

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

**BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DE IBIRUBÁ/RS DAS SAFRAS DE SOJA
2022/23 E 2023/24**

LIDIANE ALINE ROHR TIEMANN

Ibirubá, outubro de 2025

LIDIANE ALINE ROHR TIEMANN

**BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DE IBIRUBÁ/RS DAS SAFRAS DE SOJA
2022/23 E 2023/24**

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto ao curso de Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Professor Dr. Jardel Henrique
Kirchner

Coorientador: Eduardo Montezano

Ibirubá, outubro de 2025

LIDIANE ALINE ROHR TIEMANN

**BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DE IBIRUBÁ/RS DAS SAFRAS DE
SOJA 2022/23 E 2023/24**

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto ao curso de Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Professor Dr. Jardel Henrique Kirchner

Coorientador: Eduardo Matos Montezano

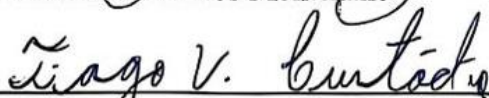
Aprovado em 21 de outubro, 2025.



Prof. Jardel Henrique Kirchner – Orientador



Prof. Eduardo Matos Montezano



Prof. Tiago Vega Custódio



Prof. Bem-Hur Costa de Campos – Coordenador do

Curso de Agronomia do IFRS – Campus Ibirubá

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela força e determinação concedida para enfrentar e superar os desafios ao longo de toda minha trajetória acadêmica e para realização deste trabalho.

Aos meus pais e a meu irmão, pela dedicação e incentivo constante em todos os momentos.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá, pela sólida formação acadêmica proporcionada.

Ao fomento externo da instituição e ao CNPq pela concessão da bolsa de pesquisa e inovação no período de 2024 e 2025.

Ao professor Dr. Jardel Henrique Kirchner, pela orientação, dedicação e apoio imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Aos demais professores, pela contribuição fundamental por meio dos conhecimentos transmitidos durante a graduação.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia, pela disponibilização dos dados climáticos necessários para a execução desta pesquisa.

À Embrapa, pela disponibilização da planilha utilizada no cálculo da evapotranspiração.

RESUMO

Trabalho de Conclusão de Curso
Curso de Agronomia
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá

BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DE IBIRUBÁ/RS DAS SAFRAS DE SOJA 2022/23 E 2023/24

AUTOR: LIDIANE ALINE ROHR TIEMANN
ORIENTADOR: JARDEL HENRIQUE KIRCHNER
Ibirubá/RS, 21 de outubro de 2025

A soja é considerada um dos principais grãos produzidos mundialmente e destaca-se como uma das culturas de maior importância econômica e social no cenário agrícola. O Brasil ocupa a posição de maior produtor e exportador global dessa aleuro-oleaginosa, que se destaca por sua versatilidade de uso na produção de óleo vegetal, farelo para alimentação animal e fonte de proteína para o consumo humano. Entretanto, a produtividade da soja depende diretamente das condições climáticas, especialmente da disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da cultura. No estado do Rio Grande do Sul, a produtividade das últimas safras tem sido comprometida pela irregularidade das precipitações, influenciada pelos fenômenos do El Niño e La Niña. Nesse contexto, o balanço hídrico climatológico (BHC) é uma ferramenta fundamental para avaliar a disponibilidade de água no solo, considerando as variações no regime pluviométrico e no armazenamento hídrico. Este trabalho teve por objetivo realizar o balanço hídrico climatológico para o município de Ibirubá/RS das safras de soja de 2022/23 e 2023/24. O BHC foi determinado pela classificação climatológica de Tohrnthwaite e Mather (1995). Os dados climáticos foram obtidos da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na área agrícola do IFRS campus Ibirubá. Foram determinadas a evapotranspiração de referência diária através do método de Penman-Monteith, utilizando uma planilha desenvolvida pela Embrapa. Após isso, determinou-se a capacidade de água disponível, em razão da classe de água disponível de acordo com o tipo de solo e a profundidade do sistema radicular da soja, e a precipitação acumulada mensalmente. Os dados foram obtidos e calculados para o período de outubro a abril, compreendido pelo cultivo da soja no município. A partir da capacidade de água disponível, precipitação e evapotranspiração de referência, desenvolveu-se o balanço hídrico, quantificando a diferença de precipitação e evapotranspiração, negativo acumulado, armazenamento de água no solo, variação de armazenamento de água no solo, evapotranspiração real, deficiência hídrica e excedente hídrico. Na safra 2022/23, houve deficiência hídrica de 522 mm entre novembro e abril, sem excesso ou déficit em outubro. Já na safra 2023/24, houve dois meses com deficiência hídrica (dezembro e fevereiro), totalizando 9 mm. Os demais meses (outubro, novembro, janeiro, março e abril) apresentaram um excedente de 1039 mm. A análise do BHC permitiu identificar, nas safras de 2022/23 e 2023/24, os períodos de déficit e excedente hídrico no solo, estabelecendo sua correlação com os estádios fenológicos críticos da cultura da soja. Esses resultados, ao evidenciar a variação do regime hídrico entre diferentes anos agrícolas influenciados pelos fenômenos climáticos, fornecem subsídios importantes para o planejamento das safras futuras na região, como também no posicionamento de escolha de cultivares mais adequadas às condições locais. Dessa forma, o estudo contribui para o

direcionamento de estratégias de manejo da cultura da soja, incluindo práticas voltadas ao aumento da capacidade de armazenamento de água no solo, fundamentais para minimizar os impactos tanto da escassez quanto do excesso hídrico.

Palavras-chave: balanço hídrico do solo; déficit hídrico; excedente hídrico; evapotranspiração de referência; capacidade de água disponível.

ABSTRACT

Completion of course work
Agronomy Course
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá

CLIMATOLOGICAL WATER BALANCE OF IBIRUBÁ/RS FOR THE 2022/23 AND 2023/24 SOYBEAN SEASONS

AUTHOR: LIDIANE ALINE ROHR TIEMANN
ADVISOR: JARDEL HENRIQUE KIRCHNER
Ibirubá/RS, October 21, 2025

Soybean is considered one of the main grains produced worldwide and stands out as one of the most economically and socially important crops in the agricultural sector. Brazil holds the position of the world's largest producer and exporter of this oilseed, which is notable for its versatility in the production of vegetable oil, animal feed meal, and as a protein source for human consumption. However, soybean productivity depends directly on climatic conditions, especially on water availability throughout the crop cycle. In the state of Rio Grande do Sul, the productivity of recent harvests has been compromised by irregular rainfall patterns influenced by the El Niño and La Niña phenomena. In this context, the Climatological Water Balance (CWB) is a fundamental tool for assessing soil water availability, considering variations in rainfall regimes and water storage. This study aimed to perform the Climatological Water Balance for the municipality of Ibirubá/RS during the 2022/23 and 2023/24 soybean growing seasons. The CWB was determined according to the climatological classification of Thornthwaite and Mather (1995). Climatic data were obtained from the automatic weather station of the National Institute of Meteorology (INMET), located in the agricultural area of the Federal Institute of Rio Grande do Sul (IFRS) – Ibirubá Campus. The reference daily evapotranspiration was determined using the Penman-Monteith method, through a spreadsheet developed by Embrapa. Subsequently, the available water capacity was determined based on the soil's available water class, according to the soil type and the rooting depth of soybean, along with the monthly accumulated precipitation. The data were obtained and calculated for the period from October to April, corresponding to the soybean cultivation period in the municipality. Based on the available water capacity, precipitation, and reference evapotranspiration, the water balance was developed, quantifying the difference between precipitation and evapotranspiration, accumulated deficit, soil water storage, variation in soil water storage, actual evapotranspiration, water deficit, and water surplus. In the 2022/23 growing season, there was a water deficit of 522 mm between November and April, with no excess or deficit in October. In contrast, during the 2023/24 season, there were two months with water deficit (December and February), totaling 9 mm, while the other months (October, November, January, March, and April) presented a water surplus of 1039 mm. The analysis of the CWB allowed identifying, for the 2022/23 and 2023/24 growing seasons, the periods of soil water deficit and surplus, establishing their correlation with the critical phenological stages of the soybean crop. These results, by revealing variations in the water regime between different agricultural years influenced by climatic phenomena, provide valuable insights for future crop planning in the region, as well as for selecting cultivars better adapted to local conditions. Thus, this study contributes to guiding soybean crop management strategies,

including practices aimed at increasing soil water storage capacity, which are essential to minimize the impacts of both water scarcity and excess.

Key words: soil water balance; water deficit; water surplus; reference evapotranspiration; available water capacity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classes de água disponível de acordo com a granulometria do solo.....	14
Figura 2: Escala fenológica proposta por Fehr e Caviness (1977) da cultura da soja.....	19
Figura 3: Evapotranspiração (ET) diária da soja durante seus estádios de desenvolvimento.	20
Figura 4: Estação Meteorológica Automática do INMET, Ibirubá/RS.....	22
Figura 5: Distribuição das precipitações e temperaturas médias de Ibirubá durante a safra de soja 2022/23.....	28
Figura 6: Variação da precipitação, evapotranspiração de referência e evapotranspiração real de Ibirubá na safra de soja 2022/23.....	31
Figura 7: Representação do balanço hídrico climatológico de Ibirubá da safra de soja 2022/23.....	32
Figura 8: Distribuição das precipitações e temperaturas médias de Ibirubá durante a safra de soja 2023/24.....	33
Figura 9: Variação da precipitação, evapotranspiração de referência e evapotranspiração real de Ibirubá na safra de soja 2023/24.....	36
Figura 10: Representação do balanço hídrico climatológico de Ibirubá da safra de soja 2023/24.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Balanço hídrico climatológico para o município de Ibirubá durante a safra de soja 2022/23	30
Tabela 2: Balanço hídrico climatológico para o município de Ibirubá durante a safra de soja 2023/24.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 DESENVOLVIMENTO	13
2.1 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1.1 Balanço hídrico climatológico	13
2.1.2 Evapotranspiração	15
2.1.2.1 Evapotranspiração de referência	17
2.1.3 Cultura da soja	17
2.1.3.1 Descrição botânica e morfológica	18
2.1.3.2 Exigências climáticas da soja	19
2.1.4 El Niño Oscilação Sul (El Niño e La Niña)	21
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
3 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O clima é considerado um dos fatores de mais difícil controle na produção agrícola, sendo também o principal limitador para se alcançar produtividades máximas. Considerando sua grande influência sobre o desempenho das culturas, o uso de informações meteorológicas e climáticas tornam-se essenciais para o planejamento e para a adoção de práticas que garantam uma agricultura mais eficiente e sustentável (Monteiro, 2009).

Entre as ferramentas mais utilizadas nesse contexto destaca-se o balanço hídrico climatológico, que permite estimar a deficiência e o excedente hídrico, bem como a reposição, a retirada e o armazenamento de água no solo. Essa ferramenta possibilita relacionar a disponibilidade de água às exigências hídricas das culturas, sendo fundamental para o manejo racional da agricultura irrigada e para o planejamento de safras em regiões com expressivas variações de tempo.

Essas variações interanuais dos elementos climáticos, principalmente em relação as oscilações no regime pluviométrico, se caracterizam como uma grande preocupação aos produtores de soja no estado do Rio Grande do Sul. A cultura apresenta grande sensibilidade perante o déficit hídrico, em termos de rendimento de grãos, aumentando à medida que a planta avança em suas fases de crescimento e desenvolvimento, sendo o florescimento e enchimento de grãos a fase de maior demanda hídrica (Gava, 2014).

A soja (*Glycine max* L.), pertencente à família Fabaceae, é uma cultura de grande importância econômica, sendo o Brasil o maior produtor mundial, com 144 milhões de toneladas produzidas em 45 milhões de hectares (IBGE, 2024). Essa oleaginosa se adapta em diferentes condições edafoclimáticas e possui diversos usos, como na alimentação animal e humana, além de ser utilizada como fonte de biocombustível. (Souza *et al.*, 2022).

