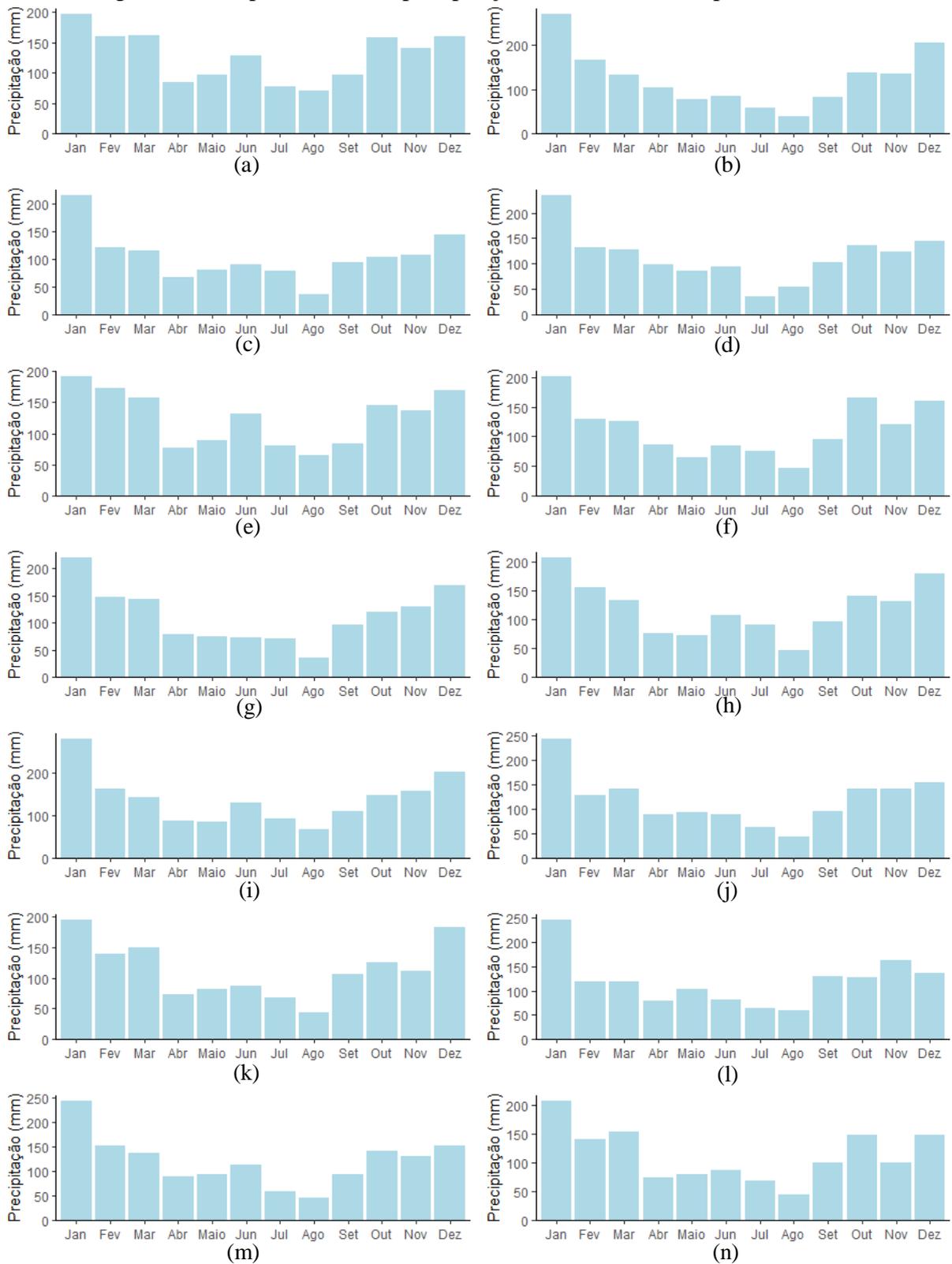
Em destaque para o município de Itararé, que contém a menor temperatura média (16,8 °C), menor temperatura média mínima (6 °C), maior precipitação média anual (139,4 mm), maior precipitação média máxima (280,3 mm) e maior volume total médio da região (1672,6 mm)

Na Figura 4 apresenta a distribuição média de chuva em função do tempo. É possível perceber que os maiores volumes de chuvas estão concentrados entre outubro a março, enquanto que abril a setembro os menores volumes. Os municípios Apiaí, Iporanga, Itapeva e Itararé apresentaram um pico de precipitação em junho em relação aos meses adjacentes, enquanto que os municípios Capão Bonito, Itapetininga, Paranapanema apresentaram um volume médio inferior neste mesmo mês, porém melhor homogeneidade de distribuição no período de seca.

