

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**Felipe Schmidt Dalla Porta**

**FASES DE PLASTOCRONO E MODELAGEM DO  
DESENVOLVIMENTO NA CULTURA DA SOJA**

Santa Maria, RS  
2023

**Felipe Schmidt Dalla Porta**

**FASES DE PLASTOCRONO E MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO NA  
CULTURA DA SOJA**

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

Orientador: Prof. Dr. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS  
2023

Dalla Porta, Felipe  
FASES DE PLASTOCRONO E MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO  
NA CULTURA DA SOJA / Felipe Dalla Porta.- 2023.  
57 p.; 30 cm

Orientador: Nereu Augusto Streck  
Coorientador: Alencar Junior Zanon  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2023

1. Plastocrono 2. Modelagem matemática 3. SimulaSoja  
I. Augusto Streck, Nereu II. Junior Zanon, Alencar III.  
Titulo.

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

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

**Felipe Schmidt Dalla Porta**

**FASES DE PLASTOCRONO E MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO NA  
CULTURA DA SOJA**

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

Aprovada em 10 de julho de 2023

---

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

---

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

---

**Michel Rocha da Silva, Dr. (CropsTeam)**

Santa Maria, RS

2023

## AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, em especial meus pais Airton e Eliani, minhas irmãs Gabriela e Giulia, meus avós Ariovaldo (*in memoriam*), Noveli, Adelma e Arlindo (*in memoriam*), a minha sobrinha Beatriz, aos meus tios, especialmente a Lizia e Cláudio, os quais foram a minha base sejam quais forem minhas escolhas.

Aos professores Nereu Augusto Streck e Alencar Junior Zanon pela amizade, parceria e orientação desde parte da graduação até o mestrado, os quais sempre propuseram grandes desafios e oportunidades, permitindo tornar-me a pessoa que sou hoje.

Ao Prof. Cleber Maus Alberto pela orientação, amizade e conselhos dados a minha pessoa desde o início da graduação e por aceitar participar desta banca avaliadora.

Ao Dr. Michel Rocha da Silva pelos anos de amizades e ensinamentos desde 2017, e o maior incentivador a seguir meus objetivos, mesmo frente aos entraves propostos pela vida, e por aceitar ser parte da banca avaliadora.

Aos colegas da Equipe FieldCrops, em especial ao Lorenzo Dalcin Meus, Enrico FleckTura, Eduardo Lago, Alexandre Ferigolo, José Eduardo Winck, Maurício Fornalski e todos os demais membros desse grande time, sem exceções, que me acolheram quando entrei no grupo e auxiliaram na condução de experimentos permitindo obter os dados utilizados neste estudo.

E por fim, as amizades construídas em Santa Maria, especial ao meu amigo Leonardo Rodrigues que topou a grandiosa missão de morar junto comigo, e a todos aqueles que tornaram cada dia durante o mestrado especial.

## **EPÍGRAFE**

“Ser livre não é apenas romper os próprios  
grilhões, mas viver de forma a respeitar e  
engrandecer a liberdade dos outros”

Nelson Mandela

## RESUMO

### FASES DE PLASTOCRONO E MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO NA CULTURA DA SOJA

AUTOR: Felipe Schmidt Dalla Porta  
ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

Modelos agrícolas para cultura soja são muito utilizados para compreender as interações entre planta e ambiente, contudo nenhum modelo foi desenvolvido para as condições edafoclimáticas e de cultivares cultivadas no Brasil. O objetivo deste estudo foi melhorar a compreensão dos processos básicos que governam o desenvolvimento vegetativo da soja e desenvolver um modelo matemático robusto para simular a fenologia da soja. O estudo foi realizado com base em experimentos conduzidos da safra 2010/11 até 2022/23 no Brasil. O desenvolvimento vegetativo foi avaliado pelo detalhamento do plastocrono para melhor entendimento sobre o processo de emissão de nós durante a sobreposição da fase vegetativa com a reprodutiva. Cultivares de hábito de crescimento determinado foram divididas em duas fases, o plastocrono inicial (desde o primeiro nó visível, par de folhas unifolioladas, até o estágio R1) e plastocrono final (R1 até estágio R3). Para cultivares com hábito de crescimento indeterminado o plastocrono foi dividido em três fases: plastocrono inicial (desde o primeiro nó visível, par de folhas unifolioladas, até o estágio R1), o plastocrono intermediário (R1 até o estágio R3) e o plastocrono final (R3 até o estágio R5). O plastocrono apresentou diferença durante a emissão de nós em cultivares de soja de hábito de crescimento determinado e indeterminado sob diferentes regimes hídricos. Cultivares de soja de hábito de crescimento determinado e indeterminado apresentaram diferença entre os cultivos irrigados e sequeiro. Cultivares irrigadas de hábito de crescimento determinado, o plastocrono apresenta duas fases, a fase inicial de  $59,7 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$  e a fase final de  $65,7 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ . Em ambientes não irrigados, não há diferença entre as fases inicial e final do plastocrono. As cultivares de hábito de crescimento indeterminado com irrigação apresentam um plastocrono médio inicial e final de  $64,1 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ , ao contrário da fase intermediária onde o plastocrono é de  $58,5 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ . Em ambientes de sequeiro, as fases inicial e intermédia têm um valor médio de  $60,6 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ , ao diferentes da fase final com um plastocrono de  $79,4 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ . O modelo matemático baseado em processos genuinamente brasileiro para simular o desenvolvimento na cultura da soja, SimulaSoja, foi construído. Os estudos seguirão na jornada do desenvolvimento do SimulaSoja nos próximos quatro anos, com os processos de calibração e validação, e com o objetivo de entregar para o produtor brasileiro um modelo que represente a interação genótipo x ambiente no Brasil.

**Palavras-chave:** Plastocrono, Modelagem matemática, SimulaSoja.

## ABSTRACT

### PLASTOCHRON PHASES AND DEVELOPMENT MODELING IN SOYBEAN CROP

AUTHOR: Felipe Schmidt Dalla Porta

ADVISOR: Nereu Augusto Streck

Crop models for soybean are widely used to understand the interactions between plant and environment, but no model has been developed for edaphoclimatic conditions and cultivars grown in Brazil. The aim of this study was to improve understanding of the basic processes that govern soybean vegetative development and to develop a robust mathematical model to simulate soybean phenology. The study was carried out based on experiments from the 2010/11 to 2022/23 growing seasons in Brazil. The vegetative development was evaluated by detailing the plastochron for a better understanding of the node emission process during the overlapping of the vegetative and reproductive phases. Cultivars with determinate growth habit were divided into two phases, the early plastochron (from the first visible node, pair of unifoliate leaves, to the R1 stage) and the late plastochron (R1 to R3 stage). For cultivars with indeterminate growth habit, the plastochron was divided into three phases: early plastochron (from the first visible node, pair of unifoliate leaves, to the R1 stage), the intermediate plastochron (R1 to the R3 stage) and the late plastochron (R3 to stage R5). The plastochron showed a difference during emission of nodes in soybean cultivars of determinate and indeterminate growth habit under different water regimes. Soybean cultivars of determinate and indeterminate growth habit showed differences between irrigated and rainfed crops. Irrigated cultivars of determinate growth habit show two plastochron phases, the early phase of  $59.7\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  and the late phase of  $65.7\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ . In rainfed environments, there is no difference between the early and late phases of plastochron. Cultivars with indeterminate growth habit with irrigation have an average early and late plastochron of  $64.1\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ , unlike the intermediate phase where the plastochron is  $58.5\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ . In rainfed environments, the early and intermediate phases have an average value of  $60.6\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ , unlike the late phase with a plastochron of  $79.4\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ . The genuinely Brazilian process-based mathematical model for simulating soybean crop development, SimulaSoja, was built. Studies will continue the development of SimulaSoja over the next four years, with calibration and validation processes, with the aim of providing Brazilian producers with a model that represents the genotype x environment interaction in Brazil.

**Keywords:** Plastochron, Mathematical modeling, SimulaSoja.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
	<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>14</b>
	<b>1.1.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>14</b>
	<b>1.1.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
	<b>2.1 A cultura da soja e a importância para o sistema agrícola brasileiro .....</b>	<b>14</b>
	<b>2.2 Ecofisiologia da cultura da soja .....</b>	<b>17</b>
	<b>2.3 Plastocrono na cultura da soja .....</b>	<b>18</b>
	<b>2.4 Modelos de simulação de culturas agrícolas.....</b>	<b>18</b>
	<b>2.5 Modelagem para a cultura da soja .....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>21</b>
	<b>3.1 ARTIGO 1 - Improving the understanding of the plastochron of determinate and indeterminate soybean cultivars .....</b>	<b>21</b>
	<b>3.2 Avanços na modelagem da cultura da soja .....</b>	<b>45</b>
	<b>3.2.1 Descrição do submodelo de desenvolvimento da soja no modelo SimulaSoja..</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO GERAL.....</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é a principal oleaginosa cultivada no mundo, sendo uma cultura agrícola chave na segurança alimentar global por ser utilizada como fonte de proteína e óleo para alimentação humana e animal (FAO, 2022). O Brasil possui importância significativa na oferta e na demanda da soja, sendo o maior produtor e o maior exportador mundial, com uma área média de cultivo de 44.072,9 milhões de hectares, produtividade média de grãos de 3,508 Mg ha<sup>-1</sup> e produção na safra 2022/2023 de 154.603,4 mil toneladas (CONAB, 2023). Isso pode ser atribuído, principalmente, ao desenvolvimento e utilização de novas tecnologias de produção, como o incremento da utilização de cultivares de soja com hábito de crescimento indeterminado e semeaduras precoces e tardias, visando escape de períodos críticos à deficiência hídrica e na tentativa de um segundo cultivo (TAGLIAPIETRA et al., 2022).

Entre as diferentes condições edafoclimáticas no Brasil, observa-se que o potencial de produtividade (PP) de soja apresenta um gradiente do Sul ao Norte do país com produtividades potenciais de 5,7 Mg ha<sup>-1</sup> (Baixa Grande do Ribeiro, Piauí) a 7,5 Mg ha<sup>-1</sup> (Cruz Alta, Rio Grande do Sul) (TAGLIAPIETRA et al., 2021; TAGLIAPIETRA et al., 2022). Além do PP, é possível observar que existe uma lacuna de produtividade por manejo no Brasil (2,5 Mg ha<sup>-1</sup>) (TAGLIAPIETRA et al., 2022), o que está ligado às inovações tecnológicas e suas aplicabilidades, como também, a inserção de diferentes cultivares utilizadas no cultivo de soja a cada ano.

Dessa maneira, a modelagem agrícola apresenta-se como uma ferramenta importante para simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas, e permite descrever as interações entre a planta e o ambiente, sendo uma poderosa ferramenta para decisões referente ao manejo das culturas agrícolas para obtenção da máxima eficiência (STRECK et al., 2013; TAGLIAPIETRA et al., 2022). Como exemplo de um modelo agrícola com aplicabilidade prática, O SimulArroz é um modelo para tomada de decisões para o manejo da cultura do arroz irrigado, como por exemplo, a aplicação de herbicida (RICHTER, 2018) e a previsão da safra (SILVA et al., 2016).

Existem vários modelos de simulação da cultura da soja disponíveis na literatura (Soybean (SINCLAIR, 1986), WOFOST (DIEPEN et al., 1989), Cropgro–Soybean (BOOTE et al., 1998), SOYDEV (SETIYONO et al., 2007) e SOYSIM (SETIYONO et al., 2010)), porém não existe nenhum modelo brasileiro desenvolvido para as condições edafoclimáticas e de cultivares cultivadas no Brasil e Rio Grande do Sul (CERA et al., 2017), que seja de fácil manuseio e com poucos dados de entrada para atender a demanda do agricultor e de técnicos

agrícolas na melhoria da eficiência nas práticas de manejo, como cultivares de diferentes hábitos de crescimento e grupos de maturidade relativa.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Melhorar a compreensão dos processos básicos que governam o desenvolvimento vegetativo da soja e desenvolver um modelo matemático robusto para simular a fenologia da soja

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

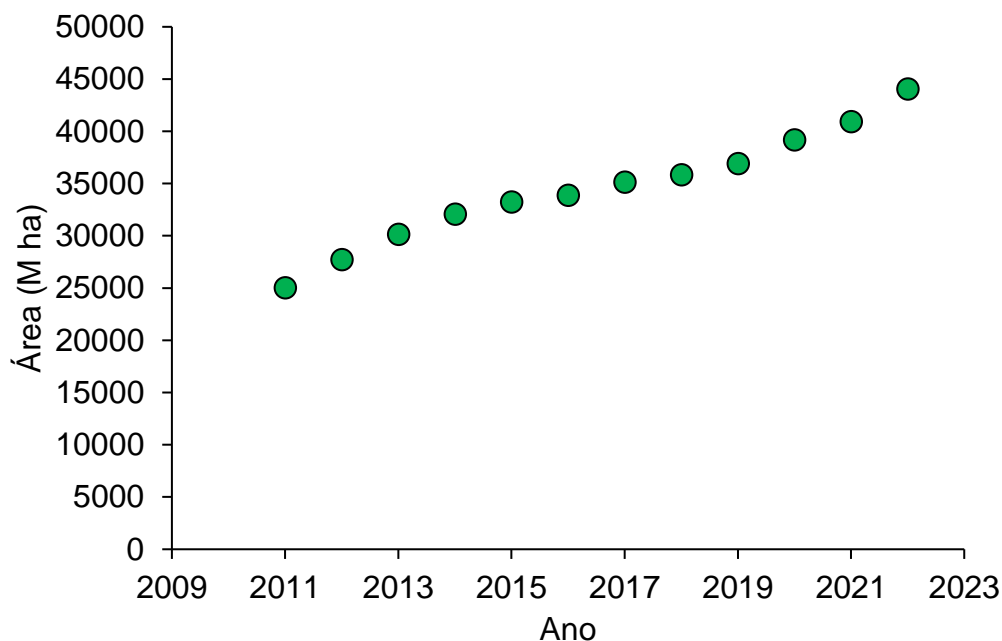
Identificar fases de plastocrono em cultivares de soja com hábito de crescimento determinado e indeterminado.

