



**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE  
DO SUL**

**VICE REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO, PESQUISA E EXTENSÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM SISTEMAS  
AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE**

**INAÊ CAROLINA SFALCIN**

**BIOLOGIA FLORAL E REPRODUTIVA DE *Linum usitatissimum* L.  
(LINACEAE), ASPECTOS CITOGENÉTICOS, FENOLÓGICOS E SUA  
CONTRIBUIÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE DOS AGROECOSSISTEMAS**

IJUÍ, RS

2023



**INAÊ CAROLINA SFALCIN**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**BIOLOGIA FLORAL E REPRODUTIVA DE *Linum usitatissimum* L. (LINACEAE),  
ASPECTOS CITOGENÉTICOS, FENOLÓGICOS E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A  
SUSTENTABILIDADE DOS AGROECOSSISTEMAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Sistemas Ambientais e Sustentabilidade da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul para obtenção do título de Mestra em Sistemas Ambientais e Sustentabilidade.

Orientador (a): Dra. Juliana Maria Fachinetto

Co-orientador: Dr. Ivan Ricardo Carvalh

IJUÍ, RS

2023

Catálogo na Publicação

S523b

Sfalcin, Inaê Carolina.

Biologia floral e reprodutiva de *Linum usitatissimum* L. (Linaceae), aspectos citogenéticos, fenológicos e sua contribuição para a sustentabilidade dos agroecossistemas / Inaê Carolina Sfalcin. - Ijuí, 2023.

38 f.: il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Campus Ijuí). Sistemas Ambientais e Sustentabilidade.

"Orientadora: Dra. Juliana Maria Fachinetto"

"Co-orientador: Dr. Ivan Ricardo Carvalho"

1. Biologia da polinização. 2. Linhaça. 3. Linho. 4. Melhoramento genético vegetal. 5. Produção sustentável. I. Fachinetto, Juliana Maria. II. Carvalho, Ivan Ricardo. III. Título.

CDU: 633.521

**UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul**  
**PPGSAS - Programa de Pós Graduação *Stricto Sensu* em Sistemas Ambientais**  
**e Sustentabilidade**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**Biologia floral e reprodutiva de *Linum usitatissimum* L. (Linaceae), aspectos citogenéticos, fenológicos e sua contribuição para a sustentabilidade dos agroecossistemas**

Elaborada por

**INAÊ CAROLINA SFALCIN**

Como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Sistemas Ambientais e Sustentabilidade

**Comissão Examinadora**

*Juliana Maria Fachinetto*

Prof.<sup>a</sup> Dra. Juliana Maria Fachinetto (Orientadora/PPGSAS/ UNIJUÍ)

*Ivan Ricardo Carvalho*

Prof. Dr. Ivan Ricardo Carvalho (PPGSAS/ UNIJUÍ)

*Vidica Bianchi*

Prof.<sup>a</sup> Dra. Vidica Bianchi (PPGSAS-PPGEC/ UNIJUÍ)

*Eliane Kaltchuk dos Santos*

Prof.<sup>a</sup> Dra. Eliane Kaltchuk dos Santos (PPGBot - UFRGS)

Ijuí, 06 de setembro de 2023



*À minha família, como reconhecimento pelo incentivo ao meu crescimento pessoal e profissional, e por nunca deixarem de estar ao meu lado.  
Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, inteligência suprema, causa primária de todas as coisas.

Aos meus pais, Ordilei e Jocemar, pelo apoio e suporte incondicional em todas minhas decisões e pela confiança de que tudo daria certo.

Ao meu irmão, Lorenzo, por ser descontração nos dias felizes e difíceis.

Ao meu namorado, Henrique, pelo companheirismo, por me ouvir em todos os momentos e por estar disponível para me ajudar sempre.

À orientadora Dra. Juliana Maria Fachinetto e ao co-orientador Dr. Ivan Ricardo Carvalho pela contribuição na pesquisa.

Aos bolsistas do Programa de Educação Tutorial – PET do curso de Ciências Biológicas da UNIJUÍ pela colaboração na coleta de dados da pesquisa.

Ao Programa de Melhoramento Genético da UNIJUÍ, pela oportunidade e colaboração acadêmica.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Ambientais e Sustentabilidade pelo conhecimento transmitido e vivências compartilhadas.

À Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ) e ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Ambientais e Sustentabilidade (PPGSAS) pela oportunidade da realização do mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela concessão da bolsa de estudos.

Em memória de meus avôs Claudino Agostinho Sfalcin e Vilmar Antônio Pianesso.

Agradeço a todos os amigos e profissionais que acreditaram, motivaram e colaboraram com a condução da pesquisa e com minha formação profissional.

## RESUMO

O crescimento populacional e a perda de diversidade biológica têm gerado preocupações em nível global quanto à produtividade das culturas, a sustentabilidade da cadeia produtiva e a manutenção da segurança alimentar. A linhaça, semente do linho (*Linum usitatissimum* L.), desponta como uma alternativa emergente, sendo reconhecida por seu potencial nutricional, farmacológico, químico e de produção com baixo impacto ambiental. No Brasil, as condições edafoclimáticas que permitem o cultivo do linho se concentram na região Sul, mas a falta de conhecimentos básicos acerca da biologia e do desenvolvimento da planta nas condições deste território ainda limitam a produção. Compreender a ecologia reprodutiva de culturas de importância econômica é fundamental no aumento da produtividade. Por se tratar de uma espécie que gera produtos de alto valor nutracêutico e com práticas de cultivo protetivas ao ambiente, torna-se imprescindível promover pesquisas na expansão do cultivo do linho em regiões que oportunizam seu desenvolvimento, alinhando-se ao atendimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas. Desta forma, esta pesquisa objetivou conhecer a biologia floral e a estabilidade reprodutiva de *Linum usitatissimum* L., contribuindo com o fomento de cultivos sustentáveis para a região produtiva do sul do Brasil. Para isso, foram conduzidas pesquisas para identificar os caracteres fenotípicos florais, a biologia reprodutiva e os componentes citogenéticos de genótipos de linhaça marrom e dourada, bem como, registrar a composição de visitantes florais em suas inflorescências e, ainda, propor uma escala fenológica para CISJU21, uma cultivar aclimatada e registrada no Estado do Rio Grande do Sul. Foram aplicados procedimentos metodológicos específicos em cada capítulo, e os resultados geraram uma descrição botânica reprodutiva da espécie, da fenologia reprodutiva e da dinâmica da antese floral, além de discutida a ecologia da polinização, atestando uma série de polimorfismos florais e da variabilidade genética existente nos genótipos. Bem como, produzida uma prancha botânica para a espécie e proposta uma escala fenológica baseada em tempo após o plantio, exigência térmica e descrição de eventos fenológicos. Foi reconhecida a estabilidade reprodutiva de genótipos com base em parâmetros citogenéticos e definido o sistema reprodutivo misto de autogamia facultativa para *L. usitatissimum*, em que autopolinização e polinização cruzada são hábeis na mesma flor, e apomixia, dicogamia e cleistogamia não ocorrem. Foi identificada a ocorrência de morfos florais hercogâmicos e evidenciada a importância de vetores de pólen para a fecundação de flores de linho. Foram relatadas espécies de visitantes florais, pilhadores e polinizadores associados ao cultivo do linho, e registrado o coleóptero *Astylus quadrilineatus* (Germar, 1825) como espécie-praga, em virtude dos danos causados nas estruturas reprodutivas. O cultivo da linhaça fornece serviços de polinização e desempenha um papel importante na redução do impacto ambiental das atividades agrícolas. Os estudos relativos à biologia floral e reprodutiva, aos aspectos citológicos e aos polinizadores do linho são pioneiros no país, com resultados inéditos. Espera-se que os contributos desta dissertação possam colaborar com futuras estratégias agroambientais na expansão da cadeia produtiva da linhaça e no desenvolvimento sustentável da região Sul do Brasil.

