

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA-UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS-CAV
CURSO DE DOUTORADO**

MARCIO DOS SANTOS

**IDENTIFICAÇÃO DE GENITORES DE LÚPULO E DESENVOLVIMENTO DE
COMBINAÇÕES HÍBRIDAS PARA O PLANALTO CATARINENSE**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Produção vegetal. Área de concentração: Melhoramento e Recursos Genéticos de plantas.

Orientador: Dr. Altamir Frederico Guidolin.

Co-orientadora: Dra. Patrícia Maria Oliveira Pierre Castro.

LAGES, SC

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

dos Santos, Marcio
IDENTIFICAÇÃO DE GENITORES DE LÚPULO E
DESENVOLVIMENTO DE COMBINAÇÕES HÍBRIDAS PARA
O PLANALTO CATARINENSE / Marcio dos Santos. -- 2023.
88 p.

Orientador: Altamir Frederico Guidolin
Coorientador: Patrícia Maria Oliveira Pierre Castro
Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação , Lages, 2023.

1. Lúpulo . 2. Melhoramento . 3. Estatística. I. Frederico
Guidolin, Altamir . II. Maria Oliveira Pierre Castro, Patrícia . III.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de
Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação . IV.
Titulo.

MARCIO DOS SANTOS

**IDENTIFICAÇÃO DE GENITORES DE LÚPULO E DESENVOLVIMENTO DE
COMBINAÇÕES HÍBRIDAS PARA O PLANALTO CATARINENSE**

Tese apresentada ao Curso de Pós-graduação em Produção Vegetal, na Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Produção Vegetal com área de concentração: Melhoramento e Recursos Genéticos de plantas.

Banca examinadora:

Orientador:

Dr. Altamir Frederico Guidolin
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros internos:

Dr. Adelar Mantovani
Universidade do Estado de Santa Catarina

Dr. Newton Clóvis Freitas da Costa.
Universidade do Estado de Santa Catarina

Dr. Jefferson Luís Meirelles Coimbra
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro externo:

Dr. Lirio Luiz Dal Vesco
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Amanda Gonçalves Guimarães
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Nicole Trevisani
Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina

Lages-SC, 27 de setembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado força para concluir a etapa final dessa caminhada de 13 anos para a formação profissional. Foram 3 graduações 1 mestrado e agora finalmente, o Doutorado!

A todos os Professores e Doutores do Curso de Pós-graduação em Produção Vegetal da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em especial ao Prof. Dr. Altamir Frederico Guidolin, Prof Dr. Jefferson Luís Meirelles Coimbra e minha coorientadora Profa. Dra. Patrícia Maria Oliveira Pierre Castro pela oportunidade e orientação em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho. Ao Prof. Dr. Lírio Luiz Dal Vesco, Prof. Dr. Leocir José Welter, Profa. Dra. Adriana Terumi Itako ao Me. Kauê Tortato Alves por terem me incentivado a continuar na área da pesquisa científica.

À minha mãe, que com grande esforço e amor me deu muito mais que a vida e nunca me deixou desistir nas horas difíceis. Ao meu pai (*in memoriam*) que mesmo ausente me ajudou espiritualmente guiando meu caminho, tenho certeza de que de onde estiver, terá orgulho de mim por realizar seus sonhos. A minha filha Yiasmin da Rosa Santos por ser a minha alegria e razão de viver.

Aos meus amigos Prof. Dr. Cezario Ferreira dos Santos Junior, Mr. Guga Santos. Ao companheiro Esp. eng. agr. Rodrigo Baierle (Lúpulos 1090) por compartilhar o sonho o ~~im~~possível de produção de lúpulo brasileiro e ser guardião de um excelente Banco ativo (BAG) de germoplasma da espécie e seus trabalhos em prol do melhoramento do lúpulo no Brasil. Aos inimigos, que durante as brigas me deram mais vontade de vencer deixo também meus agradecimentos.

Ao PROGRAMA UNIEDU/FUMDES PÓS-GRADUAÇÃO e a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas e auxílio financeiro.

OBRIGADO A TODOS!

“Se vai tentar, vá até o fim. Caso contrário, nem comece.
Se vai tentar, vá até o fim. Você pode perder namorada,
esposa, parentes, emprego e talvez até a cabeça.
Vá até o fim. Pode ficar sem comer por três ou quatro
dias. Pode congelar no banco de uma praça bêbedo. Pode ser
preso. Pode receber escárnio, gozações, isolamento.
Isolamento é um presente, todo o resto é um teste da sua
resistência, de quão forte é a sua vontade. E você fará a
despeito da rejeição e dos piores azares e será melhor do
que qualquer coisa que possa imaginar. Se vai tentar, vá
até o fim. Não há outra emoção como essa. Você estará
sozinho com Deus e as noites queimarão como fogo.
Faça, faça, faça, faça, até o fim, até o fim. Você cavalgará
a vida diretamente para o riso perfeito. Essa é a única boa
luta que existe”. Adaptado de Charles Bukowski.

RESUMO

O lúpulo (*Humulus lupulus* L) é uma planta de origem de clima temperado. A espécie possui grande importância econômica devido a sua utilização para a produção de cerveja. Contudo, apesar do enorme potencial, a produção nacional e do Planalto Catarinense apresenta baixo índice produtivo, falta cultivares adaptadas ao clima local. Através do melhoramento genético da cultura é possível aumentar a produção e desenvolver lúpulos com diferentes perfis aromáticos. O objetivo deste trabalho é identificar genitores de lúpulo e desenvolver combinações híbridas para o Planalto Catarinense. Para isso, foram executados dois experimentos, o primeiro foi realizado a caracterização de genitores promissores de lúpulo para a região. O delineamento experimental utilizado foi de blocos completos, em esquema fatorial 3 x 4, com 12 tratamentos: (Fator 1: três anos de cultivo (2019, 2020 e 2021) e combinado com o fator 2: quatro genótipos (Cascade, Chinook, Columbus e Hallertau). No segundo ensaio foi determinada estimativas de parâmetros genéticos da capacidade geral e específica de combinação de lúpulo e da variabilidade genética em um dialelo parcial. O delineamento experimental foi blocos ao acaso, com três repetições. Foram utilizados 6 genitores (2 masculinos: Cascade, Hallertauer e 4 femininos: Cascade, Columbus, Chinook e Hallertauer) e os F1s (8 híbridos) totalizando 14 tratamentos. Os caracteres avaliados foram a massa fresca de plantas (MFP, g), massa verde de cones (MTV, g), a massa seca de cones (MSC, g), os teores de alfa-ácidos (ALFA, %) e a produção (PROD, g planta⁻¹). A partir dos resultados do primeiro experimento, observou-se que nos cruzamentos, existe variação disponível ao melhoramento genético do lúpulo, fator que permitiu obter ganhos produtivos e qualitativos com as hibridações controladas. Os resultados do segundo ensaio, os cruzamentos demonstraram que a maioria das combinações manifestaram habilidade específica de combinação entre os grupos (genitores masculinos e femininos), indicando a presença de alelos favoráveis entre genótipos divergentes geneticamente.

Palavras-chave: Melhoramento, *Humulus lupulus*, cerveja, variabilidade.

IDENTIFICATION OF HOP GENITORS AND DEVELOPMENT OF HYBRID COMBINATIONS FOR THE CATARINENSE PLATE

ABSTRACT

Hops (*Humulus lupulus* L) are a plant of temperate climate origin. The species has great economic importance due to its use for beer production. However, despite the enormous potential, national production and that of Planalto Catarinense have a low production rate, lacking cultivars adapted to the local climate. Through genetic improvement of the crop, it is possible to increase production and develop cultivars with different aromatic profiles. identify hop parents and development of hybrid hops for the Planalto Catarinense. To this end, two experiments were carried out, the first was to characterize promising hop parents for the Planalto Catarinense region. The experimental design used was complete blocks, in a 3 x 4 factorial scheme, with 12 treatments: (Factor 1: three years of cultivation (2019, 2020 and 2021) and combined with factor 2: four genotypes (Cascade, Chinook, Columbus and Hallertau). In the second trial, the general and specific ability to combine hops in a partial diallel and estimates of genetic parameters and genetic variability were determined. The experimental design was randomized blocks, with three replications. 6 parents were used (2 male: Cascade, Hallertauer and 4 females: Cascade, Columbus, Chinook and Hallertauer) and the F1s (8 hybrids) totaling 14 treatments. The traits evaluated were the fresh mass of plants (MFP, g), green mass of cones (MTV, g), dry mass of cones (MSC, g), alpha-acid content (ALFA, %) and production (PROD, g plant⁻¹). Based on the results of the first experiment, it was verified that our combinations, there is variation available for the genetic improvement of hops, a factor that allowed productive and qualitative gains to be obtained with controlled hybridizations. The results of the second test, the crossings, demonstrated that the majority of bacteria demonstrated a specific ability to combine between groups (male and female parents), reducing the presence of beers developed between genetically divergent genotypes.

Keywords: Breeding, *Humulus lupulus*, beer, variability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	10
2. OBJETIVOS.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 A Cultura do Lúpulo	13
3.1.1 <i>Descrição Botânica</i>	13
3.1.2 <i>Características morfológicas</i>	14
3.1.3 <i>Compostos presentes no lúpulo.</i>	16
3.1.4 <i>Histórico da cerveja e do lúpulo</i>	18
3.2 <i>Importância econômica</i>	19
3.4 Condições climáticas para o cultivo de lúpulo.....	22
3.4 Caracterização do germoplasma	24
3.4.1 <i>Conservação da espécie</i>	24
3.4.2 <i>Identificação da variabilidade genética</i>	25
3.5 Características de interesse para a seleção	28
3.6 Parâmetros genéticos: o início do programa de melhoramento.....	31
3.6.1 <i>Herdabilidade e ação genica predominante</i>	31
3.6.2 <i>Endogamia e heterose</i>	35
3.6.3 <i>Cruzamentos Dialélicos</i>	38
3.7 Melhoramento do Lúpulo.....	40
3.7.1 <i>O histórico do Melhoramento</i>	40
3.7.2 <i>Os métodos de condução de populações</i>	41
4. CAPÍTULO I: DESEMPENHO E VARIABILIDADE PARA CARACTERES DE INTERESSE AGRONÔMICO E CERVEJEIRO DE GENÓTIPOS DE LÚPULO NO PLANALTO SERRANO CATARINENSE	46
5. CAPÍTULO II: CAPACIDADE GERAL E ESPECÍFICA DE COMBINAÇÃO DE GENÓTIPOS DE LÚPULO PARA CARACTERÍSTICAS DE INTERESSE AGRONÔMICOS EM UM DIALELO PARCIAL PARA O PLANALTO CATARINENSE	61
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
BIBLIOGRAFIA	77

1. INTRODUÇÃO GERAL

O lúpulo (*Humulus lupulus*), apresenta grande potencial econômico devido a sua utilização para a produção de cerveja. A Brasil é um dos mais produtores e consumidores da bebida com destaque para o estado de Santa Catarina na produção de cerveja e chopes artesanais (SEBRAE, 2018). Em Santa Catarina são aproximadamente 120 empreendimentos ligados ao setor, possuindo 1 estabelecimento industrial para cada 41,4 mil, com crescimento de 20% ao ano (SEBRAE, 2018; FIESC; 2022). No Planalto Catarinense, diversas iniciativas para explorar a cultura em escala comercial têm sido desenvolvidas, a região concentra o maior número de produtores de lúpulo do Brasil, porém, a produção (aproximadamente 10 toneladas de lúpulo colhidos em 2022) não é suficiente para abastecer o mercado brasileiro. O Brasil importa cerca de 99% do lúpulo que é consumido da Alemanha e dos Estados Unidos (SANTOS et al., 2022). As limitações ocorrem porque as condições climáticas são desafiadoras, as cultivares em uso comercial atual não são adaptadas ao clima local, principalmente porque são sensíveis ao fotoperíodo, resultando em baixa eficiência produtiva.

De acordo com Hieronymus (2012), através do melhoramento genético da cultura, é possível selecionar cultivares com baixa sensibilidade ao fotoperíodo, mais produtivas e com características cervejeiras superiores. O melhoramento do lúpulo é agronomicamente e economicamente viável (ORTON, 2019; NESVADBA et al., 2011), bons exemplos do melhoramento genético da cultura são encontrados na África do Sul, na Índia, no México e no sul dos Estados Unidos. Dessa forma, um programa de melhoramento e a seleção de novas cultivares é de fundamental importância para consolidar e expandir a cultura na região do Planalto Catarinense, visando altos rendimentos e qualidade superior para que o cultivo nacional coloque o Brasil como um país autossuficiente na produção de lúpulo.

O sucesso do melhoramento genético depende da disponibilidade de uma coleção de germoplasma com frequência de genes com alto potencial (variabilidade efetiva). Dessa forma, é necessário a identificação e seleção de genitores de alto desempenho, que sejam contrastante e transmitam os caracteres de interesse para suas progênes. No país, existem variedades que podem ter mais de 100 anos, assim, essas constituições foram aclimatadas e selecionadas empiricamente pelos agricultores e apresentam melhor desempenho agrônomico que as cultivares

comerciais, atualmente, e podem ser utilizadas como fonte de variabilidade para o melhoramento (HIERONYMUS, 2012). O conhecimento da herança genética auxilia o melhorista na tomada de decisões para definir estratégias para o melhoramento do lúpulo. Os cruzamentos em esquemas de dialelos são reconhecidos como os mais seguros e eficientes para estimação de parâmetros dos componentes genéticos (GRIFFING, 1956; VENCOVSKY; BARRIGA, 1992). Os principais parâmetros genéticos como capacidade geral (CGC) e específica (CEC) de combinação e herdabilidade são muito importantes para se realizar inferências acerca do controle genético dos caracteres de interesse e desenvolvimento de novos genótipos.

A capacidade geral de combinação (CGC) é definida como resposta média de um genitor em uma série de cruzamentos, sendo usada para estimar os efeitos da ação genica do tipo aditiva. Já a capacidade específica (CEC) é caracterizada como os desvios positivos ou negativos ao valor médio (CGC) dos genitores, e, está relacionada geneticamente a ação do tipo não aditivo de dominância ou sobredominância e permite estudos sobre a heterose (GRIFFING, 1956; VENCOVSKY; BARRIGA, 1992). A partir da heterose, tendo conceitos como diferenças do híbrido comparando-se com a média dos pais, é possível fazer previsões para ganhos com seleção e fixação de alelos superiores através da reprodução assexuada (HENNING et al., 2004; DARBY, 2005; HENNING et al., 2010).

Porém, de acordo com Henning et al. (2005), grande parte do melhoramento genético de lúpulo buscou a seleção de características de ação aditiva, a ação de genes dominantes foi pouco explorada pelos melhoristas. Dessa forma, estudos como este podem orientar os melhoristas para identificação de genitores com característica de interesse, para o desenvolvimento de linhas puras masculinas e femininas, formação de blocos de cruzamentos e a seleção de híbridos promissores, especialmente para a regiões como do Planalto Catarinense.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Identificar genitores de lúpulo e desenvolver combinações híbridas para o Planalto Catarinense.

Objetivos específicos

- a) Caracterizar e identificar genitores de lúpulo com potencial agrônomico e cervejeiro para o Planalto Catarinense.

- b) Avaliar a capacidade geral e específica de combinação dos genitores Columbus, Chinook, Cascade, Hallertauer nas condições climáticas do Planalto Catarinense.

- c) Estimar os parâmetros genéticos de variância e herdabilidade para caracteres de interesse agrônomico de populações de meio-irmão de lúpulo cultivadas nas condições climáticas do Planalto Catarinense.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Cultura do Lúpulo

3.1.1 Descrição Botânica

O lúpulo (*Humulus lupulus*) pertence ao gênero *Humulus*, grupo Urticáceas da família Cannabaceae, foi recentemente incluída na Ordem de Rosales (BOTAIN, 2014). O gênero inclui três espécies, *Humulus lupulus*, *Humulus scandens* e *Humulus yunnanensis*, porém, as duas últimas não demonstram potencial cervejeiro. O Lúpulo (*H. lupulus*) é uma espécie dioica (podendo ser encontrados indivíduos monoicos), perene, de fotoperíodo curto, de provável origem asiática (HAMPTON; SMALL, 2001). Para a espécie *H. lupulus*, são conhecidas seis variedades taxonômicas ou subespécies baseadas no seu DNA, que refletem a sua distribuição geográfica (entre latitudes de aproximadamente 30° e 70° norte) (MOBOT/Tropicos, 2023).

O *H. lupulus* é uma espécie diploide (embora sejam encontradas variedades com diferentes níveis de ploidia). A pesquisa citogenética e o sequenciamento de DNA sugerem que o lúpulo no seu genoma tenha aproximadamente 2,8 gigas de bases e é altamente repetitivo (HILL et al., 2017). As avaliações indicam que são encontradas variedades europeias diploides ($2n=2x=18 + XY$ e $2n=2x=18+XX$) ou triploides ($2n=3x=30$) de *H. lupulus* var. *lupulus*, as variedades americanas de *H. lupulus* var. *neomexicanus*, var. *lupuloides* ($2n=2x=20$) e o *Humulus lupulus* var. *pubescens* e o *Humulus lupulus* var. *cordifolius* (indivíduos femininos/ $2n = 16$; indivíduos masculinos/ $2n = 17$) (HAUNOLD, 1981) (Tabela 01).

As variedades diploides quando cruzadas artificial ou espontaneamente podem apresentar aberrações cromossômicas e dar origem indivíduos diploides, triploides ou tetraploides. Neve (1965), relata que híbridos de *Humulus lupulus* estéreis foram encontrados na natureza e são comuns entre cruzamentos europeus e selvagens da América do Norte, provavelmente devido às diferenças no tamanho do cromossomo. Apesar de apresentarem o mesmo perfil cromossômico, a variedade *lupulus* e a variedade *neomexicanus* diferem quanto ao conteúdo de DNA nuclear (2C DNA) (GRABOWSKA-JOACHIMIAK et al., 2006).

A proporção da segregação e obtenção de novos indivíduos é de 0,5 a 1,0 entre os sexos em plantas dioicas, podendo ser encontradas plantas monoicas

quando o cromossomo X se transforma em autossomo com uma relação de 1,0, produzindo uma fêmea, e uma relação de 0,5 ou menos resultando machos. Algumas plantas monoicas possuem flores masculinas estéreis, sugerindo que os cromossomos Y não são essenciais para determinar o fenótipo sexual, mas são necessários para o desenvolvimento do pólen (SHEPHARD et al., 2000).

Tabela 01. Variedades botânicas e região de ocorrência de *Humulus lupulus*.

Nome	Região de Ocorrência	Fonte/autor
<i>H. lupulus</i> var. <i>humulus</i>	Europa e Ásia	Linnaeus, Carl von
<i>H. lupulus</i> var. <i>cordifolius</i>	Leste da Ásia e Japão	Maximowicz, Carl Johann
<i>H. lupulus</i> var. <i>neomexicanus</i>	EUA/MÉXICO*	Nelson, Aven Cockerell
<i>H. lupulus</i> var. <i>pubescens</i>	América do Norte	Small, Ernest
<i>H. lupulus</i> var. <i>lupuloides</i>	América do Norte	Small, Ernest

**H. lupulus* var. *neomexicanus*. Distribuição e hábitat está mais intimamente associado com a Cordilheira das Montanhas Rochosas do oeste da América do Norte até o norte do México (TEMBROCK et al., 2016). Montanhas Chihuahua do México perto de Nuevo Casas Grandes (FRANCKE et al., 1982).