Nas últimas safras de soja, no estado do Rio Grande do Sul, a má distribuição de chuvas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, tem sido um fator limitante à obtenção de altas produtividades. Foram registrados impactos nas safras de grãos 2021/2022 e 2022/2023, com destaque principal para a safra 2021/2022 registrada com uma das maiores estiagens dos últimos 100 anos no estado devido à ocorrência de La Niña (INMET, 2022).

Já na safra de 2023/2024 houve uma redução na produção da cultura devido às chuvas intensas e prolongadas, que encharcaram o solo e prejudicaram o desenvolvimento das plantas (CONAB, 2024). Dessa forma, a avaliação e o monitoramento dos períodos de maior ou menor ocorrência de precipitação pluviométrica, das temperaturas ótimas para as culturas, da disponibilidade de radiação e do balanço hídrico são fundamentais para haver

retorno produtivo (Villa *et al.*, 2022).

A elaboração de um balanço hídrico, mesmo utilizando um período de avaliação curto, tem sua importância, pois considera os aspectos relacionados ao solo e a dinâmica da água no mesmo (Matos *et al.*, 2014). Essa ferramenta auxilia o produtor no planejamento da irrigação e na adoção de práticas que melhorem as condições físico-hídricas do solo, favorecendo o armazenamento e o uso eficiente da água.

Além disso, o manejo eficiente da cultura, aliado à aplicação do balanço hídrico climatológico, é essencial para orientar o posicionamento de cultivares mais adequadas às condições climáticas e à disponibilidade hídrica da região. Diante disso, o trabalho teve como objetivo determinar e analisar o Balanço Hídrico Climatológico para o município de Ibirubá/RS das safras de soja 2022/23 e 2023/24.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO DE LITERATURA

2.1.1 Balanço hídrico climatológico

A produção agrícola é uma das atividades econômicas mais dependentes das condições ambientais, especialmente da disponibilidade de água no solo (Pereira *et al.*, 2005). De acordo com Mavi e Tupper (2004) a tomada de decisão com base em informações meteorológicas busca tornar os sistemas agrícolas mais adaptáveis às variações do tempo.

Através da elaboração do balanço hídrico climatológico, é possível ter um planejamento integrado dos recursos hídricos, possibilitando classificar o clima de uma região, zoneamento agroclimático e ambiental, além de identificar os períodos de disponibilidade e demanda hídrica no solo (Santos; Hernandez; Rossetti, 2010). A metodologia de estimativa do balanço hídrico foi proposta por Thornthwaite e Mather (1955), a fim de determinar o regime hídrico de um local. Além disso, é possível quantificar a água no solo que pode estar disponível às plantas e indicar períodos secos ou úmidos, dentro de um determinado espaço de tempo (Tremocoldi; Brunini, 2008).

O BHC é contabilizado através do fornecimento natural de água no solo, pela precipitação pluviométrica (P) como variável de entrada, e pela demanda atmosférica como variável de saída, que é expressa pela evapotranspiração de referência (ET_o), considerando um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível no solo (CAD).

O armazenamento de água no solo está diretamente relacionado à CAD, a qual corresponde ao intervalo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) (Sousa; Assunção, 2020). A capacidade de campo representa o limite superior de retenção de água no solo após a drenagem da água gravitacional, enquanto que o ponto de murcha permanente indica o limite inferior, no qual as plantas não conseguem mais extrair água e perdem a turgidez dos tecidos vegetais (Pequeno *et al.*, 2002).

A CAD é dependente do tipo de solo, pois varia conforme a sua textura e estrutura. Solos arenosos, por apresentarem maior proporção de macroporos, retêm menor quantidade de água, enquanto solos argilosos, com predominância de microporos, apresentam maior capacidade de armazenamento de umidade, embora sejam mais suscetíveis à compactação (Pequeno *et al.*, 2002).

Além disso, o Ministério da Agricultura e Pecuária definiu seis classes de capacidade de água disponível para o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) da safra de soja no Rio Grande do Sul, de acordo com a granulometria do solo, sendo elas as classes AD1, AD2, AD3, AD4, AD5 e AD6 (Figura 1). Em virtude da composição da granulométrica dos solos de Ibirubá, se considera a textura em classe AD4, ou seja, aproximadamente 1mm/cm de água disponível (Teixeira *et al.*, 2021).

Figura 1 - Classes de água disponível de acordo com a granulometria do solo

Limite inferior (mm cm ⁻¹)		Classes de AD		Limite superior (mm cm ⁻¹)
0,00	≤	AD0	<	0,34
0,34	≤	AD1	<	0,46
0,46	≤	AD2	<	0,61
0,61	≤	AD3	<	0,80
0,80	≤	AD4	<	1,06
1,06	≤	AD5	<	1,40
1,40	≤	AD6	≤	1,84*

*Amostras de solo com composição granulométrica que eventualmente resulte em estimativa de AD acima de 1,84 mm cm⁻¹ serão representadas pela classe AD6.

Fonte: Ministério da Agricultura e Pecuária (2023).

Dessa forma, a determinação da CAD é feita pela multiplicação da água disponível no solo pela profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, o que permite estimar o volume de água que pode ser efetivamente utilizado pelas plantas em seu desenvolvimento (Teixeira *et al.*, 2021). Com a CAD adequada ao tipo de planta cultivada na região de estudo, o BHC vai fornecer estimativas da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM), podendo ser calculado diariamente ou mensalmente (Camargo, 1971; Pereira *et al.*, 2002).

A variação de armazenamento de água no solo varia em função da quantidade de água que entra e sai no perfil e dos fatores que contribuem para que esta continue armazenada. As principais entradas de água no solo são a precipitação, irrigação, orvalho, escoamento superficial, drenagem lateral e ascensão capilar e as principais saídas de água do solo são a evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem lateral e drenagem profunda (Jesus, 2015).

A precipitação é considerada a principal entrada da água no solo, influenciando na infiltração, na retenção e no movimento da água dentro do perfil (Jesus, 2015). Em períodos de carência hídrica a irrigação torna-se uma importante prática para garantir que a produção agrícola na região tenha estabilidade, sendo necessária desta forma a gestão dos recursos hídricos da região (Lima; Silva, 2007).

A contribuição do orvalho é importante apenas no aspecto ecológico, contribuindo com no máximo 0,5 mm/dia, sendo que em regiões ou épocas secas o suprimento de água para a cultura acaba proporcionando uma contribuição desprezível (Pereira *et al.*, 2007). Além disso, a quantidade de água que entra e que sai no escoamento superficial e na drenagem lateral irão se compensar, tornando-se nulos.

A entrada de água através da ascensão capilar é muito pequena, tornando a contribuição desta variável irrelevante, já a drenagem profunda representa o excesso de água que penetrou no volume de solo através da irrigação ou da chuva. Portanto, quanto maior for a profundidade do volume de controle, maior será a ascensão capilar e menor será a drenagem profunda (Jesus, 2015).

Os fluxos horizontais de água como escoamento superficial de entrada (*Run in*) e escoamento superficial de saída (*Run off*) irão se compensar, assim como a drenagem lateral de entrada (DLi) e a drenagem lateral de saída (DLo). Sendo assim, a principal saída de água do sistema é a evapotranspiração, principalmente nos períodos secos, ao mesmo tempo em que a drenagem profunda representa outra forma de saída de água do volume de controle do solo em períodos de chuva excessiva (Pereira *et al.*, 2007).

Dessa forma, o cálculo do BHC é uma importante ferramenta para o planejamento agrícola e pode ser aplicado para comparar o clima de diferentes regiões e para caracterizar os períodos secos e úmidos. Essas informações possuem grande relevância para se tomar decisões que irão permitir saber a disponibilidade hídrica do solo, a deficiência e quais são os excedentes hídricos de períodos específicos, identificando assim o comportamento dessas variáveis (Pereira *et al.*, 2002).

2.1.2 Evapotranspiração

Dentro dos componentes do ciclo hidrológico, a evapotranspiração (ET) é muito importante, uma vez que, representa a saída de água por meio dos processos de evaporação do solo e transpiração vegetal (Brito *et al.*, 2020). A evaporação consiste na transferência da água em um estado líquido para o gasoso pelo ganho de energia cinética molecular, enquanto a

transpiração das plantas baseia-se num processo biofísico dado pelo metabolismo vegetal, em que a água em seu interior é perdida em forma de vapor para a atmosfera (Andrade, 2018).

Esse processo é influenciado por diversos fatores como vento, umidade relativa do ar, temperatura, radiação solar e a disponibilidade de água no solo. O vento contribui para a remoção da camada de ar úmido que fica em contato com a superfície do solo, permitindo a entrada de ar seco e saída do vapor para a atmosfera (Penman, 1948; Taiz e Zeiger, 2008). Como também, uma maior umidade do ar contribui para a saturação do mesmo, dificultando a evaporação.

A evapotranspiração, apesar de ocorrer também em temperaturas ambientes, ocorre com maior rapidez em altas temperaturas e pressão de vapor. Allen *et al.* (1998), Monteith (1965) e Shuttleworth (1993) destacam a importância da radiação solar e da temperatura do ar no processo, uma vez que a radiação solar fornece energia para que as moléculas de água na superfície sejam excitadas e convertidas em vapor, enquanto a temperatura do ar influencia a quantidade de energia necessária para que a água atinja o ponto de ebulição.

A presença de coberturas vegetais pode impedir que uma parte da radiação solar atinja diretamente o solo. Outro fator importante e que influencia é a baixa disponibilidade hídrica no solo que limita a taxa de evaporação, fazendo com que ela diminua, podendo até cessar (Andrade, 2018).

Segundo Tateish (1996) a evapotranspiração possui uma grande importância no balanço hídrico, representando 60 a 80% do volume de água que retorna para a atmosfera. Além de que a estimativa correta da evapotranspiração serve de subsídios para poder conhecer a quantidade real de água a ser fornecida ao solo no monitoramento da irrigação. Seu valor normalmente é descrito em milímetros (mm) por uma determinada unidade de tempo, expressando a quantidade de água perdida da cultura (Allen *et al.*, 1998).

Também apresenta grande importância na agricultura não irrigada, pois permite o planejamento de épocas de semeadura em função da disponibilidade hídrica da região considerada, permitindo maior eficiência no aproveitamento das precipitações (Petry *et al.*, 2007). Além disso, a evapotranspiração apresenta uma grande variabilidade temporal e espacial, podendo variar de acordo com a época do ano, o horário do dia, a localização geográfica e as condições meteorológicas.

2.1.2.1 Evapotranspiração de referência

Segundo a FAO (Food and Agriculture Organization) a evapotranspiração de referência (ET_o) é definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência com altura de 0,12 m, uma resistência de superfície de 70 s.m⁻¹ e um albedo de 0,23, considerando como superfície de referência uma cultura hipotética com altura uniforme, sem restrições de água, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo (Allen *et al.*, 1998). A E_{to} é utilizada em muitos estudos agrometeorológicos de modelos de produção, balanços hídricos e zoneamentos agroclimáticos, bem como no manejo e no dimensionamento de sistemas de irrigação (Conceição, 2006).

Penman estabeleceu uma equação para estimativa da evapotranspiração, a qual foi modificada por Monteith que introduziu as funções de resistência aerodinâmica e resistência do dossel vegetal (Monteith, 1981). Este método denominado de Penman-Monteith, vem sendo utilizada por vários pesquisadores e foi adotada pela FAO como a equação padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (Allen *et al.*, 1998).

Para a sua utilização são necessários dados de variáveis climáticas como temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e do saldo de radiação. Estes dados são obtidos através de estações meteorológicas, se aproximando da evapotranspiração padrão da grama dos locais avaliados e com superioridade em relação aos outros métodos.

2.1.3 Cultura da soja

A soja (*Glycine max* L.) é uma oleaginosa de grande importância econômica, sendo o Brasil o maior produtor mundial, ocupando o primeiro lugar no ranking de produção de grãos, seguido por Estados Unidos e Argentina (CONAB, 2024). O grão representa o papel de principal aleuro-oleaginosa produzida e consumida, com altos teores de óleo e de proteína (Roessing *et al.*, 2005; Sedyama, 2009). Essa cultura também vem se destacando pelos benefícios dos seus diversos usos na alimentação e também na saúde humana, tornando-se uma fonte barata de proteína, a qual vem sendo cada vez mais demandada (Carvalho *et al.*, 2023).