**Palavras-Chave:** Biologia da polinização, linhaça, linho, melhoramento genético vegetal, produção sustentável.

## ABSTRACT

The population growth and biological diversity loss have raised global concerns regarding crop productivity, the sustainability of the production chain, and the maintenance of food security. Flaxseed, the seed of the flax plant (*Linum usitatissimum* L.), stands out as an emerging alternative, recognized for its nutritional, pharmacological, chemical, and environmentally low-impact production potential. In Brazil, the edaphoclimatic conditions suitable for flax cultivation are primarily concentrated in the southern region. However, the lack of fundamental knowledge concerning the biology and plant development under these conditions continues to limit production. Understanding the reproductive ecology of economically important crops is crucial for increasing productivity. Given that flax is a species that yields high-value nutraceutical products and employs environmentally protective cultivation practices, it is imperative to promote research aimed at expanding flax cultivation in regions conducive to its development, aligning with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). As such, this study aimed to elucidate the floral biology and reproductive stability of *Linum usitatissimum* L., contributing to the promotion of sustainable cultivation in the southern production region of Brazil. To achieve this, research was conducted to identify floral phenotypic characteristics, reproductive biology, and cytogenetic components of brown and golden flax genotypes. Additionally, the composition of floral visitors in their inflorescences was recorded, and a phenological scale was proposed for CISJU21, a cultivar acclimated and registered in the State of Rio Grande do Sul. Specific methodological procedures were applied in each chapter, and the results generated a reproductive botanical description of the species, reproductive phenology, and the dynamics of floral anthesis. Furthermore, the pollination ecology was discussed, confirming a range of floral polymorphisms and genetic variability present in the genotypes. A botanical plate for the species was created, and a phenological scale was proposed based on time after planting, thermal requirements, and the description of phenological events. Reproductive stability was recognized in genotypes based on cytogenetic parameters, and a mixed reproductive system of facultative autogamy for *L. usitatissimum* was defined, wherein both self-pollination and cross-pollination are possible within the same flower, and apomixis, dichogamy, and cleistogamy do not occur. The occurrence of herkogamous floral morphs was identified, highlighting the importance of pollen vectors in flax flower fertilization. Various floral visitors, nectar thieves, and pollinators associated with flax cultivation were documented, and the beetle *Astylus quadrilineatus* (Germar, 1825) was recorded as a pest species due to the damage it causes to reproductive structures. Flax cultivation provides pollination services and plays a significant role in reducing the environmental impact of agricultural activities. Studies regarding the floral and reproductive biology, cytological aspects, and pollinators of flax are pioneering in the country, yielding unprecedented results. It is expected that the outcomes of this dissertation will contribute to future agro-environmental strategies for expanding the flax production chain and promoting sustainable development in the southern region of Brazil.

**Keywords:** Pollination biology, flax, linseed, plant genetic improvement, sustainable production.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lavoura de cultivo de *Linum usitatissimum* L. durante o florescimento, em Augusto Pestana – RS (A), porção terminal da planta de linho, evidenciando flor, cápsulas e folhas (B) e sementes de linhaça marrom (C) e dourada (D)..... 17

## LISTA DE ABREVIATURAS

ALA	Alpha-Linolenic Acid
cDNA	Complementary Deoxyribonucleic Acid
DNA	Deoxyribonucleic Acid
FAO	Food and Agriculture Organization
LA	Linoleic Acid
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
UNIJUÍ	Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
PPCS	Plano de Ação para Produção e Consumo Sustentáveis

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	12
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	16
CAPÍTULO 1	
<b>3. VARIABILIDADE FENOTÍPICA E POLIMORFISMOS FLORAIS EM <i>Linum usitatissimum</i> L. (LINACEAE): UM ESTUDO DE BIOLOGIA FLORAL E REPRODUTIVA</b> .....	27
3.1 INTRODUÇÃO .....	27
3.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	29
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	32
3.4 CONCLUSÃO .....	51
3.5 REFERÊNCIAS .....	52
APÊNDICE A - Prancha Botânica de <i>Linum usitatissimum</i> L. ....	58
CAPÍTULO 2	
<b>4. SISTEMA REPRODUTIVO MISTO DE <i>Linum usitatissimum</i> L.: UMA ESPÉCIE AUTOCOMPATÍVEL BENEFICIADA POR VETORES DE PÓLEN</b> .....	60
4.1 INTRODUÇÃO .....	60
4.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	61
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	63
4.4 CONCLUSÃO .....	70
4.5 REFERÊNCIAS .....	70
CAPÍTULO 3	
<b>5. COMPOSIÇÃO DE VISITANTES FLORAIS E POLINIZADORES EM ÁREA DE CULTIVO DE LINHAÇA (<i>Linum usitatissimum</i> L.)</b> .....	74
5.1 INTRODUÇÃO .....	74
5.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	76
5.3 RESULTADOS .....	77
5.4 CONCLUSÃO .....	89
5.5 REFERÊNCIAS .....	89
CAPÍTULO 4	
<b>6. NÚMERO CROMOSSÔMICO, ANÁLISE MEIÓTICA E ESTIMATIVA DA VIABILIDADE POLÍNICA EM GENÓTIPOS DE <i>Linum usitatissimum</i> L. NO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL</b> .....	94
6.1 INTRODUÇÃO .....	94
6.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	96
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	99
6.4 CONCLUSÃO .....	106

6.5 REFERÊNCIAS.....	107
CAPÍTULO 5	
<b>7.FENOLOGIA DA CULTURA DA LINHAÇA (<i>Linum usitatissimum</i> L.) CULTIVADA NO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL.....</b>	<b>111</b>
7.1 INTRODUÇÃO .....	111
7.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	113
7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	114
7.4 CONCLUSÃO.....	120
7.5 REFERÊNCIAS.....	120
APÊNDICE A .....	122
<b>8.CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>126</b>
<b>9.REFERÊNCIAS.....</b>	<b>129</b>

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O crescimento populacional das últimas décadas e a contínua diminuição da diversidade biológica têm gerado preocupações em nível global quanto à produtividade das culturas, a sustentabilidade da cadeia produtiva e a manutenção da segurança alimentar. Investigações acerca da reprodução vegetal e dos processos inerentes à geração e desenvolvimento de sementes desempenham um papel crucial na obtenção ágil e sustentável de grãos destinados ao consumo humano e pecuário. Tais estudos fornecem a base para programas de melhoramento vegetal visando à produção de culturas de maior rendimento e qualidade (Pereira; Coimbra, 2019).

Nos últimos anos, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) tem se dedicado a dar visibilidade ao grupo de culturas de grande potencial para fortalecer a nutrição global, a produção sustentável e a segurança alimentar, além de promover perspectivas inovadoras na geração de empregos dignos e no impulso às economias, em consonância com os esforços em prol da ação climática (Nações Unidas, 2023). Tecnologias que visam o melhor uso e eficiência do solo, conservação do ambiente e sustentabilidade socioeconômica vêm sendo implantadas como novas formas de produção agrícola em todo o mundo (Silva *et al.*, 2021), momento em que autoridades internacionais têm movido esforços para proporcionar aos agricultores alternativas que melhorem os seus rendimentos, ao mesmo tempo em que combatem a degradação do ambiente (Stravopoulos, 2023). Tais iniciativas são estratégias governamentais e das nações unidas aplicadas para alcançar os propósitos dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que visam alcançar a prosperidade coletiva para as pessoas e para o planeta.

A espécie *Linum usitatissimum* (Linnaeus, 1753), conhecida como linho, é uma planta herbácea que produz sementes de alto valor nutracêutico e desponta como uma das culturas alternativas emergentes, sendo reconhecida por seu potencial como fonte nutricional para suprir as necessidades alimentares diante da demanda global (Isleib, 2012; Anjun *et al.*, 2017; Jhala; Hall, 2010). O linho é reconhecido como uma cultura resiliente, versátil, que pode ser aclimatada e cultivada para fortalecer os sistemas agrícolas e a segurança alimentar (Stravopoulos *et al.*, 2023). Nos últimos anos, métodos tradicionais de melhoramento vêm sendo empregados para introduzir alterações genéticas que melhoram o desempenho agrônômico da cultura (Xie *et al.*,

2018), principalmente no que diz respeito aos aspectos de produtividade da semente, a linhaça.

Neste contexto, o linho já tem sido empregado como alternativa para cultivos de inverno, tanto para produção de sementes, quanto para conservação do solo e água, feitas por meio da cobertura vegetal e rotação de culturas, consideradas práticas protetivas do ambiente. Seus benefícios ambientais incluem a tolerância à seca, uma demanda reduzida de produtos químicos durante seu ciclo de cultivo e um potencial relativamente baixo de impacto ambiental. Assim, o linho se configura como uma cultura de relevância para mitigar o impacto ambiental dos sistemas de produção (Gallardo *et al.*, 2014; Cajamarca *et al.*, 2018; Marsaro-Júnior *et al.*, 2019; Stravopoulos *et al.*, 2023).