3.1.2 Características morfológicas

O *H. lupulus* apresenta hábito do tipo trepador, comumente mantido em treliças feitas de cordas ou fios que apoiam as plantas. Os indivíduos são vigorosos (crescimento em até 30 cm por dia), podendo atingir cerca de 10 metros de altura, de acordo com a variedade utilizada e com a presença de ramos laterais. Na figura 01, é possível ver as flores são em forma de inflorescência (cones) de tamanho aproximado de 2 mm no início antes da fecundação, chegando a 10 cm na maturação do cone, formadas em plantas distintas que geram pequenos frutos chamados aquênios. Para a produção, apenas os cones de flores fêmeas são desejados, por produzem a lupulina, resina cristalina que contém alfa, beta ácidos e óleos essenciais (DODDS, 2019).

O lúpulo pode entrar no estágio produtivo/reprodutivo já no primeiro ano, quando as mudas são propagadas vegetativamente, as progênes oriundas de sementes para fins de melhoramento genético podem demorar cerca de 2 anos para emitir as primeiras inflorescências. Os cones de primeiro ano são chamados de “baby hops” e muitos casos acabam sendo descartados devido que nos primeiros anos a qualidade também é menor (quantidade de lupulina por cone) (DONNER et al., 2020; ROSSINI et al., 2020). (DONNER et al., 2020; ROSSINI et al., 2020). De

acordo com Dodds (2019), ocorre aumento de produtividade ao longo dos anos iniciais e no quinto ano tende a se estabilizar.

Para diferenciar o sexo das plantas são utilizados marcadores moleculares do tipo microssatélites, porque não é possível classificá-las visualmente (macho e fêmeas) antes da formação das inflorescências que ocorre, geralmente, somente no segundo ano de cultivo (SEEFELDER et al., 2000; PATZAK et al., 2010).

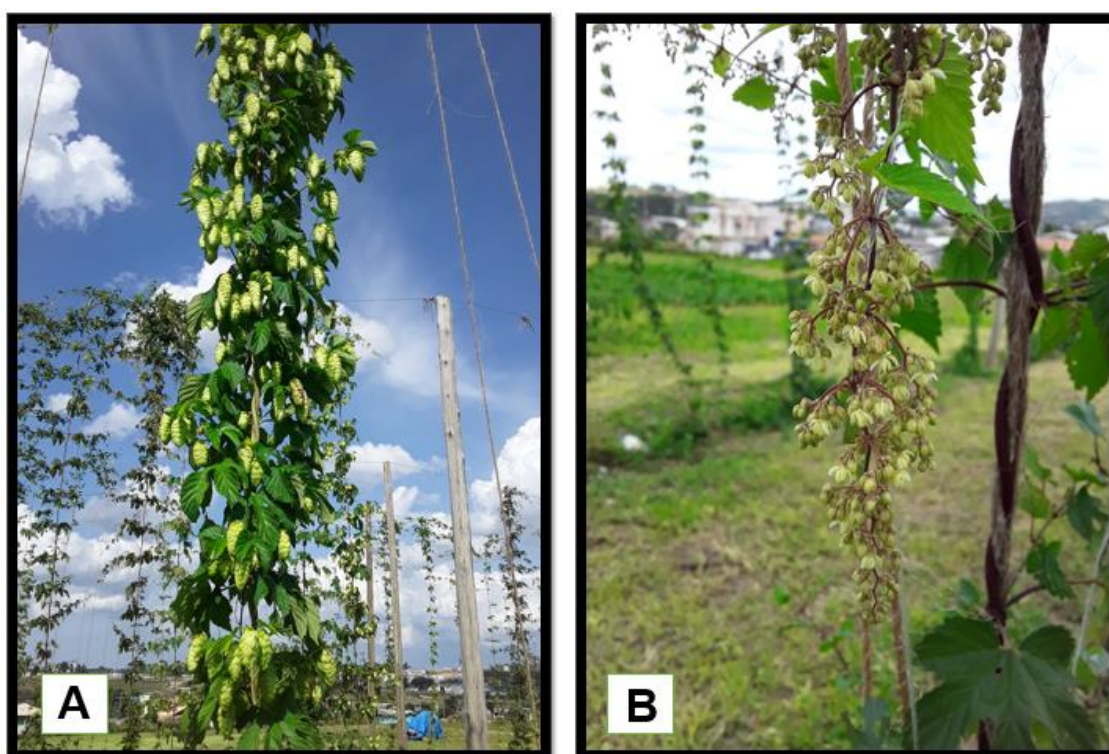


Figura 01. A - Planta com inflorescências femininas. B - Planta com inflorescências masculinas. Fonte: próprio autor, 2022.

Na produção comercial destinada à cerveja, as plantas masculinas têm pouco ou nenhum valor econômico e devem ser erradicadas para evitar a polinização. De acordo com Dodds (2019), as sementes são consideradas indesejáveis pelos cervejeiros, porque a fecundação desencadeia o processo de oxidação dos ácidos graxos que produz sabores desagradáveis na bebida. A ausência de sementes também faz com que o lúpulo seja geralmente mais rico em óleos essenciais e resinas (α e β ácidos), do que quando fecundados (ALMAGUER et al., 2014). O sistema radicular é formado de rizomas ou coroa de rizomas. As estruturas radiculares são responsáveis pelo armazenamento de energia, assim, como as demais plantas perenes apresentam um processo de translocação dos nutrientes da parte aérea para as raízes no final do ciclo.

A vida útil de um jardim de lúpulo pode chegar a 50 anos, no entanto, a renovação das plantas geralmente ocorre em intervalos menores, de dez a 20 anos. Essa prática acompanha as demandas do mercado por cultivares específicas (DODDS, 2019).

3.1.3 Compostos presentes no lúpulo.

Os cones de lúpulo são compostos por mais de 2000 substâncias químicas, apesar de sua complexibilidade, pode ser dividida em óleos essenciais, proteínas, resinas entre outras como pode ser visto na tabela (Tabela 02).

Tabela 02: *Composição química média de cones de lúpulo de cones secos.*

Constituinte	Quantidade % (mm)
Resinas Totais	15 – 30
Óleos essenciais	0,5 – 3
Proteínas	15
Monossacarídeos	2
Polifenóis (taninos)	4
Pectinas	2
Aminoácidos	0,1
Ceras e esteroides	Traços – 25
Cinzas	8
Umidade	10
Celulose	43

Fonte: BAMFORTH, 2011.

Nos cones de lúpulos as resinas totais são classificadas de acordo com sua solubilidade na substância hexano, em resinas moles (solúvel) ou duras (insolúvel). Nas resinas solúveis são observados os Alfa e beta ácidos, que são ácidos fenólicos alicíclicos resinosos, sendo o alfa ácido chamado de ácidos amargos, pois confere a amargor a cerveja.

O alfa ácido é composto por 5 substâncias:

Humulona (35 a 70%).

Cohumulona (20 a 55%).

Adhumulona (10 a 15%).

Prehumulona (1 a 10%).

Poshumulona (1 a 3%).

Os alfas ácidos, durante a fermentação, conferem amargor a cerveja que reduz os açúcares produzidos pela cevada. Na fervura os alfas ácidos quando são solúveis a água, quanto maior o tempo de fervura, mais amarga fica a cerveja, adicionando lúpulo ao mosto na fase de fervura (ALMAGUER et al. 2014).

Com base no teor de alfa ácido qual confere amargor a cerveja, estes são divididos em 3 categorias, a) Lúpulos de sabor, b) duplo propósito, c) lúpulos de amargor (acima de 7% de alfa ácidos). Os lúpulos com elevados teores de amargor são chamados de super alfa (acima de 13% de alfa ácidos), como exemplo tem-se o cultivar Zeus com 13 à 17% de concentração.

Os betas ácidos contêm o grupo alcoólico na sua composição química, não sendo isomerizados, conferindo aroma e sabor a cerveja, portanto, no processo de lupulagem são menos solúveis a água (OLSOVSKA et al, 2016).

Beta ácidos são compostos por:

Lupulona (30 a 55%)

Cohupulona (20 a 55%)

Adlupulona (10 a 15%)

Prehumulona (1 a 10%)

Poshumulona (1 a 3%)

No lúpulo há também muitas substâncias de benefícios para a saúde humana e animais (OLSOVSKA et al, 2016). Os componentes medicinais do lúpulo ainda estão em pesquisa, devido aos seus efeitos antioxidantes, anti-inflamatórios e imunomoduladores. As propriedades mais importantes da espécie, estão relacionadas principalmente ao xanthohumol pertencente as resinas duras (DURELLO et al., 2011). A substância química tem a capacidade de proteger as células impedindo a proliferação do câncer, pela inibição da síntese de DNA, indução do ciclo celular na fase S, causando apoptose das células cancerígenas ou impedindo sua diferenciação e multiplicação celular (GERHAUSER et al., 2002).

As substâncias de interesse cervejeiro e medicinais presente no lúpulo variam de acordo com a cultivares e as condições climáticas e podem ter diferentes efeitos sobre sua produção. Os compostos são voláteis e degradam facilmente com exposição ao oxigênio, sofrem alterações durante o amadurecimento dos cones, no processamento, e no armazenamento podem deteriorar e terem suas propriedades alteradas (VAN HOLLE, 2021). Dessa forma, é importante respeitar as recomendações técnicas de colheita e armazenamento para ter um produto de qualidade.

3.1.4 Histórico da cerveja e do lúpulo

A tradição da produção de cerveja é milenar em vários países, esta é uma das bebidas alcoólica mais antiga consumida pelo homem (HIERONYMUS, 2012). Estudos arqueológicos recentes demonstram que o lúpulo e a cerveja sempre estiveram associados às atividades humanas. A datação da invenção da tecnologia cervejeira, ainda não tem uma confirmação oficial, alguns estudos remontam ao início do período Neolítico (“Revolução Neolítica” a cerca de 12 mil a.C) (CABRAS; HIGGINS, 2016). Outras evidências de bebidas fermentadas aparecem na China entre 9 a 7 mil anos a.C, fontes citam que a produção da cerveja tenha se iniciado na Mesopotâmia (DAMEROW, 2012). Há relatos que a cerveja maltada era produzida na Babilônia em 6 mil a.C. O Código de Hammurabi, incluiu leis para a fabricação, comercialização e consumo da cerveja para as tavernas da época (SALES, 2010).

A evidência mais antiga do uso de lúpulo em cervejas vem dos Celtas há mais de 2 mil a. C anos. Os gregos utilizavam o lúpulo na bebida e no Egito está a receita mais antiga para a produção de cerveja com a lupulagem. Os monges na idade média também observaram que a bebida demonstrava melhores propriedades com a adição do lúpulo. O vinho era considerado bebida sagrada e não poderia ser utilizado no ritual sagrado, assim, a cerveja foi a principal alimento e bebida utilizados pelos sacerdotes naquela época (SPOSITO et al., 2019; CORNELL, 2004).

Para a produção da cerveja, o lúpulo europeu foi exportado da Europa para os Estados Unidos pela Massachusetts Company em 1629. Na América do Sul, os primeiros plantios ocorreram com os imigrantes galeses em 1865 na Argentina (MATAMALA; MARTÍNEZ; 2013). No Brasil, a história do lúpulo é bastante peculiar,

inicialmente, foi introduzido pela família real no Rio Grande do Sul ou/e trazidas pelo barão Von Steinberg. Em 1868 as plantações de lúpulo chamaram a atenção do Ministro da Agricultura, Joaquim Antão Fernandes Leão, e do comendador Antônio José Gomes Pereira Bastos. No estado do Paraná, os colonos poloneses, em 1860, também se interessam pela cultura. Em Santa Catarina, registros históricos confirmam que o estado já foi um produtor de lúpulo (MARCUSO; MÜLLER, 2019; SILVA, 1868; LIGER; 1885). A prática de cultivo para fins medicinais, e a produção em pequena escala contínua sendo realizada pelos agricultores e cervejeiros brasileiros ao longo desses 120 anos. No ano de 2015 a espécie ganhou destaque nacional devido ao produtor Rodrigo Veraldi que importou sementes do Canadá e desenvolveu uma variedade de polinização aberta chamada Mantiqueira e foi o precursor do lúpulo no Brasil. Atualmente diversas iniciativas para viabilizar o cultivo de Lúpulo no país, com destaque para a região do Planalto Catarinense.

3.2 Importância econômica

Os cones ou estróbilos da espécie de lúpulo apresentam grande potencial econômico, devido à alta demanda da indústria, seja para a fabricação de cerveja ou produtos cosméticos e farmacêuticos (SPÓSITO et al., 2019; DODDS, 2019). Os maiores produtores estão distribuídos em duas faixas do globo terrestre e são Estados Unidos (52.857 toneladas), Alemanha (47.862 toneladas), China (6.228 mil toneladas), República Tcheca (8.305 mil toneladas) e Polônia (3.251 toneladas) (BARTHHAAS_REPORT, 2022) (Figura 02). As maiores áreas de cultivo incluem os estados de Washington, Oregon e Idaho nos EUA (24.634 ha) e a região de Hallertau na Alemanha (17.122 ha). A África do Sul cultiva 450 hectares (BARTHHAAS_REPORT, 2022) e na América do Sul, os argentinos detêm a maior produção da trepadeira, com aproximadamente 164 hectares, com destaque a região da patagônia. A produtividade média das principais cultivares plantadas são de 1500 a 3500 kg. ha⁻¹ de cones desidratados.



Figura 02: Duas principais faixas de produção de lúpulo: temperada (superior) e 1 subtropical e temperada faixa inferior (BEERMAVERICK, 2020).

A cerveja, é uma bebida composta por água, malte, lúpulo e levedura (HIERONYMUS, 2012). O Brasil é protagonista no ramo de cervejas, assim, existe um grande potencial para a cultura, o país é o 3º maior consumidor e produtor de cervejas do mundo (SEBRAE, 2018; RODRIGUES et al., 2015). Atualmente, o mercado brasileiro da cerveja é três vezes maior que do vinho. O nicho de mercado que vem em crescente incremento são as cervejas artesanais, que oferecem um produto diferenciado e de alta qualidade. De acordo com levantamento realizado pela startup brasileira MindMiners, cerca de 12% dos brasileiros afirmaram consumir cervejas artesanais com frequência, enquanto 53% disseram já ter experimentado algumas vezes, com apreciação positiva.

O estado de Santa Catarina é pioneiro e possui uma rota com destaque na produção de cerveja e chopes artesanais. O estado vem investindo no turismo com a degustação de cervejas e comidas típicas para o fortalecimento da agricultura familiar (SEBRAE, 2018). Em Santa Catarina são aproximadamente 120 empreendimentos ligadas ao setor, possuindo 1 estabelecimento industrial para cada 41,4 mil, com crescimento de 20% ao ano (SEBRAE, 2018; FIESC; 2022). A região do Vale do Itajaí é referência na produção de cerveja devido à colonização alemã, tem mais de 26 cervejas premiadas internacionalmente. Além disso, Canoinhas-SC no planalto norte tem a cervejaria artesanal mais antiga do Brasil (REVISTA DA CERVEJA, 2012).

De acordo com a lei 9.902 sancionada em 2019, não é possível substituir o lúpulo por outro princípio amargo, toda cerveja produzida ou importada necessariamente deve possuir os ingredientes "originais" da bebida que incluem o malte, lúpulo, água e levedura. O Brasil consome cerca de 4,7 mil toneladas de lúpulo ao ano (na forma de sucos e extratos de lúpulo; cones de lúpulo, triturados ou moídos, ou em "*pellets*"; cones de lúpulo, frescos, secos, não triturados etc.), movimentando um montante em torno de 450 milhões de reais no ano de 2022 (BRASIL, 2022a).

O lúpulo utilizado nas cervejarias brasileiras é 99% importado devido no Brasil, a produção do lúpulo nacional não ser suficiente para atender o mercado local (DURELLO et al., 2019). O lúpulo importado para o Brasil não é de boa qualidade, sendo resultante de uma safra anterior, dessa forma, pode demonstrar baixo perfil aromático e redução em até 50% da concentração de alfa ácidos. Recentemente, também ocorreu um aumento do preço dessa *commodity* nos mercados internacionais devido ao aumento do preço do dólar.

Dessa forma, observando esse nicho de mercado, atualmente no país, há cerca de 100 produtores de lúpulo distribuídos em 11 estados ocupando uma área de 40 hectares plantados, com destaque para Santa Catarina (8,5 hectares), São Paulo (4,5 hectares) e Minas Gerais (2,9 hectares) (BRASIL, 2022b). A produção de aproximadamente 24 mil quilos e a produtividade média de 500 kg ha⁻¹ em sistema tradicional e 1000 kg ha⁻¹ de cones com iluminação artificial. Esses resultados são baixos devido às condições climáticas e a falta de tecnologia (desde cultivares promissores, até a pós-colheita) (APROLÚPULO, 2022). Os cultivos em escala comercial são recentes e não estão no estágio de produção máxima (menos de 5 anos) no qual conseguem produzir até 2 Kg por planta. O preço pago ao agricultor é considerado baixo (entre 70 a 250 reais o quilo do lúpulo seco) devido a forma de comercialização ser *in natura* (seco desidratado, não é forma utilizada para a fabricação de cerveja), necessitando de pesquisas e tecnologia de processamento para obtenção de *pellets* ou líquido concentrado de lúpulo (BRASIL, 2022b). Contudo, o sucesso de cultivo do lúpulo não depende necessariamente das produções elevadas, uma vez que 1g de lúpulo é possível produzir aproximadamente 10 litros de cerveja, e, com uma pequena produção abasteceria uma cervejaria de pequeno porte (SANTOS et al., 2022). Além disso, os resultados

qualitativos encontrado no lúpulo brasileiro são promissores, sendo igual ou superior aos importados de alto desempenho (ARRUDA et al., 2023; DA ROSA et al, 2020).

Para fortalecer a cadeia produtiva e fomentar as pesquisas os agricultores e pesquisadores criaram a APROLUPÚLO com sede na cidade de Lages-SC, tendo como sua mantenedora a Universidade do Estado de Santa Catarina (MARCUSO et al., 2019). Através das associações foram estabelecidas várias parcerias, agora os produtores contam com o apoio do Grupo Petrópolis (área de 5 hectares, mais de 5 milhões em investimento), da HEINEKEN e a AMBEV (SPÓSITO et al., 2019; RAMIRES, 2020). As empresas líderes do mercado de cervejas compram o lúpulo produzido no Brasil, e também oferecem estrutura para melhorar a produção, como a construção de um secador de lúpulo pela AMBEV (RAMIRES, 2020), dessa forma, espera-se consolidar e expandir a atividade. A tendência do mercado nos próximos anos, é o Brasil superar a Argentina e ultrapassar os 150 hectares em área de cultivo, reduzindo as importações por conta dos investimentos financeiros realizados.

3.4 Condições climáticas para o cultivo de lúpulo

De acordo com Jastrombek et al. (2022), o lúpulo é uma planta de dias curtos e ambientes ripários ou margem ribeira, próxima aos rios, os fatores climáticos mais preponderantes são o fotoperíodo e o estresse hídrico (falta ou acesso de água). A transição para o início da redução de horas de luz normalmente é responsável pelo florescimento e ocorre no solstício de verão. As regiões recomendadas para o cultivo do lúpulo são as latitudes 35 a 55°, uma vez, que nessas regiões há predominância de elevada horas de luz diária e baixa umidade do ar (THOMAS; SCHWABE, 1969.). As cultivares atuais disponíveis no Brasil (cultivares de origem Americanas e Europeias) geralmente necessitam de pelo menos 15 horas de luz, sem o padrão de luz ideal as cultivares não desenvolvem os ramos laterais responsáveis pela produção. De acordo com Darby (2005); Beverley (2015), na África do Sul e nos Estados Unidos (Flórida), devido aos fatores climáticos pode haver redução de até 50% da produção para algumas cultivares quando plantadas fora do seu zoneamento agroclimático.