No Brasil, os primeiros registros de cultivo da cultura datam do final do século XIX na Bahia, no entanto, o grão começou a ser mais facilmente encontrado no país a partir da intensificação da migração japonesa, nos anos 1908. (Gazzoni, 2018). Em segundo momento,

foi introduzida no Rio Grande do Sul em 1914, onde as condições edafoclimáticas se assemelhavam a das cultivares produzidas nos EUA de onde foram trazidas (Freitas, 2011).

A soja brasileira possui alta demanda no mercado global devido à sua qualidade e preços competitivos, representando mais de 50% no total das exportações do agronegócio do país (Bucioli *et al.*, 2024). O aumento da produtividade de grãos, associado à redução de custos e diminuição nos riscos de produção, são fundamentais para a viabilidade técnica e econômica da cultura (Zanon *et al.*, 2018). Entre os riscos, a ocorrência de adversidades meteorológicas é o principal fator a ser considerado no seu cultivo, especialmente em sistemas produtivos não irrigados (Sentelhas *et al.*, 2015).

2.1.3.1 Descrição botânica e morfológica

A soja é uma planta anual pertencente à família Fabaceae, gênero *Glycine* e espécie *Glycine max* (L.) Merrill. Possui sistema radicular pivotante ou axial, composto por uma raiz principal e outras secundárias, sendo que nelas são encontrados nódulos que realizam a simbiose entre a soja e bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, promovendo a fixação do nitrogênio atmosférico (Mascarenhas *et al.*, 2005).

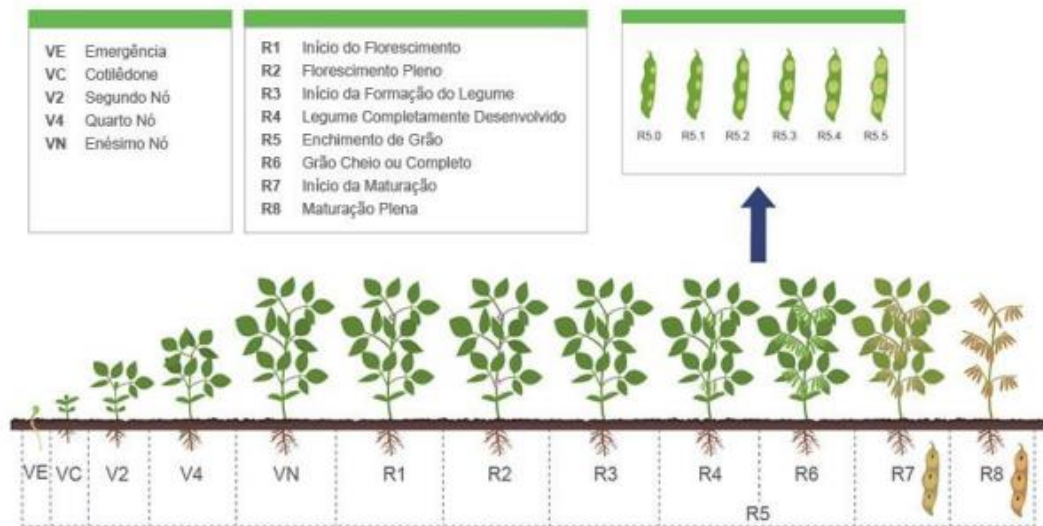
O caule da cultura é caracterizado como herbáceo, ereto, pubescente e com algumas ramificações. O desenvolvimento final do caule é dependente do hábito de crescimento, para cultivares de crescimento determinado e semi-determinado, a gema terminal transforma-se em inflorescência racemosa, enquanto que para cultivares de crescimento indeterminado o caule continua se desenvolvendo mesmo após o florescimento (Nogueira *et al.*, 2009).

Durante seu crescimento e desenvolvimento, a soja apresenta folhas cotiledonares iniciais, logo surgem um par de folhas unifolioladas e após isso aparecem as trifolioladas, permanecendo até a senescência (Sedyama *et al.*, 1985). Em relação aos órgãos reprodutivos, as flores são completas com uma inflorescência do tipo racemo e localizam-se axialmente ao caule. São consideradas flores autógamas e podem possuir uma coloração branca ou roxa (Embrapa, 2019).

O fruto da planta é um legume, comumente chamado de vagem, que apresenta de 2 a 7 cm de comprimento e 1 a 2 cm de largura, variando conforme o cultivar e as condições climáticas, mas normalmente apresenta uma forma achatada. As vagens podem conter de 1 a 5 grãos, entretanto, grande parte das cultivares apresentam a variação de 2 a 3 (Tejo; Fernandes; Buratto, 2019).

A escala fenológica da cultura da soja foi proposta por Fehr e Caviness (1977), como pode ser visualizado na Figura 2. A escala divide em estádios vegetativos, que abrange desde a germinação e emergência até o início do florescimento (VE até VN), e em estádios reprodutivos, os quais se iniciam com o florescimento e se estende até a maturação fisiológica (R1 até R8).

Figura 2 - Escala fenológica da soja.



Fonte: Fehr, Caviness (1977).

2.1.3.2 Exigências climáticas da soja

Dentre os principais fatores intrínsecos à produção agrícola, os elementos climáticos são os mais difíceis de se controlar e também o mais limitante de se obter máxima produtividade (Farias *et al.*, 2009). Os principais fatores de risco e de insucesso na produção de soja são decorrentes das adversidades climáticas, e dentre os elementos a disponibilidade de água é um fator essencial para que a cultura da soja apresente um desenvolvimento adequado e obtenha uma melhor produtividade (Farias; Nepomuceno; Neumaier, 2009).

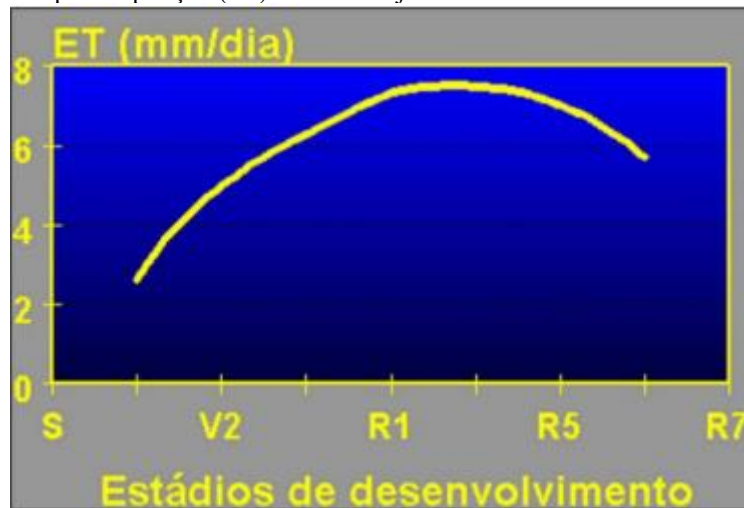
A cultura da soja durante o seu ciclo necessita um volume total de água entre 450 a 850 mm, levando em consideração as variações do tempo durante o crescimento da planta e da duração do seu ciclo (Franke, 2000). As duas etapas críticas do desenvolvimento da cultura são da germinação e emergência (VE – VC) e o florescimento e enchimento de grãos (R1 ao R6) (Silva, 2013).

A deficiência hídrica no início do ciclo dificulta a embebição da semente e o processo da germinação, além de promover formação de crostas superficiais em determinados tipos de solo, que atrasam ou impedem a emergência das plântulas (Câmara; Heiffig, 2000). A semente de soja necessita absorver, no mínimo, 50% de seu peso em água para assegurar boa

germinação, e o conteúdo de água no solo não deve exceder a 85% do total de água disponível (Embrapa Soja, 2005).

Essa necessidade de água vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), quando também normalmente é atingida a cobertura máxima do dossel, decrescendo a demanda hídrica após esse período (Figura 3). O estresse hídrico durante estes estádios fenológicos, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático, queda prematura de folhas e de flores, abortamento de vagens e má formação e enchimento de grãos (Embrapa Soja, 2005).

Figura 3 - Evapotranspiração (ET) diária da soja durante seus estádios de desenvolvimento.



Fonte: Farias, Nepomuceno e Neumaier (2007).

A soja se adapta a temperatura do ar entre 20°C e 30°C, sendo que para seu crescimento e desenvolvimento ideal deve estar próximo de 30°C. A semeadura da cultura, sempre que possível deve ocorrer com temperatura acima de 20 °C, pois temperaturas com valor inferior podem prejudicar a germinação e emergência (Embrapa Soja, 2011)

As temperaturas inferiores a 10°C ou maiores que 40°C, são inadequadas para seu cultivo, já que em baixas temperaturas seu crescimento vegetativo é pequeno ou nulo e sob altas temperaturas pode danificar a floração e causar abortamento dos legumes, acentuando esse dano com a ocorrência de déficit hídrico (Gava, 2014). Além disso, a temperatura basal da soja está acima de 13°C, necessitando ser superior a esse valor para que se tenha a indução da floração (Farias; Nepomuceno; Neumaier, 2009).

Outra variável importante é a disponibilidade de luz, estando relacionada com a faixa ideal de temperatura e ao maior acúmulo de CO₂, resultante da fotossíntese realizada pela planta. Em condições de máxima radiação solar, a soja produz maior rendimento desde que

bem suprida de água (Liu *et al.*, 2006). Entretanto, no caso de haver déficit hídrico, o rendimento poderá ser maior em ambiente com menor radiação solar (Embrapa Soja, 2011).

A energia luminosa e a temperatura atuam como importantes sinais ambientais que regulam processos fisiológicos nas plantas, como a indução do florescimento. A cultura da soja é caracterizada como uma planta de dias curtos, sendo estimulada a florescer quando a duração do dia é inferior ao seu fotoperíodo crítico, caso contrário, permanece em fase vegetativa (Tejo; Fernandes; Buratto, 2019).

A sensibilidade fotoperiódica varia com o genótipo, sendo determinante para a adaptação dos cultivares em diferentes áreas. Os genótipos com período juvenil longo apresentam maior adaptabilidade a diferentes latitudes e épocas de semeadura (Farias; Nepomuceno; Neumaier, 2007). Para a região Sul do Brasil, são indicadas cultivares com período juvenil curto, devido aos dias mais longos no momento da semeadura, o que permite adequada formação de gemas reprodutivas antes do encurtamento do fotoperíodo (Tiemann *et al.*, 2023).

2.1.4 El Niño Oscilação Sul (El Niño e La Niña)

O fenômeno denominado de El Niño Oscilação Sul (ENOS), consiste no aquecimento (El Niño) ou no resfriamento (La Niña) das águas do Pacífico tropical. De forma geral, a fase quente está associada aos períodos secos nas regiões tropicais e aos períodos quentes e úmidos nos extras tropicais (Brizola, 2024).

O fenômeno ENOS corresponde a um acoplamento entre o oceano e a atmosfera, ocorrendo através de anomalias na temperatura do oceano Pacífico Tropical na parte central e junto a América do Sul, e de anomalias na pressão atmosférica (Brizola, 2024). Além disso, afeta a circulação na atmosfera, determinando variabilidade no padrão da temperatura do ar e, principalmente, da precipitação pluvial em pelo menos vinte regiões do mundo, persistindo normalmente, entre 6 a 18 meses (Cunha *et al.*, 2011).

No Sul do Brasil, localizado na faixa extratropical, se tem um evidente sinal de variabilidade climática relacionado ao fenômeno ENOS. Em episódios quentes, relacionados ao El Niño, se tem a precipitação pluvial acima do normal e os episódios frios, associados a La Niña, estão relacionados à diminuição da precipitação pluvial (Grimm *et al.*, 2000).