Devido ao seu excelente perfil nutricional e dos potenciais benefícios à saúde que oferece, a semente do linho está gradualmente se destacando no mercado como um alimento funcional de relevância (Kajla; Sharma; Sood, 2014; Wu *et al.*, 2020). Da mesma forma, cresce o interesse mundial na produção da linhaça. Neste contexto, a qualidade dos frutos e das sementes da espécie cultivada tornam-se importantes comercialmente, bem como, o conhecimento dos fatores que o afetam atraem o interesse científico. Assim, compreender a ecologia reprodutiva de plantas cultivadas é fundamental no aumento da produtividade de diversas culturas, uma vez que a eficácia da fecundação e fertilização está diretamente relacionada à produção de boas sementes (Rosati; Caporali; Paoletti, 2012; Jain, 2014).

O registro de novas cultivares, melhoradas geneticamente, busca entregar aos produtores rurais genótipos mais robustos, mais tolerantes às condições ambientais adversas e com menos demanda de produtos sintéticos, promovendo a sustentabilidade da cadeia produtiva (Pinto-Maglio; Pierozzi, 2015). Para isso, informações relacionadas à base genética de espécies aparentadas são muito importantes, o que pode ser auxiliado pelo uso de parâmetros citogenéticos e de biologia floral (Carvalho *et al.*, 2009). Desta forma, a pesquisa focada no melhoramento genético de cultivares adaptadas e validadas para as condições de solo e clima dos locais produtivos pode impulsionar o incremento do cultivo da linhaça no Brasil (Bosco *et al.*, 2021).

Para a compreensão da biologia floral e reprodutiva de uma cultura, leva-se em consideração diversos aspectos, tais como a morfologia da flor, a fenologia reprodutiva, o sistema reprodutivo, a polinização, os visitantes florais e a fertilização

das flores (Pereira; Coimbra, 2019; Barbosa; Sousa, 2016). Estudos acerca da biologia floral associada aos mecanismos reprodutivos das espécies vegetais auxiliam na compreensão dos aspectos relativos à fertilidade, diretamente relacionada com a formação de sementes. A capacidade do sistema reprodutivo em produzir gametas de alta fertilidade é fator decisivo na fertilização e, conseqüentemente, no desenvolvimento de sementes com qualidade e quantidade garantidas. Neste sentido, o conhecimento do sistema reprodutivo das culturas que visam a produtividade de grãos é imprescindível nas abordagens do melhoramento de plantas e da produção sustentável.

Segundo Nolasco (2011), o conhecimento da biologia reprodutiva em grupos vegetais de importância econômica pode proporcionar benefícios aplicáveis a curto, médio e longo prazo, solucionando questionamentos, tanto antes, quanto depois do melhoramento genético propriamente dito. Isto porque a identificação de características relacionadas à produção de gametas, à polinização e à fertilização pode ser utilizada de forma prática e direta no conhecimento da diversidade genética, na compreensão da estabilidade fenotípica dos genótipos e na obtenção de plantas com níveis de fertilidade e expressão fenotípica desejáveis para uma produção menos onerosa e mais sustentável (Carvalho *et al.*, 2009).

Nativa do oriente médio, a linhaça é cultivada em todos os continentes, com exceção da Antártica. No Brasil, a região sul é apontada como propícia para o seu cultivo, mas a falta de conhecimentos básicos acerca da biologia e do desenvolvimento da planta nas condições deste território ainda limitam a produção (Brutch *et al.*, 2008; Bassegio *et al.*, 2012; Kim, 2016, Bosco *et al.*, 2020). Assim como a maioria das culturas alternativas, a linhaça possui informações limitadas sobre suas práticas de cultivo adequadas, gerando resistência por parte dos agricultores em adotarem seu plantio. Por isso, se faz necessário impulsionar pesquisas que busquem compreender os aspectos relacionados ao comportamento reprodutivo de *L. usitatissimum*, principalmente no que diz respeito à estabilidade genética dos genótipos e à melhoria da eficiência produtiva da cultura, a fim de fomentar o cultivo da linhaça em regiões que oportunizam seu desenvolvimento, como é o caso do Sul do Brasil (Pozzobon *et al.*, 2018; He *et al.*, 2019).

Esses conhecimentos podem desempenhar um papel crucial não apenas na preservação dos agroecossistemas e na estabilidade de genótipos, mas também na promoção da sustentabilidade e na obtenção de produções satisfatórias de linhaça

no país (Pozzobon *et al.*, 2015; Patial *et al.*, 2019; Bosco *et al.*, 2021), além de servir como incentivo econômico para as famílias agrícolas (Bosco *et al.*, 2021). Sendo assim, estudar o desenvolvimento fenológico e os aspectos reprodutivos e citológicos do linho são relevantes para a expansão do seu cultivo no cenário atual, subsidiando o melhoramento genético de cultivares adaptadas às condições ambientais do Sul do Brasil e, conseqüentemente, promovendo uma agricultura menos impactante e mais sustentável ao contribuir com a qualidade ambiental dos agroecossistemas enquanto fomenta a economia agrícola regional.

Fomentar o desenvolvimento da linhaça enquanto cultura agrícola promove uma agricultura sustentável, ao se tratar de uma planta que produz sementes que se constituem alimento de alto valor nutracêutico para o abastecimento e segurança alimentar e de produção com base em práticas protetivas ao ambiente. Neste contexto, a promoção do cultivo da linhaça, por meio da pesquisa científica, atende os princípios da Agenda 2030 e das Metas Nacionais dos ODS da ONU (Organização das Nações Unidas), reforçando o compromisso científico e agrícola em promover um futuro mais justo, próspero e sustentável para todos.

Desta forma, esta pesquisa teve como objetivo conhecer a biologia floral e a estabilidade reprodutiva de *Linum usitatissimum* L., contribuindo com o fomento de cultivos sustentáveis para a região produtiva do sul do Brasil. Os resultados obtidos estão apresentados nesta dissertação em cinco capítulos que atendem aos seguintes objetivos de pesquisa:

- a) Capítulo 1: Identificar os caracteres fenotípicos florais e a biologia reprodutiva de *L. usitatissimum*.
- b) Capítulo 2: Investigar o sistema reprodutivo de *L. usitatissimum* por meio da frutificação e produção reprodutiva de sementes sob diferentes polinizações controladas.
- c) Capítulo 3: Registrar a composição, abundância e riqueza de visitantes florais em *L. usitatissimum* cultivado no Rio Grande do Sul.
- d) Capítulo 4: Avaliar os componentes citogenéticos de número cromossômico, comportamento e índice meiótico, e viabilidade polínica de genótipos de *L. usitatissimum* no Rio Grande do Sul, Brasil.
- e) Capítulo 5: Propor uma escala fenológica para *L. usitatissimum* cv. CISJU21 com base nos eventos fenológicos, na exigência térmica e no tempo em dias após a semeadura.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

*Linum usitatissimum* (Linnaeus, 1753) é uma espécie de planta herbácea anual, pertencente à família Linaceae e cultivada comercialmente ao redor do globo para fins de produção de fibra e óleo. A espécie é conhecida popularmente como linho, quando seu cultivo objetiva a obtenção da fibra, ou linhaça, quando se destina à produção de sementes (Diederichsen; Richards, 2003). A planta é considerada atualmente uma cultura emergente e economicamente importante devido a seus múltiplos usos (Wang *et al.*, 2017; Canada, 2019; Guo *et al.*, 2020; Bosco *et al.*, 2021). O nome científico *Linum usitatissimum* L. foi atribuído por Carl Linnaeus em 1753 em sua obra "Espécies Plantarum", onde o epíteto específico, "usitatissimum", significa "mais útil", destacando as inúmeras aplicações da planta (Jhala; Hall, 2010; Johnson; Kerr, 2019; Lúcio *et al.*, 2021).

Desde a sementeira até a maturidade, pode apresentar um ciclo de 90 a 150 dias, com plantas esguias e alongadas (Figura 1a e 1b), de folhas verdes, inflorescências variando da cor branca ao azul e ao lilás, e frutos em formato de cápsulas marrons (Jacobsz; Van-Der-Merwe, 2012; Canada, 2019). As flores terminais possuem todos os elementos florais de cálice, corola, androceu e gineceu. Estames e carpelos ocorrem em número de cinco e cada carpelo possui um septo falso, onde aloca dois óvulos, somando 10 células no gineceu sincárpico (Gautam; Maurya; Chauhan, 2020; Diederichsen; Richards, 2003; Dressler; Reppinger; Bayer *et al.*, 2014). O linho é uma espécie amplamente reconhecida como autógama, embora polinização cruzada seja admitida em taxas não suficientemente estabelecidas. Uma grande variação morfológica é relatada para o grupo ao redor do globo (Ushijima *et al.*, 2012), mas não há uma descrição botânica clara dos acessos cultivados no Brasil.