As cultivares de fotoperíodo curto apresentam requerimento de horas de frio (processo de vernalização) com a duração de horas de frio (no mínimo de 42 dias a

3 °C para a cultura) necessário para que as reservas sejam translouçadas para as raízes e então na primavera ocorre o rebrote (DODDS, et al. 2019; SUNG et al., 2006). O desenvolvimento radicular satisfatório é importante, uma vez que será responsável pelo crescimento do dossel produtivo e a sobrevivência da planta no próximo ano. A cultura tem uma faixa ótima de desenvolvimento entre 20 a 24° C, podendo temperaturas acima de 25° C causar estresse térmico, resultando em perdas produtivas (NEVE, 1991; HAUNOLD 1981; PAVOLOVIC et al., 2010; MULLOY, 2014; DE LANGE, 2015). De acordo com relatos, no Brasil a seca e o calor do verão de 1871, foi responsável por causar a morte das plantas na primeira introdução de lúpulo no Brasil (BRASIL, 2022b). O índice de precipitação também tem demonstrado correlação positiva com os alfas ácidos. Estações de seca abaixo de 200 mm ou alta umidade acima de 300 mm mensal podem comprometer a produção, sendo os estágios de maior sensibilidade a floração e a formação dos cones. A planta não tolera solos encharcados (PAVLOVIC et al. 2010).

Para amenizar os efeitos climáticos, o plantio de lúpulo deve ser realizado em regiões mais favoráveis do Brasil, como a exemplo do Planalto Catarinense. As regiões de clima subtropical, ou mais precisamente da região de Lages-SC está localizada mais distante da linha equatorial, apresenta um período adequado no inverno, permitindo o acúmulo de horas de frio necessário para a produção satisfatória do lúpulo. A altitude próxima aos 1000 metros e a presença de verões brandos com amplitude térmica (dias quente e noites frias) podem contribuir para a aumentar a qualidade do lúpulo.

Contudo, a duração do dia necessário para o crescimento e desenvolvimento é específico para cada genótipo e há grande variabilidade genética no número elevado de cultivares, algumas suportam desvios ao padrão de luz, amplitude térmica e hídrica (BAUERLE, 2019). De acordo com Hieronymus (2012), e Brits (2008), para alcançar produções elevadas em regiões que não atendem o padrão de luz é necessária a utilização de hormônio vegetal, de iluminação artificial e o melhoramento genético. As aplicações exógenas de hormônio balanceados entre giberelina e citocinina pode retardar o florescimento e evitar o gasto energético com brotações fora de época (BAUERLE, 2022). Os investimentos para o fornecimento de luz artificial melhoram a qualidade e a quantidade do lúpulo produzido, contudo, podem onerar os custos de produção (BLITS, 2008). A opção mais eficiente é o

melhoramento genético como foi realizado no Brasil com a soja, a maçã e a agora com oliveira.

3.4 Caracterização do germoplasma

3.4.1 Conservação da espécie

De acordo com Korpelainen & Pietiläinen. (2021), existem centenas de cultivares de lúpulo registradas e muitas variedades utilizadas pelos agricultores e indígenas no mundo. Na China provável centro de origem e regiões de ocorrência natural da espécie pode ser encontrado elevado número de indivíduos em populações silvestres e nativas. Os bancos de germoplasmas são responsáveis pela captação, caracterização, manutenção e distribuição da variabilidade genética. Os principais bancos de germoplasma ativos (BAGs) do lúpulo, são da República Tcheca, da Alemanha e dos Estados Unidos Da América.

A República Tcheca conta com recursos genéticos de 150 cultivares desenvolvidas pelo programa de melhoramento do país e do exterior. A sua população genética base conta com cerca de 15.000 linhagens femininas e 4.000 acessos do sexo masculino que podem ser usados como genitores nos blocos de cruzamentos (SEIGNER et al., 2009). A Alemanha avalia anualmente mais de 1.000 variedades da espécie nos seus principais programas de melhoramento e conta com um banco de germoplasma de 325 acessos e 300 variedades. Nos Estados Unidos da América, o NGRP *National Clonal Germoplasm Repository* – Programa Nacional de Recursos Genéticos, na cidade de Corvallis, estado de Oregon-EUA. (site da NGRP- Referência), conta com uma coleção de 587 acessos mantidos em campo, em casa de vegetação 68 acessos testados para resistência a vírus, e uma coleção de cultura de tecidos de 86 acessos, e 22 acessos na conservação em forma de sementes.

Em regiões de baixas latitudes, próximas a linha equatorial existem poucas informações sobre os bancos de germoplasmas e da diversidade genética da África do Sul. No México há apenas menções de algumas cultivares melhoradas no país na década de 80, oriundas de hibridação entre cultivares em uso comercial nos Estados Unidos da América e populações naturais encontradas do norte do país (FRANCKE, et al., 1982). No Brasil a APROLÚPULO, em parceria com a USP e EMBRAPA

pretendem desenvolver um banco de germoplasma, com recursos de aproximadamente 200 mil reais do governo federal. Em 2013 foi realizada um levantamento por um grupo de pesquisadores da Universidade Federal do Paraná nos agricultores e cervejeiros brasileiros que conservavam em status de conservação *on farm* do lúpulo. Foram coletados e identificados 26 genótipos de origem dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Há descrição de uma variedade tropicalizada chamada de *Brasilizki* pelos imigrantes poloneses com mais de 120 anos de uso no Brasil (SILVA, 2015).

No Brasil, houve um aumento no número de cultivares de origem Americana e Europeia disponíveis para a comercialização, estão registradas no RNC (Registro Nacional de Cultivares) do MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) aproximadamente 50 cultivares (BRASIL, 2023b). A Universidade Federal do Paraná possui cerca de 28 genótipos. A Universidade Federal de Santa Catarina (Campus de Curitibanos) em parceria com produtores, conta com 50 acessos. A Universidade do Estado de Santa Catarina com campus na cidade de Lages-SC, tem aproximadamente 15 genótipos fixos (genótipos que serão utilizados como genitores) e uma população de segregante de 150 genótipos.

3.4.2 Identificação da variabilidade genética

De acordo com Henning (2006), com o avanço dos marcadores moleculares e sequenciamento genético associado a caracterização morfológica dos genótipos, vem possibilitando enormes avanços nos estudos da caracterização do lúpulo. A Universidade do Estado de Oregon desenvolveu uma biblioteca genômica para fins de estudos genômicos da espécie. A HopBase (<https://hopbase.cgrb.oregonstate.edu>), é um site com informações de genes sequenciados, genes de resistência a doenças, primers para discriminação do sexo e das variedades. Outras informações complementares são obtidas no GENBANK (HILL et al., 2017).

A caracterização das variedades é realizada por vários pesquisadores; Henychová (2018), amplificaram 27 fragmentos de DNA utilizando marcadores moleculares de microssatélites SSR em 135 cultivares tradicionais. Os autores, baseados em 276 marcas polimórficas, agruparam os genótipos em dois grandes grupos principais. Foram utilizados um total de 37 marcadores moleculares, sendo

10 deles previamente estabelecidos e 27 novos. Os resultados indicaram alta diversidade genética entre e dentro das cultivares de lúpulo estudadas, com uma média de heterozigosidade observada teve valores entre 0,22 e 0,86 e uma média de alelos por loci de 3,9. De acordo com os valores foi possível observar 4 subgrupos em relação a genealogia: origem do Late cluster, de cultivares raças europeias, do Brewers Gold e do Fuggle and Northern Brewer. A cultivar Sorachi ace de origem japonês se agrupou com outro genótipo que também possuía um genitor masculino de origem Japonesa, do mesmo modo Southern Cross agrupou-se com outras cultivares provenientes da Nova Zelândia no grupo.

Visando verificar a variabilidade genética Townsend e Henning (2005) utilizaram marcadores AFLP e amplificaram 550 fragmentos para caracterizar 106 variedades de lúpulo, sendo 80 machos e 26 fêmeas. Foi possível agrupar os genótipos em dois grandes grupos e 13 subgrupos, O primeiro grupo foi composto por lúpulo Europeu, enquanto o segundo formou-se de lúpulo híbridos entre Americanos e Europeus silvestres. Os dois principais clusters foram subdivididos com base em uma análise qualitativa em 13 clusters menores (dois femininos, nove masculinos, dois masculinos e femininos).

No Brasil a caracterização das variedades iniciou-se a partir de 1900. Há um zoneamento agroecológico da cultura realizado pela EPAGRI para o estado de Santa Catarina. Fortuna et al. (2023), também avaliaram e caracterizaram morfologicamente 4 variedades de lúpulo em dois ambientes de cultivos (Com adubação orgânica e a tradicional), seus resultados demonstraram que existem diferenças entre as variedades e formando-se dois grupos A: (Cascade, Nugget, Chinook) e B: (Hallertau Mittelfrüh, Columbus) pelo teste de Scott & Knott a 5% probabilidade. Santos et al. (2022), avaliaram a variação fenotípica para o caráter alfa ácido de 28 clones em 7 estados e 29 municípios do Brasil, no qual foram observados variação entre e dentro dos clones, indicando que há 30% de variação entre as cultivares e que 25% são de origem genética demonstrada através do coeficiente de repetibilidade.

Os estudos realizados para avaliar a diversidade genética nas populações de lúpulo nativos são realizados em diferentes ambientes das várias regiões do mundo. Na Europa, por exemplo, estudos têm mostrado que as populações de lúpulo nativo na Eslovênia, Croácia, República Tcheca, Polônia e Irã apresentam populações abundantes e com alta diversidade genética (GRDIŠA et al., 2021; MAFAKHERI et

al., 2020). Na América do Norte, são encontradas variação dentro das três raças de lúpulo nativo com ocorrência em regiões como o noroeste do Pacífico. De acordo com Tembrock et al. (2016), há um processo de especiação simpátrica ocorrendo (na mesma região) entre as três variedades, ecótipo ou subespécie encontradas nos Estados Unidos.

De acordo com os resultados, o lúpulo apresenta elevada variabilidade genética, isso ocorre devido ao seu sistema reprodutivo (alógamia) e estar distribuído em vários continentes (Ásia, América, Europa, Oceania) (PATZAK et al., 2010; SEEFELDER et al., 2000; BASSIL et al., 2008). As análises de morfologia e molecular, demonstram que a variação na espécie corresponde com a origem genealógica e geográfica das cultivares (PATZAK; HENYCHOVÁ, 2018). Da Ásia, provavelmente a espécie migrou para os outros continentes formando *pools* gênicos Americano, Europeu e Asiático. O lúpulo cultivado é derivado principalmente da variedade ou subespécie *Humulus lupulus* var. *lupulus* ou raças europeias que apresenta baixa variabilidade genética quando comparada das variedades devido aos processos seleção e evolução (DARBY, 2005).

As principais variedades landraces cultivadas, são o Fuggle e Goldings na Inglaterra, Tettnanger e Hallertauer Mittlefruer na Alemanha e Saazer na República Tcheca. Estas variedades e seus derivados ocupam hoje ainda uma boa área de produção e são representantes típicos de lúpulos aromáticos europeus com rendimento e teor de resina relativamente baixos (STAJNER et al., 2008). A baixa variação entre as cultivares para várias características químicas entre os genitores maternos em cultivares de elite de domínio pública, ocorre devido a relação de ancestralidade, a maioria do lúpulo atual é descendentes de 'Brewer's Gold'(HENNING, 2006). Henning & Townsend (2005) encontraram baixa variação entre os genitores ou genótipos maternos, este estudo encontrou menor variação em comparação com os genótipos paternos e populações segregantes. Nos estudos, o lúpulo selvagem é utilizado como fonte de variação genética, o que contribuiu para que os genótipos selvagens ou híbridos tivessem mais variação para caracteres qualitativos e quantitativos. Os resultados destacam o status de conservação indicando que está ocorrendo fluxo genético entre as populações e a importância para o desenvolvimento de novas variedades de lúpulo com características aprimoradas. O lúpulo selvagem tem demonstrado maior rusticidade as condições climáticas extremas. *H. lupulus* var. *neomexicanus* tem distribuição e hábitat está

mais intimamente associado com a Cordilheira das Montanhas Rochosas do oeste da América do Norte até o norte do México (TEMBROCK et al., 2016) e Montanhas Chihuahua do México perto de Nuevo Casas Grandes (FRANCKE et al., 1982) regiões localizadas próximas as baixas latitudes de 28° (igual a Lages-SC), indicam que essas populações têm baixa necessidade de luz.

3.5 Características de interesse para a seleção

O lúpulo é susceptível a diferentes tipos de patógenos, incluindo vírus, viroides, bactérias e fungos, o que prejudica o seu rendimento e qualidade. Como resultado, o objetivo principal dos programas de melhoramento genético é a obtenção de variedades resistentes a doenças fúngicas, como a murcha de *Verticillium*, o míldio (*Pseudoperonospora humuli*), o oídio (*Podosphaera macularis*) e a ferrugem. Atualmente, o míldio é a doença fúngica mais grave que ameaça a produção global de lúpulo (SPLICHAL et al, 2017; DARBY, 2005; ENT et al., 2009).

O lúpulo foi cultivado em muitos locais de baixas latitudes, porém, por volta de 1930 um surto de oídio dizimou as plantações no mundo inteiro e fez com que as plantações migrassem para regiões de clima seco sem molhamento foliar, boa disponibilidade de água, com temperaturas baixas, solo arenoso e localizados mais distantes da linha equatorial (SOLOMON, 1930). No Brasil, já foram identificados o oídio (MENDES FAGHERAZZI et al., 2021), relatos de míldio e *Alternaria alternata*, porém, não há produtos químicos registrados no país que sejam eficazes para o controle de pragas e doenças. Consequentemente, os rendimentos das culturas estão sujeitos a flutuações sazonais decorrentes da ocorrência de doenças. Fontes de resistência foram identificadas em genótipos, como a cultivar Vital desenvolvida na República Tcheca com resistência moderada aos fungos e a variedade Hood hops desenvolvidas nos EUA com resistência ao míldio. Porém, as fontes de tolerância comumente são superadas poucos anos depois da sua utilização, sendo esse um problema recorrente na cultura do lúpulo (OBERHOLLENZER, et al., 2011).

Os programas de melhoramento para a cultura buscam também aumentar a qualidade e a quantidade dos alfas ácidos (com concentração acima de 7%). Os lúpulos aromáticos são mais consumidos e apresentam maior valor de mercado. A qualidade do lúpulo está relacionada a baixas quantidades de cohumuleno, aromas e sabores que remetem frutas cítricas e tropicais. O produtor deve atender a um

padrão mínimo de qualidade, conforme estipulado no contrato entre os produtores e as grandes empresas consumidoras. Dessa forma, se o lúpulo produzido não atender a esse padrão mínimo, ele será rejeitado. Alguns agricultores ganham bonificação dependendo de alguns critérios de qualidade do lúpulo, que geralmente está relacionada ao teor de alfa-ácidos e óleos essenciais (DURELLO et al., 2019).

Atualmente no mercado existem várias opções de cultivares, porém, há resistência das grandes empresas produtoras de cerveja ao utilizar novas variedades. As novas variedades só ganham aceitação quando a produção da variedade tradicional for severamente ameaçada, muitas vezes por uma nova doença ou demonstrarem características mais acentuadas de notas de frutas cítricas e doces (DARBY, 2005; LEMMENS, 1998). As variedades tradicionais favoritas específicas são melhoradas agronomicamente, mas tende a manter um aroma o mais próximo possível do original. As dificuldades do melhoramento estão que apesar de utilizar métodos de seleção de pedigree, a complexidade e subjetividade dessa tarefa, aliada ao desconhecimento científico da contribuição do aroma do lúpulo para o aroma e sabor da cerveja, torna muito difícil produzir uma muda que se aproxime do aroma da variedade padrão. Os cervejeiros necessitam também de escala de produção e que características de sabor e aroma sejam padrão e consistente ao longo dos anos para serem utilizadas em suas receitas de cervejas (HENNING, 2006; SEIGNER et al., 2009).

Além disso, é importante a redução da estatura, cones maiores, menor número de ramos ladrões, assim como, substâncias que aumentem a capacidade de estocagem do lúpulo e propriedades de conservar a cerveja (STAJNER et al., 2008) (NESVADBA et al., 2017; NESVADBA et al., 2016; HIERONYMUS, 2012; DARBY, 2005; HAUNOLD, 1981). Em países de clima subtropicais como Brasil são desejáveis cultivares de fotoperíodo neutro e que demonstrem tolerância ao estresse térmico (SANTOS et al., 2022; BRITS, 2008). Programas de melhoramento na África do Sul, México e Colômbia, e programas de teste de variedades na Índia, Argentina e Quênia, têm procurado selecionar variedades adaptadas a fotoperíodos muito mais curtos (DERBY, 2005).

Por outro lado, os lúpulos neomexicanos de baixas latitudes tem ganhado destaque internacional para pequenas cervejarias e refere-se às variedades de lúpulos originários do estado de Novo México nos Estados Unidos, que foram selecionados para desenvolver nas regiões de baixas latitudes. Estes lúpulos têm

uma grande demanda na indústria cervejeira artesanal devido a suas características de sabor e aroma únicos. Algumas das variedades de lúpulo neoamericanas de baixas latitudes mais populares nos Estados Unidos da América: incluem a Medusa, a Sabro e a Zappa, que são utilizadas comumente em cervejas artesanais e comerciais. O lúpulo Medusa tem um sabor e aroma que se descrevem como frutas tropicais, enquanto o Sabro tem notas de coco e pinha. O Zappa, por sua parte, tem um sabor a frutas cítricas e um aroma que reflete a ervas.

A indústria cervejeira do Sul da África desenvolveu 10 variedades de lúpulo locais nos últimos anos. Algumas das variedades de lúpulo cultivadas na África do Sul são: Southern Star: Este lúpulo é conhecido por suas notas cítricas e florais, e é uma variedade de duplo propósito que pode ser utilizada tanto para amargor como para aroma. African Queen: Desenvolvida por uma companhia sul-africana de sementes, este lúpulo tem um sabor e aroma de frutas tropicais, com notas de manga e papaya. Southern Passion: Outra variedade desenvolvida na África do Sul, o Southern Passion tem um perfil de sabor e aroma similar ao African Queen, com notas de frutas tropicais e cítricas. XJA/436: Uma variedade de lúpulo experimental desenvolvida por Hop Breeding Company em colaboração com uma empresa sul-africana, o XJA/436 tem um perfil de sabor e aroma de frutas tropicais e cítricas, com um toque de pinheiro.

É importante mencionar que o uso de lúpulos neomexicanos de baixas latitudes na elaboração de cerveja está em constante evolução e desenvolvimento, o que significa que podem surgir novas variedades com características únicas no futuro possibilitando introdução do lúpulo e áreas marginais ou inapta para as variedades de lúpulo tradicionais (PEARSON, 2013). Contudo, apesar de existir cultivares com fotoperíodo neutro, ainda não estão disponíveis no Brasil. Além disso, o lúpulo apresenta uma complexa interação com o ambiente devido ao grande número de genes envolvidos em seu processo de crescimento e desenvolvimento (MÁRQUEZ GUTIÉRREZ et al., 2022). De acordo com Darby (2005), os genótipos de lúpulo apresentam adaptação específica. Como resultado, embora alguns produtores cultivem lúpulo em diferentes regiões, as variedades podem não apresentam bom desempenho fora da área original onde foram selecionadas (DARBY, 2005).