Na região do Nordeste brasileiro, situado na faixa tropical, se tem um cenário contrário, onde a atuação do fenômeno El Niño causa uma redução nas precipitações médias e

a ocorrência do La Niña, está associado à anos de precipitações normais, chuvosos ou muitos chuvosos (Cunha *et al.*, 2011).

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no município de Ibirubá, localizado na região do Alto Jacuí, no estado do Rio Grande do Sul. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, o solo predominante é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (MSRS, 2025). O clima é caracterizado como Cfa (úmido, temperado e com verões quentes) pela classificação de Köppen, com temperaturas médias anuais que variam geralmente entre 10 °C e 29 °C, e precipitação média anual de 1.810,1 mm (IRGA, 2022).

Foram obtidas séries de dados meteorológicos registrados entre os meses de outubro de 2022 a abril de 2023 e de outubro de 2023 a abril de 2024, coletados da Estação Meteorológica Automática do INMET em Ibirubá (Figura 4), com as coordenadas geográficas de 28°39'12,4 S e 53°06'42,6 W e altitude de 455 metros, a qual está localizada no setor agrícola do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, campus Ibirubá.

Figura 4 - Estação Meteorológica Automática do INMET, Ibirubá/RS



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A renovação do acordo de cooperação técnica entre o IFRS Campus Ibirubá e o INMET foi realizada no dia 21 de março de 2023. A estação automática realiza as medições horárias de diversas variáveis meteorológicas, como temperatura e umidade relativa do ar, ponto de orvalho, pressão atmosférica, velocidade do vento, radiação solar e precipitação.

Além disso, a estação mede e registra os dados a cada hora, sendo mais precisa que as estações convencionais que captam apenas três vezes ao dia. Os dados climáticos coletados na estação são obtidos do site do INMET, acessando a aba “Dados Meteorológicos” e em seguida “Tabela de dados das estações”. Logo, foi selecionado o tipo de estação (automática ou convencional), o estado onde está instalada, a estação de acordo com a cidade que está instalada e a data de coleta dos dados.

A partir desta coleta, será determinada a precipitação diária dos acumulados e posteriormente a soma mensal, e também será calculada a evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO. Assim, utilizando uma planilha no software Microsoft Excel desenvolvida pela Embrapa, a E_{to} foi calculada de forma automática, com as mesmas variáveis do método de Penman-Monteith.

Para essa determinação diária da E_{to} foram preenchidas na planilha da Embrapa as informações de data, latitude, dia juliano, altitude e município. Posteriormente, completou-se as células das variáveis meteorológicas de temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), umidade relativa máxima (%), umidade relativa mínima (%), pressão atmosférica (hPa), velocidade do vento (m.s⁻¹) e radiação global (KJ.m⁻²) com os valores de cada horário. Em seguida, realizou-se o somatório da E_{to} de cada dia para obter a evapotranspiração de referência mensal.

Após o cálculo da E_{to}, se estabeleceu o balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite & Mather (1955). Primeiramente, definiu-se a capacidade de água disponível (CAD), a qual consiste no intervalo de umidade do solo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), dependendo do tipo de solo e da cultura. A CAD foi determinada a partir da seguinte equação:

$$CAD = CAD \text{ média} \times Z_r \quad (1)$$

Sendo:

CAD: capacidade de água disponível (mm);

CAD média: capacidade de água disponível média, (mm/cm);

Z_r: profundidade específica do sistema radicular (cm).

A CAD adotada no estudo foi de 100 mm, devido a característica de solo argiloso no município, deve-se considerar o valor de CAD média de 1,0 mm/cm (Teixeira *et al.*, 2021). Já a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura da soja é de 100 cm.

Normalmente, o sistema radicular adotado para a cultura é de 50 cm, entretanto, em anos de menor ocorrência de precipitações, a soja quando cultivada em sequeiro tende a desenvolver um sistema radicular mais profundo como uma adaptação em busca de umidade, o que justifica utilizar uma profundidade de sistema radicular maior.

Após a determinação da P, ETo e CAD, foi quantificada a diferença entre precipitação e evapotranspiração de referência (P-ETo). Nos meses em que a P-ETo foi positiva, significa que precipitou mais do que evapotranspirou, e quando a P-ETo foi negativa, a evapotranspiração foi maior que a precipitação. Utilizou-se a seguinte equação para determinação da P-ETo:

$$P-ETo (n) = P(n) - Eto (n) \quad (2)$$

Sendo:

P-ETo: diferença de precipitação e evapotranspiração de referência (mm);

P: precipitação (mm);

ETo: evapotranspiração de referência (mm);

n: mês de referência do cálculo.

Em seguida, determinou-se o negativo acumulado (NAc), o qual consiste no somatório da sequência de valores negativos de P-ETo. O NAc representa em que mês o balanço hídrico foi iniciado, o qual é considerado muito importante para quantificar o armazenamento de água no solo.

O cálculo do NAc é iniciado no primeiro mês de P-ETo negativo após uma sequência positiva de P-ETo, repetindo para o NAc o mesmo valor negativo de P-ETo do mês em questão. Se no mês seguinte o valor de P-ETo continua negativo, realizou-se o somatório do valor P-ETo do mês em questão com o valor do NAc do mês anterior. Caso o armazenamento do mês for maior ou igual a CAD, o valor de NAc será 0.

O mês em que a P-ETo voltar a ser positiva após uma sequência negativa, calculou-se primeiro o armazenamento pela equação 3, e depois o NAc pela equação 4.

$$ARM = (P - ET_o)_n + ARM_{n-1} \quad (3)$$

Sendo:

ARM: armazenamento de água no solo (mm);

P-ET_o: diferença de precipitação e evapotranspiração de referência (mm);

n: mês de referência;

(n-1): mês anterior do mês de referência do cálculo.

$$NAc = CAD \times \ln (ARM/CAD) \quad (4)$$

Sendo:

NAc: negativo acumulado (mm);

CAD: capacidade de água disponível (mm);

ARM: armazenamento de água no solo (mm).

Com o negativo acumulado quantificado, determinou-se o armazenamento de água no solo (ARM), que é a quantidade de água que estava presente no solo considerando suas entradas e saídas. Os meses em que P-ET_o foi < 0, foi utilizada a seguinte equação para quantificar o armazenamento:

$$ARM_c = CAD e^{-[NAc/CAD]} \quad (5)$$

Sendo:

ARM: armazenamento de água no solo (mm);

CAD: capacidade de água disponível (mm);

NAc: negativo acumulado (mm);

n: mês de referência.

Com o ARM quantificado, calculou-se a variação de armazenamento de água no solo (ALT), ou seja, o quanto o armazenamento de água no solo varia de mês a mês, sendo importante na determinação da evapotranspiração real e do excedente hídrico. Sendo utilizada a equação 6 para calcular a alteração do armazenamento de água no solo:

$$ALT_n = ARM_n - ARM_{n-1} \quad (6)$$

Sendo:

ALT: variação de armazenamento de água no solo (mm);

ARM: armazenamento de água no solo (mm);

n: mês de referência do cálculo;

(n-1): mês anterior do mês de referência do cálculo.

Posteriormente determinou-se a evapotranspiração real (ETR), ou seja, a evapotranspiração que realmente ocorre em função da disponibilidade de água no solo. A ETR é utilizada para determinação do déficit hídrico, sendo que nos meses de deficiência hídrica sempre é inferior a evapotranspiração de referência.

Nos meses em que a P-ET_o foi ≥ 0 , para a ETR adotou-se o mesmo valor da ET_o. Já nos meses em que a P-ET_o foi < 0 , foi utilizada a equação 7 para determinar a ETR:

$$ETR_n = P_n + [ALT_n] \quad (7)$$

Sendo:

ETR: evapotranspiração real (mm);

P: precipitação (mm);

ALT: variação de armazenamento de água no solo (mm);

n: mês de referência do cálculo.

Em seguida pode-se calcular a deficiência hídrica no solo (DEF), ou seja, a quantidade de água que faltou no solo, pois a saída de água no solo foi maior que a quantidade que ficou retida, sendo utilizada a equação:

$$DEF_n = ET_{o_n} - ETR_n \quad (8)$$

Sendo:

DEF: deficiência hídrica (mm);

ET_o: evapotranspiração de referência (mm);

ETR: evapotranspiração real (mm);

n: mês de referência do cálculo.

Após a determinação do DEF foi quantificado o excedente de água no solo (EXC), ou seja, a quantidade de água que não foi aproveitada pela vegetação e que foi perdida por percolação ou escoamento superficial, pois o solo atingiu sua capacidade máxima de retenção de água.

Nos meses que tiverem o ARM $< CAD$, o valor adotado para o excedente hídrico foi 0. Nos meses que apresentaram o ARM $\geq CAD$, utilizou-se a equação 9 para a quantificação

do excedente:

$$EXC_n = (P - ET_{o_n}) - ALT_n \quad (9)$$

Sendo:

EXC: excedente hídrico (mm);

P-ET_o: diferença entre precipitação e evapotranspiração de referência (mm);

ALT: variação de armazenamento de água no solo (mm);

n: mês de referência do cálculo.

Após a realização dos cálculos foi realizada a aferição do Balanço Hídrico Climatológico através das seguintes equações:

$$\Sigma P = \Sigma ET_o + \Sigma (P - ET_o);$$

$$\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EXC;$$

$$\Sigma ET_o = \Sigma ETR + \Sigma DEF;$$

$$\Sigma ALT = 0.$$

Posteriormente foram gerados gráficos sobre a variação da precipitação e temperatura, variação da precipitação, evapotranspiração de referência e evapotranspiração real e excedente ou déficits para cada período de cultivo da soja durante as duas safras. Com o BHC quantificado foi possível compreender o armazenamento de água no solo e poder relacionar com os períodos críticos de necessidade hídrica da cultura da soja.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação de precipitação (mm) e temperatura média diária (°C) do período de outubro de 2022 a abril de 2023 estão representados na Figura 5. Observa-se que nos meses de outubro e novembro, as temperaturas médias diárias variaram entre os 13 °C e 25 °C. Nos meses de dezembro e janeiro as temperaturas começaram a aumentar, se situando entre 20 °C e 29°C. Em fevereiro e março, as médias diárias ficaram entre 14 °C e 27 °C, diminuindo mais em abril onde variaram entre 11 °C e 23 °C.

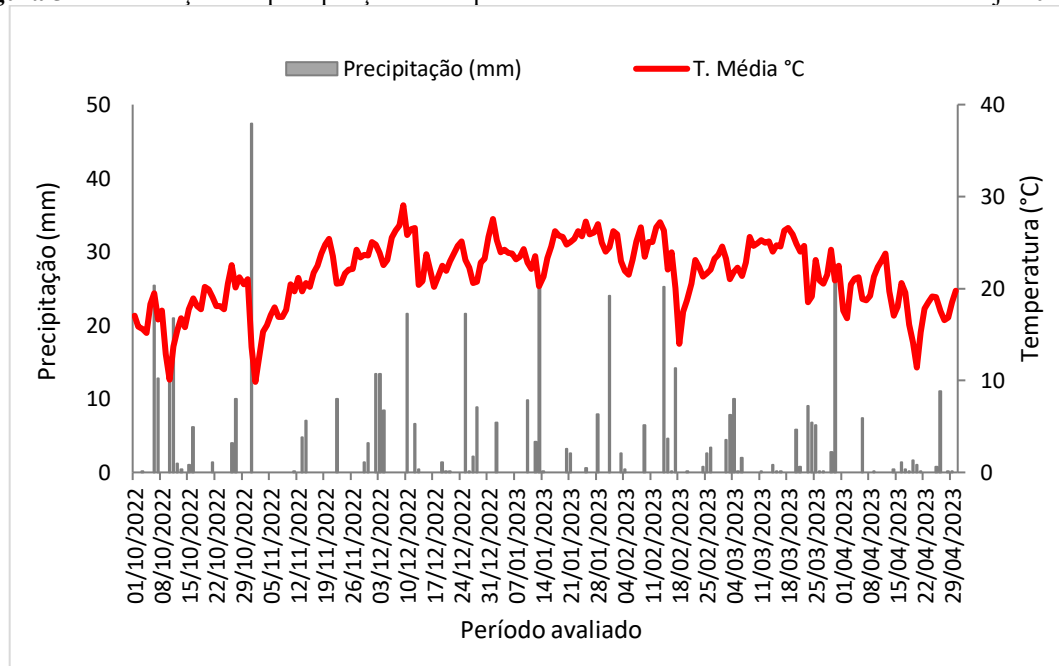
O período condizente com a semeadura até a emergência da soja, é ideal que a temperatura do solo esteja próxima de 25 °C, para proporcionar uma germinação rápida e uniforme (Monteiro *et al.*, 2009). Durante o crescimento e desenvolvimento da cultura, os

valores ideais de temperatura do ar são em torno de 30 °C, mostrando efeitos adversos quando cultivada a temperaturas superiores a 40 °C (Farias *et al.*, 2007).