*Linum usitatissimum* apresenta dois genótipos de interesse no mercado, a linhaça marrom (Figura 1c) e a dourada (Figura 1d), cuja cor da semente é determinada pela quantidade de pigmentos em seu revestimento externo, influenciada por fatores ambientais e genéticos (Barroso *et al.*, 2014). A linhaça dourada é cultivada em regiões predominantemente frias, como o Canadá e o norte dos Estados Unidos, enquanto a marrom predomina em regiões de clima subtropical, como o Brasil (Cupersmid *et al.*, 2012), o qual possui hoje 13 cultivares registradas no país (MAPA, 2022). Em condições de boa oferta hídrica, a linhaça dourada

apresenta médias mais altas de rendimento de sementes, enquanto que a linhaça marrom tem maior tolerância à seca, com maior produtividade do que a dourada no cenário de estresse hídrico (Zare *et al.*, 2021).

**Figura 1:** Lavoura de cultivo de *Linum usitatissimum* L. durante o florescimento, em Augusto Pestana – RS (A), porção terminal da planta de linho, evidenciando flor, cápsulas e folhas (B) e sementes de linhaça marrom (C) e dourada (D).



Fonte: Inaê Carolina Sfalcin (2023)

A diversidade geográfica de *Linum* pode explicar a ampla variação morfológica, ecológica e reprodutiva das suas espécies (Johnson; Kerr, 2022). O linho é a única espécie cultivada pertencente à família Linaceae, família com mais de 250 táxons distribuídos em cerca de 13 gêneros (Dressler; Replinger; Bayer, 2014; CABI, 2018). Esse grupo tem uma distribuição global, sendo encontrado em regiões temperadas e tropicais, embora mostre preferência por climas frios. No Brasil, a família Linaceae está representada por quatro gêneros e 19 espécies, com sete delas sendo endêmicas (Silva, 2021). O principal gênero de Linaceae é o *Linum*, que engloba 187 espécies, compreendendo quase dois terços do total das espécies da família, cuja planta *L. usitatissimum* detém relevância econômica e importância social (Dressler; Replinger; Bayer, 2014).

A taxonomia de *L. usitatissimum*, por sua vez, é definida em: Reino Plantae; Sub-reino Tracheobionta; Superdivisão Spermatophyta; Divisão Magnoliophyta; Classe Magnoliopsida, Subclasse Rosidae; Ordem Linales; Família Linaceae; Subfamília Linoidea; Gênero *Linum* L. e Espécie *Linum usitatissimum* L. (Mcdill *et al.*, 2009; Schoch *et al.*, 2020). Seu genoma possui uma extensão estimada de aproximadamente 370 Mpb e contém cerca de 43.471 genes (Wang *et al.*, 2012). As investigações iniciais acerca da estrutura do DNA (Ácido Desoxirribonucleico, em português) do linho datam de quase três décadas atrás, com o primeiro sequenciamento de cDNA (DNA complementar) sendo registrado no GenBank® em 1993. Os cariótipos das diversas variedades analisadas exibem 30 cromossomos metacêntricos de pequeno porte (1–3 µm). No contexto do seu material genético, destaca-se que o plastoma do linho assume a forma de uma molécula circular de DNA com 156.721 bp (Muravenko *et al.*, 2003, Vromans, 2006; Yurkevich *et al.*, 2017).

Globalmente, os bancos de genes preservam aproximadamente 48.000 amostras de germoplasma provenientes de *L. usitatissimum* e, no Canadá, é mantida uma coleção mundial de aproximadamente 3.500 acessos de linho pela *Plant Gene Resources of Canada* (Huis; Hawkins; Neutelings, 2010; Wang *et al.*, 2017). Pesquisas moleculares indicam que *L. usitatissimum* L., *L. bienne* (Mill.) Stankev e *Linum angustifolium* Huds possivelmente descendem de um ancestral comum, sendo *L. angustifolium* a espécie mais antiga, de onde as outras duas derivaram (Kutuzova; Porokhovinova; Pendinen, 2015). O Mediterrâneo e o Sudoeste da Ásia são considerados possíveis centros de origem para a espécie. Acredita-se que seu cultivo e domesticação se iniciaram há mais de 8.000 anos nas regiões a leste do Mar Mediterrâneo e no Crescente Fértil, expandindo-se em direção à Índia, Ásia, Europa e, finalmente, às Américas (Vaisey-Genser; Morris, 2003; Diederichsen, 2007; Canada, 2019).

O potencial econômico do linho deve ser considerado. De acordo com dados da FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, em português), no ano de 2019, o maior produtor de grãos de linhaça foi o Cazaquistão, com produção de aproximadamente 1 milhão de toneladas, seguido pela Rússia e Canadá (FAOSTAT, 2020). Já na América do Sul, a Argentina foi o país de maior produção da semente com aproximadamente 9,9 mil toneladas, seguida pelo Brasil, com aproximadamente 3,7 mil toneladas produzidas em 2019. No ano de 2020, a produção global de linhaça atingiu aproximadamente 3,36 milhões de toneladas,

provenientes de uma extensão de cultivo que abrangeu mais de 3,54 milhões de hectares (FAOSTAT, 2020; Lúcio *et al.*, 2021). Ainda, o relatório global do mercado de sementes de linho enfatizou que o segmento da linhaça vem crescendo rapidamente, girando em torno de 14,81 bilhões de dólares em 2021, e com um alcance estimado de cerca de 25,02 bilhões de dólares até o ano de 2028, sendo impulsionado pela procura do alimento *in natura* para consumo humano, como aditivo em rações animais e como matéria-prima industrial (Global Flax Seeds Market, 2023).

Os produtos de linhaça podem ser utilizados em diferentes ramos da indústria, sendo quase todas as partes da planta do linho processadas e aproveitadas comercialmente. O floema das plantas de linho possui paredes celulares ricas em celulose, fornecendo a fibra de alta resistência e durabilidade que servem à indústria de tecidos e de biocombustíveis, bem como, constituem uma alternativa ecológica para fibras sintéticas, como as de vidro. Embora promissor, o mercado do linho têxtil não tem expansão no Brasil, onde a produção de *L. usitatissimum* se destina à exploração comercial da semente (CABI, 2018; IBGE, 2022), cuja composição lipídica é reconhecida como fonte promissora de ácidos graxos essenciais para a nutrição humana e animal, sendo consumida, mais frequentemente, triturada ao constituir farinhas. O óleo obtido a partir da moagem e compressão a frio das sementes é encapsulado e consumido em cápsulas digeríveis. Seus compostos também são utilizados como aditivo nutricional em rações animais. Quando purificado, o óleo é processado de maneira a remover o valor alimentar e antioxidantes, e se torna matéria-prima para diversos produtos, como tintas, óleos secantes, vernizes, corantes, ceras, dentre outros (Singh *et al.*, 2011; Zuk *et al.*, 2015).

As sementes são compostas por 36% a 40% de óleo, contendo fibras dietéticas, proteínas e compostos fenólicos, os quais vêm sendo utilizados também em medicamentos, uma vez que possuem forte ação antioxidante e ajudam na prevenção e controle de diversas doenças, incluindo diabetes, hipertensão e câncer. O óleo extraído do grão é rico em ácido alfa-linolênico (ALA), um ácido graxo ômega-3, em ácido linoleico (LA), uma variante ômega-6 essencial e lignanas biologicamente ativas, importantes não só no ramo alimentício, mas também nas indústrias química e farmacêutica (CABI, 2018; Johnson; Kerr, 2019; Bosco *et al.*, 2021).

O ácido alfa-linolênico representa o principal elemento funcional identificado na composição da linhaça. Esse componente desempenha um papel singular ao suprir a demanda por ácidos graxos ômega-3 em regimes alimentares de base

vegetariana. Esses ácidos graxos, classificados como "essenciais", são fundamentais uma vez que o organismo os requer, porém, não possui a capacidade intrínseca de sintetizá-los, tornando necessária sua inclusão na dieta. A linhaça exibe uma complexa combinação de ácidos graxos, sendo que os percentuais de ALA e LA correspondem a 57% e 16,0%, respectivamente, do total de ácidos graxos presentes (Diederichsen; Richards, 2003). Estes compostos importantes agregam valor aos produtos feitos a partir da linhaça, o que promove a viabilidade econômica do seu cultivo em várias partes do mundo (Zuk *et al.*, 2015).