Ha exceções, como por exemplo, é a descrição do Cascade de origem Americana quando foi introduzido na Argentina e/ou melhorado teve suas notas aromáticas acentuadas, se tornando um “Super Cascade” (TROCHINE et al., 2020). Assim, faz-se necessário avaliar os genótipos nas condições ambientais locais de cultivo para se obter sucesso, devido à alta interação dos genótipos com os ambientes (SANTOS et al., 2022). A grande vantagem da implantação de um programa de melhoramento no Planalto Catarinense, é que esse tipo de ambiente ainda não foi explorado para a produção de lúpulo e a associação das cultivares com o clima podem gerar novos *terroirs*. A definição de *terroir* ainda gera controversas. Para o vinho a Organização Internacional da Vinha e do Vinho (OIV) chegou a uma definição oficial sobre seu significado:

“Terroir: conceito que remete a um espaço no qual está se desenvolvendo um conhecimento coletivo das interações entre o ambiente físico e biológico e as práticas enológicas aplicadas, proporcionando características distintas aos produtos originários deste espaço. Características distintas aos produtos originários deste espaço.” (OIV, 2008).

Dessa forma, podem ser desenvolvidas, por meio do melhoramento genético e a seleção de novas cultivares, cervejas com diferentes perfis e estilos exclusivamente brasileiros, de maior valor agregado (SILVA, 2015).

3.6 Parâmetros genéticos: o início do programa de melhoramento

3.6.1 Herdabilidade e ação genica predominante

As etapas do melhoramento consistem na escolha de genitores, condução de populações segregantes ou desenvolvimento de linhagens, seleção, avaliações preliminares, avaliações de DHEs (Teste de distinguibilidade, homogeneidade e estabilidade) e os VCUs (Ensaio de valor de cultivo e uso) (BORÉM et al., 2013). O trabalho inicial do melhorista consiste na seleção de indivíduos de ocorrência nas regiões ou na introdução de variedades de origem de outros países. Assim, busca-

se o conhecimento da composição genética nos diferentes sistemas de produção e/ou dos principais fatores genéticos (variabilidade genética, herdabilidade, repetibilidade, número de genes, ações gênicas predominantes e as correlações). A avaliação correta, auxilia na escolha dos genitores, na utilização de método de condução da população para a seleção de blocos de cruzamentos e o desenvolvimento de novas cultivares (BORÉM et al., 2013; FALCONER & MACKAY, 1996; CARDELLINO; ROVIRA, 1987).

Para avaliar as estimativas dos parâmetros (fatores) genéticos foram desenvolvidos ao longo dos anos uma série de ferramentas fenotípicas e moleculares. As análises moleculares são caras, exigem laboratórios com equipamentos sofisticados. Dessa forma, não menos precisas, as análises clássicas do melhoramento, baseadas no fenótipo e modelos estatísticos são de fundamental importância. As estimativas são desvios em relação à média, de covariância e semelhança entre parentes (coeficiente de repetibilidade), análises de variância uni e multivariadas, componentes da variância (VENCOVSKY & BARRIGA, 1992).

A variabilidade é o parâmetro genético mais importante, uma população efetiva grande e com a presença de alelos favoráveis está correlacionada positivamente com o sucesso de um programa de melhoramento, sendo obtida através de genitores contrastantes de origens distintas. Quanto maior for a diversidade genética entre dois genótipos, maiores poderão ser as chances de seleção de indivíduos transgressivos superiores, bem como para recombinar descendentes com rendimentos acima da média e outras características agrônômicas desejáveis (HENNING et al., 2004). A variação genética pode ser simplificada e obtida por um modelo estatístico linear que descreve a variação da característica em análise em um conjunto de fatores ou efeitos (VENCOVSKY; BARRIGA, 1992):

$$\sigma G^2 = \sigma F^2 - \sigma E^2$$

onde;

σG^2 = variância de origem genética;

σF^2 = variância de origem fenotípica;

σE^2 = variância de origem ambiental.

De acordo com Vencovsky & Barriga (1992); Falconer & Mackay (1996); Cardellino; Rovira, (1987), é importante também, determinar a variação entre e dentro de uma população, bem como estimativa de herdabilidade e ganhos com a seleção. Para Falconer & Mackay (1996), a porção da variação ou do fenótipo que é de origem genética denomina-se de herdabilidade. Em outras palavras, ela revela a confiabilidade do valor fenotípico como indicador do valor reprodutivo e é obtida pela seguinte fórmula:

$$h^2 = (\sigma^2G / \sigma^2F) \times 100$$

Onde:

h^2 : herdabilidade do caráter

σ^2G : variância genética

σ^2F : variância fenotípica total ($\sigma^2F = \sigma^2G + \sigma^2E$)

σ^2E : variância ambiental

Segundo Cardellino; Rovira. (1987), a herdabilidade pode ser desdobrada em herdabilidade no sentido amplo e no sentido restrito. A variação no sentido amplo é a porção total da variância genética, e a herdabilidade no sentido restrito é resultante dos efeitos aditivos. O processo de melhoramento genético é facilitado, com a utilização da herdabilidade no sentido restrito, uma vez que o fenótipo dos descendentes sempre será a média de seus pais. Porém, a exploração do fenômeno da heterose devido aos efeitos não aditivos ou de dominância é muito desejável para aumento da produtividade e obter altos teores de alfa ácidos. A heterose é definida como desvios (superioridade ou inferioridade) dos descendentes (heterozigotos) em relação aos seus pais (homozigotos).

A herdabilidade não é um caráter imutável, pode ocorrer variação em relação a variação genética presente e do efeito do ambiente (FALCONER & MACKAY, 1996). A grande utilidade desse fator genético para o melhorista é a possibilidade de predição dos ganhos esperados com a seleção e o sucesso da obtenção de genótipos com constituição genética superior. Para aumentar a herdabilidade é necessário ampliar a variabilidade genética e o controle dos efeitos do ambiente, estratificação dos ambientes ou trabalhar com variedade que demonstrem adaptação no sentido amplo (heterozigotas) (BOREM, 2013). No caso do lúpulo, de

acordo com McAdam et al. (2014), a para a maioria dos caracteres de importância agrônômica não superaram 20% de herdabilidade no sentido restrito em estudos realizados na Austrália.

As variedades quando apresentam bons parâmetros (principalmente desempenho produtivo de origem genética) podem ser utilizadas prontamente pelos agricultores. Em outros casos, é necessário adaptar o material exótico e o melhoramento genético da cultura (BORÉM et al., 2013). A escolha dos genitores, o número de parentais envolvidos na formação da população base e ação gênica ou alélica predominante são as etapas muito importantes no programa de melhoramento, já que além dos custos elevados, está envolvido o tempo. Assim, deve-se fazer um planejamento para escolher os genitores que demonstrem alelos favoráveis, ou boa capacidade de combinação para gerar descendentes promissores (BORÉM et al., 2013). Além disso, o melhorista deve sempre estar embasado em aspectos legais na utilização de germoplasma, como a exemplo a lei de proteção de cultivares.

Nas etapas de cruzamento a utilização de genitores de melhor desempenho ou contrastantes (cruzamentos divergentes), geralmente são suficientes para o melhoramento genético de muitas espécies em curto espaço de tempo (BORÉM et al., 2013). Porém, outras vezes indivíduos que não apresentam um bom desempenho podem resultar nas melhores combinações. Um exemplo de obtenção de um bom genótipo é o caso do trigo obtido por Norman Borlaug, no qual, seus genitores apresentavam desempenho produtivo medíocre e suas progênes demonstraram bons resultados quando cruzadas variedades anãs ou semi-anãs com variedades resistentes ao calor.

Estudos iniciais demonstraram que existem potencial para exploração da heterose no lúpulo, porque encontraram dois grupos contrastantes (TOWNSEND et al., 2005; HENNING et al., 1997). Muitas características de importância econômica no lúpulo são controladas por uma combinação de efeitos genéticos aditivos e dominantes (10,11). Níveis significativos ($P < 0,01$) de capacidade específica de combinação foram observados para rendimento, níveis de alfa ácidos, níveis de ácido beta, conteúdo de cohumulona e armazenamento de lúpulo (10). Campo recentemente preenchidos estudos validaram essas descobertas (HENNING, 2005). Henning et al. (1997), em estudos preliminares, mas de alta consistência, utilizou genitores femininos aninhados aos masculinos, por um período de 25 anos,

observou que a capacidade geral de combinação foi maior para um dos genitores masculinos avaliados para os caracteres produtividade e concentração de alfa ácidos, mas demonstra que existem efeitos consideráveis de ação de dominância e que é possível explorar a heterose.

3.6.2 *Endogamia e heterose*

Os Estudos mais importantes sobre o assunto de endogamia e heterose foram desenvolvidos pelo geneticista George H. Shull com a publicação de seu trabalho intitulado “A composição de um campo de milho” e do bioquímico East (1908) que também desenvolveu as bases genéticas para explicar os fenômenos. Ambos os autores realizaram suas contribuições para a ciência, mas as publicações de Shull chamaram mais atenção devido suas discussões serem mais claras sobre o assunto (SHULL, 1908; SHULL, 1952).

A endogamia é a redução do vigor ou depressão dos filhos em relação aos fenótipos dos pais, é resultante do cruzamento entre indivíduos aparentados, ou seja, é a correlação e/ou probabilidade de obtenção de genes de origens comum em um único locus resultando em aumento progressivo de homozigose. De acordo com Allard, (1999), o grau de homozigose em populações depende do sistema de reprodução, estrutura genética da população e o sistema de cruzamento utilizado.

Nas espécies de autofecundação como o trigo, soja e arroz, a depressão causada pela endogamia não é expressiva. De acordo com Allard (1999), plantas autóгамas são mais evoluídas e conservam os genes de interesse em homozigose. As plantas alógamas, em uma população em equilíbrio, ou espécies que se reproduzem assexuadamente são compostos por muitos indivíduos heterozigotos e demonstram maior redução do vigor quando ocorre cruzamento entre indivíduos aparentados. Nas espécies alógamas, a manifestação da perda de vigor não é uniforme.

O sistema de cruzamento ou hibridação pode ocorrer entre irmãos completos, meios-irmãos, pais-filhos, retrocruzamento, além da autofecundação. A forma mais extrema obviamente é a endogamia, ou seja, a manutenção de um indivíduo por autofecundação. Para algumas espécies, em 6 a 8 gerações de autofecundações, as plantas serão consideradas em homozigose para espécies diploides, utilizando como sistema de cruzamento a autofecundação. Expressão apresentada por Allard

(1999), representando o aumento dos loci em homozigose, no processo de autofecundação. Assim, na n -ésima geração de, tem-se: $[(1/2)^{m-1}]$ heterozigotos e $[1-(1/2)^{m-1}]$ homozigotos - Coeficiente de endogamia: $F = 1-(1/2)^n \cdot [(2^{m-1}-1) + 1]^n$, em que n é o nº de locus envolvidos e m o número de gerações. A cada nova geração de autofecundação aumenta 0,50 ou 50% de locus em homozigose, assim, como para os demais cruzamentos de indivíduos aparentados:

Autofecundação = 0,50

Pais-Filhos = 0,25

Irmãos completos = 0,25

Meio irmãos = 0,125

Primos 1º = 0,0625

Os primeiros caracteres a manifestarem a homozigose são os qualitativos, seguidamente aqueles que são regulados por um menor número de genes e em indivíduos com nível de ploidia menor (diploide > triploide > tetraploide) (GRIFFITHS et al., 2016). Os efeitos da endogamia entre plantas ou animais aparentados já são conhecidos por muitos anos, assim, o melhorista deve evitar os cruzamentos ou realizá-los de acordo com seu interesse. A depressão por endogamia pode ser responsável por aparecimento de características indesejáveis, redução da produtividade ou até mesmo a extinção de espécies. No melhoramento, por sua vez, é importante para a manutenção de genótipos em homozigose. Através da homozigose é possível realizar a identificação e eliminação de alelos recessivos letais indesejáveis, fixar caracteres de interesse e realizar a redistribuição da variabilidade genética para obtenção de linhagens, sem perda de alelos (BORÉM et al., 2013).

De acordo com Johanssen (1903), a variação genética entre linhas tende a aumentar e a variação dentro da linha diminui com as sucessivas autofecundações. A porção não aditiva da variância epistática não podem ser utilizadas na seleção das linhagens, pois estas variâncias vão se perdendo a cada geração de autofecundação, à medida que a heterozigose vai sendo reduzida ou redistribuindo. Cockerham (1963), prova matematicamente que devido a endogamia, que as variâncias genéticas aditivas e de dominância alteram suas proporções em espécies autógamias, dessa forma, a variância genética aditiva tende a 2,0 enquanto a

variância de dominância se aproxima de zero. Para os componentes da variância em geração F_g qualquer (t) a variação fenótipo apresentada em termos de covariância C) para gerações aparentadas pode ser expressa como:

$$C = a \cdot \sigma^2_A + d \cdot \sigma^2_D + a^2 \cdot d^2 \sigma^2_{AD} + ad\sigma^2_{AD}$$

Onde,

- σ^2_A = Variância genética aditiva.
- σ^2_D Variância genética de dominância.
- $a^2 \cdot d^2 \sigma^2_{AD}$ = Variância epistática do tipo aditiva e com valores não representativos.

Assim, em uma população com cruzamentos com indivíduos contraste em homozigose, onde a frequência alélica é igual a 0,50, a e d podem ser obtidos pela Fórmula:

$$a = 1 + l_t$$

$$b = \frac{1 + l_t}{1 - l_t} (1 - l_g)^2$$

Onde:

l_t = coeficiente de endogamia na geração do genitor.

l_g = coeficiente de endogamia na geração da descendência.

Quadro 01: Composição da variância genética total com o decorrer das autofecundações.

Gerações	a. σ^2_A	%	d. σ^2_D	%
F2	1	100	1	100,00
F3	3/2	100,00	3/4	75,00
F4	7/4	175,00	7/16	43,75
F5	15/8	187,50	15/64	23,44
F6	31/16	193,75	31/256	12,11
F7	63/32	196,87	63/1024	6,15
F8	127/64	198,43	127/4096	3,10

A heterose e a endogamia são fenômenos opostos, mas relacionados (são as duas faces da mesma moeda). Após ser obtido as linhagens (homozigotos) ou indivíduos com boa capacidade de combinação específica, observa-se a manifestação da heterose. Diferentes conceitos podem ser utilizados para estudar a heterose, de acordo com Falconer (1996) a heterose tradicional é caracterizada pela superioridade dos filhos em relação aos seus genitores, a heterose ou heterobeltose ocorre quando o desempenho do filho é realizado em função do melhor genitor.

A heterose é um fenômeno comum em plantas, cujo nível de expressão depende da diversidade genética envolvida no cruzamento e da capacidade combinatória dos indivíduos. Brewbaker (1969), considera a heterose um recurso extremamente importante para o melhoramento de plantas. Foi graças aos estudos desse fenômeno, heterose, que possibilitaram o desenvolvimento da indústria de mudas e sementes, proporcionando aumento significativo na produção agrícola mundial com o desenvolvimento de híbridos comerciais.

A heterose ocorre quando a interação alélica é não aditiva, ou seja, de dominância e/ou sobredominância. Há várias hipóteses que tentam explicar a heterose, incluindo a hipótese da dominância (DAVENPORT, 1908), a hipótese da sobredominância (HULL, 1945; CROW, 1948), a hipótese da epistasia (WILLIAMS, 1959), o balanço metabólico, a influência de fitohormônios, como o ácido giberélico (ROOD et al., 1988), a metilação do DNA (TSAFTARIS et al., 1997), e a complementação para genes ausentes (FU; DOONER, 2002). De acordo com a hipótese com referência a dominância, o vigor híbrido é atribuído à ação complementar de genes dominantes favoráveis. A maior crítica a essa teoria é que as linhagens com todos os genes efetivos superiores nunca foram encontradas, sendo que, a probabilidade de encontrar tal planta em uma população é muito baixa. Já a hipótese da sobredominância indica que as plantas com maior número de pares de genes heterozigotos são mais vigorosas e produtivas, e que a depressão do vigor por autofecundação ocorre devido ao aumento da homozigose dos alelos (BORÉM, 2013).

3.6.3 Cruzamentos Dialélicos

As bases teóricas de um modelo em esquema de dialelo são descritas por Griffing, (1956). O termo dialelo tem sido definido como um conjunto de p genitores

possíveis e p^2 combinações envolvendo p genitores, estando presentes nas combinações p genitores, o conjunto de $p(p-1)/2$ híbridos e o conjunto de $p(p-1)/2$ híbridos recíprocos, e à apresentação destes tem sido em uma tabela dialélica (GRIFFING, 1956). Os cruzamentos dialélicos são amplamente utilizados em programas de melhoramento de diversas culturas (CRUZ et al., 2012; VEIGA et al., 2005), mais existem poucas informações para a cultura do lúpulo.

As capacidades de combinações, ou seja, a decomposição dos quadrados médios na análise de variância, são discriminadas. Dessa forma, a generalização é realizada de acordo com a natureza da ação gênica envolvida. A capacidade geral de combinação está relacionada a genes de efeitos predominantemente aditivos, além de efeitos de dominância e outras interações epistáticas do tipo aditivo-aditivo. A capacidade específica de combinação está associada aos efeitos de dominância e de outras interações epistáticas, entretanto, os efeitos epistáticos são considerados de pequena magnitude, sendo negligenciados para o efeito da análise (VENCOVSKY & BARRIGA, 1992).

A principal restrição da análise dialélica relaciona-se com sua exequibilidade quando se tem muitos genitores envolvidos, e, conseqüentemente, o número de combinações híbridas a serem obtidas e avaliadas se torna elevado demais e os experimentos atingem dimensões inviáveis. Em algumas situações esses cruzamentos também são difíceis ou impossibilitados devido ao sistema de reprodução. Dessa forma, surgiu o conceito de dialelos parciais. Os cruzamentos em esquemas dialélicos pode ser classificado em tabela dialélica de quatro maneiras possíveis: a tabela completa com todos as combinações possíveis e os genitores; a tabela completa sem a utilização dos genitores; a meia tabela com apenas os híbridos e os genitores, sem os recíprocos; e a meia tabela simples com apenas os híbridos.

De acordo com Vencovsky & Barriga. (1992), cada método de avaliar foi desenvolvido com um objetivo, por exemplo, aqueles que estão envolvidos os recíprocos apresentam por objetivo estudar os efeitos maternos. Os mais utilizados são o método de Jinks & Hayman (1954) e o de Griffing (1956) e o de Gardner & Eberhart (1966). A metodologia de Jinks & Hayman (1954) dá maior ênfase o controle genético da característica, enquanto a metodologia de Griffing (1956) enfoca as capacidades de combinação, e Gardner & Eberhart (1966), dá ênfase a heterose e seus componentes.

Sprague e Eberhart (1977) recomendam duas repetições por local e três a cinco ambientes para avaliações de cruzamentos de milho, porque a interação de efeitos aditivos por ambiente é um fator significativo na manifestação da variância fenotípica. O aumento no número de ambientes reduz o erro e a interação de efeitos aditivos por ambiente, enquanto o aumento no número de repetições somente reduz a contribuição do erro na variância fenotípica (EBERHART et al., 1995).