Já Avaré apresenta queda acentuada a partir de janeiro até agosto, com retomada apenas em setembro. Em Ipaussu segue o mesmo comportamento, porém além da suavidade da queda, a retomada é mais precoce.

Como já mencionado, o mês de janeiro apresenta maior volume de chuva em todos os municípios do estudo, no entanto apenas os municípios de Apiaí e Iporanga mantêm relativamente constante esse volume para o mês de fevereiro e março, enquanto que os demais municípios apresentaram considerável queda.

Figura 4 - Comportamento de precipitação médio dos municípios estudados



Média de precipitação (mm) do período de 2009 a 2019 dos municípios: (a) Apiaí, (b) Avaré, (c) Capão Bonito, (d) Ipaussu, (e) Iporanga, (f) Itaberá, (g) Itapetininga, (h) Itapeva, (i) Itararé, (j) Manduri (k) Paranapanema, (l) Riversul, (m) Sarutaia (n) Taquarituba

A partir da análise de variância (ANOVA), foi constatado que as médias de produtividade de soja são estatisticamente diferentes ( $p$ -valor  $<0,05$ ) em função das datas de

semeadura (Tabela 5). As datas entre 15 de setembro a 24 de novembro apresentaram as maiores médias com variação de 2775 a 2473 kg ha<sup>-1</sup> e sem diferença estatisticamente significativa entre elas, enquanto que o mês de dezembro as piores de 2199 a 1941 kg ha<sup>-1</sup>.

Tabela 5 - Dados médios de produtividade de soja por diferentes datas de semeadura

Data de semeadura	Produtividade de soja (kg ha <sup>-1</sup> )
29/9	2775 a
13/10	2771 a
27/10	2745 a
15/9	2727 a
10/11	2612 a
24/11	2473 a b
8/12	2199 b c
22/12	1941 c

\*Médias seguidas por mesma letra na coluna são diferentes pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV): 31.2%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Os estudos de Motta et al. (2002) mostraram melhores rendimentos de grãos de soja na semeadura realizada no mês de novembro na região de Maringá. Já Nakagawa et al. (1983) amplia o período para o mês de outubro a dezembro para o estado de São Paulo. O presente estudo, converge com os estudos supracitados, exceto em relação a semeadura no mês de dezembro. Porém, para a região sul do país, em geral os grãos apresentam maior rendimento semeados a partir do início de dezembro (BORNHOFEN et al., 2015). É importante lembrar que o melhor período de semeadura está diretamente atrelado com a temperatura do ar, fotoperíodo e umidade do solo, que são influenciados pela latitude e altitude da região.

Além das características edafoclimáticas, é recomendado atentar-se a cultivar utilizada e sua interação ambiental (BORNHOFEN et al., 2015), sobretudo em anos com ocorrência de veranico durante o crescimento vegetal (EMBRAPA, 2012). Logo, as características genotípicas também é um fator determinante na seleção da melhor época de semeadura.

Segundo a Tabela 6, os municípios com maiores potenciais sojicultura na região do Alto do Paranapanema foram Apiaí com a maior produtividade média da região de 3040 kg ha<sup>-1</sup>, seguido pelos municípios de Itararé 2934 kg ha<sup>-1</sup>, Sarutaiá 2755 kg ha<sup>-1</sup>, Paranapanema 2719 kg ha<sup>-1</sup> e Capão Bonito 2637 kg ha<sup>-1</sup> sem diferença estatisticamente significativa entre eles. Em contra partida, Ipaussu obteve a menor produtividade média 2044 kg ha<sup>-1</sup> seguido pelos municípios de Itapetininga, Riversul, Itaberá, Manduri e Taquarituba.

Tabela 6 - Dados médios de produtividade de soja de diferentes municípios da região

Municípios	Produtividade de soja (kg ha <sup>-1</sup> )
Apiaí	3040 a
Itararé	2934 a b
Sarutaiá	2755 a b c
Paranapanema	2719 a b c
Capão Bonito	2637 a b c
Itapeva	2581 b c d
Avaré	2543 b c d
Iporanga	2542 b c d
Itapetininga	2488 b c d e
Riversul	2461 c d e
Itaberá	2341 c d e
Manduri	2303 c d e
Taquarituba	2176 d e
Ipaussu	2044 e