No Brasil, a linhaça foi introduzida durante o período colonial (século XVI), principalmente no estado de São Paulo e, atualmente, seu cultivo se concentra nos estados da região Sul, sendo o Rio Grande do Sul o maior produtor (IBGE, 2022). No país, seu cultivo ocorre durante os períodos de outono e inverno e, no interesse de diversificar as atividades agrícolas e otimizar a utilização de áreas pouco exploradas durante a estação invernal, o plantio de linhaça vem surgindo como uma alternativa de interesse no setor agrícola. Por outro lado, a expansão de seu cultivo tem sofrido oscilações e ainda não se estabeleceu no Brasil como uma cultura competitiva no meio agrícola. Em 2010, por exemplo, a área plantada no Brasil chegou a 16.584 ha, enquanto que, em 2020, dez anos mais tarde, apenas 4.185 ha foram destinados ao cultivo da linhaça. Este cenário demonstra o quanto a cultura do linho carece de incentivo e apoio tecnológico no país para assegurar sua produção (Floss, 1983; Lúcio *et al.*, 2021; IBGE, 2022).

Atualmente, os teores de óleo e o baixo rendimento da cultura são os principais alvos dos programas de melhoramento vegetal (Johnson; Kerr, 2019). Os principais objetivos para o aumento da produção da cultura em todas as zonas produtivas incluem aumentar o rendimento das sementes, o incremento do teor de óleo nas sementes, a otimização da qualidade do óleo, o amadurecimento precoce e o estabelecimento de uma altura adequada para as plantas. No cultivo de linho, é possível aprimorar o rendimento de sementes através da otimização de seus elementos constituintes, englobando o aumento do número de sementes por cápsula, do número de cápsulas por planta e o incremento do peso de mil sementes (Stavoproulos *et al.*, 2023).

Para a produção das linhagens com características desejadas, o processo de cruzamento direcionado de indivíduos com fenótipos de interesse inicia controlando a fecundação dos óvulos das plantas por polinização manual, onde é depositado o

pólen selecionado diretamente no estigma na flor feminina do genótipo alvo, evitando que grãos de pólen de fenótipos indesejáveis entrem em contato com o estigma (Amabile; Vilela; Peixoto, 2018). Assim, todo o procedimento é dependente do conhecimento da biologia reprodutiva da espécie, que, dentre uma gama de abordagens, inclui informações sobre o grão de pólen e o conjunto estigma-ovário-óvulo. Durante o processo meiótico, podem ocorrer alterações em diferentes estágios da meiose, implicando em anomalias e irregularidades nos grãos de pólen que resultam em diferentes graus de fertilidade ou esterilidade da planta. Entre outros fatores, o cruzamento bem-sucedido de genótipos depende de bons gametas haploides e balanceados, bem como, de divisões mitóticas corretas do micrósporo (Angelo, 2017; Impe *et al.*, 2020).

Associada a aspectos citológicos, a fertilidade dos grãos de pólen pode variar dentro de populações de plantas e ser um reflexo da ocorrência de irregularidades meióticas, o que reforça a relevância da avaliação desses aspectos em espécies cultivadas (Bespalhok; Guerra; Oliveira, 2007; Kumar; Rana; Singhal, 2016). A interação pólen-pistilo é pré-requisito para a polinização bem-sucedida, devendo ser investigada a fim de se identificar o período ideal para aplicação de procedimentos de polinização artificial. Conhecer o período de receptividade do estigma é fator decisivo para garantir a fertilização em cruzamentos manuais e aumentar a probabilidade de produção de sementes. Variadas técnicas têm sido utilizadas para estimar a receptividade do estigma, sendo a maioria delas baseada na verificação da presença da enzima peroxidase na superfície estigmática. A enzima peroxidase é indicadora da receptividade do estigma, uma vez que atua sobre os componentes da parede celular do estigma, permitindo a entrada dos tubos polínicos para fertilizar o óvulo (Zeisler, 1938; Dafni, 1992; Flores *et al.*, 2015; Zulkarnain; Eliyanti; Swari, 2019; Silva *et al.*, 2021).

Quanto à morfologia floral, a estrutura e os mecanismos de floração da linhaça possibilitam sua autopolinização, embora diversos estudos relatam a ocorrência de visitantes florais, sendo observada polinização cruzada principalmente entomofílica (Tadesse *et al.*, 2009; Zelentsov *et al.*, 2018; Navatha *et al.*, 2012). Ainda assim, não há informações que descrevam o sistema reprodutivo da linhaça em genótipos desenvolvidos e cultivados no território brasileiro, o que dificulta a condução de programas locais de melhoramento vegetal. Alguns pesquisadores relacionaram a polinização aberta ao aumento de rendimentos da cultura (Sabir *et al.*, 1999; Bareke;

Addi, 2019). Com base em observações conduzidas em territórios abrangendo Rússia, Egito e Índia, diversos registros apontam para a presença de uma variedade de espécies que realizam forrageamento em lavouras de cultivo de linhaça, como abelhas, vespas, moscas, borboletas, percevejos e coleópteros (Sabir *et al.*, 1999; Navatha *et al.*, 2012). Desta forma, o papel dos polinizadores não pode ser descartado, pois a dispersão de pólen por insetos pode configurar um mecanismo adicional de polinização para a linhaça (Zelentsov *et al.*, 2018), embora ainda não tenha sido investigado no Brasil.

A linhaça, uma cultura de notável relevância histórica para a humanidade, apresenta um potencial de significância econômica e nutracêutica, além de exibir uma marcante diversidade morfológica e ecológica. Esses elementos convergem para posicionar a linhaça como um alvo de interesse científico, especialmente no contexto de investigações relacionadas a aspectos genéticos e evolutivos. Nessa perspectiva, a elucidação dos aspectos ligados à biologia reprodutiva de *L. usitatissimum* tem revelado benefícios no âmbito do melhoramento genético de plantas, em abordagens que almejam a produção de uma cultura sustentável que visa atender às demandas agrícolas, ambientais, econômicas e culturais inerentes à sociedade contemporânea do século XXI (Sfalcin *et al.*, 2023).

Neste contexto, a agricultura sustentável se constitui como um objetivo de alcançar um sistema produtivo de alimentos e fibras que não apenas eleve a produtividade dos recursos naturais e dos sistemas agrícolas, mas também capacite os produtores a enfrentar os níveis de demanda originados pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento econômico. Tal sistema busca ser responsável por gerar alimentos saudáveis e ricos em nutrientes, contribuindo para o bem-estar humano, além de garantir aporte econômico aos agricultores, dando-lhes a capacidade de investir no aprimoramento da produtividade do solo, da água e de outros recursos genéticos animais e vegetais, sem degradar o ambiente, sendo ambientalmente apropriado, economicamente viável e socialmente justo (NCR, 1989).

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável propõe diversas iniciativas para promover ações nas três dimensões do desenvolvimento sustentável – econômica, social e ambiental – até alcançar os ODS propostos. Por meio da promoção da agricultura sustentável, a cultura da linhaça impulsiona a criação de um sistema agrícola que proporciona vantagens ao agroecossistema e desempenha um

papel fundamental na produção alimentar (You *et al.*, 2017). Essa planta, reconhecida por gerar alimentos com alto valor nutracêutico e versatilidade de usos, contribui de maneira significativa para a consecução dos ODS Fome Zero e Agricultura Sustentável.

Além disso, a linhaça oferece produtos de alto valor agregado, como alimentos com propriedades nutricionais benéficas e ingredientes para diversos setores, incluindo alimentos e saúde. Isso contribui para o crescimento da indústria e da economia em geral, ao mesmo tempo em que atende à demanda por produtos saudáveis e sustentáveis. Em última análise, o cultivo da linhaça se posiciona como um exemplo concreto de como a agricultura pode ser uma força motriz para o crescimento econômico sustentável, proporcionando fonte de renda às comunidades rurais, estimulando a inovação e contribuindo com as demandas sociais (He *et al.*, 2019), elementos essenciais para o atendimento dos ODS Trabalho Decente e Crescimento Econômico.