3.7 Melhoramento do Lúpulo

3.7.1 O histórico do Melhoramento

Há cerca de dez mil anos, o homem iniciou inconscientemente o melhoramento de plantas. De acordo com Damerow (2012), o interesse do homem pelas propriedades alcoólicas, seja para fins recreativo ou medicinal, foi responsável pela domesticação de muitas plantas (como uva, cana-de-açúcar, cevada e o lúpulo) e o desenvolvimento de várias técnicas para a agricultura. O cultivo de lúpulo começou com a coleta de plantas diretamente na natureza, através do desenvolvimento das civilizações teve o início do melhoramento da espécie. Os trabalhos como ciência foram realizados após publicações dos estudos de grandes cientistas, como Charles Darwin (1809 – 1882), e a redescoberta de trabalhos de Gregor Mendel sobre a transmissão e a segregação de caracteres na ervilha. De tamanho importância também temos Johannsen (1903), responsável pelo termo gene e estudo de características quantitativas. Os autores motivaram inúmeros debates que se estenderiam até o início do século vinte, culminando na genética clássica e a biologia molecular.

O melhoramento genético é um processo laborioso, cíclico e demanda mão de obra qualificada. No entanto, o contínuo desenvolvimento de cultivares de lúpulo justifica-se devido ser economicamente viável e ecologicamente correto (ORTON, 2019). O melhoramento é a melhor estratégia não só para o aumento da produtividade e melhoria da qualidade dos produtos agrícolas, mas para manter os elevados índices frente as mudanças climáticas (BORÉM et al., 2013; ALLARD, 1999). O melhoramento foi responsável pela revolução verde e com as novas tecnologias foi possível incrementar 50% da produtividade do lúpulo e aumentar em 4 vezes a produção de lupulina (DARBY, 2005; BEATSON et al., 2008).

De acordo com Lemmens (1998), o primeiro programa de melhoramento de lúpulo que se tem registro foi o da Grã-Bretanha no Wye College em 1906, com o professor Salmon, resultando em mudas de polinização aberta de um lúpulo selvagem do norte americano var. *neomexicanus*. O programa desenvolveu duas variedades conhecidas como Brewers Gold e Northern Brewer que são as bases genéticas do melhoramento de lúpulo devido à resistência ao oídio. O interesse na seleção de variantes de lúpulo cresceu significativamente durante o século XX, quando muitas seleções foram feitas (MOIR, 2000). Os programas foram iniciados em 1908 nos EUA (embora logo interrompidos e reiniciados em Oregon em 1931). Em 1925, o pioneiro Karel Osvald começou hibridações de plantas em Zatec, na República Tcheca com a seleção clonal entre a variedade Saazer (HIERONYMUS, 2012) e na Alemanha o programa foi iniciado em Hüll no ano 1926. Nas regiões de baixas latitudes os programas iniciaram em 1935 na cidade de Waboomskraal na África do Sul A SAB Hop Farms compreende sete agricultores privados independentes e no México em 1980 nas cidades de Valle de Guadalupe, Valle de la Trinidad, Sierra de Juarez, Nuevo Leon (Navidad), Chihuahua (Nuevo Casas Grandes) (FRANCKE et al., 1982).

No Brasil o melhoramento iniciou-se em 2015 na cidade do Rio de Janeiro a primeira empresa Rio Claro Biotecnologia visando o melhoramento do lúpulo que desenvolveu duas variedades o Canastra e a Tupiniqui. No mesmo ano foi fundada a Hops Brasil, criada pelo americano Max Raffaele, empresa responsável pela introdução de várias cultivares e por um programa de melhoramento em São Paulo. Na UNESP campus Jaboticabal o Renan Furlan Gonsaga iniciou o seu trabalho de tese para fins de melhoramento do lúpulo no ano 2017 (GONSAGA, 2021). Na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em Parceria com a empresa (LÚPULO1090) também há presença atividade de pesquisa para o manejo e melhoramento da cultura, contudo, os programas estão em fases iniciais e desenvolveram poucas cultivares (SANTOS et al., 2022).

3.7.2 Os métodos de condução de populações

As técnicas utilizadas para o melhoramento do lúpulo incluem a seleção clonal ou individual, seleção massal, hibridação (inter e intra populacional), seleção

recorrente, retrocruzamento, engenharia genética e uso de marcadores moleculares (BRITS, 2008; HENNING, 2006; NESVADBA et al., 2003). As mutações e a seleção massal foram as primeiras técnicas utilizadas antes mesmo de ter o melhoramento como ciência (pre-1900) (DARBY, 2005). No processo de seleção, mutações aleatórias eram identificadas fenotipicamente nas plantas de lúpulo e as mesmas selecionadas e propagadas vegetativamente. Atualmente, a mutagênese é uma técnica em que as plantas são expostas as mutações, geralmente, por meio de radiação ou produtos químicos, seu uso tem várias restrições e recentemente é utilizada para alterar características qualitativas (sabor e aroma) e criar variantes, como por exemplo o desenvolvimento de plantas anãs no lúpulo. Através da seleção clonal pode-se melhorar uma característica sem grandes alterações no fenótipo da planta. Os outros métodos geram populações segregantes com alta variabilidade, resultando em alterações de características já melhoradas. Foram desenvolvidas algumas variedades atualmente ainda aceitas pelo mercado, como por exemplo o Fuggle, Hallertauer Mittelfriih, Saazer, Mantiqueira e Agnus (SPOSITO et al., 2019; HAUNOLD, 1981).

As duplicações cromossômicas são micro (alteração de perda e ganho de bases nitrogenadas) e macro mutações, nelas ocorrem aberrações, (quebra, perda e ganho de cromossomos), alterações no número de cópias de cromossomos de células de um genótipo. No lúpulo é pouco utilizada devido efeitos negativos, como o aumento da suscetibilidade a mutações e a instabilidade genômica. Os estudos iniciaram em 1966 e em 1976 foram desenvolvidas as primeiras variedades triploides, denominadas de Willamette e Columbia (DARBY, 2005). Os pais tetraploides desempenham um papel importante na criação de lúpulo, pois podem ser cruzados com genótipos diplóides para produzir progênie triplóides. As etapas consistem em obter genótipos diploides ($2n=2x=20$), induzir a sua duplicação cromossômica *in vitro* por meio de agentes antimitóticos para a obtenção de genótipos autotetraploides ($2n=4x=40$) (ŠVĚCAROVÁ et al., 2019). Posteriormente, plantas autotetraploides fenotipicamente estáveis são cruzadas com genótipos diploides para a obtenção de genótipos triploides ($2n=3x=30$) (SKOF et al., 2012). Os genótipos triploides obtidos, podem combinar várias características promissoras, mas principalmente utilizado para resistência a doenças e o desenvolvimento de cultivares para aromas (HIERONYMUS, 2012; TROJAK-GOLUCH et al., 2009; TROJAK-GOLUCH et al., 2013; TROJAK-GOLUCH et al., 2018). As cultivares

triploides ocupam uma considerada área de cultivo, na Nova Zelândia (64%), Eslovênia (36%) e a Austrália (35%) (HIERONYMUS, 2012; SKOF, et al., 2012). Dentre os cultivares de maior importância estão o Cascade (cultivar em uso com três níveis de ploidia diploide, triploide e tetraploide) a Nelson Sauvin e a Galaxy.

A seleção massal é o método mais antigo de melhoramento, consiste em selecionar a melhor ou melhores plantas para a geração seguinte, sem teste de progênie. No lúpulo foi muito utilizada, mas atualmente tem sua importância limitada (HAUNOLD, 1981). O lúpulo é uma espécie polinizada pelo vento, dessa forma, foram criadas variedades de polinização aberta de uma planta fêmea desejável sem conhecer a identidade ou as propriedades genéticas do genitor masculino através da seleção de uma planta ou uma população com alelos desejáveis. Esse método não utiliza teste de progênie e a grande influência do ambiente pode mascarar o verdadeiro valor genético de caracteres quantitativos. A falta da identificação da genealogia da cultivar pode resultar em problemas de processos legais para obter o registro de proteção de cultivares (SNPC-Concessão do título de propriedade intelectual sobre cultivares obtidas por métodos de melhoramento vegetal). Nos Estados Unidos da América, a falta de conhecimento da genealogia resultou num processo judicial, uma vez, que o Columbus e o Zeus são a mesma cultivar patenteadas por duas empresas diferentes (HIERONYMUS, 2012). Exemplos bem-sucedido de variedades da polinização aberta são Bullion, Brewer's Gold, Cascade, Talismã, Galena, Eroica, Registro, Wye Northdown, dentre outras (YAKIMA CHIEF, 2016).

Ao longo dos anos a variabilidade disponível acabou se exaurindo, dessa forma, o lúpulo de origem da Europa apresenta variabilidade restrita para característica de interesse agrônomo e baixos teores de alfa ácidos. Para aumentar a base genética disponível e a seleção de novas cultivares, as variedades selvagens norte-americanas foram hibridadas com variedades europeias (DARBY, 2005; HAUNOLD, 1981). A incorporação do germoplasma norte-americano conferiu variabilidade genética e possibilitou o desenvolvimento de cultivares (HAMPTON et al., 2001; DARBY, 2005).

Porém, os melhoristas perceberam que alguns caracteres indesejáveis estariam sendo incorporada a progênie devido a utilização de genitores masculinos não melhorados e a falta de conhecimento de sua genealogia, podendo resultar em cruzamento de indivíduos aparentados (HENNING, 2006). O método pedigree, foi

utilizado na espécie para contornar efeitos negativos da endogamia e transmissão de caracteres indesejados pelos genitores masculinos. A Diferença Esperada na Progenie (DEP) ou valor genético do genitor é a sua habilidade de transmissão genética quando avaliado as filhas do progenitor. A DEP é utilizada para descrever os potenciais contribuições genéticas que um determinado genitor masculino ou feminino possui. Alguns machos possuem maior capacidade de transmissão de características promissoras para as progênies (HENNING, 2006), assim, foram patenteados e utilizados o pólen de machos específicos. Os estudos da habilidade das genitoras são iniciais, mas estão associadas com as características de sabor e aroma (HENNING, 2006).

A hibridação recorrente é a base do melhoramento atual, envolve cruzamentos de plantas de lúpulo de variedades para selecionar plantas com características desejáveis (HENNING et al., 2005). De acordo com Allard (1999), espécies alógamas de propagação vegetativa são altamente heterozigotas devido ao sistema reprodutivo que propicia trocas de alelos e a manutenção da frequência genica. Desse modo, uma geração de autofecundação pode originar variabilidade genética possibilitando a exploração da heterose (HENNING et al, 2004). O 'Cluster' foi o primeiro resultado da hibridização entre um Cultivar europeu, trazido com a Massachusetts Company em 1629, e uma linhagem de lúpulo americana selvagem (NEVE, 1991). De acordo com Haunold. (1981), a grande vantagem do desenvolvimento de híbridos de lúpulo é que a espécie pode ser propagada vegetativamente, sendo que, as características de interesse podem ser facilmente fixadas e as cultivares geralmente são liberadas após um único ciclo de seleção.

Na era da biotecnologia e inteligência artificial, os melhoristas estão utilizando o "triângulo do melhoramento moderno", que consiste na otimização do uso da genômica, fenômica, *screening* e simulação de fatores ambientais (também conhecido como *envirotypic-assisted* ou *enviromics*) (CROSSA et al, 2021; CASTRO & MOREIRA, 2021). De acordo com pesquisas recentes, os melhoristas estão combinando técnicas modernas com métodos clássicos para acelerar as etapas do melhoramento genético. A biologia molecular auxilia no planejamento dos cruzamentos, minimizando a ocorrência de depressão endogâmica e potencializando o efeito da heterose, entre outros benefícios (WHITE et al., 2007).

Através de trabalhos marcadores QTL (Quantitative Trait Loci) foram realizados mapas genéticos e a identificação de regiões do genoma que expressam

características quantitativas (WHITE et al., 2007). Os estudos identificaram diferentes marcadores QTLs associados para resistência a doenças e alguns envolvidos em processos metabólicos secundário das plantas, como, por exemplo, regiões de expressão de alfa ácido. De acordo com Britis (2008), o primeiro lúpulo transgênico expressando um gene de quitinase foram apresentados mostrando resistência a doenças.

A maioria dos programas de melhoramento de lúpulo utiliza uma combinação de seleção assistida por marcadores moleculares, com os clássicos métodos de pedigree e seleção recorrente recíproca com cruzamentos-teste para seleção de linhagens parentais masculinas e femininas. Além disso, os melhoristas empregam técnicas como retrocruzamento e piramidação de genes de resistência para obter híbridos com múltiplas características desejáveis em um único genótipo. Essas técnicas têm sido amplamente utilizadas para melhorar a resistência a doenças e aumentar a eficiência da seleção (HENNING, 2009). Assim, após todas as etapas, se uma variedade é bem-sucedida durante a seleção, ela é propagada em áreas de escala comercial e colhida para testes pilotos. Seguidamente as linhas experimentais mais promissoras são utilizadas nos testes de fabricação de cerveja e lançada como uma cultivar (HENNING, 2006).

4. CAPÍTULO I: DESEMPENHO E VARIABILIDADE PARA CARACTERES DE INTERESSE AGRONÔMICO E CERVEJEIRO DE GENÓTIPOS DE LÚPULO NO PLANALTO SERRANO CATARINENSE

Resumo: Os estudos visando o melhoramento de lúpulo (*Humulus lupulus*) no Brasil são recentes e buscam estabelecer a autossuficiência da produção. O conhecimento da variabilidade dos genótipos disponível no país é de fundamental importância para o desenvolvimento de um programa de melhoramento de lúpulo. O objetivo do trabalho foi identificar genitores de lúpulo com potencial agrônomo e cervejeiro para o Planalto Catarinense. O delineamento experimental utilizado foi de blocos completos, em esquema fatorial 3 x 4, com 12 tratamentos: (Fator 1: três anos de cultivo (2019, 2020 e 2021) e combinado com o fator 2: quatro genótipos (Cascade, Chinook, Columbus e Hallertau). Os caracteres avaliados foram a massa fresca de plantas (MFP, g), massa verde de cones (MTV, g), a massa seca de cones (MSC, g), os teores de alfa-ácidos (ALFA, %) e a produção (PROD, g planta⁻¹). O genótipo Hallertauer demonstrou melhor desempenho e comportamento diferenciado para os caracteres de massa fresca de plantas, massa seca de cones e produção, quando comparado aos demais. Assim, a partir destes resultados observou-se que, existe variação disponível ao melhoramento genético do lúpulo para esses caracteres, fator que permitirá obter ganhos produtivos no desenvolvimento de novas cultivares, a partir deste genótipo promissor.

Palavras-Chave: *Humulus lupulus* L.; Melhoramento genético vegetal; Genética; Cultivares.

INTRODUÇÃO

O lúpulo (*Humulus lupulus* L.) é uma erva trepadeira, perene, pertencente à ordem das Rosales e à família Cannabaceaea, dioica, de possível origem asiática e adaptado ao clima temperado. A espécie é cultivada em grande escala para a fabricação de cervejas devido a uma resina cristalina (lupulina) produzida por suas inflorescências femininas ou também chamadas comercialmente de cones. A lupulina é composta por alfas, beta-ácidos e óleos essenciais. Suas funções são de

conferir aroma, sabor e estabilidade microbiológica à bebida (ALMAGUE, 2014; HIERONYMUS, 2012).

O Brasil é o terceiro maior produtor e consumidor de cervejas do mundo, o país produziu 14,3 milhões de litros de cervejas em 2022 e conta com cerca de 1700 estabelecimentos comerciais do produto (CERVBRASIL, 2022). As cervejas artesanais são o nicho de mercado no Brasil que vem em franca expansão nos últimos 5 anos (35% ao ano). O Estado de Santa Catarina tem cervejas nacionais premiadas internacionalmente devido a sua melhor qualidade. As cervejas são compostas por quatro elementos: água, malte, leveduras e o lúpulo. A principal dificuldade encontrada no setor é a falta de lúpulo no mercado ou seu custo elevado. O país importa praticamente todo o lúpulo consumido, principalmente dos Estados Unidos, da Alemanha e da República Tcheca. Em 2022 foram importadas cerca de 4 mil toneladas de lúpulo, movimentando um montante de 298 milhões de reais ao ano (IHGC, 2022; COMEXSTAT/MDIC, 2023).

O plantio de lúpulo ocorre predominantemente em latitudes entre 35° à 55° Norte e Sul (HIERONYMUS, 2012) devido, inicialmente, se acreditar que não seria possível produzir lúpulo em países de baixas latitudes. Historicamente no Brasil a espécie já foi cultivada em pequena escala (SILVA, 1868). Recentemente, o plantio da espécie se estende em fases iniciais por 11 estados brasileiros, Santa Catarina é o estado com maior área de cultivo com aproximadamente 8,5 hectares e cerca de 50 produtores (BRASIL, 2022b). O cultivo de lúpulo na região possibilitará atender a demanda local, oferecendo lúpulo fresco de melhor qualidade.

No entanto, a produção de lúpulo sustentável e economicamente viável requer o desenvolvimento de novas cultivares. Por meio do melhoramento genético vegetal é possível desenvolver genótipos híbridos ou transgressivos que possam resultar na obtenção de cultivares mais produtivas com características melhoradas superiores para o sabor e dessa forma, com maior valor agregado (SANTOS et al., 2022). O sucesso do melhoramento genético depende da disponibilidade de uma coleção de germoplasma com frequência de genes com alto potencial (variabilidade efetiva). No Brasil foram registrados no MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) e estão disponíveis para a comercialização cerca de 50 genótipos de lúpulo oriundos dos Estados Unidos e da Alemanha.

Os genótipos mais utilizados e comercializados de domínio público, são: Columbus, Chinook, Cascade e Hallertauer. Os genótipos foram selecionados para

característica de amargor, de duplo propósito e de aroma, ou seja, em relação a sua função na produção da cerveja (HIERONYMUS, 2012). As informações do desempenho individual, da estrutura genética dos genótipos e suas variações fenotípicas estão, diretamente, ligadas a recomendações de cultivares e ao seu uso em programas de melhoramento genético para região Sul (ALLARD, 1999; ORTON, 2019).

O objetivo do trabalho foi caracterizar e identificar genitores de lúpulo com potencial agrônomo e cervejeiro para o Planalto Catarinense.

MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio foi conduzido no jardim experimental implantado na área da Universidade do Estado de Santa Catarina no Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV), em Lages-SC (27°47'S, 50°18' O e 916 m de altitude) Planalto Catarinense, Sul do Brasil em três anos consecutivos (2017 a 2020). O solo do local do estudo é classificado como Cambissolo Húmico Alumínico Léptico (EMBRAPA, 2004), com um horizonte A moderado, textura argilosa e relevo ondulado, e tem as seguintes propriedades: 34% de argila, pH: 5,93, P:10,06 mg dm³; K: 80 mg dm³, MO: 2,61%, Ca: 5,42 cmol dm³ e Mg: 2,10 cmolc dm³. O clima segundo a classificação de Koeppen é o Cfb-Temperado mesotérmico, úmido com verão ameno.

Foram avaliados quatro genótipos de lúpulo (Cascade, Chinook, Columbus e Hallertauer), oriundos de produtores rurais locais. A propagação das mudas foi realizada por via assexuada (rizomas) e o plantio realizado no mês de outubro. O ensaio foi conduzido em sistema de treliças e o espaçamento utilizado foi de 3 m entre linhas e 1 m entre plantas. Para a irrigação foi utilizada uma lâmina de água de 5 L por planta diariamente no período do florescimento até a maturação dos cones. Os tratamentos culturais seguiram as recomendações técnicas para a cultura (DUDDS, 2019). O delineamento experimental utilizado foi blocos completos, em esquema fatorial 3 x 4, com 12 tratamentos: (Fator 1: três anos de cultivo (2019, 2020 e 2021) e combinado com o fator 2: quatro genótipos (Cascade, Chinook, Columbus e Hallertau). Os dados para compor as unidades experimentais foram coletados de duas parcelas experimentais dentro de cada bloco e para as unidades

observacionais foram mensuradas duas plantas (clones) centrais por parcela, e cada parcela foi constituída de 5 plantas, totalizando 10 plantas por tratamento.