Na prática, conciliar a temperatura ótima com a umidade ideal do solo para a semeadura e o manejo da soja representa um grande desafio para os produtores. Muitas vezes, quando a temperatura atinge níveis favoráveis à germinação, o solo ainda pode estar sem condições ideais de umidade, ao contrário de quando há umidade suficiente, as temperaturas podem estar abaixo do ideal, retardando a emergência das plântulas.

Além disso, na aplicação de agrotóxicos, o produtor raramente encontra o cenário ideal. As temperaturas elevadas podem acelerar a evaporação da calda, reduzindo a eficiência do produto e aumentando o risco de deriva, enquanto que a umidade relativa muito baixa compromete a absorção pelos tecidos vegetais. Por outro lado, condições de alta umidade e baixa ventilação podem favorecer escorrimento e reduzir a penetração do defensivo nas folhas, além de dificultar a entrada em campo com maquinário devido à umidade do solo.

Figura 5 - Distribuição das precipitações e temperaturas médias de Ibirubá durante a safra de soja 2022/23



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De acordo com o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), o processo de semeadura da soja no estado do Rio Grande do Sul para a safra 2022/23, ocorreu entre 11 de outubro de 2022 a 28 de janeiro de 2023 (MAPA, 2022). No período em estudo, o mês de outubro teve acumulados de precipitações que possibilitaram o processo de semeadura e a germinação e emergência das plântulas.

No entanto, no mês de novembro as precipitações foram muito irregulares e com baixos volumes, o que prejudicou o processo de semeadura para os produtores que optaram por semear naquele mês, como também dificultou o desenvolvimento das plântulas já estabelecidas no campo. Em dezembro, as precipitações foram mais frequentes em relação ao mês anterior, possibilitando a prática da semeadura nas áreas.

Nos meses de janeiro e março, as precipitações foram maiores em comparação a fevereiro. Estes meses normalmente compreendem o período em que a soja está mudando da fase vegetativa para fase reprodutiva no município. Esta última fase é caracterizada por maior demanda hídrica da cultura, afim de formar os legumes e grãos (Gatelli *et al.*, 2022). Além disso, esta mudança de fase depende do fotoperíodo e do grupo de maturação dos cultivares semeados.

A partir da segunda quinzena de março e durante o mês de abril, compreende normalmente os meses de colheita da cultura no município. No mês de março, geralmente são colhidas as áreas que foram semeadas no mês de outubro e início de novembro, já em abril são colhidas as áreas semeadas a partir da segunda quinzena de novembro e dezembro (Tiemann *et al.*, 2023).

Para a cultura da soja, a frequência de chuvas no momento de colheita está diretamente relacionada ao aumento da umidade dos grãos, favorecendo perdas por deterioração (Tsukahara *et al.*, 2016). No período avaliado, o mês de março teve maiores precipitações principalmente na primeira semana e na última semana, enquanto que abril foi caracterizado por um baixo acumulado e menores distribuições pluviométricas, sendo mais favorável para a colheita.

Os resultados do balanço hídrico climático do município de Ibirubá/RS correspondente aos meses de outubro a abril da safra de soja de 2022/23, estão apresentados na Tabela 1.

Durante a safra, a precipitação teve um acumulado de 529 mm. Esse valor encontra-se próximo ao limite inferior das necessidades hídricas da soja, estimadas entre 450 e 800 mm por ciclo (Farias *et al.*, 2007). Os meses de outubro e dezembro, obtiveram os maiores volumes de 145 mm e 99 mm, respectivamente. Os meses de novembro e abril, tiveram menores acumulados de precipitações, de 27 mm e 25 mm.

Tabela 1 - Balanço Hídrico Climatológico para Ibirubá da safra de soja 2022/23

Mês	P	ETo	P-ETo	NAc	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
	(mm)								
Out	145	121	24	-143	24	24	121	0	0
Nov	27	173	-146	-146	23	-1	28	145	0
Dez	99	194	-95	-241	9	-14	113	81	0
Jan	86	186	-100	-341	3	-6	92	94	0
Fev	61	141	-80	-421	1	-2	63	78	0
Mar	86	137	-51	-472	1	0	86	51	0
Abr	25	99	-74	-546	0	-1	26	73	0
Σ	529	1051	-522	-	61	0	529	522	0

Observação: P = Precipitação; ETo = Evapotranspiração de referência; (P-ETo) = Diferença de precipitação e evapotranspiração de referência; NAc = Negativo acumulado; ARM = Armazenamento de água no solo; ALT = Alteração de armazenamento de água no solo; ETR = Evapotranspiração real; DEF = Deficiência hídrica e EXC = Excedente hídrico.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A evapotranspiração de referência durante o período avaliado, teve um somatório de 1051 mm, sendo o mês de dezembro com maior acumulado de 194 mm e o mês de abril teve o menor acumulado de 99 mm. Apenas o mês de outubro teve a precipitação superior a evapotranspiração de referência, sendo que nos demais meses (novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril) observa-se que a evapotranspiração foi maior que a precipitação, resultando em uma sequência negativa de P-Eto.

O armazenamento de água no solo em nenhum momento atingiu a CAD ao longo do ciclo da cultura da soja, refletindo diretamente da influência do regime pluviométrico e da demanda da evapotranspiração. Em outubro, observou-se um armazenamento de água no solo de 24 mm, acompanhado de uma variação positiva no armazenamento, evidenciando a reposição hídrica em função da precipitação ser maior que a evapotranspiração de referência.

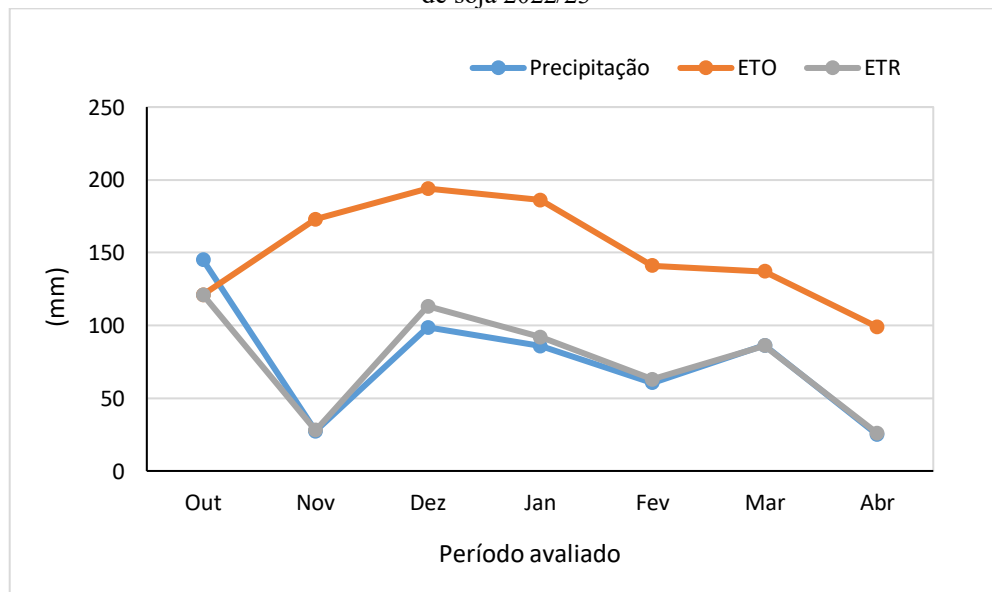
Entretanto, a partir de novembro as precipitações tiveram volumes menores em relação a evapotranspiração de referência, ocasionando a redução no armazenamento de água no solo. Esse padrão manteve-se durante todo o ciclo, sendo intensificado em janeiro, fevereiro e março, quando o armazenamento se aproximou de valores nulos (3, 1 e 1 mm, respectivamente), resultando em severas restrições hídricas. Em abril, o solo não teve armazenamento de água, sem possibilidade de reposição, conforme indicado pela alteração no armazenamento ser igual a zero.

Segundo Allen *et al.* (1998), o armazenamento de água no solo é fundamental para a manutenção do crescimento das culturas, atuando como um regulador entre a oferta atmosférica e a demanda hídrica das plantas. Nesse sentido, os resultados demonstram que a soja enfrentou severas restrições hídricas, especialmente a partir do mês de janeiro, coincidindo com as fases de florescimento e enchimento de grãos.

A Figura 6 apresenta como decorreu a variação da precipitação, evapotranspiração de referência e evapotranspiração real durante o ciclo de desenvolvimento da soja. No mês de outubro a precipitação foi maior que a evapotranspiração, ou seja, não teve déficit hídrico e a evapotranspiração real foi a mesma que a de referência. Nos demais meses a evapotranspiração real foi inferior a referência, acompanhando a limitação da precipitação e demonstrando que a planta não conseguiu atingir seu potencial hídrico por falta de água no solo.

Sendo assim, precipitações consideráveis são fundamentais para que a camada de solo determinada pela CAD seja devidamente preenchida, garantindo que as raízes da soja tenham acesso à umidade necessária para o pleno desenvolvimento. Quando ocorrem apenas chuvas de baixo volume, a água infiltra-se superficialmente, atingindo apenas as camadas mais rasas do solo, limitando o acesso das raízes à água e comprometendo processos fisiológicos essenciais, como absorção de nutrientes, fotossíntese e crescimento vegetativo.

Figura 6 - Variação da precipitação, evapotranspiração de referência e evapotranspiração real de Ibirubá na safra de soja 2022/23

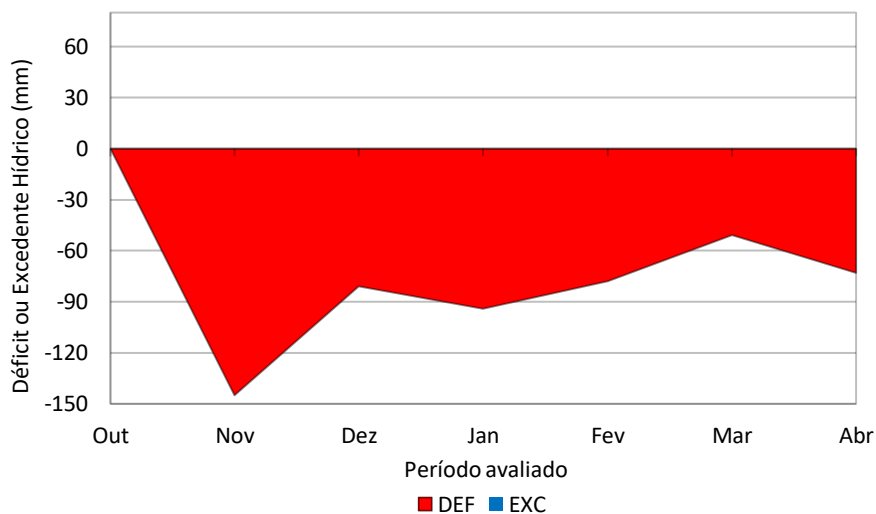


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No mês de outubro a precipitação foi maior que a evapotranspiração, e a evapotranspiração real foi a mesma que a de referência. Nos demais meses a evapotranspiração real foi inferior a referência, acompanhando a limitação da precipitação e demonstrando que a planta não conseguiu atingir seu potencial hídrico por falta de água no solo.