Desenvolver um modelo matemático de soja para as condições edafoclimáticas e cultivares do Brasil

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 A cultura da soja e a importância para o sistema agrícola brasileiro**

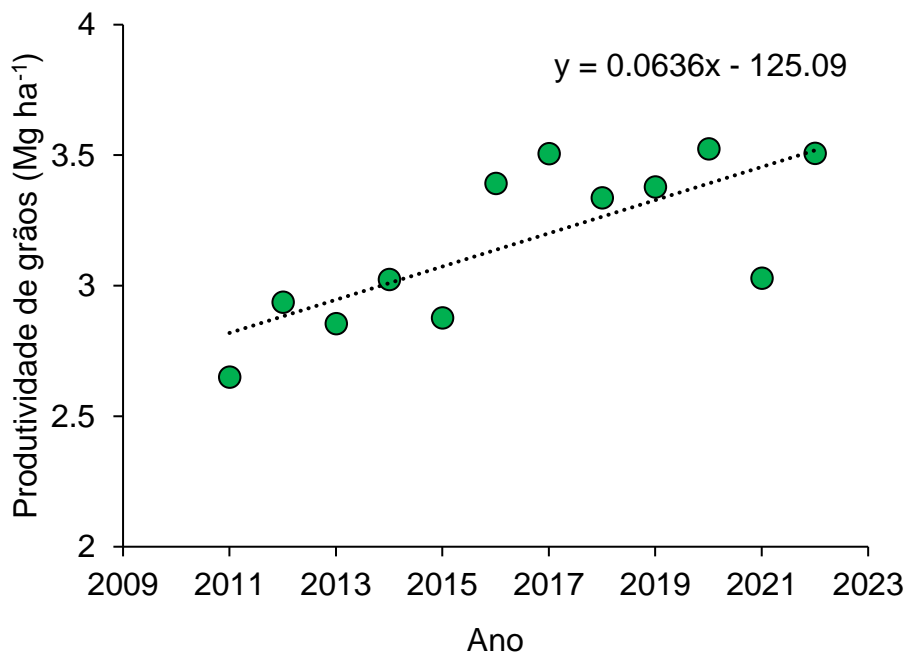
A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma cultura chave para a segurança alimentar, porque é fonte de proteína e óleo para nutrição humana e animal, representando 56% do total da produção de oleaginosas no mundo (FAO, 2022). A região subtropical da América do Sul (Brasil, Argentina e Paraguai) tem a maior área de cultivo de soja do mundo, com mais de 50 milhões de hectares cultivados anualmente (FAO, 2022). No Brasil, observa-se um aumento da área cultivada com soja devido ao seu alto valor econômico (Figura 1), onde na safra de 2022/2023 o país apresentou uma área semeada de 44.072,9 milhões de hectares (CONAB, 2023).

Figura 1 - Evolução da área de cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) no Brasil.

Fonte: CONAB, 2023.

A produtividade brasileira também está em um contínuo aumento devido às condições climáticas mais favoráveis nos últimos anos e pelo incremento tecnológico, como cultivares mais produtivas e aplicação de práticas de manejo de maneira mais eficiente (Figura 2). Entretanto, essa produtividade está abaixo da alcançada em lavouras de alto nível tecnológico, que chega a  $6.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  (ZANON et al., 2016; MENZA et al., 2017), como também, encontra-se abaixo do potencial de produtividade (PP) observado para o Brasil ( $7.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , Cruz Alta, Rio Grande do Sul) (TAGLIAPIETRA et al., 2021; TAGLIAPIETRA et al., 2022). Na safra 2022/2023 o Brasil apresentou uma produtividade média de  $3,508 \text{ Mg ha}^{-1}$  (CONAB, 2023).

Figura 2 - Evolução da produtividade de soja no Brasil, com linha de tendência.



Fonte: CONAB, 2023.

O aumento exponencial no crescimento populacional, e consequente aumento na demanda de alimentos torna o cultivo desta espécie de grande importância. A soja possui elevado teor de proteína em seus grãos (aproximadamente 40%), fazendo com que o grão seja fonte de energia importante para a população mundial (MENZA et al., 2017). Neste cenário, o Brasil está presente como o maior produtor mundial do grão, com produção na safra de 2022/2023 de 154.603,4 mil toneladas (CONAB, 2023), sendo uma das principais forças fornecedoras deste produto ao globo terrestre.

Conforme descrito por Tagliapietra et al. (2022), o potencial de produtividade de grãos de soja é de 6.7 Mg ha<sup>-1</sup> (média para o Brasil) e observa-se uma lacuna de rendimento entre o potencial de produtividade e a produtividade média do país (3.0 Mg ha<sup>-1</sup>) de 3.7 Mg ha<sup>-1</sup>. Fechar a lacuna de rendimento possibilitará ter um incremento na produção de grãos de soja, onde para atender esta demanda o produtor rural deve aumentar a eficiência do seu sistema de produção, garantindo ganhos em produtividade pelo fechamento desta lacuna (MARCON et al., 2017; TAGLIAPIETRA et al., 2022). Assim, estudos com a cultura da soja são motivados pela crescente demanda na produção de alimentos e energia, buscando atender o crescimento populacional e de renda, o que afeta o consumo alimentar da população e a busca por alimentos com maiores teores de proteína (FERMONT et al., 2009; GRASSINI et al., 2015).

## 2.2 Ecofisiologia da cultura da soja

A influência de características genéticas (grupo de maturidade relativa, hábito de crescimento, presença do gene de juvenilidade e hormônios), elementos climáticos (fotoperíodo, temperatura do ar, radiação solar e precipitação) e fatores relacionados ao manejo das áreas de cultivo de soja (densidade e espaçamento de plantas, fertilização e manejo fitossanitário), e principalmente a interação entre estes (Genética x Ambiente x Manejo) caracterizam o estudo da ecofisiologia (TAGLIAPIETRA et al., 2022). As interações sobre esses fatores têm influência direta sobre o desenvolvimento e crescimento da soja.

O ciclo de desenvolvimento das culturas é a resposta a interação dos diferentes genótipos com as distintas condições edafoclimáticas onde são realizados os cultivos (SETIYONO et al., 2007; 2010). Um dos principais fatores abióticos que influenciam o desenvolvimento e crescimento vegetal, e de forma distinta para cada cultura, é a temperatura do ar (WANG & ENGEL, 1998; ALBERTO et al., 2009). Concomitantemente, o fotoperíodo é outro fator importante que regula o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja (HODGES, 1991), principalmente relacionado ao início do período reprodutivo (SETIYONO et al., 2007). O ciclo de desenvolvimento das plantas é caracterizado por diferentes estágios de desenvolvimento, o qual expressa um momento morfológico que a planta ou um órgão se encontram, permitindo uma comunicação global sobre a cultura, como também, realizar as melhores práticas de manejo no cultivo (TORRION et al., 2011; TAGLIAPIETRA et al., 2022).

O sistema de descrição dos estágios de desenvolvimento da cultura da soja mais utilizada a nível mundial é a escala proposta por Fehr e Caviness (1977), posteriormente adaptada por Yorinori (1996) no Brasil. Os estágios vegetativos (V1 a Vn) são determinados pela contagem do número de nós, iniciando pelo par de folhas unifolioladas (V1). Os estágios reprodutivos são representados pela letra R. No estágio R1 (início do florescimento) ocorre o aparecimento da primeira flor aberta na haste principal. O R2 (florescimento pleno) presença de uma flor aberta em um dos dois últimos nós da haste principal. Os estágios R3 (início de formação do legume), R4 (legumes completamente desenvolvidos), R5 (início do enchimento de grãos) e R6 (legume cheio) são determinados nos últimos quatro nós da haste principal. A maturação fisiológica é o R7 (um legume na cor madura característico de cada genótipo) e o ponto de colheita é o R8 (95% dos legumes na cor madura característico de cada genótipo) (FARIAS et al., 2009). A compreensão dos estágios e a duração das fases de desenvolvimento,

tem importância direta sobre o manejo dos cultivos (manejos fitotécnicos e fitossanitários), como também, para o uso em modelos de desenvolvimento e crescimento de culturas agrícolas (RODRIGUES et al., 2001; TORRION et al., 2011).

### **2.3 Plastocrono na cultura da soja**

O número de nós é um importante componente de modelos matemáticos de simulação do desenvolvimento de soja, pois está relacionado diretamente com os estágios de desenvolvimento vegetativo ( $V_n$ ) (Fehr and Caviness, 1977). O processo de emissão de nós na haste principal pode ser estimado pelo tempo necessário para o aparecimento de dois nós sucessivos na planta de soja (Streck et al., 2008). O intervalo de tempo entre o aparecimento de dois nós sucessivos na haste principal é denominado plastocrono (Sinclair, 1984).

O plastocrono representa o desenvolvimento vegetativo e pode apresentar variação entre cultivares e condições de déficit hídrico (Streck et al., 2008; Martins et al., 2011; Zeist et al., 2020). Os primeiros estudos com plastocrono em soja no Brasil apresentaram valores de plastocrono de 48.1 a 60.3°C dia nó-1 (Streck et al., 2008). Os resultados mais atuais apresentam valores de plastocrono variando de 84.0 a 148.5 °C dia nó-1, para cultivares de soja semeadas no cerrado brasileiro (Bossolani et al., 2022). O plastocrono, expresso como tempo em °C dia pode ser empregado para compreender o processo de emissão de nós em espécies vegetais dicotiledôneas como a soja (Sinclair, 1986).

### **2.4 Modelos de simulação de culturas agrícolas**

A caracterização do crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas agrícolas por modelos matemáticos é uma ferramenta útil (STRECK et al., 2008), pois permite projetar a data de ocorrência de alguns estágios fenológicos para a realização de tratamentos culturais, escolha de cultivares com maior estabilidade de produção e estudo do impacto de mudanças climáticas (STRECK et al., 2013). Os modelos matemáticos utilizam equações que permitem expressar a taxa de desenvolvimento de cada fase do ciclo, em resposta a variáveis climáticas, como a temperatura do ar, fotoperíodo, radiação solar, entre outras (SCHAYKEWICH, 1995; WANG & ENGEL, 1998). Dessa maneira, escolher um modelo com significado biológico, com base em relações entre a taxa de desenvolvimento da cultura e as variáveis climáticas é

importante para estimar o tempo requerido para passar pelas diferentes fases do ciclo de desenvolvimento da planta (SCHAYKEWICH, 1995).

Os modelos podem ser divididos quanto a complexidade e ao número de parâmetros, que vão desde modelos empíricos, utilizando relações estatísticas em suas funções matemáticas, a modelos mecanísticos que utilizam funções matemáticas que descrevem processos (modelos baseados em processos, que podem ser fisiológicos, ecofisiológicos, entre outros) (STRECK et al., 2013; UHLMANN et al., 2016). Os modelos mecanísticos utilizam o sistema dividindo-os em componentes para entender o comportamento de todo o sistema através das interações, porém os modelos empíricos fazem relações das variáveis utilizadas para descrever o comportamento do sistema.

Os modelos ainda podem ser divididos em dois grupos, modelos lineares e não lineares (SINCLAIR et al., 1991). Os processos biológicos respondem melhor à temperatura, quando descritos por modelos não lineares, com base em temperaturas cardinais (mínima, ótima e máxima) de desenvolvimento das culturas (STRECK, 2002). Diversas são as opções para a construção de um algoritmo geral, que incluem modelos multiplicativos (WANG & ENGEL, 1998; STRECK et al., 2003), aditivos (SINCLAIR et al., 1991) e subtrativos (STEWART et al., 2003). Os modelos multiplicativos são utilizados em grande parte dos modelos de simulação de culturas agrícolas, como o CROPGRO (JONES et al., 2003). Dessa maneira, diversas são as alternativas para o uso de modelos matemáticos em larga escala, com destaque para os modelos matemáticos baseados em processos, os quais após devida calibração apresentam bons resultados em uma ampla faixa de condições (BATTISTI, 2013).

## **2.5 Modelagem para a cultura da soja**

Diversos modelos simulam processos físicos, químicos e biológicos na cultura da soja em função da disponibilidade dos elementos meteorológicos, tipos de solo e manejo da cultura (VERA-DIAZ, 2008). Alguns dos modelos de simulação da cultura da soja são: o modelo SOYBEAN (SINCLAIR, 1986), o modelo GLYCIM (ACOCK; TRENT, 1991), o modelo SOYCROS (PENNING DE VRIES et al., 1992), o modelo CROPGRO–SOYBEAN (BOOTE et al., 1998), e os modelos SOYDEV e SOYSIM (SETIYONO et al., 2007; 2010). Os modelos de simulação de aplicação agrônômica estão sendo usados como ferramentas para a simulação, por exemplo, do potencial de produtividade de soja, identificação de fatores limitantes da produtividade e em cenários de mudanças climáticas (BATTISTI et al., 2017a, 2017b; CERA et al., 2017; TAGLIAPIETRA et al., 2021).



O modelo SOYSIM é o mais recente e moderno modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade de grãos da cultura da soja (SETIYONO et al., 2010). Porém, este modelo não tem boa performance na simulação com cultivares com GMR acima de 5.0, que dominam no cultivo de soja no RS e no Brasil, pois foi calibrado em uma região em que são utilizadas pelos produtores cultivares com GMR menor que 4.0 (CERA et al., 2017). Por outro lado, o modelo CSM-CROPGRO-Soybean é um dos principais, e um dos mais utilizados ao redor do mundo, modelos matemáticos baseado em processos, que simula o crescimento, desenvolvimento e produtividade de soja (BOOTE et al., 2002; JONES et al., 2003).