As variáveis respostas avaliadas foram a massa fresca de plantas (MFP, g), a massa seca de cones (MSC, g), os teores de alfa-ácidos (ALFA, %) e a produção (PROD, g planta⁻¹). A produtividade (kg ha⁻¹) foi obtida a partir da produção de cones (g planta⁻¹) e estimada por hectare, com densidade de plantio de 3200 plantas. Para a determinação do ponto de colheita foi utilizada a metodologia de acordo com Dodds (2019), que consiste em: 1) Análise da textura do cone (textura que lembra levemente áspero e seco) e; 2) Quantidade de lupulina (altamente presente, com uma cor dourada e o aroma intenso da lupulina). Para a quantificação dos teores/conteúdo de alfas-ácidos, foi utilizada a titulação condutométrica (HOPS 6.B – Conductometric Titration) e HPLC (High performance liquid chromatography) e os valores convertidos em porcentagens de acordo com a análise oficial da American Society of Brewing Chemists (1976):

$$\text{Alfa-ácidos \% (m/m)} = \frac{358 \times \left(\frac{100}{10}\right) \text{final.p.xC}}{379,4 \times W}$$

Onde:

m/m: relação massa dos alfa-ácidos e a massa do acetato de chumbo; final. p: volume do ponto final da titulação da solução de acetato de chumbo usado, em m L⁻¹; 358: massa molecular médio dos α-ácidos; C: concentração da solução de acetato de chumbo, em % (g por 100 m L⁻¹); 379,4: massa molecular do reagente tri-hidrato de acetato de chumbo (II); W = peso inicial da amostra (g).

A homogeneidade de variância foi avaliada pelo teste de Levene e a normalidade dos dados por Shapiro Wilk (STEEL; TORRIE, 1980). A análise global de variância com dados desbalanceados para os caracteres avaliados dos genótipos foi realizada através dos modelos lineares gerais (procedimento GLM) em F a 5% de probabilidade. O modelo matemático utilizado foi:

$$Y_{ijkl} = \mu + \text{Blk}_i + \text{Gen}_j + \text{Ano}_k + \text{Gen}^* \text{Ano}_{jk} + \text{Blk}^* \text{Gen}^* \text{Ano}_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Onde: Y_{ijkl} representa o valor observado da variável resposta do gen_i no Ano_k no Blk_i avaliados em cada unidade experimental; μ é a média geral do ensaio; bloco_i é o efeito do i-ésimo nível do bloco; Gen_j é o j-ésimo nível do fator cultivar; Ano_k

representa o k-ésimo nível do fator ambiente; Gen*Ano_{jk} é o efeito da interação cultivar*ano; Blk*Gen*ano_{ijkl} é efeito do erro dentro de cada parcela e; ϵ_{ijk} é o efeito do erro experimental associado as unidades de observação.

Foi realizado a avaliação da relaxação dos erros entre e dentro para avaliar a precisão das avaliações. Os contrastes univariados ortogonais de interesse foram estabelecidos de acordo com o seguinte esquema: C1: Hallertauer vs Cascade, Chinook e Columbus; C2: Cascade vs Chinook e Columbus; C3: Chinook vs Columbus. As correlações fenotípicas entre todos os caracteres foram estimadas por meio dos coeficientes de correlação de Pearson a 5% de probabilidade e realizado o desdobramento dos efeitos diretos e indireto pela análise de trilha. As análises foram processadas com auxílio computacional SAS (SAS *Ondmands for academics*).

RESULTADOS

De acordo com a análise de variância para o fator genótipo foram observadas diferenças significativas para os caracteres massa fresca de plantas (MFP) e a produção (PROD) ($p < 0,05$). Entretanto, as variáveis massa seca de cones (MSC), alfa-ácidos (ALFA) não apresentaram significância entre os genótipos avaliados. Para o fator ano foi observado diferença apenas para a variável alfa-ácidos (ALFA) (Tabela 03).

Tabela 03. Resumo da análise de variância (Quadrados médios) com a partição dos erros entre e dentro das unidades amostrais para as variáveis massa fresca de plantas (MFP), massa seca de cones (MSC), alfa-ácidos (ALFA) e a produção (PROD) para os genótipos (Gen) de lúpulo. Média de três anos de cultivo consecutivos (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021). Lages-SC, 2021.

FV	GL	MFP (g)	MSC (g)	ALFA (%)	PROD (g planta⁻¹)
Blk	1	5,270	2,901	0,554	121,579
Gen	3	121,753*	2,672	3,194	255,414*
Ano	2	52,612	1,616	11,974*	2,832
Gen*Ano	6	34,619	750	6,106	50,479
Erro dentro	10	29,083	2,023	2,431	52,043

Relação do erro entre e dentro	6	35403,360	1791,040	4,705	50658,578
Total	19/17	216,138	1,270	0,046	31,480
CV (%)		32	60	10	48
Variância genética ($\hat{\sigma}_g^2$)		14,52	320	0,48	34,15
Média geral		341	59	2	367

FV: fontes de variação; GL: graus de liberdade; CV: coeficiente de variação; Blk: Bloco; ^{ns}: não significativo; *: significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

A relação entre o erro entre e dentro não foi significativa, indicando, portanto, que os efeitos entre plantas dentro da mesma unidade amostral são puramente aleatórios. Os valores de variância genética foram altos. Os resultados do teste F evidenciaram que não ocorreram interações entre genótipo e o ano para os caracteres avaliados. No entanto, se na análise de variância apenas uma das comparações envolve poucas diferenças e as outras não, um teste F médio pode falhar, necessitando de uma análise minuciosa dos dados (BANZATTO & KRONKA, 1995). Dessa forma, foram realizados contrastes univariados ortogonais na comparação de médias para avaliar o comportamento dos genótipos, possibilitando, determinar a presença de variabilidade fenotípica entre genótipos ou grupos de genótipos previamente estabelecidos. De acordo com os resultados dos contrastes, apenas o contraste C1, apresentou diferenças significativas a 5% de probabilidade (Tabela 04).

Tabela 04. Resumo dos contrastes univariados (Quadrados médios) para as variáveis: massa fresca de plantas (MFP), massa seca de cones (MSC), alfa-ácidos (ALFA), produção (PROD) para genótipos de lúpulo cultivados em três anos (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021). Lages-SC, 2021.

EFEITO	MFP (g)	MSC (g)	ALFA (%)	PROD (g planta ⁻¹)
C1: Hall vs Cas Chi e Col	376,717*	11,208*	0,147	825,699*
C2: Cas vs Chi e Col	5,965	2,261	2,214	75,121
C3: Chi vs Col	8,669	61	2,479	19,671

*Significativo a 5 % de probabilidade de erro pelo teste F. GL; Graus de liberdade; *: significativo a 5% de probabilidade; hall; Hallertauer ; Cas: Cascade; Chi: Chinook e Col: Columbus.

Para os valores dos contrastes (médias das estimativas) o caráter massa fresca de plantas se observa que o genótipo Hallertauer foi superior aos demais com $493 \text{ g planta}^{-1}$ e uma estimativa produtividade de 1575 g ha^{-1} (dados não mostrados), em relação à média dos genótipos Cascade, Chinook e Columbus. Estes valores expressos de $128 \text{ g planta}^{-1}$ (34% superior), quando comparado a média dos genótipos Cascade, Chinook e Columbus. Enquanto que, nos genótipos Columbus e Chinook observou-se valores médios de $312 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente. Os menores valores médios de massa fresca foram observados de $256 \text{ g planta}^{-1}$ (Cascade), ou seja, 49% inferior ao genótipo Hallertauer.

O genótipo Hallertauer também produziu melhores valores médios para a massa seca de cones (50% superior ou média de 85 g planta^{-1}) quando comparado aos demais genótipos (Dados não demonstrados). Os valores médios obtidos para a massa seca de cones foram: Chinook (51 g planta^{-1}); Columbus (48 g planta^{-1}); e os menores resultados com o Cascade (26 g planta^{-1}). Para os valores do caráter concentração de alfa-ácidos (ALFA) não ocorrem diferenças significativas entre os genótipos e seus valores das concentrações foram baixos (menores que 7%) para todos os genótipos avaliados.

O caráter com maior poder de discriminação dos genótipos foi a produção (Tabela 04, quadrado médio: 825,699). A produção entre plantas dentro de genótipo apresentou uma amplitude de 30g a $1.500 \text{ g planta}^{-1}$ e entre os genótipos de 200 a $650 \text{ g planta}^{-1}$ (Dados não mostrado). O genótipo que demonstrou maior produtividade foi o Hallertauer com média de 604 kg ha^{-1} (Tabela 05). Os demais genótipos não apresentaram diferenças (Tabela 05). O genótipo Columbus foi o que mais se aproximou do Hallertauer, demonstrando produção de 42% abaixo, com média de 347 kg ha^{-1} e o menor valor foi observado para o Cascade com valor médio de 234 kg ha^{-1} ou 61% inferior ao melhor genótipo. No presente trabalho também foram observados valores de incremento (13% ou 47 kg ha^{-1}) para a média de produção quando os genótipos atingiram a maturação no terceiro ano comparado ao primeiro ano do cultivo (Tabela 06).

Tabela 06: Valores médios absolutos e comparação entre as médias para as variáveis produção (PROD, g planta^{-1}) na diagonal superior e diagonal inferior para matéria fresca de plantas (MFP, g planta^{-1}) para genótipos de lúpulo cultivados em três anos (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021). Lages-SC, 2021.

Variável: PROD (kg planta ⁻¹)					
Variável: MFP	i/j	1=604	2=195	3=283	4=346
	1=493	1	409*	321	246
	2=257	*236	1	-88	-151
	3=270	223	13	1	-63
	4=312	181	-55	-42	1

1= Hallertauer ; 2= Cascade; 3=Chinook; 4=Columbus. * Significativo a 5 % de probabilidade de erro pelo teste de Tukey-Krammer.

O processo de examinar a variação, avaliar as correlações fenotípicas e seus desdobramentos em efeitos diretos e indiretos são fundamentais para a seleção de características promissoras para serem utilizadas em programas de melhoramento (CRUZ et al., 2012). Os resultados da Tabela 07 demonstram que a produtividade foi correlacionada positivamente em 0,77 e, com efeito direto elevado de 0,46 para massa fresca de planta (MFP). Para massa seca de cones (MSC) foi observado um valor de 0,85 de correlação, com efeito direto de 0,54 demonstrando valores altos. Por outro lado, não foram verificadas correlações de efeito direto e indireto positivas e significativas entre os alfa-ácidos e caracteres vegetativos ou produtivos.

Tabela 07. Efeito fenotípico direto e indireto das variáveis independentes explicativas: massa fresca da planta (MFP), massa seca dos cones (MSC) e os alfa-ácidos (ALFA), sobre a variável dependente principal produção (PROD). Lages - SC, 2019 a 2021.

VARIÁVEL	EFEITOS	COEFICIENTES DE TRILHA	
MFP	Efeito direto sobre	PROD	0,46
	Efeito indireto via	MSC	0,35
	Efeito indireto via	ALFA	-0,05
	Total		0,77**
MSC	Efeito direto sobre	PROD	0,54
	Efeito indireto via	MFP	0,3
	Efeito indireto via	ALFA	0,01
	Total		0,85**
ALFA	Efeito direto sobre	PROD	0,23
	Efeito indireto via	MFP	-0,10
	Efeito indireto via	MSC	0,02
	Total		0,15^{ns}
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO		0,84	
EFEITO DA VARIÁVEL RESIDUAL		0,40	

**P ≤ 0,01; ns: não significativa por teste de Pearson.

DISCUSSÃO

De acordo com os resultados do contraste C1: Hallertauer vs Cascade; Chinook; Columbus (Tabela 05), o Hallertauer foi superior aos demais genótipos. Dessa forma, apesar do baixo desempenho, há variação entre os genótipos. O uso das estratégias, nos programas de melhoramento, com relação à seleção e desenvolvimento de cultivares, possibilitou a exploração nas regiões antes consideradas marginais ou inaptas para o lúpulo (BLITS, 2008). A primeira etapa do desenvolvimento de novas cultivares de plantas é a introdução de variedades (cultivares recomendados e/ou híbridos) oriundas de outros programas de melhoramento em condições climáticas similares as quais pretende-se introduzir o lúpulo. A avaliação do potencial produtivo e o *scrining* inicial das cultivares presentes no país são extremamente importantes, objetivando selecionar genótipos superiores ou com características a serem utilizados em blocos de cruzamento dirigidos para o melhoramento da cultura em ambiente brasileiro.

Os valores foram superiores aos trabalhos com lúpulo realizados no Brasil, no qual Machado et al., (2018) obteve 200 g planta⁻¹. Os resultados diferenciados entre os autores e os baixos valores encontrados são decorrentes do ambiente de cultivo, práticas de manejo, idade das plantas e da origem das matrizes em que foram obtidas mudas. Para os alfa-ácidos, caráter extremamente importante para definir o amargor das cervejas, os valores foram baixos quando comparados aos descritos para os genótipos elites de lúpulo (com valores de 12-15% de alfa-ácidos). Os genótipos podem ter sido selecionados inicialmente para aroma, assim, apresentam geneticamente baixos valores de alfa-ácidos (valores menores que 7% de acordo com a normatização internacional) independente do ano de cultivo. Resultados similares foram observados por Santos et al. (2022), no qual obteve valores inferiores a 5% de alfa-ácidos para a maioria dos genótipos avaliados. Por outro lado, os autores observaram três genótipos apresentaram valores de 8%, 9% e 15% devido serem geneticamente superior para o caráter (SANTOS et al., 2022).

Para o caráter produção, os valores foram similares a outras regiões de baixas latitudes dos Estados Unidos, Europa e África do Sul para as cultivares sensíveis ao fotoperíodo (no máximo 500 g planta⁻¹). Os resultados demonstram que sob condições climáticas como do Planalto Catarinense de cultivo, há uma redução do índice produtivo para os genótipos avaliados. Na maturação fisiológica (cerca de

3 a 5 anos) espera-se 2000 g planta⁻¹ de cones secos, condição almejada nas regiões de Hallertauer -EUA e Corvalis-ALE. De acordo com Dodds (2019), ocorre baixo desenvolvimento vegetativo das cultivares avaliadas (sensíveis a fotoperíodo) em baixa latitudes o que limita altas produções. Os resultados corroboram com ensaios de Pearson et al. (2018) 350 g planta⁻¹ na Florida-USA e são superiores ao realizado no estado do Paraná-BR com média de 60 g planta⁻¹. Os resultados também são semelhantes à média dos genótipos cultivados na África do Sul com valores de 500 a 1000 g planta⁻¹ de cones verdes (BLITS, 2008).

As diferenças entre os valores de produção de cones obtidos são referentes a resposta dos genótipos ao ambiente de cultivo. Os problemas de adaptação dos genótipos avaliados nas condições do Planalto Catarinense ocorrem, uma vez, que não foram selecionados e desenvolvidos para regiões de baixas latitudes, dessa forma, não expressaram seu total potencial produtivo devido a adaptação do tipo específica. Blits (2009), salienta que as cultivares americanas e alemãs plantadas inicialmente na África do Sul também apresentaram desempenho de produtividade menor de 40 a 60% e nos alfa-ácidos nas mesmas proporções do seu potencial. A falta de adaptação ou baixo desempenho ocorre porque os genótipos de lúpulo atualmente cultivadas no Brasil necessitam, ou desenvolvem melhor, quando é fornecido pelo menos 15 horas de luz diária (TESTA et al., 2020). No planalto catarinense a máxima duração do dia é de cerca de 14 horas e 30 minutos. Plantas dos genótipos cultivadas sob esta condição de duração do dia tendem a florescer prematuramente e, portanto, limitam os rendimentos dos cones (AGEHARA, 2019). Assim, os genótipos que são sensíveis ao fotoperíodo avaliados demonstraram baixo potencial produtivo no sistema de produção utilizado, podendo ser utilizado sistema com iluminação artificial para suprir a falta de horas de luz e obter elevadas produções.

Porém, os melhoristas de plantas estão interessados na variabilidade genética, matéria prima para a aplicação de processos seletivos que resultem em ganhos genéticos significativos para redução da necessidade de horas de luz. As análises morfológicas foram suficientes para discriminar os genótipos avaliados, sendo possível identificar genótipos contrastantes. A presença de variabilidade pode ser explicada pela distribuição geográfica da espécie e por diferentes pressões de seleção (natural e artificial) ao qual cada genótipo foi naturalmente submetido, induzindo alterações nas frequências genicas. O lúpulo tem provável origem

Asiática e no processo de evolução um grupo foi disperso ou levado para a Europa e outro para a América do Norte, sendo esses os três *pools* gênicos a ou centros de diversidade da espécie (PATZAK, 2018; SKOMRA, 2013).

O Hallertauer é um genótipo de lúpulo com uma longa história de desenvolvimento que foi aprimorado por meio de um processo contínuo de mutação e seleção. A pesquisa conduzida por Patzak e Henychová (2018) destacou que as plantas desse genótipo demonstraram notável robustez e alto vigor, indicando elevada adaptabilidade às condições ambientais. A maior adaptabilidade pode ser atribuída, em parte, à menor sensibilidade do genótipo europeu ao fotoperíodo em comparação com outras variedades originárias dos Estados Unidos. Como resultado, o Hallertauer foi capaz de desenvolver maior número de ramos laterais produtivos e completar seu ciclo de crescimento de forma bem-sucedida no ambiente do Planalto Catarinense (dados não apresentados). Essas observações fornecem evidências sólidas de que o Hallertauer possui uma base genética de alta qualidade.

A distinção entre os genótipos de lúpulo ocorreu principalmente devido às suas diferentes origens genéticas. Como observado por Bassil et al. em 2008, o lúpulo tem suas origens em *pools* gênicos distintos, com origens europeias e americanas, o que resulta em variações fenotípicas de grande interesse para programas de melhoramento. A vantagem de utilização dessas constituições americanas atualmente utilizadas podem ter se originado a partir de sementes e, ao longo do tempo, passaram por um processo de aclimação e seleção empírica conduzido pelos agricultores brasileiros, demonstrando desempenho superior ao material exótico não adaptado (Dados não publicados). Durante esse processo, foram identificadas e cultivadas as constituições genéticas superiores.

A propagação moderna do lúpulo, é realizada por meio de clones de híbridos sintéticos, que envolvem uma combinação de retrocruzamento seguido de cruzamentos direcionados. Esse método de melhoramento é eficaz para quebrar os blocos genéticos e liberar a variação disponível na população segregante. Quando dois genótipos são cruzados, isso pode resultar diretamente em uma população segregante com uma alta frequência de genes favoráveis, facilitando a seleção de genótipos que exibem características superiores em relação aos seus genitores.

De acordo com Carvalho et al. (2004), a produtividade tem sido aumentada por meio da seleção de características com ela relacionada. Assim, os resultados

demonstram que planta vigorosas apresentam produções elevadas, devido à presença correlação alta e com seu desdobramento por análise de trilha com valores diretos e significativos ($P \leq 0,01$) entre matéria verde de plantas e massa fresca de cones, massa seca de cones e a produção (Tabela 07). Resultados da eficiência da seleção indireta em lúpulo foram demonstrados por Mafakheri et al., (2020), que obteve correlação fenotípicas positivas entre os caracteres vegetativos, tamanho de cones e rendimento. A falta de correlação significativa entre os caracteres os alfa-ácidos, indica a necessidade de avaliar mais caracteres. De acordo com Hieronymus (2012), o caráter que apresenta maior correlação com os alfa-ácidos é o tamanho dos cones. Esses resultados são extremamente importantes para o melhoramento genético, uma vez que selecionando genótipos com cones maiores e de alto vigor, será possível desenvolver cultivares mais produtivas, sem haver perdas nas taxas de alfa-ácidos.