\*Médias seguidas por mesma letra na coluna são diferentes pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV): 32.6%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O município de Itapeva é o maior produtor de soja do estado, porém em volume absoluto. Segundo a Coordenadoria de Assistência Técnicas Integral (CATI, 2017) o fator determinante para alavancar o município foi o aumento da área plantada em aproximadamente 30%. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019) os cinco municípios da região com maiores áreas plantadas de soja em hectares são Itapeva (107.205), Itaberá (92.445), Itapetininga (58.265), Taquarituba (32.600) e Avaré (23.860). No entanto, conforme o resultado do presente estudo, tais municípios não apresentam as melhores condições edafoclimático para a cultura em questão, de modo que a alta produção está a atrelado com a ampliação de área. Os municípios com maiores produtividade média de soja demonstrados pela Tabela 4, tem média de área plantada de aproximadamente 18 mil hectares. Portanto, é possível perceber o erro estratégico geográfico de implantação da cultura na região, onde as maiores áreas plantadas não correspondem com os municípios com maiores potencias em termo produtividade.

Em consonância, a Tabela 7 apresenta a eficiência de produtividade em relação com a produtividade atingível e produtividade potencial. A faixa de eficiência compreende de 47,6 a

64,7% com média de 55,2%. Como já dito, é possível também observar a incongruência entre a área plantada e nível de eficiência de produtividade. Os municípios com maiores potencialidades possuem eficiência superior a 57% enquanto que os municípios como Taquarituba, que contém as maiores áreas plantadas do estado atinge apenas 47,6% de eficiência.

Tabela 7 - Eficiência de produtividade de soja nos municípios da região

Municípios	Produtividade		Eficiência (%)
	Atingível (kg ha <sup>-1</sup> )	Potencial (kg ha <sup>-1</sup> )	
Apiaí	3040	4700	64,7
Itararé	2934	4618	63,5
Sarutaiá	2755	4641	59,4
Iporanga	2542	4421	57,5
Parapanema	2719	4744	57,3
Avaré	2543	4457	57,1
Capão Bonito	2637	4651	56,7
Itapeva	2581	4568	56,5
Itapetininga	2488	4677	53,2
Riversul	2461	4646	53,0
Itaberá	2341	4713	49,7
Manduri	2303	4717	48,8
Ipaussu	2044	4257	48,0
Taquarituba	2176	4569	47,6

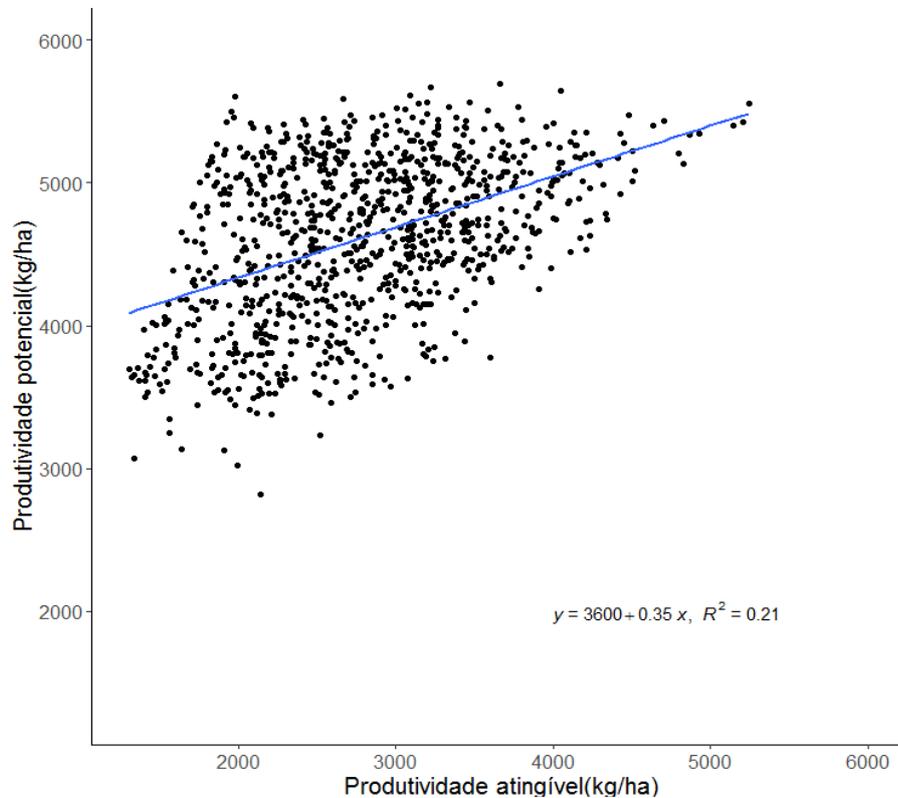
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Segundo Battisti et al. (2012) a eficiência de produtividade agrícola de soja é de aproximadamente 61% que compreende na faixa de eficiência do presente estudo. A influência dos fatores determinantes (radiação solar, fotoperíodo e temperatura) e limitante (limitação hídrica) pode explicar a baixa eficiência de partes dos municípios do presente estudo, visto que Soares et al. (2014) identificaram que na região da microbacia do Alto Parapanema encontram-se os maiores índices técnicos agrícola do estado de São Paulo, que corresponde a melhores aproveitamentos dos recursos por parte dos sojicultores, práticas modernas de plantios, manejos, presença de assistência técnica, etc. Deste modo, reforça novamente o erro estratégico de ampliação de áreas plantadas em municípios com baixo potencial de produtividade da cultura em questão do ponto de vista agrônomo.