O melhoramento da cultura, por sua vez, visa alcançar padrões de produção de baixo impacto ambiental e de alta rentabilidade, impactando tanto a esfera ambiental, quanto a socioeconômica. O linho é uma planta rústica que possui um custo de produção baixo e seu cultivo geralmente requer menos insumos químicos em comparação com outras culturas, promovendo a redução do impacto ambiental (Parizoto *et al.*, 2013). Além disso, sua contribuição para a manutenção do solo produtivo possibilita a diversificação agrícola e fortalece a resiliência do sistema de produção. Ao estimular cadeias de produção ecologicamente adequadas na produção de insumos de importância social, o cultivo da linhaça reforça os princípios do ODS número 12, do Consumo e Produção Responsáveis.

Ainda, o cultivo da linhaça auxilia os sistemas agrícolas de produção a cumprirem com os princípios do ODS 15, da Vida Terrestre. Isso porque o crescimento do linho requer menos intensidade no uso de agroquímicos e recursos hídricos, em comparação com outras culturas, minimizando potenciais efeitos negativos sobre a biodiversidade e a qualidade do solo. Adicionalmente, a linhaça exibe uma rica relação com a promoção de solos saudáveis e férteis. Por meio de suas propriedades como cultura de cobertura e sua capacidade de melhorar a estrutura do solo, a linhaça potencializa a resiliência dos ecossistemas terrestres (You *et al.*, 2017). A conservação da biodiversidade, inclusive de insetos polinizadores, é igualmente favorecida pelo cultivo de linhaça, o que está em consonância com os



esforços de proteção e revitalização das espécies nativas (Viana, Da-Silva; 2014). Esse cultivo de baixo impacto encontra ressonância com os esforços de conservação da biodiversidade terrestre, contribuindo para a preservação de habitats e a manutenção da saúde dos ecossistemas.

No relatório “Agenda 2030 - ODS - Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável” são apresentadas metas de implementação para cada um destes objetivos mencionados, e a presente pesquisa encontra-se intimamente alinhada às seguintes: (2.3) Aumentar a produtividade agrícola e a renda dos pequenos produtores de alimentos [...]; (2.4) garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos, por meio de políticas de pesquisa, de assistência técnica e extensão rural, entre outras, visando implementar práticas agrícolas resilientes que aumentem a produção e a produtividade e, ao mesmo tempo, ajudem a proteger, recuperar e conservar os serviços ecossistêmicos, fortalecendo a capacidade de adaptação às mudanças do clima, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, melhorando progressivamente a qualidade da terra, do solo, da água e do ar; (2A) aumentar o investimento [...] em pesquisa [...], no desenvolvimento de tecnologias e no estoque e disponibilização de recursos genéticos de plantas, [...] de maneira a aumentar a capacidade de produção agrícola ambientalmente sustentável [...] (8.4) [...] empenhar-se para dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental, de acordo com o Plano de Ação para Produção e Consumo Sustentáveis (PPCS); (12.2) alcançar gestão sustentável e uso eficiente dos recursos naturais; (12.4) alcançar o manejo ambientalmente adequado dos produtos químicos e de todos os resíduos, [...], e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente; (15.3) combater a desertificação, e restaurar a terra e o solo degradado [...]; (15.5.1) reduzir a degradação de habitats naturais, deter a perda de biodiversidade; (15.5.2) proteger e evitar a extinção de espécies ameaçadas; (15.5.3) manter a diversidade genética [...] de plantas cultivadas [...] e elaborar e implementar estratégias para minimizar a perda de variabilidade genética (Nações Unidas Brasil, 2023).

Por fim, com a revisão da literatura, entende-se que dedicar esforços ao melhoramento e expansão da linhaça vem ao encontro dos princípios da Agenda 2030 e das Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Essas pesquisas visam à criação de variedades de linhaça mais resilientes, produtivas e

adaptadas às realidades ambientais e sociais. Ao desenvolver cultivares com maior resistência a pragas, maior eficiência no uso de recursos hídricos e maior rendimento nutricional, as pesquisas de melhoramento da linhaça contribuem diretamente para a segurança alimentar, a sustentabilidade ambiental e a promoção da saúde humana, beneficiando comunidades rurais e o desenvolvimento sustentável.

Os capítulos da dissertação foram ocultos neste documento. Seu conteúdo pode ser consultado nos periódicos eletrônicos em que os artigos científicos foram publicados.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação, foi apresentada uma descrição botânica reprodutiva de *Linum usitatissimum*, bem como, disponibilizada uma prancha botânica da mesma, elementos que poderão nortear os estudos futuros de abordagem reprodutiva em linho. A partir do estudo da biologia floral e reprodutiva, polimorfismos florais foram descritos nos diferentes genótipos, abrangendo variações morfológicas e manifestação de cores nos filamentos florais. Essa variabilidade genética é mais pronunciada nos genótipos de linhaça marrom, enquanto o genótipo de linhaça dourada exibe maior estabilidade fenotípica em relação a esses atributos. A cultivar CISJU21 apresentou flores maiores e maior produção de pólen por flor, características superiores associadas à polinização aberta, embora tenha ocorrido flores brancas, reconhecidas por serem preferencialmente autopolinizadas em outras pesquisas. Tais informações podem subsidiar a seleção de características desejáveis em programas de melhoramento vegetal.

A ocorrência de hercogamia e de diferentes morfos florais em parcela das flores foi relatada nos genótipos, onde polinizadores cumprem papel importante como facilitadores de pólen nos morfos brevistilos e longistilos. Ao investigar a frutificação e produção reprodutiva de sementes sob diferentes polinizações controladas, foi observado que o auxílio na transferência do pólen potencializa a produção de sementes e a celeridade da frutificação, principalmente nos genótipos de linhaça marrom. Os genótipos demonstraram ser auto-compatíveis, mas a auto-incompatibilidade e a produção reprodutiva intra-morfos não foi abordada. A ocorrência de hercogamia em genótipos auto-compatíveis sugere um cenário de pressão seletiva no sistema reprodutivo de *L. usitatissimum*, sendo oportuno aprofundar as investigações no estabelecimento das síndromes de polinização e seus aspectos reprodutivos relacionados, como heterostilia estabelecida e sua relação com a produção de sementes nos diferentes morfos florais.

Os componentes citogenéticos investigados revelaram um comportamento meiótico regular, de mesmo número cromossômico, alta viabilidade de pólen e estabilidade reprodutiva, concordando que a instabilidade na produção de sementes não pode ser explicada pela citogenética, estando, desta forma, relacionada a fatores externos não suficientemente esclarecidos, mas que podem estar associados ao

estabelecimento em curso da heterostilia na espécie, um mecanismo que reduz a capacidade de autofecundação.

Os atrativos e recursos florais presentes na flor do linho a tornam entomófila, e o levantamento de visitantes florais evidenciou a ocorrência de melitofilia, sendo a abelha social *Apis mellifera* o principal polinizador. Seu forrageio no linho ocorre durante todo o período de antese, com pico às 10h da manhã. A diversidade de polinizadores é maior no início da manhã, e a riqueza se mantém alta até às 11h. Ao mesmo tempo que os polinizadores contribuem com o aumento na produção de linhaça, sua escassez no ambiente pode atuar como fator limitante da reprodução, dada a dependência de vetores de pólen existentes nos morfos florais hercogâmicos. Recomenda-se adotar práticas de manejo amigáveis aos polinizadores em áreas de cultivo adjacentes, principalmente durante o período de floração do linho, para assegurar sua polinização. Diversas espécies de insetos-praga associadas ao linho foram descritas, bem como, de inimigos naturais, importantes no controle biológico natural de pragas. O besouro *Astylus quadrilineatus* foi definido como pilhador herbívoro devido aos danos mecânicos causados nos filamentos reprodutivos, sendo o primeiro registro desta espécie como praga agrícola em *L. usitatissimum* no Brasil.

Por fim, foi proposta uma escala fenológica para *L. usitatissimum* cv. CISJU21, demonstrando um ciclo de 147 dias da emergência até a maturidade fisiológica, onde foram definidos estádios fenológicos considerando o tempo em dias após a semeadura, a exigência térmica e a descrição dos eventos fenológicos observados no decorrer do ciclo. Espera-se que a proposta de escala fenológica para linhaça auxilie pesquisadores e produtores na condução de cultivos mais assertivos e ecologicamente conscientes, contribuindo para a sustentabilidade da agricultura na região Sul do Brasil. Os estudos relativos à biologia floral e reprodutiva, aos aspectos citológicos e os visitantes florais do linho foram baseados em genótipos aclimatados no Rio Grande do Sul e são pioneiros no país, com resultados inéditos que fornecem uma gama de recursos científicos úteis para aprimorar o melhoramento e o cultivo da linhaça no sul do Brasil, oportunizando uma agricultura menos impactante e mais sustentável ao fomentar o crescimento agrícola enquanto promove a qualidade ambiental dos agroecossistemas.