Contudo, o cultivo de lúpulo inicialmente não depende unicamente de altas produções, uma vez que a planta é responsável por inúmeras funções na produção da cerveja. No início do processo é responsável pelo amargor e estabilidade microbiológica (fervura do mosto ou wirpool), na etapa final confere sabor e aroma a bebida (resfriamento ou dry hopping). De acordo com estudos recentes, o clima, solo, relevo e práticas de manejo associada a constituição genética da cultivar utilizada pode o expressar características únicas e exclusivas de sabor e aroma ao lúpulo ou também denominado de *terroir* que deve ser levado em consideração pelo melhorista (TESTA et al., 2020; VAN HOLLE et al., 2021).

Assim, a seleção de genótipos melhorados para os sabores pode possibilitar o desenvolvimento de cervejas especiais de maior valor agregado, podendo compensar os baixos índices produtivos inicialmente obtidos ou utilização de iluminação, a qual graças ao desenvolvimento de *leds* vem demonstrando viabilidade econômica com seu uso (LELES et al., 2023). Dessa forma, há necessidade de avaliações de análise sensorial, e produtiva do lúpulo cultivado durante várias safras a fim de um zoneamento ou indicação geográfica podendo viabilizar economicamente o cultivo de lúpulo na região Sul do Brasil

CONCLUSÃO

Existe variabilidade entre os genótipos de lúpulo avaliados. O hallertauer apresentou diferenças significativas para os caracteres de massa fresca de plantas (MFP, g), massa verde de cones (MTV, g), a massa seca de cones (MSC, g) e a produção (PROD, g planta⁻¹), quando comparado aos genótipos aclimatados pelos agricultores (Cascade, Chinook e Columbus). Embora os genótipos tenham demonstrados baixo desempenho produtivo, nas condições edafoclimáticas do Planalto Catarinense, há potencialidades de uso dessas constituições genéticas em cruzamentos dirigidos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF BREWING CHEMISTS. Methods of Analysis (7th ed.). Hops-6, Hops-6,B. **The Society**: St. Paul, MN, 1976.

ALLARD, R.W. **Principies of plant breeding**. 2.ed. NewYork: John Wiley & Sons, 1999. 254 p.

BASSIL, N.V.; GILMORE, B.S.; OLIPHANT, J.M.; HUMMER, K.E.; HENNING, J.A. Genic SSRs for European and North American hop (*Humulus lupulus* L.). **Genetic resources and crop evolution**, v. 55, n. 7, p. 959-969, 2008.

BRASILb. MAPA- Ministério da Agricultura e Pecuária. **LÚPULO NO BRASIL: PERSPECTIVAS E REALIDADES**. 2022. Disponível em> https://www.gov.br/agricultura/pt-br/arquivos/livro_lupulo-no-brasil-perspectivas-e-realidade_baixa_semmarcacao.pdf>Acesso em: 28 06 2023.

BRITS G. **Breeding strategy for the hop industry**. South African Breweries Hop Farms, George.2008.

BANZATTO, D.A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 3.ed. Jaboticabal: FUNEP, 1995. 245p.

CARVALHO, F.I.F.; LORENCETTI, C.; BENIN, G. **Estimativas e implicações da correlação no melhoramento vegetal**. Pelotas: UFPel, 2004. 142p.

COMEXSTAT/MDIC. **Plataforma de Consultas e Extrações de Dados Estatísticos do Comércio Exterior Brasileiro**. Brasília, DF: Ministério do

Desenvolvimento, Indústria e Comércio. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/39550>>. Acesso em: 7 ago. 2021.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3.ed. Viçosa: Ed. da UFV. 480p. 2012.

DODDS, K. Hops: **A Guide for New Growers**. NSW Department of Primary Industries, New South Wales, Australia. 2019.

HENNING, J. A.; STEINER, J. J.; HUMMER, K. E. Genetic diversity among world hop accessions grown in the USA. **Crop science**, v. 44, n. 2, p. 411-417, 2004.

HIERONYMUS, S. **For the love of hops: The practical guide to aroma, bitterness and the culture of hops**. Brewers publications, 2012.

LELES, N. R.; SATO, A. J.; RUFAO, L.; JASTROMBEK, J. M.; MARQUES, V. V.; MISSIO, R. F.; FERNANDES, N. L. M.; ROBERTO, S. R. Performance of Hop Cultivars Grown with Artificial Lighting under Subtropical Conditions. **Plants**, [S.l.], v. 12, 2023.

IHGC - Economic Commission Summary Reports. **International Hop 2 Growers' Convention**. Nuremberg, Germany - November 2020. Disponível em: 3 https://www.usahops.org/img/blog_pdf/266.pdf. Acesso em: 18 fev. 2020.

MAFAKHERI, M.; KORDROSTAMI, M.; RAHIMI, M.; MATTHEWS, P. D. Evaluating genetic diversity and structure of a wild hop (*Humulus lupulus* L.) germplasm using morphological and molecular characteristics. **Euphytica**, v. 216, n. 4, p. 1-19, 2020.

MACHADO, M. P.; GOMES, E.N.; FRANCISCO, F.; BERNERT, A. F.; BESPALHOK FILHO, J.C.; DESCHAMPS, C. Micropropagation and Establishment of *Humulus lupulus* L. Plantlets Under Field Conditions at Southern Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, p. 275-281, 2018.

PATZAK, J.; HENYCHOVÁ, A. **Czech Journal of Genetics and Plant Breeding**, v. 54, n. 2, p. 86-91, 2018.

PEARSON, B. J.; SMITH, R. M. Effect of *Humulus lupulus* cultivar on first-year growth and strobile yield utilizing a tall-trellis production system in Florida, United

States. In: **International Symposia on Tropical and Temperate Horticulture-ISTTH2016 1205**. 2018. p. 497-504.

SANTOS, F. C.; SANTOS, D.M.; HUEZSMANN, R. D., C, D.; DE SOUZA, E. M. D.; JUNIOR, C. F. D. S.; COIMBRA, J. L. M. Phenotypic Variability in the Induction of Alpha Acids in Hops (*Humulus lupulus* L.) in Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 14, n. 6, 2022.

SILVA, M A. Introdução do lúpulo pelo senhor comendador Antônio José Gomes Pereira Bastos. **Revista agrícola do imperial instituto fluminense de agricultura**. n 1. p 58. 1868.

SKOMRA, U.; BOCIANOWSKI, J.; AGACKA, M. Agro-morphological differentiation between European hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars in relation to their origin. **Journal of Food Agriculture & Environment**, v. 11, n. 3-4, p. 1123-1128, 2013.

STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. **Principles and procedures of statistics – A biometrical approach**. 2.ed. New York: McGraw-Hill Book Co. 633p, 1980.

ORTON, T.J. **Horticultural Plant Breeding**. Academic Press, 2019.

VAN HOLLE, A., et al. Relevance of hop terroir for beer flavour. *Journal of the Institute of Brewing*, v. 127, n. 3, p. 238-247, 2021.

YAKIMA CHIEF – HOPUNION LLC. HOP VARIETY HANBOOK. Yakima, Washington, 2016.

5. CAPÍTULO II: CAPACIDADE GERAL E ESPECÍFICA DE COMBINAÇÃO DE GENÓTIPOS DE LÚPULO PARA CARACTERÍSTICAS DE INTERESSE AGRONÔMICOS EM UM DIALELO PARCIAL PARA O PLANALTO CATARINENSE

Resumo: Em Santa Catarina e no Planalto Serrano Catarinense o lúpulo tem grande potencial econômico devido sua utilização e o elevado número de pequenas cervejarias. Porém, as cultivares disponíveis no Brasil demonstram baixo desempenho produtivo nas condições climáticas locais, necessitando do desenvolvimento de genótipos superiores. Por meio de cruzamento em esquema de dialelo é possível entender a herança dos caracteres de interesse, auxiliando o melhorista na determinação da ação gênica predominante e explorar os benefícios da heterose. O objetivo do trabalho foi avaliar a capacidade geral e específica de combinação dos genótipos Columbus, Chinook, Cascade e Hallertauer para a obtenção de híbridos com caracteres agronômicos superiores para as condições climáticas do Planalto Catarinense. O delineamento experimental foi blocos ao acaso, com três repetições. Foram utilizados 6 genitores (2 masculinos: Cascade, Hallertauer e 4 femininos: Cascade, Columbus, Chinook e Hallertauer) e os F1s (8 híbridos) totalizando 14 tratamentos. Os resultados demonstraram que a maioria das combinações manifestaram capacidade específica de combinação entre os genitores masculinos e femininos para os caracteres de número de cone (NPC, planta⁻¹), largura do ramo lateral (RML, cm), altura da primeira inserção de cones (ATP, cm), massa verde de plantas (MVP, g. planta⁻¹) e produtividade de cones (PROD, g. planta⁻¹). Para algumas combinações também foram verificados valores elevados de capacidade geral de combinação, indicando a presença de alelos favoráveis. As melhores combinações foram de *pools* gênicos distintos (grupo americano x europeu), e os melhores genitores foram Hallertauer e Cascade, demonstrando a importância da escolha de genitores divergente genética para obter maiores ganhos genéticos.

Palavras chaves: *Humulus lupulus*, novas cultivares, baixa latitude.

INTRODUÇÃO

O lúpulo (*Humulus lupulus*) é uma espécie dioica, perene, de provável origem de clima temperado. As plantas do sexo feminino de lúpulo possuem grande potencial econômico, suas flores contêm lupulina, resina rica em compostos químicos (alfa, beta ácidos e óleos essenciais) utilizados para a produção da cerveja (DURELLO et al., 2019). O estado de Santa Catarina possui o maior número de cervejarias per capita, com cerca de 1 cervejaria para 34 mil habitantes e no Planalto Catarinense, existem várias iniciativas para o desenvolvimento da cultura. Porém, os plantios não são suficientes para abastecer o mercado regional. A principal dificuldade encontrada é a baixa eficiência produtiva e a falta de cultivares melhoradas adaptadas ao clima local (SANTOS et al., 2022). Portanto, o melhoramento genético da cultura e o desenvolvimento de genótipos mais produtivos e com características cervejeiras superiores são de fundamentais importância para consolidar e expandir o cultivo de lúpulo na região (SANTOS et al., 2022).

O conhecimento da herança genética auxilia o melhorista na tomada de decisões para definir estratégias para o melhoramento do lúpulo. Os cruzamentos em esquemas de dialelos são reconhecidos como os mais seguros e eficientes para estimação de parâmetros dos componentes genéticos (GRIFFING, 1956; VENCOVSKY; BARRIGA, 1992). Assim, os principais parâmetros genéticos como capacidade geral (CGC) e específica (CEC) de combinação e herdabilidade são muito importantes para se realizar inferências acerca do controle genético dos caracteres de interesse e desenvolvimento de novos genótipos.

A capacidade geral de combinação (CGC) é definida como resposta média de um genitor em uma série de cruzamentos, sendo usada para estimar os efeitos da ação genica do tipo aditiva. Já a capacidade específica (CEC) é caracterizada como os desvios positivos ou negativos ao valor médio (CGC) dos genitores, e, está relacionada geneticamente a ação do tipo não aditivo de dominância ou sobredominância e permite estudos sobre a heterose (GRIFFING, 1956; VENCOVSKY; BARRIGA, 1992). A partir da heterose, tendo conceitos como diferenças do híbrido comparando-se com a média dos pais, é possível fazer previsões para ganhos com seleção e fixação de alelos superiores através da reprodução assexuada (HENNING et al., 2004; DARBY, 2005; HENNING et al., 2010).

Porém, de acordo com Henning et al. (2005), grande parte do melhoramento genético de lúpulo buscou a seleção de características de ação aditiva, a ação de genes dominantes foi pouco explorada pelos melhoristas. Dessa forma, estudos como este podem orientar os melhoristas para o desenvolvimento de linhas puras masculinas e femininas, formação de blocos de cruzamentos e a seleção de híbridos promissores para regiões subtropicais.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi avaliar a capacidade geral e específica de combinação de Columbus, Chinook, Cascade, Hallertauer para a obtenção de híbridos com caracteres agrônômicos superiores para as condições climáticas do Planalto Catarinense.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento em esquema de dialelo parcial foi realizado na área de pesquisa do Instituto de Melhoramento e Genética Molecular (IMEGEM) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), no Centro de Ciências (UDESC/CAV), em Lages, Santa Catarina. O clima é o Cfb (clima temperado com verão fresco) e temperatura média anual de 15 °C, com precipitação média de 1.500 mm), nos meses de outono a junho dos anos de 2020/2022. Foram utilizados 6 genitores (2 masculinos: Cascade, Hallertauer e 4 femininos: Cascade, Columbus, Chinook e Hallertauer) e os F1s (8 híbridos) totalizando 14 tratamentos (Esquema de cruzamento no anexo 1) (Tabela 08).

Tabela 08. Descrição dos genitores utilizados nos cruzamentos ou mantidos pelo programa de melhoramento da UDESC/CAV. Lages-SC, 2020/2022.

Genótipo	ID	Sexo	Grupos	Origem
Hallertauer	1	F	I	Paraná
Cascade	2	F	I	Paraná
Cascade	3	F	I	Paraná
Columbus	4	F	I	Paraná
Chinook	5	F	I	Paraná
Chinook	6	F	I	Paraná
VPA - Hallertauer	9	M	II	Paraná
VPA - Cascade	11	M	II	Lages-SC

A escolha dos genitores foi baseada no seu histórico, de acordo com o seu desempenho e características desejáveis para a indústria cervejeira, bem como, divergência genética previamente descrita entre os genitores.

Para obter os híbridos, foram selecionados botões florais acima de 2,5 m de altura das plantas. Estruturas femininas foram protegidas com sacos polinizadores para evitar contaminação com material ou pólen indesejado. O pólen dos genitores foi seco em ambiente natural e armazenado em frascos de vidro em geladeira. Os cruzamentos foram feitos pela manhã com inflorescências jovens e receptivas, as polinizações artificiais foram realizadas com uma seringa de pólen imerso em água. Cones polinizados foram identificados, protegidos e colhidos para obtenção das F1s. As sementes das oito combinações (famílias de meio-irmãos) obtidas em 2019/20 e 2020/21 e os genitores propagados assexuadamente foram acondicionados em bandejas de poliestireno expandido com 72 células contendo substrato comercial e cultivadas em casa de vegetação. Quando as mudas se encontravam com duas folhas definitivas, aproximadamente 90 dias após a semeadura, foram transplantadas para vasos plásticos onde permaneceram até a data do cultivo (plantas adultas de 2 anos).

O dialelo foi conduzido em delineamento experimental blocos completos ao acaso, com três repetições. A unidade experimental para os genitores foi composta de 5 clones. Para as progênies, a unidade foi composta de 5 plantas (4 sementes e intercaladamente foram colocadas plantas de um clone do cruzamento) espaçadas em 50 cm e 3 metros entre linhas. Os tratos culturais foram executados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura. Para o manejo da poda foram mantidas 2 hastes principais por planta e para evitar problemas sanitários, foram retiradas as folhas basais de aproximadamente 1 a 1,5 m de altura das plantas. Foram mensurados os componentes da produção: altura da primeira inserção de cones (ATP, cm), altura total da planta (ATT, m), massa verde de plantas (MVP, g. planta⁻¹) e produtividade de cones (PROD, g. planta⁻¹) referente à avaliação dos genitores dos masculinos (Grupo 1) e dos genitores femininos (Grupo 2) e de suas combinações híbridas (F1s).

A homogeneidade de variância e a normalidade dos dados foram verificadas por meio dos testes estatísticos de Levene e Shapiro Wilk. A análise de variância é dada pelo modelo:

$$Y_{ijl} = \mu + \text{Tratamento}_i + e_{ijl}.$$

Onde: Y valores observados; μ é a média geral, Tratamento_i o efeito da População, e e_{ijl} efeito do erro experimental. Posteriormente, foram obtidos os quadrados médios e as estimativas da capacidade geral de combinação (CGC) e capacidade específica de combinação (CEC) na análise dialélica. A análise dialélica foi realizada utilizando o Método II, como definido por Griffing (1956). Portanto, o modelo estatístico para descrever as observações experimentais foi:

$$Y_{ij} = \mu + \frac{1}{2} (d_1 + d_2) + g_i + g_j + s_{ij} + \varepsilon_{ij},$$

Onde: μ : média geral do dialelo; d₁ e d₂ , : contrastes envolvendo médias dos grupos 1 e 2 e a média geral; g_i : efeito da capacidade geral de combinação do i-ésimo progenitor do grupo 1; g_j : efeito da capacidade geral de combinação do j-ésimo progenitor do grupo 2; s_{ij} : efeito da capacidade específica de combinação; e ε_{ij} : erro experimental médio. Para determinar a significância estatística dos efeitos do CGC e da CEC, foi utilizado o teste F.

As estimativas de heterose (H) e heterobeltiose (HB) foram realizadas com base nas fórmulas: $H = ((F1 - VGM) / VGM) \times 100$ e para HB = $((F1 - VGS) / VGS) \times 100$: F1 é o valor do híbrido, o VPM é o valor dos genitores e o VPS representa o valor do genitor de maior valor. Todas as análises estatísticas foram executadas com auxílio dos programas computacionais estatístico Genes e SAS 14.2.

RESULTADOS

De acordo com a análise da variância (ANOVA), foram verificados resultados significativos para os tratamentos (Tabela 09). Assim, foi realizado a partição dos graus de liberdade em efeitos simples para genitores para as características RML, ATP, ATT, MVP e PROD. De acordo com os resultados não há efeitos significativos a 5% de probabilidade para nenhuma característica entre os híbridos avaliados. Porém, o efeito das comparações lineares (contrastos) entre os genitores e a interação genitores e híbrido foi altamente significativo ($p < 0,001$) para os caracteres RML, ATP, ATT, MVP e PROD.

Tabela 09. Resumo da análise de variância (quadrados médios) para largura do ramo lateral (RML, cm), altura da primeira inserção de cones (ATP, cm), altura total da planta (ATT, m), massa verde de plantas (MVP, g. planta⁻¹) e produtividade de cones (PROD, g. planta⁻¹), no segundo ano de cultivo em Lages-SC.

Fonte de variação	GL	QM				
		RML	ATP	ATT	MVP	PROD
Tratamentos	13	3541*	5224*	2,159*	136289*	133271*
Híbridos (H)	7	1878	661	4,678	64579	45685
Genitores (G)	5	2643*	11512*	4,540*	82948*	80662*
H vs, G	1	11345*	4166*	4,678*	436910*	198984*
Resíduo	28	794	1079	0,167	33474	27923
Média (H)		100,31	137,98	4,90	600,90	358,00
Média (G)		67,10	162,38	4,22	394,80	163,78
CV (%)		37,78	32,33	8,86	32,29	59,94

* Significativo a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste de F ns não significativo; GL=graus de liberdade; Qm = quadrados médios.

Os valores da média demonstraram que os híbridos foram superiores ao desempenho de seus genitores para a maioria das variáveis avaliadas (Probabilidade de 0,05%), exceto para ATP. Os resultados obtidos para os híbridos foram de 100,31 cm. planta⁻¹ para RML, para ATP de 137,98 cm. planta⁻¹, ATT com 4,90 m. planta⁻¹, MTV com 600,90 g. planta⁻¹ e 358,00 g. planta⁻¹ para PROD ou quase o dobro dos genitores (Tabela 10). De acordo com os resultados os CVs foram alto para a (PROD): 59,94 %, médios para (RML): 37,78% e (MVP): 32,17% e baixos para (ATP): 22,33%, (ATT): 8,87%.