O CROPGRO-Soybean é um modelo que está na plataforma DSSAT (Decision Support System Agrotechnology Transfer) (HOOGENBOOM et al., 2004). Esta plataforma apresenta grande relevância, pois é uma das principais plataformas ligadas a simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas. Além disso, simula fatores relacionados ao balanço hídrico, ciclos de carbono e nitrogênio relacionados ao sistema solo-planta-atmosfera.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 ARTIGO 1 - Improving the understanding of the plastochron of determinate and indeterminate soybean cultivars<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Artigo formatado nas normas da Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (AGRIAMBI)

## **Improving the understanding of the plastochron of determinate and indeterminate soybean cultivars**

### **Highlights**

Study identifies plastochron phases in soybean cultivars based on growth habit and water regime.

Plastochron varies with the growth habit of soybean cultivars rather than the maturity group.

The findings of this study offer essential insights for understanding and modeling soybean vegetative development.

**Abstract:** The aim of this study was to identify plastochron phases in soybean cultivars with determinate and indeterminate growth habits. Experiments were conducted from 2010/2011 to 2022/2023 in four locations in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, with 25 soybean cultivars exhibiting determinate and indeterminate growth habit. This study seeks to divide the plastochron into phases during the soybean node emission period. In irrigated cultivars of determinate growth habit, plastochron has two phases, the early phase of  $59.7\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  and the late phase of  $65.7\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ . In rainfed environments, there is no difference between the early and late phases of plastochron. Cultivars of indeterminate growth habit with irrigation show an average early and late plastochron of  $64.1\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ , unlike the intermediate phase, where the plastochron is  $58.5\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ . In rainfed environments, the early and intermediate phases have an average value of  $60.6\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ , unlike the late phase with a plastochron of  $79.4\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ . The division of the plastochron into phases during the period of node emission in the soybean crop, as proposed in this study, enables us to enhance our understanding of the vegetative development with determinate and indeterminate growth habit and to establish ecophysiological foundations for the construction of a chronological function.

**Keywords:** Crop modeling, node emission, development

## **Melhorando a entendimento do plastocrono de cultivares de soja determinadas e indeterminadas**

**Resumo:** O objetivo deste estudo foi de identificar as fases de plastocrono em cultivares de soja com hábitos de crescimento determinado e indeterminado. Os experimentos foram conduzidos no período de 2010/2011 a 2022/2023 em quatro locais do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, com 25 cultivares de soja com hábito de crescimento determinado e indeterminado. Este estudo buscou dividir o plastocrono em fases durante o período de emissão de nós da soja. Em cultivares irrigadas de hábito de crescimento determinado, o plastocrono apresenta duas fases, a fase inicial de  $59,7 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$  e a fase final de  $65,7 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ . Em ambientes não irrigados, não há diferença entre as fases inicial e final do plastocrono. As cultivares de hábito de crescimento indeterminado com irrigação apresentam um plastocrono médio inicial e final de  $64,1 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ , ao contrário da fase intermediária onde o plastocrono é de  $58,5 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ . Em ambientes de sequeiro, as fases inicial e intermédia têm um valor médio de  $60,6 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ , ao contrário da fase final com um plastocrono de  $79,4 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ . A divisão do plastocrono em fases durante o período de emissão de nós na cultura da soja, proposta neste estudo, permite-nos melhorar o entendimento do desenvolvimento vegetativo de cultivares de soja de hábito de crescimento determinado e indeterminado e estabelecer bases ecofisiológicas para a construção de uma função cronológica

Palavras-chave: modelagem agrícola, emissão de nós, desenvolvimento

### **Introduction**

The soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) is cultivated across south of Brazil, at subtropical environment, to the cerrado, at tropical environment, where such regional characteristics affect the processes of soybean growth and development. Among the environmental factors, air temperature is one of most affects plant development, for instance,

determining the leaf emission rate of annual plant species (Wang and Engel, 1998; Tenorio et al., 2017).

Several mathematical models simulate the development process for soybean crop, based on meteorological data, soil type and crop management. The most current and widely used models are the CROPGRO-SOYBEAN model (Boote et al., 2002) and the SOYDEV and SOYSIM models (Setyono et al., 2007; 2010). These models use a chronological function to represent the rate at which soybean plant emits nodes, however, they only partially take into account the impact of the overlap between the vegetative phase (from emergence to last node emission) and the reproductive phase (from the start of flowering to physiological maturity) on the rate at which new nodes are emitted after the start of the reproductive phase (Setyono et al., 2007).

For soybean, vegetative development is represented by the plastochron, defined as the interval, in thermal time ( $^{\circ}\text{C day}$ ), for the appearance of successive nodes on the main stem (Streck et al., 2005; Martins et al., 2011; Bexaira et al., 2021). However, plastochron in soybean is calculated from the date of emergence (VE) to the final nodes number (Streck et al., 2008; Martins et al., 2011; Rockenbach et al., 2016; Bossolani et al., 2022) without considering the reduction in the node emergence rate, when the reproductive phase begins (Setyono et al., 2007). In addition, soybean cultivars with determinate and indeterminate growth habits have different durations of overlap between the vegetative and reproductive phases. Therefore, it is necessary to detail the plastochron in soybeans throughout the vegetative phase to better understand the process of node emission during the overlap of the vegetative phase (V1 to Vn) with the reproductive phase (R1 to R8) and thus, develop a biologically meaningful chronology function in process-based mathematical models. The aim of this study was to identify plastochron phases in soybean cultivars with determinate and indeterminate growth habits.

## **Material and methods**

All the experimental plots were located at the Rio Grande do Sul (RS) state, in south of Brazil, for the seasons of 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, 2016/2017, 2017/2018 and 2022/2023, given a total of 17 experiments for 7 agricultural seasons. The experiments were conducted at universities and commercial fields in the municipalities of Santa Maria (SM, 29°41' S 53°48' W; 139 m.a.s.l.), Frederico Westphalen (FW, 27°21' S 53°23' W; 535 m.a.s.l.), Restinga Seca (RS, 29°48' S 53°22' W; 49 m.a.s.l.) and Itaquí (ITA, 29°9' S 56° 33' W; 64 m.a.s.l.), at the representative soybean-growing regions in the state of RS. According to the Koppen climate classification, these locations have a Cfa climate - humid subtropical, with hot summers and no defined dry season (Wrege et al., 2011).

The locations present variation in terms of temperature, photoperiod and soil characteristics, and the data set includes irrigated and rainfed experiments, with sowing dates ranging from August to March, for different locations and seasons (Table 1 and 2). A total of 25 soybean cultivars were used, of which 6 were of determinate growth habit and 19 were of indeterminate growth habit, with relative maturity group (RMG) ranging from 4.8 to 8.2.

**Table 1.** Soybean cultivars used to determine plastochron in the 17 soybean experiments in four locations in Rio Grande do Sul, Brazil, during seven agricultural seasons

Cultivar	RMG*	Growth-Type	Location
NS 4823 RR	4.8	Indeterminate	Santa Maria, Itaquí
TMG 7161 RR INOX	5.4	Indeterminate	Santa Maria
BMX Zeus IPRO	5.5	Indeterminate	Santa Maria
BMX Elite IPRO	5.5	Indeterminate	Santa Maria
BMX Energia RR	5.5	Indeterminate	Santa Maria
TMG 2757 IPRO	5.7	Indeterminate	Santa Maria
BMX Lança RR	5.8	Indeterminate	Itaquí
M 5947 IPRO	5.9	Indeterminate	Santa Maria
P 96Y90	6.0	Indeterminate	Santa Maria
BMX Turbo RR	6.0	Indeterminate	Santa Maria
TMG 7362 IPRO	6.2	Indeterminate	Santa Maria
TEC IRGA 6070 RR	6.3	Indeterminate	Itaquí
NA 5909 RG	6.3	Indeterminate	Santa Maria
BMX Fibra IPRO	6.4	Indeterminate	Santa Maria
CZ 26B47	6.4	Indeterminate	Santa Maria
IAS 5	6.4	Determinate	Santa Maria

BS IRGA 1642 IPRO	6.4	Indeterminate	Itaqui
Igra RA 518 RR	6.6	Indeterminate	Santa Maria
BMX Potência RR	6.7	Indeterminate	Santa Maria, Restinga Seca
BMX Ícone IPRO	6.8	Indeterminate	Santa Maria
FEPAGRO 36 RR	7.2	Determinate	Santa Maria
BRS 246 RR	7.2	Determinate	Santa Maria
BRAAG	7.3	Determinate	Frederico Westphalen, Santa Maria
SYN 1378	8.0	Determinate	Itaqui
CD 219 RR	8.2	Determinate	Santa Maria, Restinga Seca

\*RMG – relative maturity group

**Table 2.** Maximum (Tmax), minimum (Tmin) and average (Tmed) temperatures for the different locations, experiments and sowing dates during the soybean crop development cycle in seven agricultural seasons and four locations

Local	Experiments	Sowing Date	Tmax (°C)*	Tmin (°C)*	Tmed (°C)	Water Regime
Santa Maria	E1	12/10/2010	36.20	7.00	23.53	Irrigated
	E2	01/08/2011	36.20	6.70	22.27	
Santa Maria	E3	11/19/2011	38.70	6.40	24.75	Irrigated
	E4	01/28/2012	38.30	4.40	22.21	
Santa Maria	E5	09/22/2012	38.60	3.70	22.89	Irrigated
	E6	11/03/2012	38.60	6.80	23.43	
	E7	12/01/2012	38.60	6.80	23.17	
	E8	02/06/2013	33.30	1.50	20.12	
Santa Maria	E9	09/27/2013	40.00	7.40	23.70	Irrigated
	E10	02/19/2014	34.70	-0.60	18.51	
Restinga Seca	E11	11/14/2013	40.00	7.40	24.93	Non-irrigated
Frederico Westphalen	E12	11/23/2013	36.70	8.00	24.00	Non-irrigated
Itaqui	E13	11/22/2016	36.90	9.20	24.80	Non-irrigated
	E14	12/14/2016	36.90	12.80	25.12	
Santa Maria	E15	09/02/2017	38.30	7.10	22.11	Irrigated
	E16	10/17/2017	38.30	7.10	23.05	
Santa Maria	E17	08/24/2022	36.70	2.50	20.09	Non-irrigated

\*Tmax and Tmin - These are the daily maximum and minimum values observed during the soybean crop development cycle.

The experiments in SM (2010/2011 to 2017/2018) and FW (2013/2014) were conducted using a randomized block design with four replications. In ITA (2016/2017) the experimental design was randomized blocks, with three replications. In the RS (2013/2014) and SM (2022/2023) the experiments were conducted in demonstration plots 5 m long with 5 rows for each treatment. In all the experiments, the spacing between rows was 0.45 m and the sowing density was 30 plants m<sup>-2</sup>. The experiments management was in accordance with the

recommendations for soybean cultivation in southern Brazil, controlling diseases, insects, and weeds, so that soybean plants did not suffer any abiotic stress.

The date of emergence (VE) in the experiments was when 50% of the plants had their cotyledons above ground level at an angle of 45° (Tagliapietra et al., 2022). In the experiments with a randomized block design, 5 to 8 plants were randomly marked in each plot (each repetition being the average of these 5 to 8 plants) and 10 plants were marked in the demonstration plots (each plant was considered a repetition). The plants were identified as soon as the unifoliolate leaves emerged, the number of visible nodes (NN) on the main stem was counted two or three times a week and the date of occurrence of the reproductive stages (from R1 to R8) was determined (Fehr & Caviness, 1977), when 50% of the marked plants reached the stage of development.

The criterion for identifying NN was when the leaf oncoming above it did not have the edges of the leaflets leaning against (Fehr and Caviness, 1977). The weekly NN count was up to stage R3 in cultivars with determinate growth habit and up to R5 in cultivars with indeterminate growth habit, respectively.

From emergence to stage R5 (Fehr and Caviness, 1977), the daily thermal time (TTd, °C day) was calculated according to (Gilmore and Rogers, 1958; Arnold, 1960):

$$TTd = (T_{opt} - T_b) \cdot ((T_{med} - T_b) / (T_{opt} - T_b)) \cdot 1 \text{ day when } T_b < T_{med} \leq T_{opt} \quad (1)$$

$$TTd = (T_{opt} - T_b) \cdot ((T_{med} - T_B) / (T_{opt} - T_B)) \cdot 1 \text{ day when } T_{opt} < T_{med} \leq T_B \quad (2)$$

$$TTd = 0, \text{ when } T_{med} < T_b \text{ or } T_{med} > T_B \quad (3)$$

where  $T_{med}$  is the average air temperature calculated from the daily minimum and maximum temperatures and  $T_b$ ,  $T_{opt}$  and  $T_B$  are the lower basal (7.6 °C), optimum (31 °C) and upper basal (40 °C) cardinal temperatures for node emission in soybean crops (Tagliapietra et al., 2022).

The accumulated thermal time (ATT, °C day) was calculated by:



$$ATT = \sum TTd \quad (4)$$

The daily minimum ( $T_{min}$ ) and maximum ( $T_{max}$ ) temperature data during the experiments was obtained from automatic weather stations of the National Meteorological Institute (INMET) (SM, FW and RS) and from an automatic weather station located at the Federal University of Pampa, Campus Itaqui (ITA).

Unlike other studies which determine only one plastochron from VC to the final number of leaves, the present work seeks to divide the plastochron into phases during the period of node emission in the soybean crop. In cultivars with a determinate growth habit, which have a small overlap between the vegetative and reproductive phases, the plastochron was divided into two phases: early plastochron (from the first visible node, a pair of unifoliate leaves, to the R1 stage) and late plastochron (R1 to R3 stage). For cultivars with indeterminate growth habit, plastochron was divided into three phases: early plastochron (from the first visible node, a pair of unifoliate leaves, to the R1 stage), intermediate plastochron (R1 to the R3 stage) and late plastochron (R3 to the R5 stage).