O cultivo da linhaça não apenas diversifica o cenário agrícola, mas também contribui para a salvaguarda dos ecossistemas. Além de suas vantagens conhecidas na cobertura e proteção do solo, baixo custo empregado, menor demanda de

produtos químicos e alternativa econômica para comunidades rurais, o cultivo de *L. usitatissimum* promove a manutenção e conservação das comunidades de polinizadores, fator crucial na promoção de diversidade biológica nos agroecossistemas. Espera-se que os contributos desta pesquisa de dissertação possam colaborar com futuras estratégias agroambientais na expansão da cadeia produtiva da linhaça e no desenvolvimento sustentável da região sul do Brasil.

## 9. REFERÊNCIAS

AMABILE, R. F.; VILELA, M. S.; PEIXOTO, J. R. **Melhoramento de plantas: variabilidade genética, ferramentas e mercado**. SBMP, 2018. 100p.

ANGELO, P. C. S. **Aspectos Citológicos da Microgametogênese no Cafeeiro**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 23 p.

ANJUN, S. *et al.* Effects of photoperiod regimes and ultraviolet-C radiations on biosynthesis of industrially important lignans and neolignans in cell cultures of *Linum usitatissimum* L. (Flax). **Journal of Photochemistry and Photobiology: Biology**, v. 167, p. 216–227, 2017.

BARBOSA, M. V.; SOUSA, E. M. L. de. Biologia floral, ecologia da polinização e eficiência na produção de sementes de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. em sistemas agrícolas. **Gaia Scientia**, v. 10, n. 4, 2016.

BAREKE, T.; ADDI, A. Effect of honeybee pollination on seed and fruit yield of agricultural crops in Ethiopia. **MOJ Ecology & Environmental Sciences**, v. 4, n. 5, 2019.

BARROSO, A. K. M. *et al.* Linhaça marrom e dourada: propriedades químicas e funcionais das sementes e dos óleos prensados a frio. **Ciência Rural**, v. 44, n. 1, p. 181-187, 2014.

BASSEGIO, D. *et al.* Irrigation management in the culture of linseed. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.1, n.3, p. 98-107, 2012.

BESPALHOK, J. C.; GUERRA, E. P.; OLIVEIRA, R. Noções de Genética Quantitativa. In: BESPALHOK, J. C.; GUERRA, E. P.; OLIVEIRA, R. **Melhoramento de Plantas**. P. 36-38, 2007.

BOSCO, L. C. *et al.* Relação das condições meteorológicas com produtividade e fenologia da linhaça em agroecossistemas do Sul do Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 24838–24868, 2020.

BOSCO, L. C. *et al.* Experiências com o cultivo de linhaça em Santa Catarina: aspectos edafoclimáticos e genéticos. In: VELHO, J. P.; LÚCIO, A. D. **Linhaça: perspectiva de produção e usos na alimentação humana e animal**. Ponta Grossa - PR: Atena, 2021. P. 10-37.

BRUTCH, N. B. *et al.* Influence of low temperatures and short photoperiod on the time of flowering in flax. **Saskatoon Saskatchewan**, Canada, p. 81-91, 2008.

CABI, Center for Agriculture and Biosciences International. **Linum usitatissimum data sheet**. 2018. Disponível em: <https://www.cabi.org/cpc/datasheet/31053>. Acesso em: 10 mai. 2022.

CAJAMARCA, F. *et al.* Evaluation of various species of winter oleaginous plants for the production of biodiesel in the State of Parana, Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 126, p. 113–118, 2018.

- CANADA, Canadian Food Inspection Agency. **The Biology of *Linum usitatissimum* L. (Flax)**. 2019. Disponível em: <https://inspection.canada.ca/plant-varieties/plants-with-novel-traits/applicants/directive-94-08/biology-documents/linum-usitatissimum-l-flax-/eng/1330979709525/1330979779866>. Acesso em: 10 abr. 2022.
- CARVALHO, R. *et al.* Citogenética como Ferramenta Para o Melhoramento Genético Vegetal: Análise Mitótica e Meiótica em Espécies de *Manihot*. In: **XIII Congresso Brasileiro de Mandioca**. Botucatu: CERAT/UNESP, 2009, p. 645–650.
- CUPERSMID, L. *et al.* Linhaça: composição química e efeitos biológicos. **E-Scientia**, Belo Horizonte, v. 5, n. 2, p. 33-40, 2012.
- DAFNI, A. **Pollination ecology: a practical approach**. New York: Oxford University Press, 1992.
- DIEDERICHSEN, A.; RICHARDS, K. Cultivated flax and the genus *Linum* L. Taxonomy and germplasm conservation. In: MUIR, A. D., WESTCOTT, N. D. (eds). **Flax: the genus Linum**. CRC, New York, p. 74–91, 2003.
- DRESSLER, S.; REPPLINGER, M.; BAYER, C. Linaceae. In: **Flowering Plants**. Eudicots. The Families and Genera of Vascular Plants. Berlin, Heidelberg: V. 11, Springer Berlin Heidelberg, 2014, 237 p.
- FAOSTAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Crops and livestock products**, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 21 abr. 2022.
- FLORES, P. S. Manual para Teste de Viabilidade e Armazenamento de Pólen e Receptividade de Estigma do Amendoim Forrageiro. **Embrapa Acre**: Rio Branco, 2015. 20 p.
- FLOSS, E. L. **Linho: cultivo e utilização**. 3. ed. Passo Fundo: UPF; 1983. 39 p.
- GALLARDO, M. A. *et al.* Effect of Cultivars and Planting Date on Yield, Oil Content, and Fatty Acid Profile of Flax Varieties (*Linum usitatissimum* L.). **International Journal of Agronomy**, v. 2014, p. 1–7, 2014.
- GLOBAL FLAX SEEDS MARKET. **Skyquest**, 2023. 157 p. Disponível em: <https://www.skyquestt.com/report/flax-seeds-market>. Acesso em: 12 mai 2023.
- GUO, D. *et al.* Resequencing 200 Flax Cultivated Accessions Identifies Candidate Genes Related to Seed Size and Weight and Reveals Signatures of Artificial Selection. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, n. 10:1682, 2020.
- HE, L. *et al.* Genome-Wide Association Studies for Pasm Resistance in Flax (*Linum usitatissimum* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 2019.
- HUIS, R.; HAWKINS, S.; NEUTELINGS, G. Selection of reference genes for quantitative gene expression normalization in flax (*Linum usitatissimum* L.). **BMC Plant Biology**, v. 19, 10:71, 2010.



IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola** - Lavoura Temporária, 2021. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/pesquisa/14/10193?tipo=cartograma&indicador=10317> Acesso em: 22 abr. 2022.

IMPE, D. *et al.* Assessment of Pollen Viability for Wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, n. 1588, 2020.

ISLEIB, J. **Exploring Alternative Field Crops**. Michigan State University Extension: East Lansing, MI, USA, 2012.

JACOBSZ, M.; VAN DER MERWE, W. J. Production guidelines for flax (*Linum usitatissimum* L.). **Department of Agriculture, Forestry and fisheries**. Directorate: Plant Production, 2012. 33 p.

JAIN, R. K. Importance of Flowering Performance and Pattern In Linum Seed Yield. **Direct Research Journal of Agriculture and Food Science (DRJAFS)**, v. 2, n. 7, p. 82–97, 2014.

JHALA, A.; HALL, L. Flax (*Linum usitatissimum* L.): Current Uses and Future Applications. **Australian Journal of basic and Applied Sciences**, v. 4, n. 9, p. 4304–4312, 2010.

JOHNSON, B.; KERR, D. **Growing Flax: Production, Management & Diagnostic Guide**. Canada: Flax Council of Canada, 2019. 64 p.

KAJLA, P.; SHARMA, A.; SOOD, D. R. Flaxseed—a potential functional food source. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 4, p. 1857–1871, 2014.

KIM, H. J. Opportunities and challenges of alternative specialty crops: The global picture. **HortScience**, v. 51, p. 1316–1319, 2016.

KUMAR, R.; RANA, P. K.; SINGHAL, V. K. Chromatin Stickiness and Abnormal Spindle Resulting in Meiotic Irregularities and Pollen Sterility in *Meconopsis aculeata* Royle from the Northwest Himalayas. **Cytologia**, v. 81, n. 1, p. 83–87, 2016.