O balanço hídrico climatológico em relação ao déficit ou excedente hídrico durante o período avaliado, está apresentado na Figura 7. O déficit hídrico durante a safra de soja 2022/23 teve um acumulado de 522 mm. Conforme a figura, observa-se que apenas no mês de outubro não se teve déficit ou excesso de água no solo. Nos demais meses, todos apresentaram deficiência hídrica, devido a evapotranspiração de referência ter sido superior a precipitação, consequentemente, o armazenamento de água no solo em nenhum desses meses atingiu a CAD.

Figura 7 - Representação do balanço hídrico climatológico de Ibirubá da safra de soja 2022/23



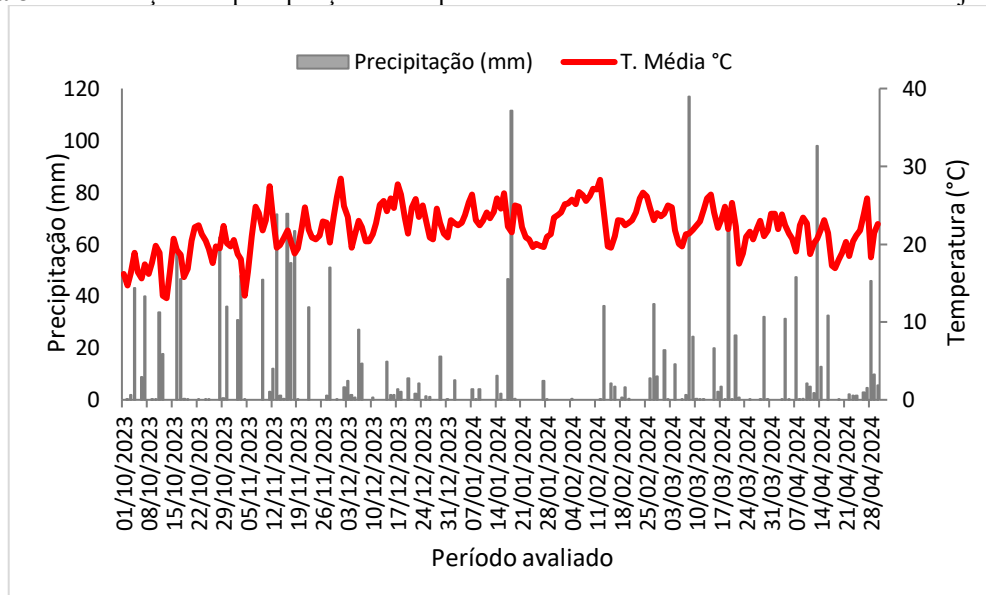
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O mês de novembro caracterizou-se pelo maior déficit hídrico da safra, dificultando a fase de semeadura no município, como também desenvolvimento das plântulas já estabelecidas. Segundo Mundstock e Thomas (2005), a deficiência hídrica no início do ciclo da soja provoca uma redução na emissão de novos ramos, limitando o número de nós com potencial para formação de vagens. Embora a soja tenha capacidade de se recuperar parcialmente diante de melhores condições hídricas após o florescimento, tal situação não se verificou na safra em estudo devido aos déficits hídricos.

Nos meses de janeiro, fevereiro e março, ocorreu déficit hídrico quando a cultura se encontrava em estádios reprodutivos cruciais, do R1 (início do florescimento) ao R6 (grão cheio ou com). Nesses estádios, a soja apresenta elevada exigência hídrica, sendo assim, a ocorrência de déficit nesse período resulta no abortamento de flores, menor número de vagens e redução no tamanho e peso das sementes, comprometendo o potencial produtivo da cultura (Andrade, 2020).

Na Figura 8 está representada a variação de precipitação (mm) e temperatura média diária (°C) do período de outubro de 2023 a abril de 2024. Observa-se na figura abaixo que a temperatura média diária de outubro e novembro permaneceram entre 13 °C e 20 °C. Nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, ocorreu um aumento com variação entre 20 °C e 28 °C, havendo apenas uma pequena redução da temperatura em março e abril, de 17 °C a 26 °C.

Figura 8 - Distribuição das precipitações e temperaturas médias de Ibirubá durante a safra de soja 2023/24



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os volumes de precipitação foram mais elevados e apresentaram melhor distribuição no início do ciclo, em comparação à safra anterior. Entretanto, os elevados índices pluviométricos registrados, resultaram em excesso de umidade no solo, especialmente nos meses de outubro e novembro, ocasionando dificuldades no processo de semeadura. Sendo assim, alguns produtores da cultura, optaram por semear a soja em dezembro.

Além disso, essa condição de elevada umidade pode ter comprometido a germinação e a emergência inicial das plântulas. A semente de soja necessita absorver, no mínimo, 50% do seu peso em água para garantir uma germinação adequada, sendo que o conteúdo de água no

solo não deve ultrapassar 85% da capacidade máxima de armazenamento hídrico (Embrapa, 2010).

Nos meses de janeiro e fevereiro observa-se, a partir do gráfico apresentado, uma distribuição irregular das precipitações ao longo do período. O mês de janeiro teve apenas duas precipitações com maiores acumulados na primeira quinzena, enquanto que fevereiro teve precipitações mais regulares a partir da segunda quinzena do mês.

Essa condição ocorrida nesses dois meses coincide com a fase reprodutiva da soja (estádios R1 a R6), período em que a cultura se encontra com o seu coeficiente da cultura (kc) máximo, ou seja, apresenta elevada exigência hídrica. De acordo com a Embrapa (2011), a soja necessita em média de 7 a 8 mm de água por dia nessa etapa do ciclo.

Sendo assim, menores disponibilidades de água nesse período podem causar, diversas alterações fisiológicas nas plantas de soja. Dentre elas destaca-se o fechamento estomático, o enrolamento das folhas, o que promove a senescência foliar precoce, bem como abortamento de flores e vagens e, conseqüentemente, redução do rendimento dos grãos (Seixas *et al.*, 2020; Embrapa, 2013).

Os meses que coincidem com o desenvolvimento final da cultura e período de colheita, apresentou precipitações bem distribuídas e com maiores acumulados. Essas precipitações ocorridas principalmente no mês abril, prejudicaram e atrasaram o período de colheita no município, resultando em uma maturação desuniforme das plantas e baixa qualidade dos grãos.

Os resultados do balanço hídrico climático do município de Ibirubá/RS correspondente aos meses de outubro a abril da safra de soja de 2023/24, estão representados na Tabela 2. Durante o período avaliado, a precipitação acumulada totalizou 1.909 mm, volume suficiente para suprir as exigências hídricas da soja, representando uma diferença positiva de 1.380 mm em relação à safra anterior.

Os maiores índices pluviométricos foram registrados nos meses de outubro (349 mm) e novembro (491 mm), enquanto dezembro (119 mm) e fevereiro (109 mm) apresentaram os menores acumulados. Essa precipitação acumulada se manteve com valor próximo a média anual registrada no município (1810,1 mm), estando associado à atuação do fenômeno El Niño, estabelecido no segundo semestre de 2023 e com influência até junho de 2024 (INMET, 2024).

Tabela 2 - Balanço hídrico climatológico de Ibirubá durante a safra de soja 2023/24

Mês	P	ETo	P-ETo	NAc	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
	(mm)								
Out	349	103	246	0	100	0	103	0	246
Nov	491	130	361	0	100	0	130	0	361
Dez	119	152	-33	-33	72	-28	147	5	0
Jan	194	156	38	0	100	28	156	0	10
Fev	109	139	-30	-30	74	-26	135	4	0
Mar	337	117	220	0	100	26	117	0	194
Abr	310	82	228	0	100	0	82	0	228
Σ	1909	879	1030	-63	646	0	870	9	1039

Observação: P = Precipitação; ETo = Evapotranspiração de referência; (P-ETo) = Diferença de precipitação e evapotranspiração de referência; NAc = Negativo acumulado; ARM = Armazenamento de água no solo; ALT = Alteração de armazenamento de água no solo; ETR = Evapotranspiração real; DEF = Deficiência hídrica e EXC = Excedente hídrico.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

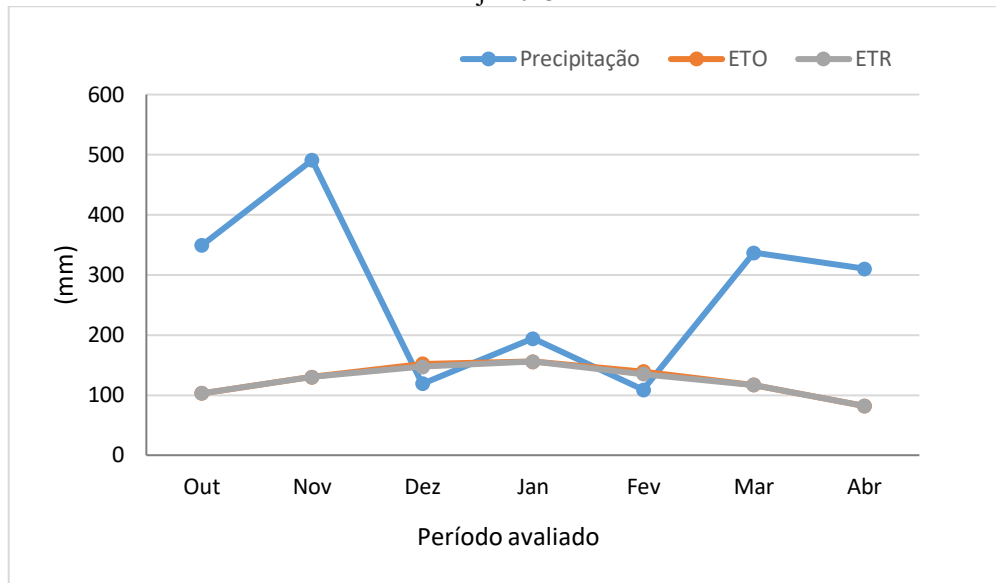
A evapotranspiração de referência teve um acumulado de 879 mm, sendo que janeiro teve o maior valor de 156 mm, enquanto que abril teve a menor evapotranspiração, de 82 mm. Apenas os meses de dezembro e fevereiro tiveram a evapotranspiração maior que a precipitação.

O balanço hídrico da safra 2023/24 mostrou que o armazenamento de água no solo (ARM) permaneceu em 100 mm entre os meses de outubro e abril, apresentando apenas pequenas reduções em dezembro (72 mm) e fevereiro (74 mm). Esses resultados indicam que o solo se manteve saturado, ou próximo à sua CAD, durante grande parte do ciclo da soja.

Esse padrão de armazenamento elevado pode trazer tanto benefícios quanto limitações ao desenvolvimento da cultura. De forma positiva, assegura a disponibilidade hídrica em fases críticas, como o florescimento e o enchimento de grãos. Por outro lado, de acordo com Garcia e Goulart (2015), o excesso de água pode ocasionar encharcamento, comprometendo a aeração do solo e dificultando a semeadura, a germinação e o estabelecimento das plântulas, situação observada principalmente em outubro e novembro.

Na Figura 9 a variação da precipitação, evapotranspiração de referência e evapotranspiração real durante o ciclo de desenvolvimento da soja.