Plastochron was estimated for each plant at each crop year, location, water regime and experiment by the inverse of the angular coefficient of the linear regression between NN in the main stem and ATT (Sinclair et al., 2005; Streck et al., 2008; Martins et al., 2011). The plastochron data was tested for homogeneity and normality by Levene's test and the Shapiro-Wilk test, and the results of these two tests indicated a non-homogeneous and non-normal database. As a result, descriptive and inferential approaches were applied, presenting the results by central tendency and variation statistics. For this purpose, measures of position (arithmetic mean and median) and dispersion (coefficient of variation) were calculated.

Plastochron data by water regime, phase, location, experiments and cultivars were compared using the Kruskal-Wallis test with Dunn's Post Hoc, using a p-value adjusted

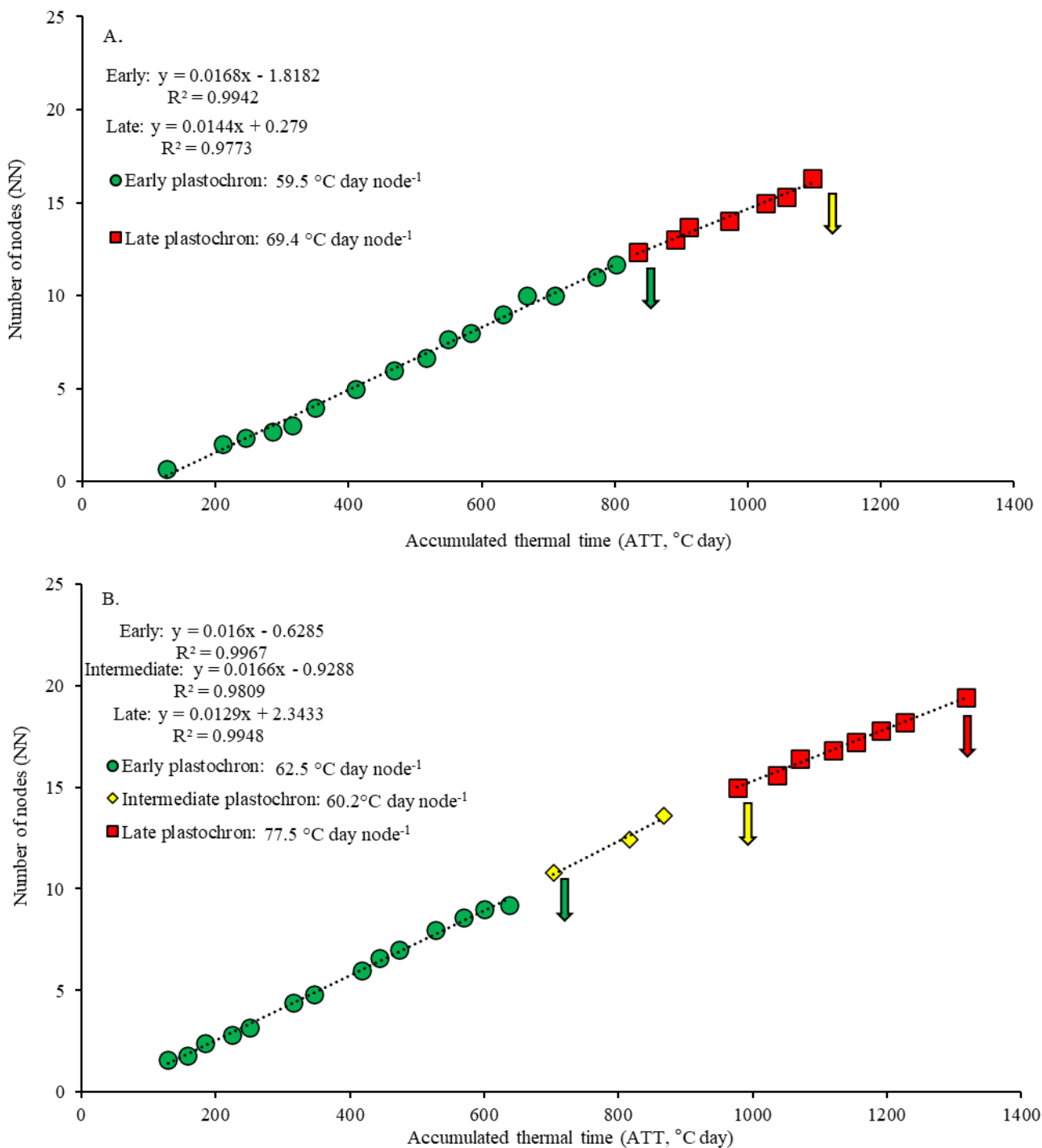
according to Bonferroni's methodology. The analyses were carried out using the open statistical program R version 4.3.0 (R Core Team).

## **Results and discussion**

The 17 experiments conducted over 7 seasons and in 4 locations were subjected to varying climate conditions, soil characteristics and management practices. They were primarily exposed to a wide range of temperatures, ranging from freezing temperatures ( $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) to maximum temperatures near to the upper basal cardinal temperature for node emission in soybean ( $40.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Table 2).

The range of temperatures observed in this study are similar of other studies that determine plastochron values for soybean crops (Martins et al., 2011; Tenorio et al., 2017). According to Streck et al. (2005), exposing plants to various weather conditions is important for plant development studies and for utilizing the thermal time as a measure of plant biological time.

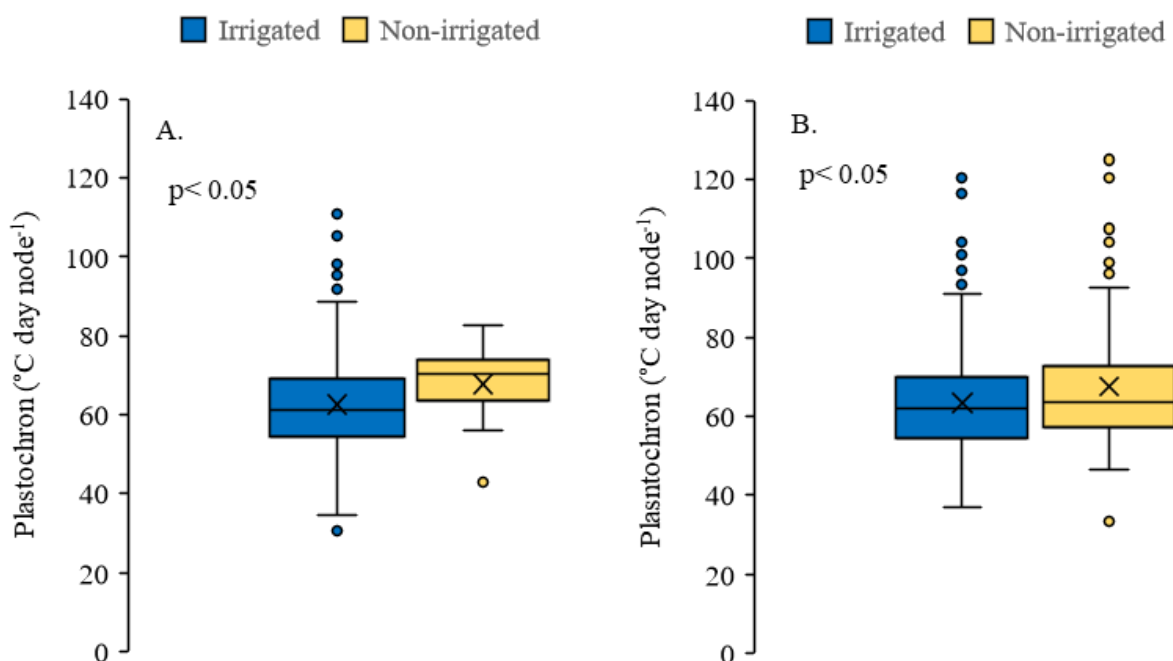
The linear regression model between NN in the main stem and ATT showed high coefficient of determination ( $R^2 > 0.9$ ) between the variables (NN and ATT). This indicates that the thermal time is the main factor determining the evolution of NN in soybean and, consequently, the estimation of plastochron by the inverse of the angular coefficient of the linear regression is appropriate. Examples of the NN x ATT relationship for soybean cultivars with determinate (FEPAGRO 36 RR) and indeterminate (Igra RA 518 RR) growth habit, sown in the 2011/2012 (03/19/2011) and 2012/2013 (09/22/2012) seasons, respectively, and how the plastochron phases were divided, are shown in Figure 1.



**Figure 1.** Relationship between the number of accumulated nodes on the main stem (NN, nodes plant<sup>-1</sup>) and the accumulated thermal time (ATT, °C day), applied to estimate plastochron of cultivar (FEPAGRO 36) with determinate growth habit (A) and a cultivar (Igra RA 518 RR) with indeterminate growth habit (B). Symbols and colors indicate the different stages of

plastochron calculation. Arrows indicate the occurrence of the reproductive development stages R1 (green), R3 (Yellow) and R5 (Red) (Fehr and Caviness, 1977)

According to Kruskal-Wallis test, the plastochron data for the water regime showed a difference between irrigated and rainfed cultivars with determinate and indeterminate growth habit (Figure 2). The median plastochron values to determinate cultivars for irrigated conditions was  $61.4\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  and for rainfed conditions  $70.2\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  (Figure 2A). For cultivars with indeterminate growth habit, the median plastochron values were  $62.1$  and  $63.7\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  for irrigated and rainfed environments, respectively (Figure 2B).

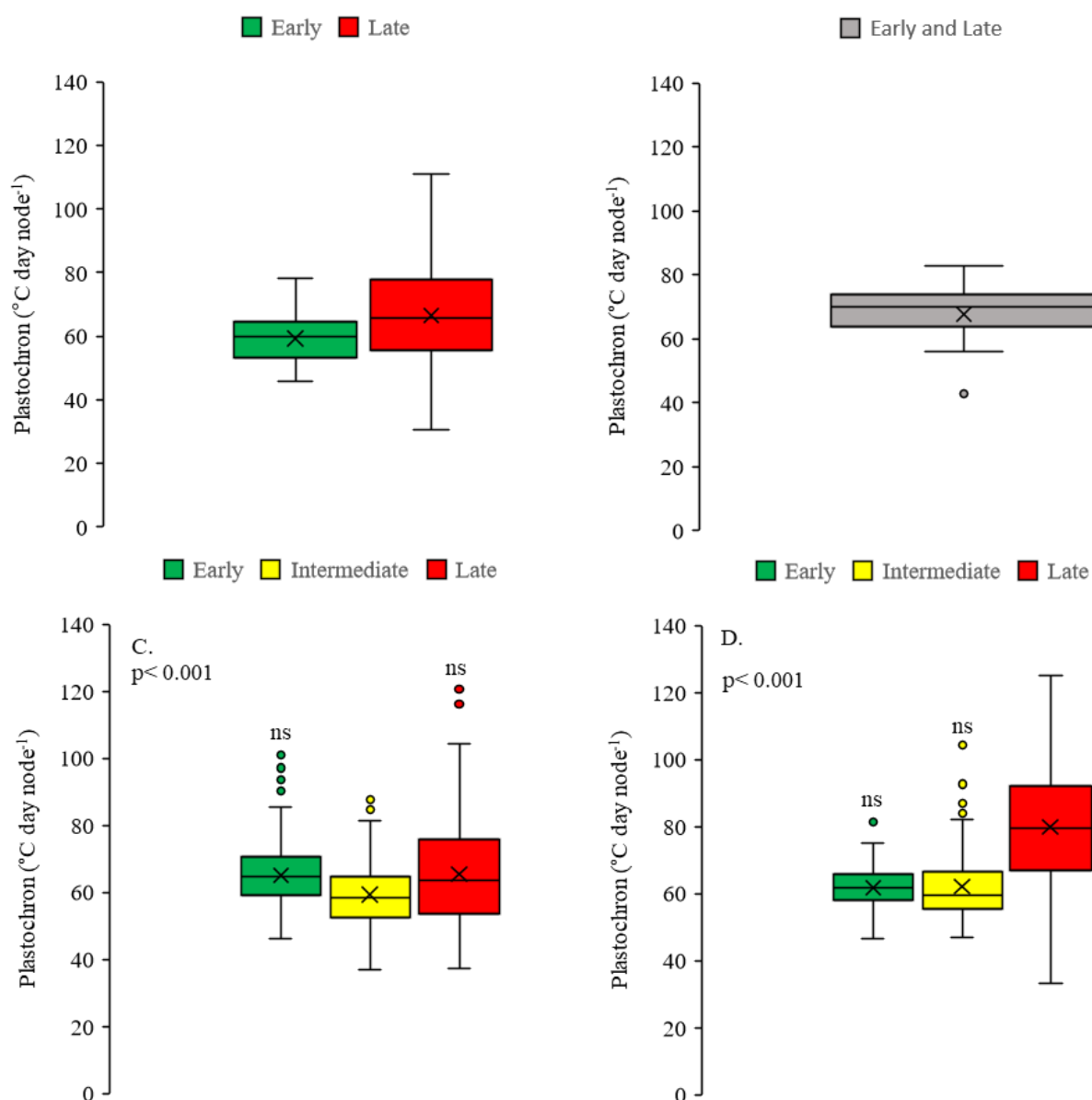


**Figure 2.** Boxplots of plastochron to each water regime (blue: irrigated; Yellow: rainfed) ( $^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ ) for cultivars of determinate (A) (CV= 20%) and indeterminate (B) (CV= 20.9%) growth habit in seven crop years and 17 experiments. Solid line indicates median. Symbol X indicates the mean. Different colors are significance by Dunn's Post Hoc test at 5% probability of error, by phase, with the p-value shown in the figure

The plastochron values increase from the irrigated to the rainfed experiments. The increase in the plastochron value may be due to the influence of water deficit on soybean crop

development in rainfed crops, delaying the soybean development cycle and increasing plastochron values (Bossolani et al., 2022).