A partir dos resultados da simulação realizada pelo DSSAT v4.7.5 e com valores de significância de p-valor < 0,05 foi possível calcular o coeficiente de determinação e equação

de regressão que verificou que a variável produtividade atingível é possível prever em 21 % a partir da produtividade potencial, mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Modelo de regressão linear na produtividade potencial atingível médio



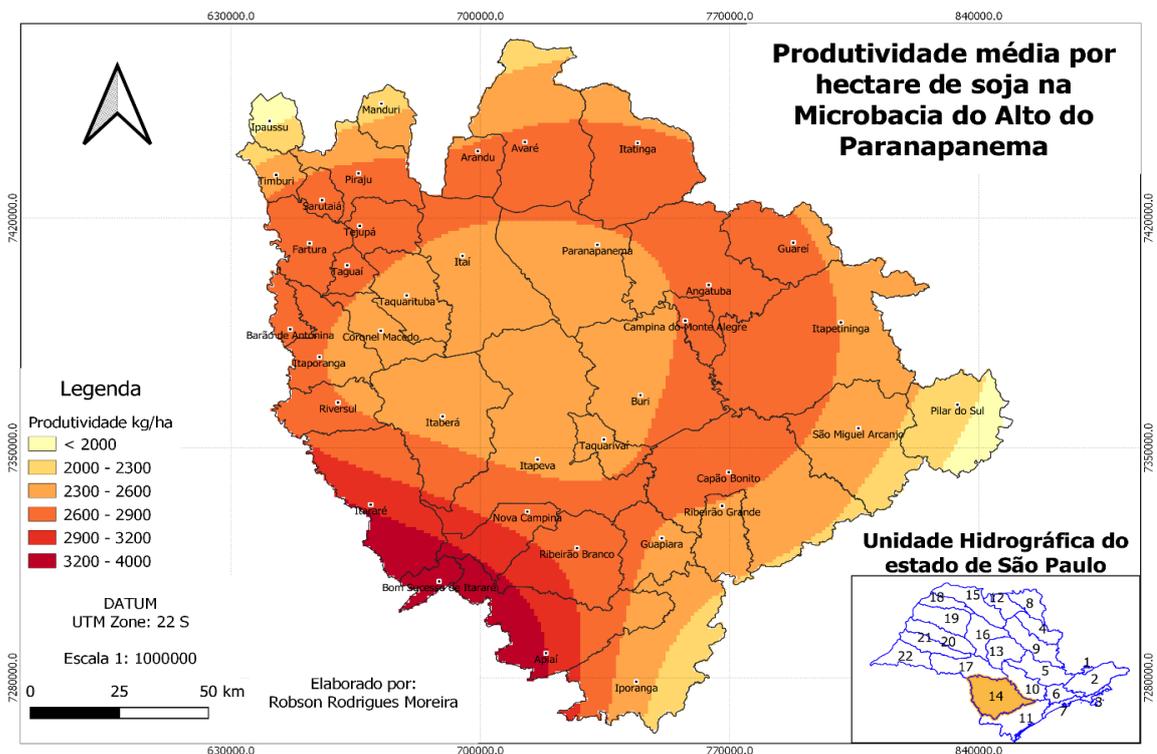
O modelo que melhor se ajustou em relação aos dados do presente estudo é o linear, que é o comportamento esperado da análise pela variação semelhante entre produtividade potencial e atingível. Outro ponto importante que além da interferência geográfica dos municípios, a influência das diferentes datas de semeaduras tenha interferência no índice de determinação do estudo. E por fim, a cultivar de soja de maturação 6.5 utilizada no estudo contribui nesta análise, visto que se mostrou sensível ao estresse hídrico.