Figura 9 - Variação da precipitação, evapotranspiração de referência e evapotranspiração real de Ibirubá na safra de soja 2023/24



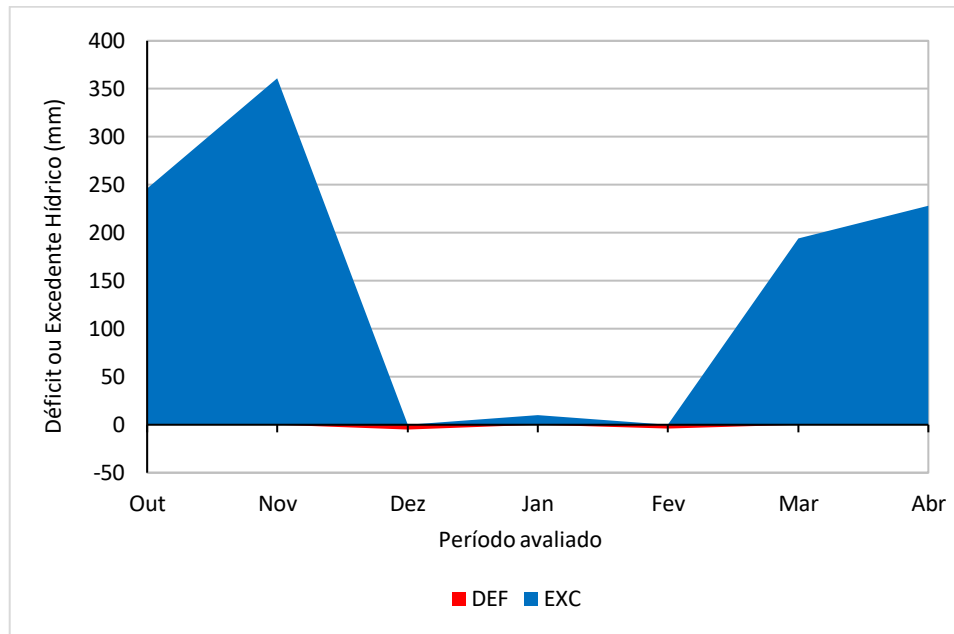
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Conforme demonstra a figura acima, a evapotranspiração real (ETR) e a evapotranspiração de referência (ETO) se mantiveram conjuntas na maior parte do ciclo. Isso indica que a disponibilidade de água no solo foi suficiente para suprir a demanda atmosférica, permitindo que a cultura mantivesse sua transpiração em nível potencial. Entretanto, nos meses de dezembro e fevereiro, a ETO apresentou valores ligeiramente superiores à ETR, devido a menor precipitação ocorrida nesses períodos.

A Figura 10 apresenta o balanço hídrico climatológico em relação ao déficit ou excedente hídrico durante a safra de soja 2023/24. Durante o período avaliado na safra de soja 2023/24, o excedente hídrico ocorreu nos meses de outubro, novembro, janeiro, março e abril, com um acumulado de 1039 mm. O mês de novembro teve o maior excedente de água no solo, totalizando 361 mm, enquanto que janeiro foi caracterizado por um pequeno excedente hídrico, de 10 mm.

Verifica-se que o excedente de água no solo ocorreu devido a precipitação ser superior à evapotranspiração de referência, o que possibilitou a recarga hídrica até o solo atingir sua capacidade de água disponível. A partir disso, toda a água excedente foi contabilizada como excedente hídrico, visto que o solo não possui capacidade de armazenamento superior.

Figura 10 - Representação do balanço hídrico climatológico de Ibirubá da safra de soja 2023/24



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os meses de dezembro e fevereiro apresentaram déficit hídrico no solo de 5 mm e 4 mm, respectivamente. Contudo, o balanço hídrico evidencia que o excedente de precipitação ocorrido em outubro e novembro, aliado à reposição hídrica registrada em janeiro e março, foi suficiente para manter o solo próximo à sua capacidade de armazenamento de água.

Considerando o ciclo da soja, dezembro corresponde ao período vegetativo (VE–VC), no qual o excedente hídrico acumulado em outubro e novembro pode ter favorecido a germinação e emergência, como também o desenvolvimento das plantas. Já as reposições hídricas em janeiro e março coincidem com estádios reprodutivos (R1–R6), contribuindo para a manutenção da floração e formação dos grãos, o que possivelmente reduziu perdas de produtividade associadas a déficits hídricos.

Resultados semelhantes foram encontrados por Tiemann (2023), através da realização do balanço hídrico climatológico para o município de Ibirubá/RS, entre os meses de outubro a abril das safras de soja de 2020/21 e 2021/22. O balanço hídrico foi gerado a partir da metodologia de Thornthwaite e Mather (1955) e a evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman-Monteith. A CAD adotada foi de 100 mm, sendo a mesma que utilizada para este trabalho.

A sequência de estudos realizados para uma mesma área é de grande importância, pois permite estabelecer comparações consistentes entre diferentes safras, contribuindo para a compreensão dos impactos climáticos sobre a produção agrícola. Assim, a aplicação da

mesma metodologia utilizada por Tiemann *et al.* (2023) nas safras de 2022/23 e 2023/24 possibilita estabelecer comparações entre os resultados, o que amplia a consistência da análise sobre os efeitos do tempo na cultura da soja no município.

Para a safra 2020/21, foram registradas deficiência hídrica nos meses de outubro, novembro, dezembro, fevereiro e abril, enquanto que janeiro e março não apresentaram nem déficit nem excedente. Na safra 2021/22, houve deficiência hídrica de novembro a fevereiro, com excedente em outubro e abril (149 mm no total) e março permaneceu sem déficit ou excedente.

Verifica-se que nas safras de soja 2022/23 e 2023/24, os déficits hídricos identificados apresentaram semelhança com os resultados obtidos por Tiemann *et al.* (2023), coincidindo com os períodos de estabelecimento da cultura e fase de florescimento e enchimento de grão. Como também, percebe-se a semelhança de comportamento da safra 2020/21 em relação a safra 2022/23 deste estudo, onde ambas possuem o predomínio de déficit hídrico, sem demonstrar excedentes de água no solo e demonstrando menores produtividades em comparação a outras safras.

Outra característica observada no balanço hídrico realizado por Tiemann *et. al* (2023) na safra 2021/22 é a presença de excedentes hídricos no início e final de ciclo da cultura soja, sendo que o mesmo é observado no presente estudo em relação à safra 2023/24, como também foram caracterizadas como duas safras de maior disponibilidade hídrica. Além disso, assim como nesse trabalho, é destacado a importância do armazenamento de água no solo, atuando como reposição hídrica para reduzir os efeitos das oscilações pluviométricas ao longo do ciclo da soja.

A safra 2022/23 teve menor produtividade devido ao déficit hídrico que se teve em quase todo o ciclo da soja, sendo que inicialmente houve dificuldade na implantação da cultura devido à falta de umidade no solo e também se teve redução no volume das precipitações na fase de maior necessidade hídrica. Esta condição enfrentada na safra é caracterizada pela influência do fenômeno La Niña, o qual já atuava pela terceira vez consecutiva e causou redução no volume e na frequência das precipitações no estado do Rio Grande do Sul.

Já a safra de soja 2023/24 apresentou maior produtividade em relação a 2022/23. De acordo com a Conab (2024), a produtividade no estado do Rio Grande do Sul na safra de 2023/24 foi de 2905 kg/ha, enquanto que na de 2022/23 foi de 1986 kg/ha. Esse aumento de produtividade se deve principalmente a melhor distribuição e acúmulo de precipitações

verificadas devido ao efeito do El Niño, principalmente nos meses de semeadura e desenvolvimento inicial da cultura e na fase de florescimento e enchimento dos grãos.

Essa relação entre a precipitação pluviométrica e a produtividade da cultura da soja foi verificada em um trabalho realizado por Silva, Sartori e Wollmann (2014), utilizando o balanço hídrico climatológico através da metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), para as safras de soja dos anos de 1982 a 2012, no município de Ibirubá/RS. O estudo também observou que os anos de El Niño estão relacionados a maiores produções de soja, assim como os anos de La Niña estão caracterizados por menores rendimentos, o mesmo que se verifica neste trabalho.

Além disso, também conclui que o fator que mais influência na produtividade da cultura é a distribuição da precipitação durante o ciclo fenológico da soja. Sendo que se verifica um resultado, principalmente na safra de 2023/24 do presente estudo, onde os meses de dezembro e janeiro tiveram menores distribuições nas precipitações, podendo se tornar um fator limitante na produção da cultura.

Aliado a isso, a maioria dos cultivares de soja atuais apresentam o hábito de crescimento indeterminado, ou seja, a planta continua a crescer vegetativamente, aumentando o número de nós mesmo após o florescimento, diferente das plantas de crescimento determinado, que cessam seu crescimento. Essa característica de crescimento indeterminado, ressalta ainda mais a importância dessa distribuição uniforme das precipitações, visto que a planta apresenta o seu desenvolvimento vegetativo juntamente com o reprodutivo, fase de maior necessidade hídrica.

Com o desenvolvimento do Balanço Hídrico Climatológico, demonstra-se a necessidade de posicionamento de cultivares de soja no Rio Grande do Sul, requerendo ação estratégica principalmente em anos de ocorrência do fenômeno La Niña. De acordo com Faverin (2024), deve-se adotar cultivares com maior grupo de maturação, pois apresentam maior duração na fase de desenvolvimento vegetativo, reduzindo o risco de ocorrência de déficit hídrico durante o enchimento de grãos.

Ademais, os dados encontrados do presente estudo destacam como os fenômenos meteorológicos de El Niño e do La Niña impactam e interferem na produtividade da cultura da soja, demonstrando a variabilidade na distribuição e nos acumulados das precipitações durante as duas safras de soja caracterizadas.

Sendo assim, diante dos cenários enfrentados nas duas safras destaca-se a importância do manejo conservacionista do solo, assim como o aumento do seu armazenamento de água, tanto em períodos de escassez quanto de excesso de água. Durante déficits hídricos, a

preservação da matéria orgânica por meio de práticas como o plantio direto (SPD) favorece a estrutura do solo e amplia sua capacidade de retenção de água, funcionando como reserva hídrica em momentos críticos (Debiasi *et al.*, 2021).

Por outro lado, em situações de excesso pluviométrico, os solos compactados apresentam dificuldade de infiltração e drenagem de água, agravando o encharcamento e limitando a disponibilidade de oxigênio para as raízes (Debiasi *et al.*, 2021). Portanto, práticas conservacionistas como manutenção da cobertura vegetal, rotação de culturas e mínima mobilização do solo são indispensáveis para mitigar os efeitos adversos de extremos hídricos e garantir rendimento da cultura de soja.

3 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu identificar, por meio do balanço hídrico climatológico, os períodos de déficit e de excedente hídrico no solo, relacionando com os períodos críticos de desenvolvimento da cultura da soja. Os resultados evidenciam a relevância do monitoramento climático como instrumento de apoio ao planejamento agrícola, fornecendo subsídios para orientar os produtores na adoção de práticas de manejo adequadas e na programação das atividades agrícolas, como também no posicionamento de cultivares em relação ao grupo de maturação.

Portanto, conclui-se que não apenas a quantidade de precipitação é determinante para atender às necessidades hídricas da soja, mas também a sua distribuição ao longo do ciclo, especialmente nas fases críticas de floração e enchimento de grãos. Também, destaca-se a importância do manejo conservacionista do solo, fundamentais para amenizar os efeitos da variação do armazenamento de água no solo e amenizar os efeitos de déficits ou de excessos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy. 1998. 300 p.
- ANDRADE, Bruno C. C. **Estimativa da evapotranspiração real via sensoriamento remoto**. Orientador: Eber José de Andrade Pinto. 2018. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 2018.
- ANDRADE, S. R. M. Impacto do déficit hídrico em diferentes fases do desenvolvimento da soja. **Revista Cultivar**, 2020. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/index.php/artigos/impacto-do-deficit-hidrico-em-diferentes-fases-do-desenvolvimento-da-soja>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- ARAÚJO FILHO, J. C. *et al.* Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 282: Determinação da capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) e sua importância para o balanço hídrico. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022. 27 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1143345/1/CNPS-BPD-282-2022.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Portaria estabelece calendários de semeadura de soja para a safra 2022/2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias-2022/portaria-estabelece-calendarios-de-semeadura-de-soja-para-a-safra-2022-2023>. Acesso em: 25 set. 2025.
- Brito, T. R. C. *et al.* Mudanças no Uso da Terra e Efeito nos Componentes do Balanço Hídrico no Agreste Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 02, p. 870-886, 2020.
- BRIZOLA, Luísa Razia. **Variabilidade climática – El Niño e La Niña: efeitos na produtividade agrícola de algumas culturas do Rio Grande do Sul**. 2024. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) — Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen, Frederico Westphalen, RS, 2024.
- BUCIOLI, Bruna Battisti. Desafios e oportunidades na exportação da soja brasileira: uma análise entre o período de 2012 a 2021. In: Anais do Congresso de Administração da Faculdade Assis Gurgacz – FAG, 2024. Disponível em: <https://www.fag.edu.br/novo/arquivos/anais/2024/Administração%20-%20Bruna%20Battisti%20Bucioli.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.
- CARVALHO, N. S. *et al.* **Revisão: A importância da soja para o agronegócio brasileiro**. In: Fitotecnia, sistemas agrícolas ambientais e solo. Cap. 6, p. 52–60. Disponível em: [file:///C:/Users/Tiemann/Downloads/revisao-a-importancia-da-soja-para-o-agronegocio-brasileiro%20\(7\).pdf](file:///C:/Users/Tiemann/Downloads/revisao-a-importancia-da-soja-para-o-agronegocio-brasileiro%20(7).pdf). Acesso em: 23 ago. 2025.
- CONAB. **Acompanhamento Semanal das Condições das Lavouras**, 2024. Disponível em: <file:///C:/Users/Tiemann/Downloads/MonitoramentoZdasZCondicoesZdasZLavourasZ-ZSUINFZ13-05ZaZ20-05.pdf>. Acesso em: 18 out. 2024.
- CONAB. **12º Levantamento – Safra 2023/24**. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safra/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 23 out. 2025.