Once differences were observed between the water regimes, follow evaluations were carried out dissociated for irrigated and rainfed environments. When the different plastochron phases were evaluated for determinate cultivars, it was observed that the early phase ( $59.7\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ ) is lower than late phase ( $65.7\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ ) under irrigation (Figure 3A). In rainfed, there was no significant differences observed between phases, with the mean plastochron of  $70.1\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  (Figure 3B).



**Figure 3.** Box plots of plastochron phases ( $^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ ) for irrigated (A) (CV= 20.5%) and non-irrigated (B) (CV= 13.1%) determinate growth habit cultivars and irrigated (C) (CV= 19.6%) and rainfed (D) (CV= 22.3%) indeterminate growth habit cultivars for seven seasons and 17 experiments. Solid line indicates median. Symbol X indicates the mean. The p-values for Dunn's Post Hoc test at 5% probability of error are shown the figure. ns indicate no significant difference between phases

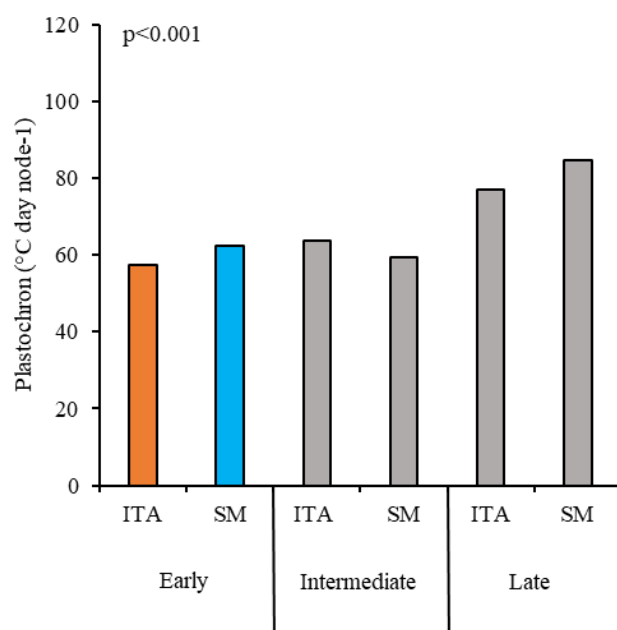
On the other hand, cultivars with indeterminate growth habit showed differences between the phases for irrigated and rainfed environments. In irrigated environments, the early and late phases do not show difference, with the mean plastochron of  $64.1^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ , differing statistically from the intermediate phase, with a plastochron of  $58.4^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  (Figure 3C). In rainfed, the early and intermediate phases do not showed, with the mean plastochron of  $60.6^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ , once that differed of the final phase, with a plastochron of  $79.3^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  (Figure 3D).

Previous studies indicate plastochron values ranging from  $48.1$  to  $60.3^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  (Streck et al., 2008), similar of the values observed in this study. However, none studies have been found in the literature that divide the plastochron into phases, with only a single plastochron being calculated throughout a node emission period in the soybean crop (Streck et al., 2008; Martins et al., 2011; Rockenbach et al., 2016; Bossolani et al., 2022). Plastochron values of  $77.5$  to  $148.5^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  were observed in a study with current soybean cultivars in the Brazilian Cerrado (Bossolani et al., 2022), which are different from the average values found for the different plastochron phases in cultivars of determinate and indeterminate growth habit in irrigated and rainfed environments.

Differences between plastochron values can be attributed to the different cardinal temperatures, where in this study the lower basal cardinal temperature was  $7.6^{\circ}\text{C}$  and in the study by Bossolani et al. (2022), the lower basal cardinal temperature was  $10^{\circ}\text{C}$ . At the same

time, the method used to calculate TTD has an influence on the plastochron values too, where previous studies have used a methodology that considers only one cardinal temperature (Streck et al., 2008; Bossolani et al., 2022).

When the plastochron for the different growing locations was evaluated, statistical differences were observed by Kruskal-Wallis and Dunn's Post Hoc test, for cultivars of determinate and indeterminate growth habit only for rainfed environments. The experiments conducted with irrigation were only carried out in SM. For cultivars with determinate growth habit, there was no significant difference between growing locations, with the mean plastochron of  $66.4\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  (CV= 13.1%). Cultivars with indeterminate growth habit for rainfed conditions were evaluated by plastochron phases, with a difference between the municipalities of SM ( $62.5\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ ) and ITA ( $57.4\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ ) (Figure 4).



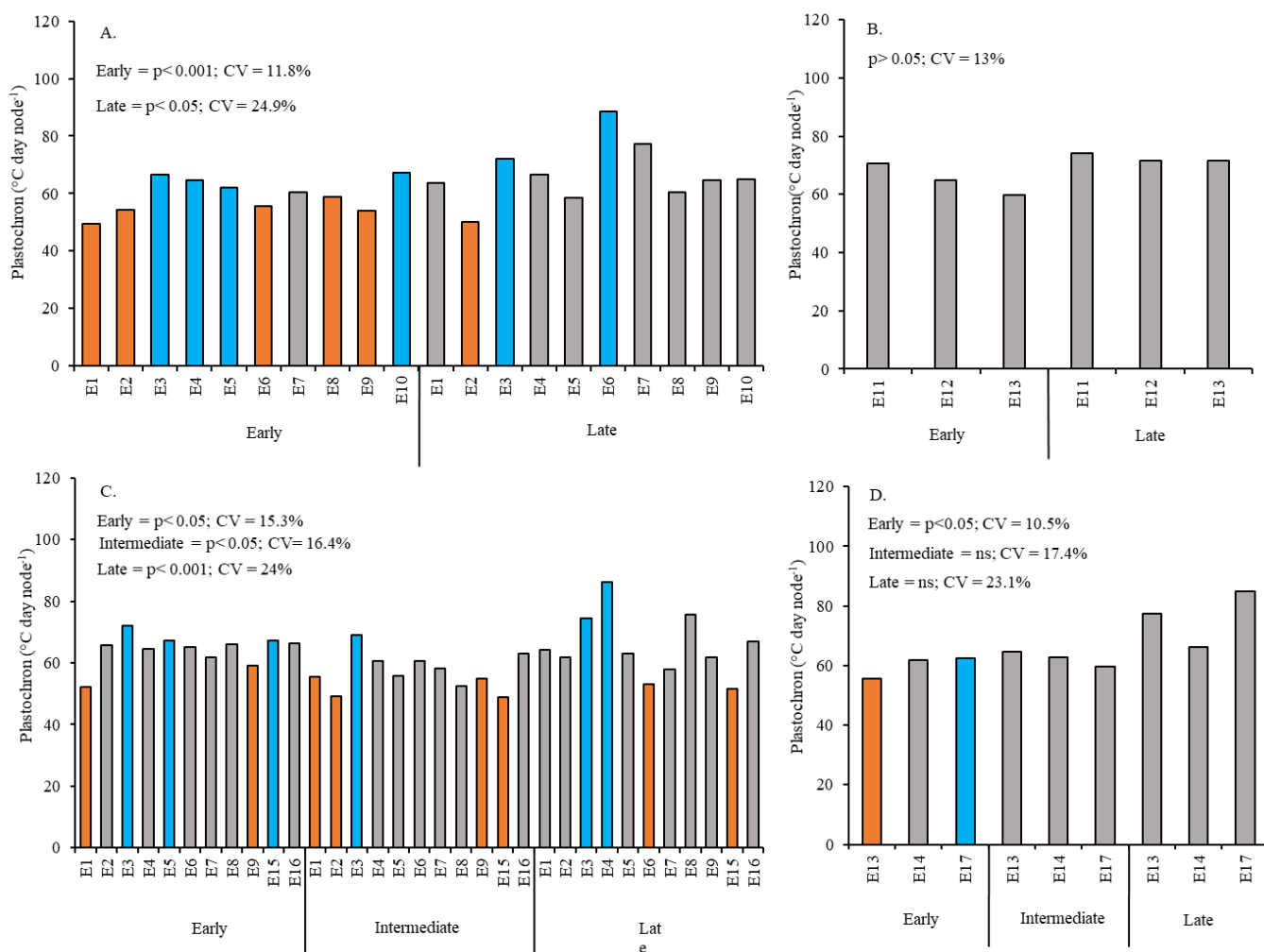
**Figure 4.** Median for the plastochron and its phases in indeterminate growth soybean cultivars (CV= 22.3%) for comparison between sites in seven agricultural seasons and 17 experiments. Locations: SM = Santa Maria and ITA = Itaquí. The blue and orange bars are significantly by Dunn's Post Hoc test at 5% probability of error, by phase, with the p-value shown in the figure.

The gray bars show no difference between the blue and orange bars within each plastochron phase

The differences between locations may be related to the soil and climate factors. Growing soybeans in lowland and upland environments and at different sowing times can expose the soybean crop to different temperature variations and water availability in rainfed crops. For cultivars with indeterminate growth habit, there was a difference between SM and ITA in the early phase, which may be related to periods of water deficit during the initial phase (VE to R1) of plastochron.

The different sowing dates, which ranged from August to March, were considered as distinct experiments (Table 2). For cultivars with determinate growth habit in irrigated environment, in the early phase, there was significant difference between experiments E3, E4, E5 and E10 and for experiments E1, E2, E6, E8 and E9, with the median plastochron ranging from 67.1 °C day node<sup>-1</sup> (E10) to 49.5 °C day node<sup>-1</sup> (E1) (Figure 5A). Therefore, for the late phase, experiments E3 (71.9 °C day node<sup>-1</sup>) and E6 (88.6 °C day node<sup>-1</sup>) differed statistically of E2 (50 °C day node<sup>-1</sup>) (Figure 5A). Cultivars grown under rainfed conditions present no significant difference, with the mean of plastochron of 68.7 °C day node<sup>-1</sup>(Figure 5B).





**Figure 5.** Median for the plastochron and its phases in cultivars with determinate growth habit in irrigated (A) and rainfed (B) environments; cultivars with indeterminate growth habit in irrigated (C) and rainfed (D) environments at different development stages for comparison between experiments in seven agricultural seasons and four locations. The blue and orange bars are different by Dunn's Pos Hoc test at a 5% probability of error, by phase, with the p-value and coefficient of variation (CV) shown in the figure. The gray bars show no difference between the blue and orange bars within each plastochron phase

For indeterminate cultivars in irrigated environments, in the early phase, experiments E3, E4 and E15 were significant different from E1 and E9, with a plastochron variation of  $19^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  from E3 to E1 (Figure 5C). At the intermediate phase, E3 ( $68.9^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ )

was significant different from E1, E2, E9 and E15, with a median plastochron of 55.6, 49.2, 54.9 and 48.78 °C day node<sup>-1</sup>, respectively. The late plastochron phase for indeterminate cultivars in irrigated environment differed from E3 and E4 to E6 and E15.

The experiments conducted in a rainfed environment for indeterminate cultivars only showed statistically differences in the early phase, with the highest plastochron value for E17 (62.5 °C day node<sup>-1</sup>) and the lowest for E13 (55.7 °C day node<sup>-1</sup>), which differed from each other, but did not differ from E14 (Figure 5D). In the intermediate and late phases, no differences were observed between experiments, with mean plastochron values of 62.3 and 76.2 °C day node<sup>-1</sup>, for the intermediate and late phases, respectively (Figure 5D).

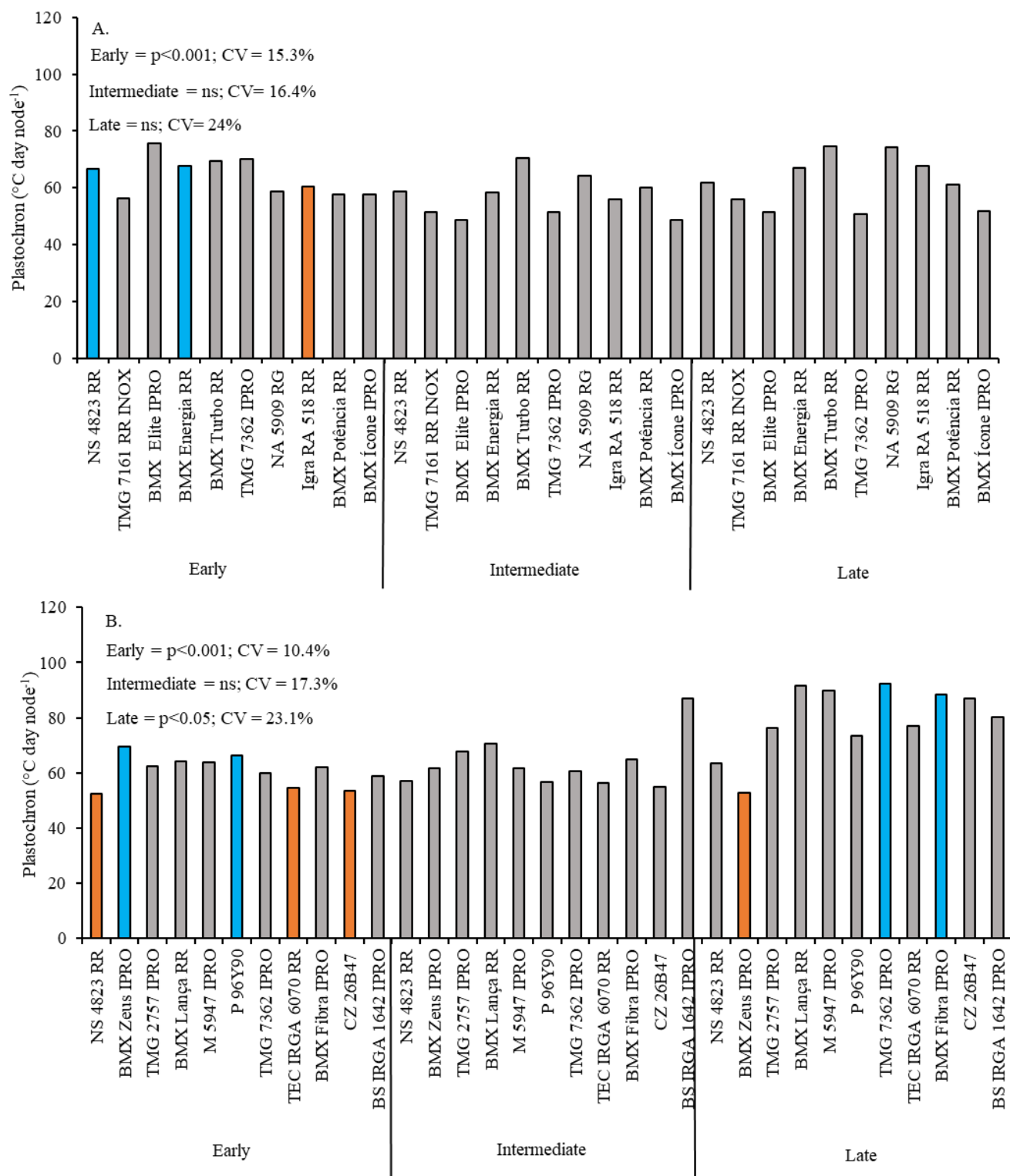
The different experiments, with different sowing dates, show variation in plastochron values. Martins et al. (2011) observed that the plastochron of different cultivars decreased as the sowing time was delayed, which is different to what was observed in this study. This reduction in the plastochron value may be linked to the duration of hours of light in a day (photoperiod), which can increase the rate of vegetative development of the soybean crop (Lu et al., 2017). However, a joint analysis of the data from the 17 experiments over 7 seasons indicated that has no effect of photoperiod on the nodes emission in soybean crop.