Embora o software Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia seja considerável acurácia em termo de apoio a tomada de decisão de diversas culturas, é preciso destacar que são modelos adaptados para a realidade e as condições dos Estados Unidos. Além da laboriosa atividade de calibração dos parâmetros e validação do desempenho, todos os modelos tem como premissa equações matemáticas de modo que seus coeficientes são definidos em sua origem. Portanto, as causas supracitadas podem minimizar a clareza do desempenho dos modelos que compromete a fidedignidade (SILVA, 2015). A complexidade do software em relação aos parâmetros técnicos é congruente apenas no âmbito acadêmico, de forma a inviabilizar a sua utilização na prática rotineira das atividades

agrícolas. Com isso, a inteligência artificial, mais especificamente aprendizado de máquinas (*Machine Learning*) tem ganhado espaço na criação de modelos do setor agrícola para auxiliar na tomada de decisão, sendo ela uma opção para complementar o processo de modelagem.

A produtividade média de soja geoespacializada na região da microbacia do Alto do Paranapanema é mostrada na Figura 6. Observou que os municípios situados no centro da região (Itaí, Paranapanema, Coronal Macedo, etc) tem produtividade média de 2300 a 2600 kg ha<sup>-1</sup>. Já a área que circunda a região central (Angatuba, Ribeirão Branco, Taguaí, etc.) tem produtividade média de 2600 a 2900 kg ha<sup>-1</sup>. As maiores médias encontram-se no su-sudoeste (SSO) podendo alcançar até 4000 kg ha<sup>-1</sup> nos municípios de Apiaí e Bom Sucesso. Em contrapartida no extremo sudoeste e noroeste, apresentaram médias inferiores a 2000 kg ha<sup>-1</sup>, como por exemplo Ipaussu e Pilar do sul.

Figura 6 - Distribuição espacial de produtividade média de grãos de soja



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Conforme a Tabela 8, a produtividade média de grãos de soja em diferentes capacidades de água disponível no solo ficou entre 3407 a 4599 kg ha<sup>-1</sup>, com todas as médias dos tratamentos estatisticamente diferentes (p-valor < 0,05) sendo que as condições de CAD (100%) foram as melhores nas simulações.

Tabela 8 - Dados médios de produtividade de soja em diferentes CAD

Capacidade água disponível no solo (%)	Produtividade de soja (kg ha <sup>-1</sup> )
CAD 100	4599 a
CAD 90	4513 b
CAD 80	4382 c
CAD 70	4128 d
CAD 60	3809 e
CAD 50	3407 f

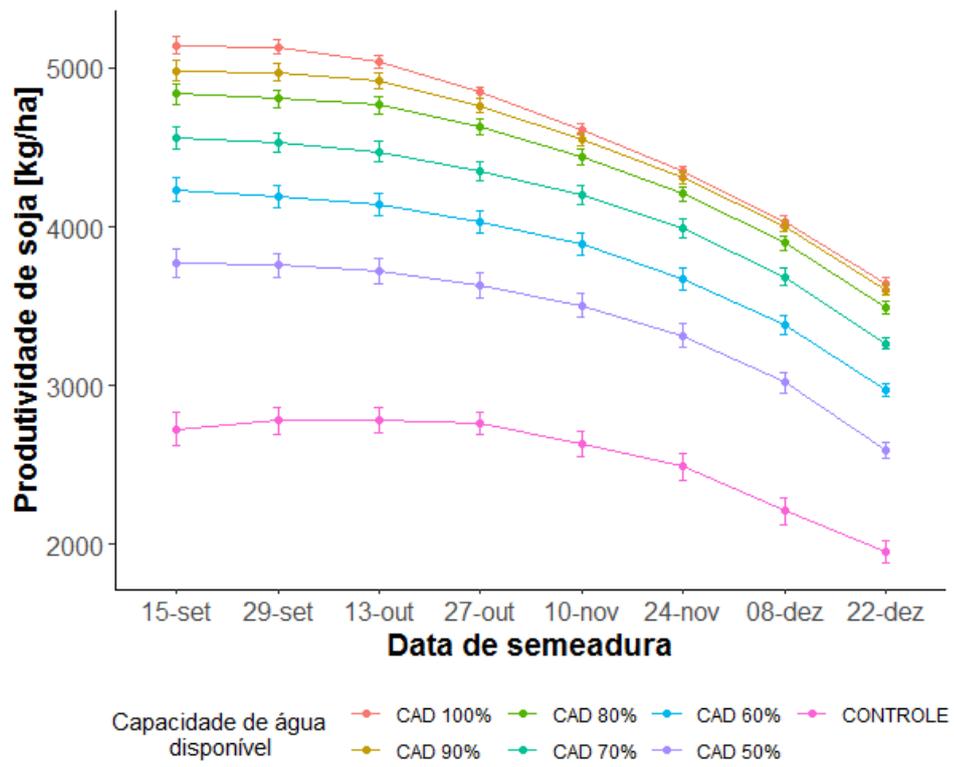
\*Médias seguidas por mesma letra na coluna são diferentes pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade. Coeficiente de variação (CV): 14.5%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