KUTUZOVA, S. N.; POROKHOVINOVA, E. A.; PENDINEN, G. I. Origin and evolution of *Linum usitatissimum* L. **Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding**, v. 176, n. 4, 2015.

LÚCIO, A. *et al.* Histórico, Usos e Importância Econômica da Linhaça. In: VELHO, J. P.; LÚCIO, A. D. **Linhaça: Perspectiva de produção e usos na alimentação humana e animal**. Ponta Grossa - PR: Atena Editora, 2021. P. 1-9.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **SNPC - Cultivar Web**. Disponível em: [https://sistemasweb.agricultura.gov.br/pages/SNPC\\_CW.html](https://sistemasweb.agricultura.gov.br/pages/SNPC_CW.html). Acesso em: 3 jul. 2022.

MARSARO-JÚNIOR, A. L. *et al.* **Manejo de insetos polinizadores adotado por produtores de canola do Rio Grande do Sul e do Paraná**. Circular técnica nº 43, Passo Fundo – RS: Embrapa, 2019. 21 p.

- MCDILL, J. *et al.* The Phylogeny of *Linum* and Linaceae Subfamily Linoideae, with Implications for Their Systematics, Biogeography, and Evolution of Heterostyly. **Systematic Botany**, v. 34, n. 2, p. 386–405, 2009.
- MURAVENKO, O. V.; LEMESH, V. A.; SAMATADZE, T. E.; *et al.* Genome comparisons of three closely related flax species and their hybrids with chromosomal and molecular markers. **Genetika**, v. 39, n. 4, p. 510–518, 2003.
- NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 21 jul. 2023.
- NAVATHA, L. *et al.* Species richness and foraging activity of insect visitors in linseed (*Linum usitatissimum* L.). **Current Biotica**, v. 5, n. 4, p. 465-471, 2012.
- NCR, National Research Council. **Alternative agriculture**. Washington, DC: National Academy Press, 1989.
- NOLASCO, C. A. **Caracterização Citogenética E Morfológica De Híbridos De Mandioca (*Manihot esculenta*)**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Vitória da Conquista: 2011.
- PARIZOTO, C. *et al.* Produção agroecológica de linhaça dourada (*Linum usitatissimum*) sob diferentes doses de cama de aves em diferentes espaçamentos entre linhas. **Cadernos de Agroecologia**, vol. 8, n. 2, 2013.
- PATIAL, R. *et al.* Morphological characterization and genetic diversity of linseed (*Linum usitatissimum* L.). **Journal of Oilseeds Research**, v. 34, p. 234–298, 2019.
- PEREIRA, A. M.; COIMBRA, S. Advances in plant reproduction: from gametes to seeds. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 11, p. 2933–2936, 2019.
- PINTO-MAGLIO, C. A. F.; PIEROZZI, N. I. Caracterização citogenética. In: VEIGA, R. F. A.; QUEIRÓZ, M. A. **Recursos fitogenéticos**. Viçosa: UFV, 2015. p. 204-213.
- POZZOBON, M. T. *et al.* Análise da viabilidade polínica na avaliação e seleção de genótipos de *Capsicum spp.* para o melhoramento genético. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento - Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia**, 341. Brasília: 2018. 18 p.
- ROSATI, A.; CAPORALI, S.; PAOLETTI, A. Floral Biology: Implications for Fruit Characteristics and Yield. In: MUZZALUPO, I. **Olive Germplasm - The Olive Cultivation, Table Olive and Olive Oil Industry in Italy**. London: IntechOpen, 2012.
- SABIR, A. M. *et al.* The Foraging Behaviour and Value of Pollination by Honeybees (*Apis mellifera* L.) in Linseed. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 2, n. 3, p. 645–646, 1999.
- SCHOCH, C. L. *et al.* NCBI Taxonomy: a comprehensive update on curation, resources and tools. Database (Oxford). **Taxonomy browser (*Linum usitatissimum*)**. 2020. Disponível em [www.ncbi.nlm.nih.gov](http://www.ncbi.nlm.nih.gov). Acesso em: 20 mai.

2022.

SFALCIN, I. C. *et al.* Biologia reprodutiva da linhaça (*Linum usitatissimum* L.). In: CARVALHO, I. R. *et al.* (org.). **Avanços tecnológicos da linhaça: sustentabilidade agrícola, qualidade nutracêutica e farmacológica**. Curitiba: Editora CRV, 2023. 312 p.

SILVA, J. P. S. **Revisão taxonômica de Linaceae para o Brasil**. Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Dissertação de mestrado. 2021. Disponível em <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/204337?show=full> Acesso em 10 mai. 2022.

SILVA, M. A. *et al.* Alelopatia de espécies da Caatinga. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, 2021.

SINGH, K. K. *et al.* Flaxseed: a potential source of food, feed and fiber. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 51, n. 3, p. 210-222, 2011.

STRAVOPOULOS, P. *et al.* On the Path towards a “Greener” EU: A Mini Review on Flax (*Linum usitatissimum* L.) as a Case Study. **Plants**, v. 12, n. 5, p. 110, 2023.

TADESSE, T.; SINGH, H.; WEYESSA, B. Correlation and path coefficient analysis among seed yield traits and oil content in Ethiopian linseed germplasm. **International Journal of Sustainable Crop Production**, v. 4, p. 8-16, 2009.

USHIJIMA, K. *et al.* Isolation of the floral morph-related genes in heterostylous flax (*Linum grandiflorum*): the genetic polymorphism and the transcriptional and post-transcriptional regulations of the S locus. **The Plant Journal**, v. 69, p. 317–331, 2012.

VAISEY-GENSER, M; MORRIS, D. Introduction: History of the cultivation and uses of flaxseed. In: MUIR, A. D., WESTCOTT, N.D. (eds). **Flax: the genus Linum**. CRC, New York, 74–91. 2003.

VIANA, B.F.; DA SILVA, F.O. **Biologia e ecologia da polinização: cursos de campo**. Salvador: EDUFBA: Rede Baiana de Polinizadores, 2014. 132 p.

VROMANS, J. **Molecular genetic studies in flax (*Linum usitatissimum* L.)**. Den Haag, Netherlands: CIP-DTA Koninklijke Bibliotheek, 2006. 144 p.

WANG, H. *et al.* The genome of flax (*Linum usitatissimum*) assembled de novo from short shotgun sequence reads. **Plant J.** v. 72, n. 3, p.461-473, 2012.

WANG, H. *et al.* Comparison of phytochemical profiles and health benefits in fiber and oil flaxseeds (*Linum usitatissimum* L.). **Food Chemistry**, v. 214, p. 227–233, 2017.

WU, Y. *et al.* Comparison of lignans and phenolic acids in different varieties of germinated flaxseed (*Linum usitatissimum* L.). **International Journal of Food Science & Technology**, v. 56, n. 1, p. 196–204, 2020.

XIE, D. *et al.* Genome-Wide Association Study Identifying Candidate Genes Influencing Important Agronomic Traits of Flax (*Linum usitatissimum* L.) Using SLAF-seq. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2018.

YOU, F. M. *et al.* Genetic Variability of 27 Traits in a Core Collection of Flax (*Linum usitatissimum* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017.

YURKEVICH, O. *et al.* Integration of Physical, Genetic, and Cytogenetic Mapping Data for Cellulose Synthase (CesA) Genes in Flax (*Linum usitatissimum* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017.

ZARE, S. *et al.* Water stress intensified the relation of seed color with lignan content and seed yield components in flax (*Linum usitatissimum* L.). **Scientific Reports**, v. 11, n. 23958, 2021.

ZEISLER, M. Über die Abgrenzung der eigentlichen Narbenfläche mit Hilfe von Reaktionen. **Beihefte Zum Botanische Zentralblatt**, v. 58, p. 108-318, 1938.

ZELENTSOV, S.V. *et al.* The Types And Methods of Natural Pollination of Flax *Linum Usitatissimum* L. **Oil Crops**, v. 1, n. 173, p. 105–113, 2018.

ZULKARNAIN, Z.; ELIYANTI, E.; SWARI, E. Pollen viability and stigma receptivity in *Swainsona formosa* (G.Don) J.Thompson (Fabaceae), an ornamental legume native to Australia. **Scientific Article**, v. 25, n. 2, 2019.

ZUK, M. *et al.* Linseed, the multipurpose plant. **Industrial Crops and Products**, v. 75, Part B, p. 165-177, 2015.