Evaluating the different cultivars of soybean with determinate growth habit, it was observed that there was no significant difference in plastochron for the irrigated environment in the early phase ( $p > 0.05$  and CV= 11.8%), as well as for the late phase ( $p > 0.05$  and CV= 24.9%), with mean plastochron values of 59.7 °C day node<sup>-1</sup> in the early phase and 65.8 °C day node<sup>-1</sup> in the late phase. The cultivars sown in rainfed environment also do not differs statistically ( $p > 0.05$  and CV= 13.1%), with an average plastochron value of 70.1 °C day node<sup>-1</sup>.

The indeterminate soybean cultivars differed significantly in the water regimes and phases. Cultivation under irrigated water regimes showed differences for cultivars only in the

early phase, in which the cultivars NS 4823 RR (66.7 °C day node<sup>-1</sup>) and BMX Energia RR (67.5 °C day node<sup>-1</sup>) showed the highest plastochron medians, differing from the cultivar Igra RA 518 RR (60.4 °C day node<sup>-1</sup>) what was the same of others cultivars (Figure 6A). In the intermediate and late phases, mean plastochron values were 56.8 and 61.6 °C day node<sup>-1</sup>, respectively.

In the early phase in rainfed environment, the cultivars BMX Zeus IPRO (69.4 °C day node<sup>-1</sup>) and P 96Y90 (66.2 °C day node<sup>-1</sup>) showed the highest median plastochron values, being statistically different from the cultivars NS 4823 RR (52.2 °C day node<sup>-1</sup>), TEC IRGA 6070 RR (54.6 °C day node<sup>-1</sup>) and CZ 26B47 (53.4 °C day node<sup>-1</sup>) (Figure 6B). Therefore, in the intermediate phase, in rainfed environment, no difference was observed between the soybean cultivars. In the late phase, the cultivars TMG 7362 IPRO and BMX Fibra IPRO had plastochron medians of 92.2 and 88.5 °C day node<sup>-1</sup>, which differed from BMX Zeus IPRO (52.9 °C day node<sup>-1</sup>), which had the lowest plastochron median value for the late phase (Figure 6B).



**Figure 6.** Median for the plastochron of indeterminate growth soybean cultivars in irrigated (A) and rainfed (B) environments at the early, intermediate and late phases in seven seasons,

four locations and 17 experiments. The blue and orange bars are different by Dunn's Post Hoc test at a 5% probability of error, by phase, with the p-value and coefficient of variation (CV) are shown in the figure. The gray bars show no difference between the blue and orange bars within each plastochron phase

Martins et al. (2011), working with determinate soybean cultivars, found a difference between the plastochron values for these materials with determinate growth habit, different to what was observed in this study, where there was no difference between determinate cultivars. However, the plastochron values found for the cultivars in this study, for the early and late phases, are similar to those found by Martins et al. (2011). Plastochron values of 57.3 to 75.8 °C day node<sup>-1</sup> were observed for the BMX Ativa RR cultivar for different row space at the sown (Rockenbach et al., 2016), similar to the values found in this study for cultivars with determinate growth habit.

The plastochron results for the different indeterminate growth habit cultivars were not related to the cultivars development cycle (RMG), as observed for older soybean cultivars by Sinclair et al. (2005) and Streck et al. 2008. The early plastochron phase for cultivars with indeterminate growth habit showed values close to those found in previous studies (Streck et al., 2008; Martins et al., 2011; Rockenbach et al., 2016). However, considering the late phase, the values for some cultivars are close to those found by Bossolani et al. (2022), that consider only a single plastochron.

The increase in plastochron values observed in this study, compared to previous studies, may be related to genetic improvement and the launch of new soybean cultivars every year. According to Winck et al. (2022), there is an increase in soybean productivity of 41 kg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> due to genetic improvement.

The division of the plastochron into phases during the soybean node emission period proposed in this study improves the understanding of the vegetative development of soybean

cultivars with determinate and indeterminate growth habits. As a follow-up to the work carried out by Bexaira et al. (2019), building a model to estimate the rate of node emission in the soybean crop, and with practical application, this division of the plastochron into the different phases presents the ecophysiological bases for the construction of a chronological function with biological significance, thus advancing the barrier of knowledge about the vegetative development of the soybean crop and allowing the creation of a reliable process-based mathematical model.

### **Conclusion**

1. There is a difference in plastochron during node emission in soybean cultivars of determinate and indeterminate growth habit under different water regimes.
2. In irrigated cultivars of determinate growth habit, plastochron has two phases, the early phase of  $59.7\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$  and the late phase of  $65.7\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ . In rainfed environments, there is no difference between the initial and final phases of plastochron.
3. Cultivars of indeterminate growth habit with irrigation has the mean of early and late plastochron of  $64.1\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ , unlike the intermediate phase where the plastochron is  $58.5\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ . In rainfed environments, the early and intermediate phases have the mean value of  $60.6\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ , unlike the late phase with a plastochron of  $79.4\text{ }^{\circ}\text{C day node}^{-1}$ .

### **Literature cited**

Arnold, C.Y. Maximum-minimum temperatures as a basis for computing heat units.

Proceedings of the American Society for Horticultural Sciences, v.76, n.1, p.682-692, 1960.

Bexaira, K. P.; Streck, N. A.; Zanon, A. J.; Tagliapietra, E. L.; Richter, G. L.; Weber, P. S.

Calibration and validation of a node appearance model in soybean crop. Revista Brasileira

de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 25, p. 361-371, 2021. [https://doi.org/10.1590/1807-](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n6p361-371)

[1929/agriambi.v25n6p361-371](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n6p361-371)

- Boote, K. J.; Mínguez, M. I.; Sau, F. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. *Agronomy Journal*, v.94, p.743–756, 2002. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.7430>
- Bossolani, J. W.; Meneghette, H. H.; Sanches, I. R.; Santos, F. L. D.; Parra, L. F.; Lazarini, E. Sowing date changes phenological development, plastochron index, and grain yield of soybeans under Cerrado conditions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, p. 488-494, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n7p488-494>
- Fehr, W. R.; Caviness, C. E. Stages of soybean development. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 15 p. Special Report, 80
- Gilmore, E.C. Jr.; Rogers, J.S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agronomy Journal*, Madison, v. 50, n. 10, p. 611-615, 1958. <https://doi.org/10.2134/agronj1958.00021962005000100014x>
- Lu, S.; Zhao, X.; Hu, Y.; Liu, S.; Nan, H.; Li, X.; Fang, C.; Shi, X.; Kong, L.; Su, T.; Zhang, F.; Li, S.; Wang, Z.; Yuan, X.; Cober, E. R.; Weller, J. L.; Liu, B.; Hou, X.; Tian, Z.; Kong, F. Natural variation at the soybean J locus improves adaptation to the tropics and enhances yield. *Nature genetics*, v. 49, n. 5, p. 773-779, 2017. <https://doi.org/10.1038/ng.3819>
- Martins, J. D.; Radons, S. Z.; Streck, N. A.; Knies, A. E.; Carlesso, R. Plastocrono e número final de nós de cultivares de soja em função da época de semeadura. *Ciência Rural*, v. 41, p. 954-959, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000064>
- McMASTER, G. S. Phenology, development, and growth of the wheat (*Triticum aestivum* L.) shoot apex: a review. *Advances in Agronomy*, v. 59, p. 63-118, 1997
- Rockenbach, A. P.; Paula, G. M. de.; Caron, B. O.; Schneider, J. R.; Elli, E. F.; Engroff, T. D.; Meira, D. Plastochron in soybean cultivars under the space arrangements. *International Journal of Current Research*, v. 8, n. 11, p. 41515-41519, 2016.

R Development Core Team. R: A language and environment for statistical Computing, 2019.

Available on: < <https://www.rproject.org/> >. Accessed on: Mar. 2023.

Setiyono, T. D.; Weiss, A.; Specht, J.; Bastidas, A. M.; Cassman, K. G.; Dobbermann, A.

Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*, v.100, p.257-271, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.011>

Setiyono, T. D.; Cassman, K. G.; Specht, J. E.; Dobermann, A.; Weiss, A.; Yang, H.; Conley,

S. P.; Robinson, A. P.; Pedersen, P.; De Bruin, J. L. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. *Field Crops Research*, v. 119, n. 1, p. 161-174, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.007>

Sinclair, T. R.; Neumaier, N.; Farias, J. R. B.; Nepomuceno, A. L. Comparison of vegetative

development in soybean cultivars for low-latitude environments. *Field Crops Research*, v.92, p.53-59, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.08.008>

Streck, N. A.; Tibola, T.; Lago, I.; Buriol, G. A.; Heldwein, A. B.; Schneider, F. M.; Zago, V.

Estimativa do plastocrono em meloeiro (*Cucumis melo* L.) cultivado em estufa plástica em diferentes épocas do ano. *Ciência Rural*, v. 35, p. 1275-1280, 2005.

<https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000600008>

Streck, N. A.; Lago, I.; Gabriel, L. F.; Samboranza, F. K. Simulating maize phenology as a

function of air temperature with a linear and a nonlinear model. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.449-455, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000400002>

Tagliapietra, E. L.; Winck, J. E. M.; Silva, M. R. da.; Alves, A. F.; Munareto, G. G.; Poersch,

A. H.; Ribeiro, B. S. M. R.; Quintero, C. E.; Richter, G. L.; Balest, D. S.; Inklamn, V. B.;

Schneider, R. A.; Bexaira, K. P.; Savegnago, C.; Nora, M. D.; Paula, L. S.; Arevalo, E. S.;

Báez, M. S. A.; Pes, L. Z.; Streck, N. A.; Zanon, A. J. *Ecofisiologia da soja visando altas produtividades*. 2. ed. Santa Maria: Palloti, 2022. 432 p.



- Tenorio, F. M.; Specht, J. E.; Arkebauer, T. J.; Eskridge, K. M.; Graef, G. L.; Grassini, P. Coordination between primordium formation and leaf appearance in soybean (*Glycine max*) as influenced by temperature. *Field Crops Research*, v. 210, p. 197-206, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.03.015>
- Wang, E.; Engel, T. Simulation of phenological development of wheat crops. *Agricultural Systems*, v.58, p.1-24, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(98\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(98)00028-6)
- Winck, J. E. M.; Tagliapietra, E. L.; Schneider, R. A.; Inklman, V. B.; Nora, M. D.; Savegnago, C.; Paula, L. S.; Silva, M. R. da.; Zanon, A. J.; Streck, N. A. Decomposition of yield gap of soybean in environment× genetics× management in Southern Brazil. *European Journal of Agronomy*, v. 145, p. 126795, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126795>
- Wrege, M. S.; Steinmetz, S.; Reisser Júnior, C.; de Almeida, I. R. Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 336 p.

### 3.2 Avanços na modelagem da cultura da soja

Modelos agrícolas de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade de soja são utilizados para diferentes finalidades, como por exemplo na simulação da fenologia visando aumentar a eficiência nas práticas de manejo nas lavouras (Torrion et al., 2011) e mais recentemente para definir o potencial de produtividade em estudos de lacunas de produtividade (Tagliapietra et al., 2021). Contudo, os modelos atuais para a cultura da soja foram desenvolvidos em ambientes e calibrados para cultivares distintas dos quais a soja é cultivada no Brasil, requerendo muitas variáveis de entrada e grande complexidade para quem o utiliza (Boote et al., 1998; Setyono et al., 2007; 2010). O Brasil é líder mundial na produção de soja e por isso é importante que seja desenvolvido um modelo matemático para as condições edafoclimáticas e de cultivares do Brasil, que seja menos complexo para atrair mais usuários, mas que tenha capacidade preditiva satisfatória. Para atender esta demanda, a Equipe FieldCrops vem trabalhando a cinco anos para suprir esta lacuna no desenvolvimento de um modelo baseado em processos com complexidade intermediária para o Brasil. Neste capítulo da dissertação é apresentado o estado atual de deste modelo, denominado SimulaSoja. Neste momento a parte do SimulaSoja que será apresentado é o modelo de desenvolvimento da cultura da soja, que simula a timeline com a sequência do desenvolvimento e que representa, ecofisiologicamente, o relógio da planta de soja.