As simulações realizadas a partir das condições pluviométricas da região mostraram aumento significativo da produtividade média com auxílio da irrigação complementar, ou seja, o maior volume de água consumida pela cultura ainda é proveniente da chuva. A capacidade de água disponível no solo (CAD) a nível de 50% já foi suficiente para superar a produtividade média em comparação com a condição sequeira do município de maior potencial de produtividade, no caso Apiaí. Conforme aumenta a capacidade de água disponível no solo, observou-se aumento da produtividade média com diferença estatisticamente significativa com produtividade média máxima de aproximadamente 4600 kg ha<sup>-1</sup> a CAD 100%. No entanto, é importante uma ressalva no custo de irrigação com mais estudos para identificação do ponto ideal de produtividade em relação ao custo de irrigação, e determinação do ponto de maior lucratividade em relação as variáveis supracitadas.

A Figura 7 converge com o resultado supracitado e mostra através do grupo controle, produtividade estimada sem irrigação, que a capacidade média de água disponível solo é inferior a CAD 50%, e a irrigação complementar pode aumentar em aproximadamente 1000 kg/ha. Em comparação com os demais tratamentos, aqueles com irrigação complementar, percebe que o aumento da produtividade desacelera conforme o aumento da CAD. Esse comportamento é perceptível sobretudo em CADs superior a 70 %, com ocorrência de saturação de água e comprometimento da produtividade, bem como desprendimento do ponto ótimo de produção através do alto custo.

Figura 7 - Produtividade de soja em função da CAD e tempo.



\* CONTROLE: Produtividade estimada conforme a precipitação. Sem complementação por irrigação.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Observou-se que durante o período avaliado, entre 2009 e 2019 na região da microbacia do Alto do Paranapanema, a melhor época de semeadura compreende o mês de setembro a novembro. Apiaí, Itararé, Sarutaiá, Paranapanema e Capão Bonito apresentaram maiores potenciais para sojicultura de toda a região estudada.

De acordo com as simulações, a irrigação ampliou a produtividade, porém requer mais estudo a respeito do ponto ótimo de produtividade x rentabilidade.

A eficiência de produtividade da região tem capacidade de ser ampliada, desde que haja ajustes nas estratégias agrícolas, sobretudo de ampliação de área e melhoria de manejo.

É consenso em toda a comunidade científica a importância e a influência dos fatores climáticos na agricultura, sendo assim, é imprescindível banco de dados sólidos meteorológicos a nível municipal do país para ampliar a sustentabilidade do sistema de produção agrícola. Por vez, no decorrer do desenvolvimento deste trabalho observou-se a necessidade de ampliação e consolidação deste serviço, visto a relevância econômica do setor agrícola brasileiro