- CONCEIÇÃO, Marco A.F. Roteiro de cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith-FAO. **Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica**, v. 65, 2006.
- CUNHA, G. R. El Niño/La Niña – Oscilação Sul e seus impactos na agricultura brasileira: fatos, especulações e aplicações. **Revista Plantio Direto**, p.18-22, 2011.
- DA SILVA, Robson Rigão; SARTORI, Maria da Graça Barros; WOLLMANN, Cássio Arthur. Relação entre precipitação pluviométrica e produtividade da cultura de soja, no município de Ibirubá-RS. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 27, p. 296-314, 2014.
- DEBIASI, H. C. *et al.* Compactação do solo. In: **Agência Embrapa de Informação Tecnológica**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://portal-h.sede.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/producao/manejo-do-solo/compactacao-do-solo>. Acesso em: 2 set. 2025.
- EMBRAPA SOJA. Manejo do solo. In: **Agência Embrapa de Informação Tecnológica**. Londrina: Embrapa Soja, 2021. Disponível em: <https://portal-h.sede.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/producao/manejo-do-solo>. Acesso em: 2 set. 2025.
- EMBRAPA SOJA; EMBRAPA CERRADOS; EMBRAPA AGROPECUÁRIA OESTE. Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil 2011. Série Sistemas de Produção, n. 14. Londrina, PR: Embrapa, 2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/864927/1/SistemaProducao14VE.pdf>. Acesso em: 25 set. 2025.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Cultivo de Soja no Cerrado de Roraima. Londrina: Embrapa Soja, 2009.
- EMBRAPA. Tecnologias de Produção de Soja – Região Central do Brasil – 2012 e 2013. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261 p.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular Técnica, 48).
- FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. cap. 15, p. 261-278.
- FAVERIN, Victor. **Ano de La Niña requer cultivar de soja específica para o Sul do país. 22 set. 2024**. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/agricultura/projeto-soja-brasil/ano-de-la-nina-requer-cultivar-de-soja-especifica-para-o-sul-do-pais/>. Acesso em: 13 out. 2025.
- FRANKE, A. E. Necessidade de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. **Pesq. Agropec. Bras.** Vol.35 n.8 Brasília, 2000.
- FREITAS, M. C. M. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, vol.7, n.12, maio 2011.
- GARCIA, Rodrigo Arroyo; GOULART, Augusto César Pereira. Excesso de chuvas na região sul de MS pode atrapalhar desenvolvimento da soja. **Revista Cultivar** (publicação online), Dourados, 31 out. 2015. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/artigo-excesso-de-chuvas-na-regiao-sul-de-ms-pode-atrapalhar-desenvolvimento-da-soja>. Acesso em: 25 set. 2025.
- GATELLI, Anna Elisa Petersen; FOCHESSATTO, Elizandro; VANÍN, João Paulo; VIAN, André Luis; BREDEMEIER, Christian. Parâmetros fisiológicos da soja sob estresse hídrico.

Revista Cultivar, 16 set. 2022. Disponível em:

<https://revistacultivar.com.br/artigos/parametros-fisiologicos-da-soja-sob-estresse-hidrico>. Acesso em: 25 set. 2025.

GAVA, Ricardo. **Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (Glycine Max,(L.) Merrill.)** Orientador: José Antônio Frizzone. 2014. 124 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

GAZZONI, D. L. A soja no Brasil é movida por inovações tecnológicas. **Ciência e cultura**, p. 70, n.3, p. 16-18, jul. 2018.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Variabilidade climática no sul da América do Sul associada aos eventos El Niño e La Niña. **Journal of Climate** , v.13, n.1, p.35-58, 2000.

IBGE. **Produção de Soja no Brasil**. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/soja/br>. Acesso em: 25 set. 2025.

INMET. **Estado do clima no Brasil em 2022**. 2023. Disponível em:

<https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Estado-do-clima-no-Brasil-em-2022-OFICIAL.pdf>. Acesso em: 23 out. 2024.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Médias climatológicas**. IRGA. 2022.

Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/medias-climatologicas>. Acesso em: 15 set. 2025.

JESUS, T. C. L. **Impacto do aumento da concentração atmosférica de CO2 no balanço hídrico do Cerrado**. Orientador: Mônica Carneiro Alves Senna. 2015. 76 f. Dissertação (Curso de Engenharia de Biossistemas) – Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. Niterói, RJ, 2015.

LIMA, J.E.F.W.; SILVA, E.M. Estimativa da contribuição hídrica superficial do Cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras. In: Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo: ABRH, 2007.

LIU, X. B.; HERBERT, S. J.; BAATH, K.; HASHEMI, A. M. Soybean (Glycine max) seed growth characteristics in response to light enrichment and shading. **Plant, Soil and Environment**, v. 52, p. 178-185, 2006.

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; WUTKE, E. B.; KIKUTI, H. Nitrogênio: a soja aduba a lavoura da cana. **O Agrônomo**. Campinas, v. 1, n. 57, 2005.

Ministério da Agricultura e Pecuária. **Classes de água disponível do solo para uso no ZARC**. Brasília: MAPA, 08 ago. 2022 (atualizado em 02 maio 2023). Disponível em:

<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/classificacao-de-solo>. Acesso em: 14 out. 2025.

MATOS, R. M. Potencial agroclimático para a cultura da mangueira no município de

Barbalha - CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 1, p. 2366 – 2373, 2018.

MONTEIRO, José Eduardo B. A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET / MAPA, 2009. 530 p. Disponível em:

https://portal.inmet.gov.br/uploads/publicacoesDigitais/agrometeorologia_dos_cultivos.pdf. Acesso em: 11 out. 2025.

MUNDSTOCK, C.M.; THOMAS, A.L. Soja: Fatores que afetam o crescimento e rendimento de grãos. Porto Alegre, Evangraf, 2005. 31p. Organização das Nações Unidas para

Agricultura e Alimentação (FAO). Disponível em: <https://www.fao.org.br/ultimosRelatoriosFao.asp>. Acesso em: 10 out. 2025.

MUSEU DE SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL. **Solos do Rio Grande do Sul**. UFSM, 2025. Disponível em: <https://www.ufsm.br/museus/msrs/unidade-de-solos>. Acesso em: 15 set. 2025.

NOGUEIRA, A. P. O.; SEDIYAMA, T.; BARROS, H.B.; TEIXEIRA, R.C. Morfologia, crescimento e desenvolvimento. In: SEDIYAMA, T. (Ed.). *Tecnologias de produção e usos da soja*. Londrina: Ed. Mecenas, p.7-16, 2009.

PEQUENO, P. L. L. *et al.* Água disponível do solo: algumas características físicas do solo importantes para quantificação. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2002.

PEREIRA, A. R. **Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather**. *Bragantia*, Campinas, v.64, n.2, p.311-313, 2005.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura, Luiz de Queiroz, Departamento de Ciências Exatas, Piracicaba, SP, fev. 2007.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária, 478p, 2002.

PETRY, Mirta Teresinha et al. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 531-539, 2007.

SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T.; ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira Agricultura Irrigada**, Fortaleza, CE, v. 4, nº. 3, p. 142-149, 2010.

SANTOS, Pedro Vieira Souza; ARAÚJO, Maurílio Arruda de. A importância da inovação aplicada ao agronegócio: uma revisão. **Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção**, v. 5, n. 7, p. 31-47, 2017.

SEDIYAMA, T.; PEREIRA, M. G.; SEDIYAMA, C. S.; GOMES, J. L. L. Botânica, descrição da planta e cruzamentos artificial. In: *Cultura da Soja – I parte*. Viçosa: UFV, p. 5-6, 1985.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil - magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 1, p. 1-18, 2015.

SILVA, Robson Rigão da. **Relação entre precipitação pluviométrica e produtividade da cultura de soja no município de Ibirubá-RS**. Orientador: Cássio Artur Wollmann. 2013. 95 f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SOUSA, Flávio Alves; DA ASSUNÇÃO, Hildeu Ferreira. Capacidade de Armazenamento de Água no solo (CAD) e características físicas dos solos na avaliação da distribuição da água das chuvas na Alta Bacia do Ribeirão Santo Antônio. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 6, p. 3635-3647, 2021.

SOUZA, Sandy Samille Alves de. **A importância da soja na agricultura brasileira frente à pandemia da Covid-19**. 2022. 30 f. Trabalho apresentado como requisito para aprovação na Disciplina TCC, Curso de Engenharia Agrônômica, Universidade do Estado da Bahia, Jacuizeiro 2022. Disponível em:

<https://saberaberto.uneb.br/server/api/core/bitstreams/38676aa1-a9dc-42a8-9191-d99d917ae535/content>. Acesso em: 9 out. 2025.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2008. 820 p.

TATEISH, R., AHN, C.H., Mapping evapotranspiration and water balance for global land surfaces. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, 51: 209–215, 1996.

TIEMANN, Fábio Daniel Rohr; KIRCHNER, Jardel Henrique; SANDRI, Maria Clara Pieri de Quadros; LUDWIG, Marcos Paulo. Balanço Hídrico Climatológico do Município de Ibirubá-RS das Safras de Soja 2020/21 e 2021/22. **Irriga**, Botucatu, v. 28, n. 4, p. 756-774, 2023. DOI:10.15809/irriga.2023v28n4p756-774

TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes *et al.* Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no zoneamento agrícola de risco climático. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2021. **Boletim técnico**, v. 272, 2021.

TEJO, D. P.; FERNANDES, C. H. S.; BURATTO, J. S. Soja: fenologia, morfologia e fatores que interferem na produtividade. **Revista Científica Eletrônica de XIX da FAEF**, v.35, n.1, jun.2019. Disponível em:http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/hw9EU5Lusw7rZZH_2019-6-19-14-11-1.pdf>. Acesso em: 28 set. 2025.

TREMOCOLDI, W. A.; BRUNINI, O. Caracterização agroclimática das unidades da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo: Capão Bonito e região. Campinas: Instituto Agrônomo. (Série Tecnologia APTA, Boletim Técnico IAC, 205, 30p.), 2008.

TSUKAHARA, R. Y.; FONSECA, I. C. de B.; SILVA, M. A. de A.; KOCHINSKI, E. G.; PRESTES NETO, J.; SUYAMA, J. T. Produtividade de soja em consequência do atraso da colheita e de condições ambientais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 8, p. 905–915, 2016. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2016.v51.23379.

VILLA, Bruna de *et al.* Balanço hídrico climatológico: Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, p. mai. 2022.

ZANON, A. J. *et al.* Ecofisiologia da Soja Visando Altas Produtividades. 1. ed. Santa Maria: Palloti, 2018.