Para desenvolver o modelo de desenvolvimento para cultura da soja será utilizado um banco de dados coletados em experimentos de campo conduzidos pelas Equipes FieldCrops de diversas instituições desde a safra 2011/2012 até a safra 2017/2018 em diversos locais do RS (Tabela 1), que estão localizados em mesorregiões com características edafoclimáticas distintas quanto à temperatura, precipitação e variação no fotoperíodo (latitude). O clima destes locais, pela classificação climática de Köppen, é Cfa (Subtropical) (WREGE et al., 2011) exceto Água Santa que é Cfb (Temperado) (WREGE et al., 2011).

**Tabela 1.** Datas de semeadura nos experimentos de campo que constituem o banco de dados para o estudo. Santa Maria, RS, 2023.

Ano Agrícola	Local	Data de semeadura
2011-2012	Santa Maria	24/09, 19/11 e 28/01
2012-2013	Santa Maria	22/09, 03/11, 01/12 e 06/02

	Pelotas	09/11
	Santa Maria	27/09, 15/11 e 19/02
	Itaqui	16/10, 24/11 e 12/12
	Frederico W.	23/11
2013-2014	Júlio de Castilhos	18/11
	Tupanciretã	17/11
	Água Santa	18/11
	Restinga Seca	14/11
2014-2015	Santa Maria	15/11
	Cachoeirinha	04/10, 19/11 e 12/12
2016-2017	Itaqui	22/11, 14/12 e 12/01 04/11, 02/12, 03/01 e 19/01
2017-2018	Santa Maria*	02/09, 17/10, 21/11, 19/12, 16/01, 20/02 e 21/03*

\*Experimentos que serão utilizados para calibração do DRmax

Nos experimentos foram utilizadas a cultivares de soja com grupo de maturidade relativa (GMR) de 4.8 a 8.2 hábitos de crescimento indeterminado e determinado. As datas de semeadura variam de agosto a março (Tabela 1), que foram definidas para representar semeadura antes, durante e após o período recomendado pelo Zoneamento de Risco Climático da Soja (MAPA, 2011).

O delineamento experimental em todos os experimentos foi de blocos ao acaso, com três a quatro repetições. Cada repetição foi constituída de uma parcela que varia de tamanho dependendo do local que foi conduzido o experimento. A adubação de base, a inoculação da semente com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum*, o tratamento da semente com fungicida e inseticida e o controle de pragas e doenças foram realizados de acordo com as recomendações técnicas da cultura. Em Santa Maria, os experimentos foram conduzidos com irrigação suplementar, de modo que o crescimento e o desenvolvimento das plantas ocorressem sem deficiência hídrica, e nos demais locais não houve irrigação suplementar, para representar as condições das lavouras de soja em cada um dos locais.

As variáveis do desenvolvimento coletadas nos experimentos foram número de nós acumulados na haste principal (semanalmente) e a data dos estágios de desenvolvimento pela

escala de Fehr and Caviness (1977): EM (planta com os cotilédones acima do nível do solo formando um ângulo de 45°C), R1 (emissão da primeira flor na haste principal), R3 (início da formação dos legumes), R5 (início do enchimento de grãos) e R7 (maturação fisiológica). Os dados meteorológicos durante o período experimental foram coletados por meio das estações meteorológicas automáticas em locais próximos dos experimentos.

### 3.2.1 Descrição do submodelo de desenvolvimento da soja no modelo SimulaSoja

O modelo proposto neste estudo é um modelo de desenvolvimento (fenologia e emissão de folhas). Para a simulação do desenvolvimento da cultura da soja foi usado o modelo de Wang e Engel (1998). Esse modelo já foi modificado para simulação do desenvolvimento de trigo de inverno (STRECK et al., 2003) e arroz (STRECK et al., 2011). Este modelo foi escolhido por ser um modelo simples, os coeficientes têm significado biológico e definição operacional (podem ser estimados ou medidos), o efeito dos fatores ecológicos sobre o desenvolvimento vegetal é representado de forma multiplicativa e as funções de resposta do desenvolvimento aos fatores ecológicos são funções não lineares.

Dentro do modelo de desenvolvimento, o submodelo de emissão de nós e estágios vegetativos foi simulado com o modelo proposto por Wang e Engel (1998):

$$NAR = NAR_{max} \cdot f(T) \quad (1)$$

em que NAR é a taxa de aparecimento de nós (nós dia<sup>-1</sup>), NAR<sub>max</sub> é a taxa diária máxima de aparecimento de nós e f(T) é uma função de resposta à temperatura. O NAR<sub>max</sub> foi calculado pelo modelo proposto por Bexaira et al. (2021) para cultivares de hábito de crescimento determinado e indeterminado:

$$NAR_{max} = -0.0061x^2 + 0.0935x + 0.0331 \quad (2)$$

em que x é o grupo de maturidade relativa (GMR) da cultivar.

O número de nós acumulados (NN) é calculado acumulando-se a NAR:

$$NN = \sum NAR$$

(3)

A f(T) é calculada por uma versão da função beta:

$$f(T) = [2(T-T_{min})^\alpha(T_{opt}-T_{min})^\alpha - (T_{med}-T_{min})^{2\alpha}] / (T_{opt}-T_{min})^{2\alpha} \text{ se } T_{min} \leq T_{med} \leq T_{max} \quad (4)$$

$$f(T) = 0 \text{ se } T_{med} < T_{min} \text{ ou } T_{med} > T_{max} \quad (5)$$

$$\alpha = \ln 2 / \ln[(T_{max}-T_{min}) / (T_{opt}-T_{min})] \quad (6)$$

em que  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  e  $T_{\text{opt}}$  são as temperaturas cardinais da fase de desenvolvimento da cultura da soja e  $T$  é a temperatura diária do ar (Tabela 3).

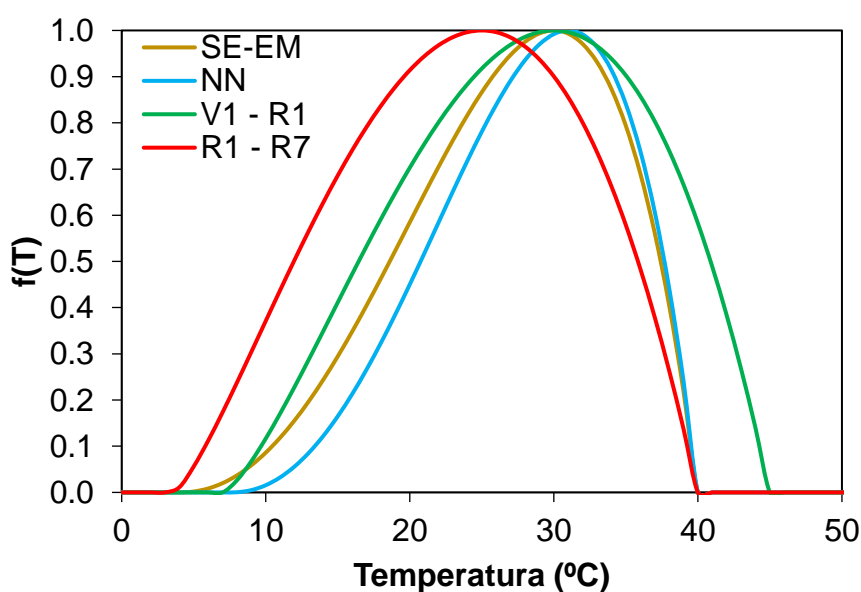
Tabela 2 - Temperaturas cardinais das fases de desenvolvimento da soja utilizadas no modelo de desenvolvimento.

Fase	$T_{\min}$ (°C)	$T_{\text{opt}}$ (°C)	$T_{\max}$ (°C)
Emissão de nós	7,6	31,0	40,0
Germinação	4,0	30,0	40,0
Vegetativa	7,0	30,0	45,0
Reprodutiva	3,6	25,0	40,0

Fonte: TAGLIAPIETRA et al., 2022.

As curvas geradas pelas equações (3), (4) e (5) com as temperaturas cardinais para a emissão de nós e demais fases do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Funções de temperatura  $f(T)$  usadas no modelo desenvolvimento da cultura da soja para simular as diferentes fases do ciclo de desenvolvimento de soja: Semeadura a Emergência (SE-EM), Emissão de nós (NN), Vegetativa (V1-R1) e Reprodutiva (R1-R7).



Fonte: O autor (2023).

O submodelo de fenologia divide o ciclo da cultura da soja em cinco fases: a fase de germinação que vai da sementeira (SE) até a emergência (EM), a fase vegetativa que vai da emergência (EM) até a emissão da primeira flor na haste principal (R1), a fase de florescimento que vai do R1 até o início da formação de legumes (R3), a fase de formação de legumes que vai do R3 até início do enchimento de grãos (R5) e a fase de enchimento de grãos que vai do R5 até a maturação fisiológica (R7). Os estágios de desenvolvimento (EM, R1, R3, R5 e R7) foram definidos pela escala fenológica de Fehr e Caviness (1977).

O primeiro passo no modelo é calcular a taxa diária de desenvolvimento da planta (DR). O estágio de desenvolvimento (DVS) em que a planta se encontra é calculado acumulando-se os valores da taxa diária de desenvolvimento, ou seja,  $DVS = \sum DR$ . DVS é -1 na SE, 0 na EM, 1 no R1, 1,2 no R3, 1.5 em R5 e 2 no R7. Optou-se em dividir o ciclo de desenvolvimento da soja e atribuir os números -1, 0, 1, 1,2, 1.5 e 2 para os estágios de desenvolvimento acima, baseado na proposta de dividir o ciclo de desenvolvimento de outras culturas anuais desta maneira (STRECK et al., 2003; STRECK et al., 2011) (Figura 2). A forma geral do modelo será:

$$DR = DR_{maxs}.f(T) \text{ para a fase emergência (SE – EM)} \quad (6)$$

$$DR = DR_{maxv}.f(T).f(P) \text{ para a fase vegetativa (EM – R1)} \quad (7)$$

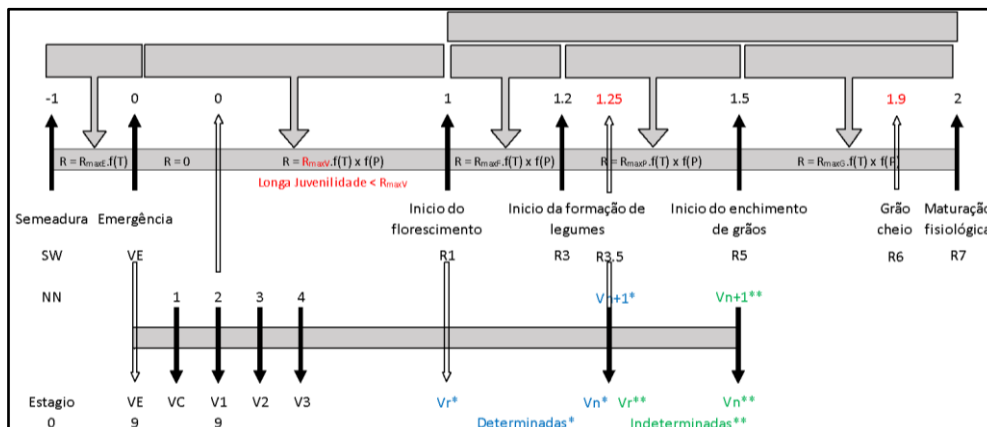
$$DR = DR_{maxr1}.f(T).f(P) \text{ para a reprodutiva 1 (R1-R3)} \quad (8)$$

$$DR = DR_{maxr2}.f(T).f(P) \text{ para a fase reprodutiva 2 (R3 – R5)} \quad (9)$$

$$DR = DR_{maxr3}.f(T) .f(P) \text{ para a fase reprodutiva 3 (R5 – R7)} \quad (10)$$

em que  $DR_{maxs}$ ,  $DR_{maxv}$ ,  $DR_{maxr1}$ ,  $DR_{maxr2}$  e  $DR_{maxr3}$  (é a taxa máxima de desenvolvimento do genótipo quando os fatores ecológicos estão na intensidade ótima na fase específica) e  $f(T)$  e  $f(P)$  são funções de resposta a temperatura e fotoperíodo, respectivamente, variando de 0 a 1.

Figura 2 - Representação esquemática do ciclo de desenvolvimento da soja no modelo de fenologia proposto, indicando os principais estágios de desenvolvimento e as taxas de desenvolvimento nas respectivas fases.



Fonte: o Autor (2023).

Importante avanço na construção do modelo de fenologia no SimulaSoja é que o somatório de DR, integrando o DS, inicia em -1 (SE) acumulando-se até 0 (EM), onde a partir da EM até o estágio vegetativo V1 (dois nós visíveis na haste principal), o modelo para de somar os valores de DR e retorna quando a planta de soja está no estágio V1 (2 nós), dando sequência no ciclo de desenvolvimento para cultura da soja (Figura 2). Esta abordagem inovadora de modelagem visa representar a fase juvenil da soja, período em que a planta de soja não responde ao fotoperíodo e portanto no modelo a soja não avança no DVS da EM até V1, apenas emite nós (o submodelo de emissão de nós não é desligado).