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: Brasília: ANA, 2019.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C., ET AL. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- APROSOJA-MT - Associação dos produtores de soja e milho de mato grosso. **Disponível em**: <<http://www.aprosoja.com.br/>>. Acessado em 27 set. 2019.
- ARAÚJO, A. E. et al. Embrapa: Cultivo do algodão irrigado. **Sistemas de produção**. Setembro de 2006.
- BARNI, N.A.; BERGAMASCHI, H. Alguns princípios técnicos para a semeadura. **In**: MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C. (Ed.). *A soja no Brasil*. São Paulo: ITAL, 1981. p.476-480.
- BARROS H. B.; PELUZIO, J. M.; SANTOS, M. M. et al. Efeito das épocas de semeaduras no comportamento de cultivares de soja no sul do Estado do Tocantins. Gurupi – TO. **revista ceres**, v. 50, n. 261, 2003.
- BATTISTI, R. **Época de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 261 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas), Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba - SP, 2013
- \_\_\_\_\_. **Calibration, uncertainties and use of soybean crop simulation models for evaluating strategies to mitigate the effects of climate change in southern Brazil**. 189 f. Dissertação (Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas), Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba - SP, 2016
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal, Amsterdam**, v.88, p.704-716, 1996.
- BORNHOFEN, E., BONIN, G., GALVAN, D., et al. Época de semeadura e desempenho qualitativo de sementes de soja. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 45, n. 1, p. 46-55, jan./mar. 2015
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Produção agropecuária**. Brasília: jun. 2018.
- CARMELO, V. **Análise da variabilidade das chuvas e sua relação com a produtividade da soja na vertente paranaense da bacia do rio Paranapanema**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente – SP, 2013.
- CONTI, J. B. **Clima e meio ambiente**. São Paulo: Atual, 1998.
- CORRÊA, S. T. R.; LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D. et al. Aplicações e limitações da modelagem em agricultura – Revisão. **Revista de Agricultura**, v.86, n.1, p.1 - 13, 2011.
- COUTO, L. **Como iniciar e conduzir um sistema produção agrícola sob irrigação**. Apostila de Minicurso. CONIRD, 2003.
- CRUSCIOL, C.A.C.; ARF, O.; SORATTO, R. P., et al. Produtividade do arroz de terras altas sob condições de sequeiro e irrigado por aspersão em função do espaçamento entre fileiras. **Agronomia**, v.37, n.1, p.10-15, 2003.
- CRUZ, T. V.; PEIXOTO, C. P.; MARTINS, M. C. Crescimento e produtividade de soja em diferentes épocas de semeadura no oeste da Bahia. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n.1, p. 033-042, 2010.
- DALLACORT, R.; DE FREITAS, P. S. L.; DE FÁRIA, R. T.; et al. Utilização do modelo Cropgro-soybean na determinação de melhores épocas de semeadura da cultura da soja, na região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Sci. Agron.** Maringa, v. 28, n. 4, p. 583-589, 2006.

DEJONGE, D. C.; ASCOUGH, J. C. ANDALES, A. A. et al. Improving evapotranspiration simulations in the CERES-MAIZE model under limited irrigation. **Agricultural water management**. v. 115, p. 92-103, 2012.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Geoestatística Aplicada na Agricultura de Precisão**. Embrapa, Brasília, 2015.

\_\_\_\_\_. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Necessidade de Irrigação Complementar da soja na Região Sul de Mato Grosso do Sul**. Embrapa, Dourados, 2015.

\_\_\_\_\_. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Embrapa, São Paulo, 2008.

\_\_\_\_\_. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **História da Soja no Brasil**. Embrapa soja, Londrina, 2004.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. Londrina: **Embrapa Soja**, 2007. (Circular técnica, n. 48).

FERREIRA, R. **Modelagem da produtividade de soja em função de variáveis meteorológicas no centro-sul do Paraná – Guarapuava**. 68 f. Dissertação (Mestrado em produção vegetal), Universidade Estadual do Centro-Oeste, Unicentro-PR, (2018).

FIETZ, C. R.; GARCIA, R. A.; COMUNELLO, E.; et al. **Semeadura antecipada da soja na região sul de Mato Grosso do Sul. Dourados**: Embrapa Agropecuária Oeste, 2013. 5 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Circular técnica, 22).

FIETZ, C. R.; RANGEL, M. A. S. Época de semeadura de soja para região de Dourados – MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia agrícola**, v. 28, n. 4, 2008.

GAVA, G. J. C.; SILVA, A. S.; SILVA, R. C.; et al. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejo de sequeiro e irrigação por gotejamento. **Engenharia agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, 2011.

GIANLUPPI, V. et al. Cultivo de soja no cerrado de Roraima. Sistema de Produção, Boa Vista: **Embrapa Roraima**, 2009.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 01, n. 02, p. 96-99, 1985.

HERZOG, R. L. DA S.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R. Produtividade de soja em semeadura direta influenciada por profundidade do sulcador de adubo e doses de resíduos em sistema irrigado e não irrigado. **Eng. Agric.** Jaboticabal, v. 24, n. 3, set, 2004.

HOOGENBOOM, G. J.W. JONES, P.W. WILKENS, C.H. et al. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 (<http://dssat.net>). DSSAT Foundation, Prosser, Washington. 2015.

IAC/SP & Embrapa. O Mapa Pedológico do Estado de São Paulo. In: O Agrônomo, Campinas, 52-1, 2000, pp. 21-23.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, **Produção Agrícola Municipal 2017**. Rio de Janeiro, 2017.

ITTEERSUM, M. K. VAN; LEFFELAAR, P. A.; KEULEN, H. et al. On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European Journal of Agronomy, Amsterdam**, v. 18, p. 201234, 2003.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, C. H.; PORTER, K. J. et al. The DSSAT cropping system model. **Europ. J. Agronomy**. v. 18, 2003.