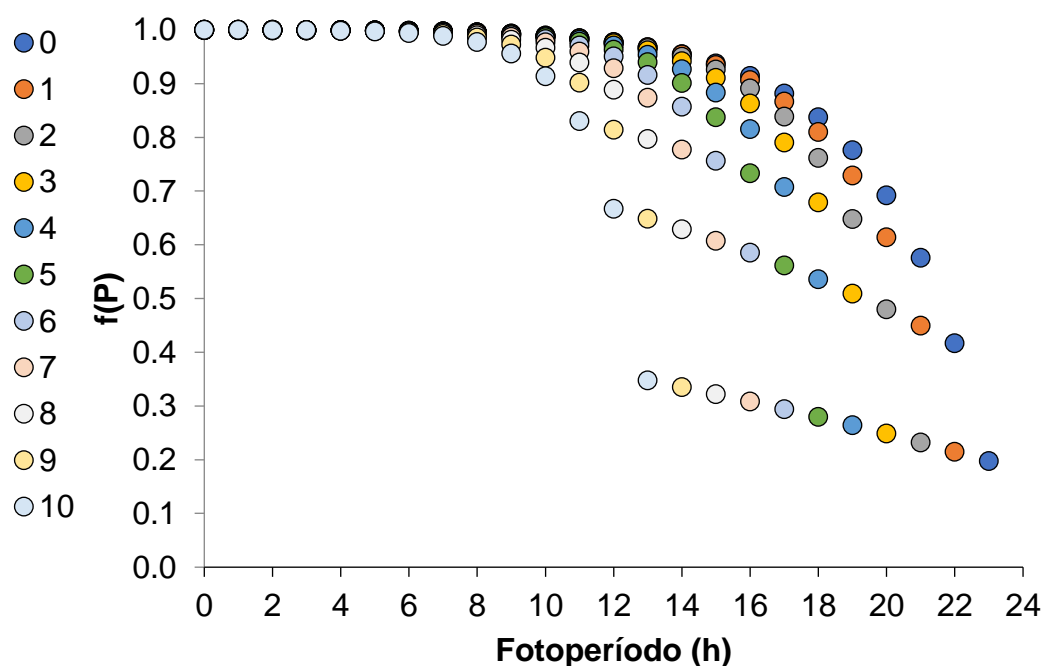
A função de resposta à temperatura  $f(T)$  utilizada no modelo de desenvolvimento é uma função beta (Figura 2) (WANG & ENGEL, 1998; STRECK, 2002; STRECK et al., 2003), descrita nas equações 4, 5 e 6.

A função de resposta do fotoperíodo é uma função exponencial negativa (Sinclair et al., 2004):

$$f(P) = 1 - \exp(c \times (P - P_c)) \quad (11)$$

em que  $P$  é o fotoperíodo (baseado no ângulo de elevação solar  $6,0^\circ$  para resposta fotoperiódica de indução floral),  $P_c$  é o fotoperíodo crítico, acima do qual a taxa de desenvolvimento é zero,  $c$  é o coeficiente ligado ao fotoperíodo ótimo. As curvas geradas pela equação (11) para diferentes GMR (0 a 10) são apresentadas na Figura 3.

Figura 3 – Função de fotoperíodo  $f(P)$  usada no modelo desenvolvimento da cultura para diferentes grupos de maturidade relativa (GMR, 0 a 10).



Fonte: o Autor (2023).

A estimativa dos coeficientes (calibração) do submodelo de fenologia será realizada através do procedimento PROC-NLIN do aplicativo computacional SAS (SAS Institute, INC., 2009) usando o método de Marquardt, o qual minimiza a soma dos quadrados do erro. Para essa estimativa serão utilizados os dados de temperatura do ar e fotoperíodo, e as datas de SE, EM, R1, R7 e R8 de diferentes cultivares de soja. O desempenho do modelo de fenologia em simular o desenvolvimento foi avaliado com dados dos demais experimentos, que são dados independentes, através das estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME) (JANSEEN; HEUBERGER, 1995), raiz do quadrado médio do erro normalizado (RQMEn) (JANSSEN; HEUBERGER, 1995) e índice “BIAS” (LEITE; ANDRADE, 2002).



#### 4 DISCUSSÃO GERAL

Neste estudo foram melhorados os conhecimentos sobre os processos básicos do desenvolvimento da cultura da soja. Cultivares de soja de hábito de crescimento determinado e indeterminado apresentaram diferentes valores de plastocrono para as diferentes fases e regime hídrico durante o período de emissão de nós. Em cultivares irrigadas de hábito de crescimento determinado, o plastocrono apresenta duas fases, a fase inicial e a fase final. Em ambientes de sequeiro, não há diferença entre as fases inicial e final do plastocrono.

Cultivares de hábito de crescimento indeterminado com irrigação tem um valor médio de plastocrono para as fases inicial e final, diferentes da fase intermediária. Em ambientes de sequeiro, as fases inicial e intermédia têm o valor médio de  $60,6 \text{ } ^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ , ao contrário da fase tardia com um plastocrono de  $79,4 \text{ } ^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ .

Os valores de plastocrono reportados neste estudo foram similares aos valores de plastocrono de  $48.1$  a  $60.3 \text{ } ^\circ\text{C dia nó}^{-1}$  observados por Streck et al. (2008) e plastocronos de  $47.4$  a  $69.3 \text{ } ^\circ\text{C dia nó}^{-1}$  observados por Martins et al. (2011). Entretanto, na literatura estes valores de plastocrono são apresentados apenas como um único valor de plastocrono, que vai de V1 até o número final de nós (Streck et al., 2008; Martins et al., 2011; Rockenbach et al., 2016). Com essa dissertação foi possível melhorar o entendimento sobre o processo de emissão de nós de soja, identificando diferentes valores de plastocrono em diferentes fases do desenvolvimento vegetativo da soja. Avanços no conhecimento sobre os valores de plastocrono nas diferentes fases do processo de emissão de nós permite que sejam melhorados os modelos matemáticos para emissão de nós na cultura da soja, determinando uma função de cronologia com significado biológico e construindo um modelo baseado em processos.

As diferentes cultivares, épocas de semeadura e locais permitiram que os estudos apresentados nos capítulos 1 e 2 se desenvolvessem em diferentes condições edafoclimáticas. Este processo é importante em estudos do desenvolvimento da cultura da soja e para testar a robustez em um modelo de desenvolvimento em simular os estágios fenológicos para a cultura da soja. Esta dissertação de mestrado apresentou avanços no desenvolvimento do modelo matemático baseado em processos, o SimulaSoja. Construiu-se bases para o desenvolvimento de uma função de cronologia e possibilitou o desenvolvimento do modelo de desenvolvimento para cultura da soja. As informações aqui relatadas serão utilizadas para dar sequência no desenvolvimento do SimulaSoja.

## 5 CONCLUSÃO

Há uma diferença no plastocrono durante a emissão de nós em cultivares de soja de hábito de crescimento determinado e indeterminado sob diferentes regimes hídricos.

Em cultivares irrigadas de hábito de crescimento determinado, o plastocrono tem duas fases, a fase inicial de  $59,7 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$  e a fase final de  $65,7 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ . Em ambientes de sequeiro, não há diferença entre as fases inicial e final do plastocrono.

As cultivares de hábito de crescimento indeterminado com irrigação têm a média de plastocrono inicial e final de  $64,1 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ , ao contrário da fase intermediária, em que o plastocrono é de  $58,5 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ . Em ambientes de sequeiro, as fases inicial e intermediária têm o valor médio de  $60,6 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ , ao contrário da fase final com um plastocrono de  $79,4 \text{ }^\circ\text{C dia nó}^{-1}$ .

O modelo matemático baseado em processos genuinamente brasileiro para simular o desenvolvimento na cultura da soja apresenta as bases que constroem o modelo, nos próximos quatro anos, os processos de calibração e validação serão realizados, buscando entregar para o produtor brasileiro um modelo que represente a interação genótipo x ambiente no Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOCK, B.; TRENT, A. The Soybean Crop Simulator, GLYCIM: **Documentation for the Modular Version 91**, Department of Plant, Soil and Entomological Sciences, University of Idaho, p.242, 1991.
- ALBERTO, Cleber Maus et al. Simulação do balanço de água no solo cultivado com trigo com modificação de dois modelos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1449-1458, 2009.
- BATTISTI, R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 2013. 263f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- BATTISTI, R. et al. Gauging the sources of uncertainty in soybean yield simulations using the MONICA model. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 9-18, 2017a.
- BATTISTI, R. et al. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 28-37, 2017b.
- BEXAIRA, Kelin P. et al. Calibration and validation of a node appearance model in soybean crop. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, p. 361-371, 2021.
- BOSSOLANI, João W. et al. Sowing date changes phenological development, plastochron index, and grain yield of soybeans under Cerrado conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 488-494, 2022.
- BOOTE, K.J. et al. Simulation of crop growth: CROPGRO, model. In: Peart, R.M., Curry, R.B. (Eds.), **Agricultural Systems Modeling and Simulation**. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, p.651–692, 1998.
- BOOTE, K.J.; MÍNGUEZ, M.I.; SAU, F. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. **Agronomy Journal**, v.94, p.743–756, 2002.
- CERA J. C. et al. Extending the evaluation of the SoySim model to soybean cultivars with high maturation groups. **Field Crops Research**, v.201, p.162-174, 2017.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acessado em: 2023.
- DIEPEN, C.A. van. Et al. WOFOST: a simulation model of crop production. **Soil Use and Management**, v.5: p.16-24, 1989.

- FARIAS, J. R. B. et al. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. et al. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: **INMET - Instituto Nacional de Meteorologia**, 2009. p.109-130
- FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <http://www.fao.org/>. Acessado em: 2022.
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 15 p. (Special Report, 80).
- FERMONT, A. M. et al. Closing the cassava yield gap: an analysis from small holder farms in East Africa. **Field Crops Research**, v. 112, p. 24–36, 2009.
- GRASSINI, P. et al. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 179, p. 150–163, 2015.
- HODGES, Tom. Temperature and water stress effects on phenology. **Predicting crop phenology**, p. 7-13, 1991.
- HOOGENBOOM, M.G et al. **Decision support system for agrotechnology transfer version 4.0**. University of Hawaii, Honolulu, HI (CD-ROM). 2004.
- JANSSEN, P. H. M., HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, v. 83, n. 1, p. 55-56, 1995.
- JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. **European journal of agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 235-265, 2003.
- LA MENZA, Nicolas Cafaro et al. Is soybean yield limited by nitrogen supply?. **Field Crops Research**, v. 213, p. 204-212, 2017.
- LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. de. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, v.26, p.321-328, 2002.
- MAPA. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul, ano-safra 2011/2012**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. p.5, 2011.
- MARCON, E. C et al. Uso de diferentes fontes de nitrogênio na cultura da soja. **Revista Thema**, Pelotas, v. 14, n. 2, p. 298-308, 2017.
- MARTINS, Juliano Dalcin et al. Plastocrono e número final de nós de cultivares de soja em função da época de semeadura. **Ciência Rural**, v. 41, p. 954-959, 2011.
- PENNING DE VRIES, F. W. T. et al. **Opportunities for soya beans after rice in the Philippines: an exploration by simulation**. CABO-DLO, Simulation Report 25, p. 60, 1992.

- RICHTER, G. L. Uso de submodelo de competição por plantas daninhas no modelo SimulArroz. **Dissertação de mestrado**. 47p, 2018.
- RODRIGUES, O. et al. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 431-437, 2001.
- SCHAYKEWICH, C. F. An appraisal of cereal crop phenology modeling. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 75, n. 2, p. 329-341, 1995.
- SETIYONO, T. D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high yield conditions. **Field Crops Research**, v. 100, p. 257-271, 2007.
- SETIYONO, T. D. et al. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. **Field Crops Research**, v. 119, n. 1, p. 161-174, 2010.
- SILVA, M. R. da et al. Modelagem numérica para previsão de safra de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.7, p.791-800, 2016.
- SINCLAIR, T.R. Leaf area development in field grown soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.76, n.1, p.141-146, 1984.
- SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. **Field Crops Research**, v.15, n.2, p.125–141, 1986.
- SINCLAIR, T. R. et al. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. **Crop Science**, v. 31, n. 3, p. 786-790, 1991.
- STEWART, D. W. et al. Modeling genetic effects on the photothermal response of soybean phenological development. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 1, p. 65-70, 2003.
- STRECK, N. A. A generalized nonlinear air temperature response function for node appearance rate in muskmelon (*Cucumis melo* L.). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 1, p. 105-111, 2002.
- STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, p. 139-150, 2003.
- STRECK, N. A. et al. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a non-linear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.449-455, 2008.
- STRECK, N. A. et al. Modeling the Development of Cultivated Rice and Weedy Red Rice. **Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)**. 54. 371-384. 2011.

- STRECK, N. A. et al. Leaf development of cultivated rice and weedy red rice under elevated temperature scenarios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.190-199, 2013.
- TAGLIAPIETRA, Eduardo Lago et al. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 2, p. 1882-1894, 2021.
- TAGLIAPIETRA, Eduardo Lago et al. **Ecofisiologia da soja visando altas produtividades**. 2ª ed. Santa Maria, RS. Palloti, 2022. 432 p.
- TORRION, J. et al. Soybean Phenology Simulation in the North-Central United States. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1661-1667, 2011.
- UHLMANN, L. O. et al. PhenoGlad: A model for simulating development in Gladiolus. **European Journal of Agronomy**, v. 82, p. 33-49, 2017.
- YORINORI, J. T. Cancro da haste da soja: epidemiologia e controle. **EMBRAPA-CNPSO. Circular Técnica**, 1996.
- VERA-DIAZ, M. C. et al. An interdisciplinary model of soybean yield in the Amazon Basin: The climatic, edaphic, and economic determinants. **Ecological Economics**. V.65, n.2, p.420-431, 2008.
- WALLACH, D. Evaluating crop models. In Wallach et al (ed.) **Working with dynamic crop models: Evaluation, analysis, parameterization, and applications**. Elsevier, Amsterdam: 2006. P. 11-50.
- WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural systems**, v. 58, n. 1, p. 1-24, 1998.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Silver Spring, v. 2, n.1, p. 184-194, 1981.
- WREGE, M.S.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; DE ALMEIDA, I.R. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 336 p.
- ZANON, A. J. et al. Climate and management factors influence Soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 108, n. 4, p. 1447–1454, 2016.
- ZEIST, André Ricardo et al. Plastochron and yield of *Physalis peruviana* L. grown in different environments and transplanting dates. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 41, n. 4, p. 1151-1164, 2020.