LAW, A.M.; KELTON, W.D. Simulation modeling and analysis. 2 ed. New York: **MacGraw-Hill**, 1991.

LISSON, S. N.; INMAN-BAMBER, N. G.; ROBERTSON, M. J. et al. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research, Amsterdam**, v. 92, n. 2/3, p. 321-335. 2005.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação de densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.33, n.2, p. 349-354, 2011.

MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.57, n.1, p. 1-6, 2000.

MEOTTI, G. V.; BENIN, G.; SILVA, R. R. et al. Época de semeadura e desempenho agrônômico de cultivares de soja. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.47, n.1, p.14-21, jan. 2012.

MONTEITH, J. The quest balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 695-697, 1996.

MOTTA, I. S.; BRACCINI, A. L.; SACAPIM, C. A. et al. Época de semeadura em cinco cultivares de soja. Efeito na qualidade fisiológica das sementes. Maringá- PR, v.24, n.5, p. 1281-1286, 2002.

MOREIRA, A. R. B., HELFAND, S. M., FIGUEIREDO, A. M. R. "**Explicando as diferenças na produtividade agrícola no Brasil**". Texto para discussão. Rio de Janeiro: IPEA, n. 1254, 2007.

NAKAGAWA, J.; ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R. Épocas de semeadura da soja. **Pesq. Agropec. bras.**, Brasília, v. 18, n.11, p. 1187 – 1198, 1983.

PAOLINELLI, G. P.; TANAKA, M. A. S.; ARANTES, N. E. Germinação e vigor de sementes de soja produzidas nas safras 1980/81 e 1981/82 em Minas Gerais. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 3, Campinas, 1984. **Anais...** Londrina, EMBRAPA-CNPSo. 1984.

PAUTIAN, K.; PARTON, W.J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.476-488, 1992.

PEIXOTO, C. P. et al. Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: Componentes da produção e rendimento de grãos. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, jan/mar., p. 89 – 96, 2000.

PENNING DE VRIES, F.W.T. System analysis and models of crop growth. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. (Ed.). Simulation of plant growth and crop production. Pudoc, Wageningen: **Elsevier**, 1982. p.9-22.

PEREIRA, L. A. G. et al. Efeito da época de semeadura sobre a qualidade de semente de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 1, n. 3, 1979.

PESSOA, M.C.P.Y.; LUCHIARI JUNIOR, A.; FERNANDES, E.N.; et al. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. Brasília, **EMBRAPA**, 1997.

PILAU, F. G. **Simulação de cenário agrícola futuros para a cultura da soja no Brasil com base em projeções de mudanças climáticas** – Piracicaba. 96 f. Dissertação (Mestrado em ciências agrícolas), Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2018.

R CORE TEAM: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available in: <<https://www.R-project.org>> Data de acesso: Abr. 2021.

RODRIGUES, R.; DIDONET, A. D.; LHAMBY, J. C. B. et al. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 431-437, 2001.

SENTELHAS, P. et al. The soybean yield gap in Brazil-magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, p. 1-18, 2015.

SILVA, B. K. **Funções de pedotransferência para predição da condutividade hidráulica saturada de solos do Brasil**. – PR. 43 f. Dissertação (Mestrado em ciência agrária), Universidade Federal do Paraná, Maringá, 2018.

SILVA, R. R. **Relação entre precipitação pluviométrica e produtividade da cultura de soja no município de Ibirubá – RS**. 93 f. Dissertação (Mestrado em geografia e Geociência), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2013.

SILVA, S. D. **Calibração e avaliação do modelo CSM-CERES-MAIZE para a cultivares crioulas e melhoradas de milho**. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícolas), Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Ciência Rurais, Santa Maria - RS, 2015.

SOARES, F. C. **Análise de viabilidade da irrigação de precisão na cultura do milho**. (Tese de Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Engenharia de Água e Solo. Santa Maria-RS, 2010.

STEINMETZ, S. Prioridades de pesquisa e necessidade de infra-estrutura em agrometeorologia no Brasil. **Revista brasileira de agrometeorologia**, Santa Maria – RS, v.8, n.1,p.155-162, 2000.

TRAGNAGO, J.L.; BONETTI, L.P. Diferentes épocas de semeadura no rendimento e outras características de alguns cultivares de soja no Rio Grande do Sul. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 3., Campinas, 1984. **Anais**. Londrina: EMBRAPA, CNPSo, 1984. p.57-69.