Os resultados dos desdobramentos dos quadrados médios de tratamentos na análise dialélica demonstraram diferenças significativas entre os genitores e combinações gerais e híbridas dos grupos G₁ (genitores masculinos) e G₂ (genitores femininos). Os quadrados médios do CGC foram maiores do que o do CEC apenas para as variáveis ATP (86%) e PROD (5%) para CGC₂ (Tabela 11).

Tabela 10 - Resumo dos desdobramentos da análise dialélica (quadrados médios) para largura do ramo lateral (RML, cm), altura da primeira inserção de cones (ATP, cm), altura total da planta (ATT, m), massa verde de plantas (MVP, g. planta⁻¹) e produtividade de cones (PROD, g. planta⁻¹) referente à avaliação dos genitores dos

grupos 1 e 2 (G1 e G2) e de suas combinações híbridas, no segundo ano de cultivo em Lages-SC.

Fonte de variação	GL	RML	ATP	ATT	MVP	PROD
Tratamentos	(13)	3541*	5224*	2,159*	136289*	133272*
CGC ₁	1	641	2528	0,201	28482	62872
CGC ₂	3	1086	3037*	0,1947	61127	153337*
CEC	8	4534*	420	1,563*	184891*	146419*
G1 vs G2	1	5855*	52896*	15,480*	80757*	38291
Resíduo	28	1058	1079	0,167	33474	27924
Média de G1		40,45	82,06	2,67	208,00	81,84
Média de G2		80,44	196,83	4,99	486,75	195,25
h ² (%)		71,64	67,0	92,3	74,65	57,26

*Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste de F. GL=graus de liberdade.

Foram observados efeitos significativos para a capacidade geral de combinação do grupo 2 (CGC₂) revelou apenas na variável ATP e PROD, com predominância de genes aditivos. A capacidade específica de combinação (CEC) mostrou diferenças significativas para as variáveis RML, ATT, MVP e PROD. Além disso, no contraste (G1 vs G2) evidenciou diferenças significativas e superioridades do grupo G2 (genitores femininos) para as características RML, ATP, ATT e PROD entre os genitores.

Para as estimativas dos efeitos de CEC dos genitores do grupo 1 e do grupo 2 e das combinações, demonstraram valores positivos e negativos. Entre os genitores do grupo 1 foi observado similaridade do comportamento fenótipo para a maioria dos caracteres e a manifestação desempenho negativos para as características avaliadas, com exceção da ATP. O melhor genitor masculino foi Cascade devido a apresentar os valores maiores para PROD, sugerindo ser mais favorável para este caractere. O Hallertauer demonstrou valores positivos desejáveis para ATP (Tabela 11).

Tabela 11: Efeitos das capacidades específicas de combinação para largura do ramo lateral (RML, cm), altura da primeira inserção de cones (ATP, cm), altura total da planta (ATT, m), massa verde de plantas (MVP, g. planta⁻¹) e produtividade de cones (PROD, g. planta⁻¹) referente à avaliação dos genitores dos grupos 1 e 2 (G1 e G2) e de suas combinações híbridas, após no segundo ano de cultivo em Lages-SC.

GRUPO I ♂		GRUPO II ♀	RML	ATP	ATT	MVP	PROD
Cascade		---	-29,5	0,73	-0,86	-240,2	-73,0
Hallertauer		---	-47,1	6,01	-0,84	-314,1	-212,8
---		Cascade	-28,7	-6,23	-0,62	-155,6	-245,0
---		Chinook	-32,9	9,51	-0,46	-125,7	-83,6
---		Columbus	-25,5	0,43	-0,32	-104,2	-82,6
---		Hallertauer	10,8	3,03	-0,36	-168,8	125,3
Cascade	X	Cascade	20,00	-6,66	0,4	1,1	242,2
Cascade	X	Chinook	33,24	-0,44	0,52	108,9	31,1
Cascade	X	Columbus	33,97	-0,62	0,3	51,9	-80,7
Cascade	X	Hallertauer	-28,1	6,27	0,5	318,6	-46,5
Hallertauer	X	Cascade	38,13	19,12	0,81	310,4	247,7
Hallertauer	X	Chinook	32,58	-18,57	0,41	143,3	136,0
Hallertauer	X	Columbus	17,06	-0,25	0,29	156,3	245,9
Hallertauer	X	Hallertauer	6,49	-12,33	0,17	18,9	-204,1
DP(Sii)			10,91	12,72	0,16	70,9	64,7
DP(Sjj) :			8,91	10,39	0,13	57,9	52,8
DP (Sij) :			13,93	16,29	0,2	81,8	82,9

Os três símbolos sexuais: masculino ♂, o símbolo feminino ♀, e o símbolo híbrido x.

No grupo 2 o genitor feminino Hallertauer foi o que demonstrou os melhores valores para RML (10,8 cm. planta⁻¹) e para PROD (125,3 g. planta⁻¹), indicando ser uma boa constituição fenotípica que pode contribuir para incrementar essas características na população. O Cascade apresentou piores valores negativos para RML, ATP, ATT e MVP, podendo demonstrar menor contribuição, se for considerada, seu desempenho *per se*, para essas características dessa constituição genética em processos de hibridações. No entanto, possui o maior valor negativo para ATP (-6,66 cm. planta⁻¹), possuindo um desempenho superior nesse caractere em comparação com os outros genitores femininos.

Para as combinações híbridas, observou-se que as características superiores não estão sendo transmitida para a progênie. Os melhores híbridos foram aqueles cruzamentos Hallertauer X Cascade, indicando ser a melhor combinação para essas características em relação aos genitores (Tabela 11). O cruzamento exibiu valor de PROD de capacidade específica de 75,09, com rendimento médio de 641 ± 0,987 g. planta⁻¹. Além disso, possui um valor positivo na para PROD, demonstrando um desempenho superior. Em seguida vem o Cascade X Cascade, devido apresentar valores positivos de ATT, RML, MVP e PROD, indicando presença de alelos favoráveis nessas características em relação aos genitores individuais. Além disso, o

valor negativo de ATP contribuiu para diminuição nessa característica. Para as demais combinações apresentaram valores intermediários.

Para os valores de heterose de PROD, foi verificado que o melhor cruzamento foi Hallertauer x Cascade com 476,57 g. planta⁻¹ de heterose e 495,97 g. planta⁻¹ do grupo I e no grupo II com 457,17 g. planta⁻¹ (Tabela 12). Seguidamente vem Cascade X Cascade apresentou heterose média de 401,25 g. planta⁻¹ e heterose positiva tanto no Grupo I masculino 423,2 g. planta⁻¹ quanto no Grupo II feminino 379,3 g. planta⁻¹. A combinação híbrida de Cascade X Hallertauer demonstrou heterose no Grupo I masculino 210,9 g. planta⁻¹, mas uma heterose negativa tanto na heterose média -72,8 g. planta⁻¹ quanto no Grupo II feminino -375,03 g. planta⁻¹.

Tabela 12: efeitos de heterose média, heterose do grupo dos genitores masculinos (GI), heterose do grupo dos genitores femininos para a caráter produtividade de cones (PROD, g. planta⁻¹), após 2 anos de cultivo.

COMBINAÇÃO HÍBRIDA		HETEROSE MÉDIA	HETEROSE GI♂	HETEROSE GII♀
Genitor ♂	Genitor ♀			
Cascade	X Cascade	401,25	423,17	379,33
Cascade	X Chinook	109,40	104,77	114,03
Cascade	X Columbus	-2,93	14,40	-20,27
Cascade	X Hallertauer	-72,67	229,70	-375,03
Hallertauer	X Cascade	476,57	495,97	457,17
Hallertauer	X Chinook	284,22	277,07	291,37
Hallertauer	X Columbus	393,58	408,40	378,77
Hallertauer	X Hallertauer	-160,38	139,47	-460,23

Os três símbolos sexuais; símbolo masculino ♂, o símbolo feminino ♀, e o símbolo híbrido x.

DISCUSSÕES

No trabalho foi observada a presença de alelos favoráveis tanto para as capacidades gerais e específicas, demonstrando que determinados genitores ou combinações podem ser promissores para a seleção dessas características. Os resultados demonstraram que a CGC foi significativa para ATP e PROD indicando a predominância de efeitos aditivos envolvidos no controle genético dos caracteres avaliados. De acordo com a literatura, a CGC é importante no início do programa de melhoramento por facilitar o melhoramento genético das espécies (NASS et al.,

2000). As combinações Cascade X Cascade e Hallertau X Chinook poderão ser selecionados e utilizados, uma vez que hibridações de genótipos com desempenho superiores para esses caracteres são capazes de transmitir alelos favoráveis para suas progênes, independentemente dos genitores com o qual é cruzado e de sua CEC. Cruz et al. (2004) relatam que essa situação é estratégica para obter ganhos nessas características, quando os genitores são utilizados em programas de melhoramento intrapopulacional.

Porém, a combinação Hallertauer X Cascade é a mais desejada no presente estudo para o lúpulo, uma vez, que seus os genitores demonstraram alta frequência de genes favoráveis para CGC, principalmente para os genitores femininos, e boa complementação com os melhores valores para CEC nas suas progênes para os caracteres de interesse demonstrando vigor híbrido (CRUZ & VENCOVSKY, 1989). De acordo com White (2007), a superioridade dos indivíduos heterozigotos (híbridos) possuem características adaptativas quando submetidos as novas condições ambientais ou estresse (baixa disponibilidade de luz). A maior capacidade de adaptação pode ser explicada pela manifestação da heterose que proporciona desempenho superior dos híbridos quando cultivados em condições adversas. Isso pode ser atribuído à variabilidade intraloco, ou reversão de dominância, no qual a presença de dois pares de genes diferentes no mesmo loco pode resultar em uma maior capacidade de manter a homeostase durante o desenvolvimento da planta, ou mudança de comportamento em comparação com os indivíduos homozigotos (PROHENS et al., 1997).

Os cruzamentos que manifestaram capacidade específica de combinação e heterose foram aqueles mais contrastantes fenotipicamente (Capítulo 2). As combinações Cascade x Hallertauer (grupo americano x europeu), Cascade x Columbus (grupo americano x grupo americano) e Hallertauer x Cascade (grupo europeu x grupo americano). Os resultados para RML, ATP e MVP evidenciaram maior importância para CEC e, assim, demonstrando possibilidade de seleção interpopulacional objetivando captar os efeitos da heterose, poderá propiciar ganhos superiores (Tabela 11). Os valores negativos para a ATP são desejados para o melhoramento, devido ao aprimoramento na arquitetura de planta, onde progênes com ramos laterais baixos, são mais produtivas e possuem maior índice de colheita devido facilitar a colheita. A exploração indispensável também da CEC para máxima manifestação dos efeitos de heterose para a expressão da arquitetura de plantas e a

produtividade. A produção de alguns genótipos da combinação Hallertauer x Cascade (1000 g. planta⁻¹) e Hallertauer x Cascade (1450 g. planta⁻¹) foram 3 vezes superiores aos híbridos e o dobro da média nacional de lúpulo (500 g. planta⁻¹), apesar de as plantas estarem apenas no segundo ano de cultivo.

Assim, o critério que deverá ser utilizado para a manifestação da heterose é a divergência entre os genitores masculinos (Hallertauer) e femininos (Cascade, Columbus, Chinook), embora haja influência da frequência gênica média do dialelo. Dessa forma, a análise mais aprofundada dos grupos contrastantes seus intercruzamentos aumentará as chances de obtenção de genótipos superiores transgressivos nas gerações segregantes (CRUZ et al., 2004). Atualmente, é conhecido que os cruzamentos entre genótipos com alta divergência genética em várias espécies de plantas (por exemplo, bom vs. ruim) resulte em combinações híbridas superiores (heterose), a utilização de linhagens endogâmicas oriundas de *pools* gênicos distintos têm sido um critério muito utilizado (REIF; HALLAUER; MELCHINGER, 2005). Hanning et al., (2004); Henning & Townsend, (2005) também encontraram correlações positivas entre a heterose na progênie e a diversidade parental, assim, verificaram que a heterose é inversamente proporcional ao grau de parentesco entre os genitores envolvidos no cruzamento.

No presente estudo, embora compartilhem do mesmo *background* genético e o reduzido de genitores masculinos testados pela falta de disponibilidade no Brasil destas constituições, os genótipos apresentaram características fenotípicas distintas. Dessa forma, as novas populações são importantes devido à variabilidade disponível para o melhorista de lúpulo e principalmente por ser nova fonte de germoplasma para o desenvolvimento de genitores masculinos de alto desempenho, uma vez que a importação ou novas introduções de genótipos masculinos pode ser de custo elevado (SANTOS et al., 2022). Além disso, de acordo com Henning et al. (2004), a dificuldade do melhoramento genético do lúpulo atual é a base genética restrita. Os *pools* gênicos de lúpulo europeu e seus híbridos americanos utilizados em cruzamentos das cultivares são descendentes de poucas linhagens relacionados e possuam um avô ou bisavô em comum resultado em poucos ganhos genéticos, ou depressão por endogamia (LEMMENS, 1998; SKOMRA et al., 2013; PATZAK & HENYCHOVÁ, 2018). Os genótipos nativos de regiões de baixas latitudes, os ecótipos *Neomexicanos*, de grupo mais contrastante são desejados para introdução no Brasil, porém, podem não se adaptar ao clima local ou transmitir características

indesejadas, necessitando de melhoramento do parental masculino que demora vários anos (HENNING, 2006; FRANCKE et al., 1982).

De acordo com Santos et al. (2022), os programas de melhoramento deverão buscar, além, do desenvolvimento de fontes de germoplasma que sejam superiores as cultivares femininos atualmente em uso no Brasil, genótipos com perfis aromáticos cada vez mais específicos, únicos e consistente ao longo dos anos. Os híbridos resultantes dos cruzamentos entre os genótipos Hallertauer, demonstraram combinações híbridas promissoras, por apresentar desempenho superior em relação aos seus genitores. Dessa forma, os resultados deste estudo indicam potencial dos híbridos derivados desse cruzamento também para testes de distinguibilidade, homogeneidade e estabilidade (DHEs) e em linhas experimentais utilizadas para a fabricação de cerveja e/ou ensaios de cultivo e uso (VCUs) (HIERONYMUS, 2012). Os híbridos que apresentarem características aprimoradas poderão ser registradas ou utilizados como genitores nos próximos ciclos de seleção para seleção de novas cultivares de lúpulo ao Planalto Serrano de Santa Catarina. A grande vantagem do desenvolvimento de híbridos de lúpulo é que a espécie pode ser propagada vegetativamente. Desta forma, as características de interesse podem ser facilmente fixadas e as cultivares são liberadas após um único ciclo de seleção (HENNING 2006).

CONCLUSÕES

Existem diferenças fenótipos entre os grupos de genitores avaliados, do grupo 1 (Hallertauer) e do grupo 2 (fêmeas: Cascade e Hallertau) apresentaram alelos favoráveis para as características avaliadas. Os efeitos de capacidades específicas de combinação foram superiores à habilidade geral de combinação na manifestação predominante de genes de ação não aditiva na expressão dos caracteres avaliados, evidenciando o potencial para o desenvolvimento de híbridos.

As combinações Cascade x Halletau (grupo americano x europeu), Cascade x Columbus (grupo americano x grupo americano) e Hallertauer x Cascade (grupo europeu x grupo américa) foram as principais responsáveis por incrementar a média dos caracteres avaliados. A melhores combinações foram Hallertauer e Cascade, demonstrando a importância de escolha de genitores divergente genética.

REFERÊNCIAS

ALLARD, R.W. **Principies of plant breeding**. 2.ed. NewYork: John Wiley & Sons, 1999. 254 p.

AMARAL JÚNIOR, A. T. D.; CASALI, V. W. D.; SCAPIM, C. A.; SILVA, D. J. H. D.; CRUZ, C. D. Análise dialéctica da capacidade combinatória de cultivares de tomateiro. **Bragantia**, v. 55, p. 75-81, 1996.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Agricultura Familiar e Cooperativismo. Departamento de Estruturação Produtiva. **Lúpulo no Brasil: Perspectivas e Realidades**. 1ª edição. Brasília: MAPA/SAF, 175p. 2022.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2012. p. 390.

CRUZ, C.D; REGAZZI A.J; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3.ed. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 480p. 2004.

CRUZ, C. D.; VENCOSKY, R. Comparação de alguns métodos de análise dialéctica. **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão Preto v. 12, n. 2, p. 425- 438, 1989.

DARBY, P. The history of hop breeding and development. **Brew Hist**, v. 121, p. 94-112, 2005.

DURELLO, R.S.; SILVA, L. M.; BOGUSZ, S. Química do lúpulo. **Química Nova**, v. 42, p. 900-919, 2019.

FALCONER, D.S.; MACKAY, T.F.C. **Introduction to quantitative genetics**. Harlow, UK: Longman; 1996.

FRANCKE, J. R.; MUNOZ, A. B.; TREVINO, M. Effect of Growing Conditions on Alpha-Acids Content of Hops Grown in Mexico. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 40, n. 2, p. 50-52, 1982.

GERHAUSER, C. et al. Cancer chemopreventive activity of xanthohumol, a natural product derived from hop. **Molecular cancer therapeutics**, v. 1, n. 11, p. 959-969, 2002.

GRIFFING, B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. **Australian Journal of Biological Science**, 9(4):463-493, 1956.

HENNING, J. A.; TOWNSEND, M. S. **Field-based estimates of heritability and genetic correlations in hop**. **Crop science**, v. 45, n. 4, p. 1469-1475, 2005.

HENNING, J.A.; TOWNSEND, M. S.; KENNY, S. Potential heterotic crosses in hops as estimated by AFLP-based genetic diversity and coefficient of coancestry. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 62, n. 2, p. 63-70, 2004.

HENNING, J. H.; TOWNSEND, M. S.; MATTHEWS, P. A. U. L. Predicting offspring performance in hop (*Humulus lupulus* L.) using AFLP markers. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 68, n. 3, p. 125-131, 2010.

HENNING, J. **The breeding of hop**. In: *Brewing*. Woodhead Publishing, 2006. p. 102-122.

HENNING, John A.; TOWNSEND, M. Shaun; KENNY, Steven. Potential heterotic crosses in hops as estimated by AFLP-based genetic diversity and coefficient of coancestry. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 62, n. 2, p. 63-70, 2004.

HIERONYMUS, S. **For the love of hops: The practical guide to aroma, bitterness and the culture of hops**. Brewers publications, 2012.

LEMMENS, G. W. The breeding and parentage of hop varieties. **Brewers Digest.**, p. 16-26, 1998.

MELCHINGER, A.E., GUMBER, R.K. Overview of heterosis and heterotic groups in agronomic crops. pp. 29-44. In: K.R. Lamkey, J.E. Staub (Ed.), *Concepts and Breeding of Heterosis in Crop Plants*. **CSSA, Madison, WI**. 2005.

MOIR, M. Hops—a millennium review. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 58, n. 4, p. 131-146, 2000.

NASS, L. L.; LIMA, M.; VENCOVSKY, R.; GALLO, P. B. Combining ability of maize inbred lines evaluated in three environments in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, p.129-134, 2000.

NESVADBA, V. Breeding process aimed at dwarf hops. **Kvasný průmysl**, v. 62, n. 6, p. 166–172-166–172, 2016.

NESVADBA, V.; CHARVÁTOVÁ, J.; ŠTEFANOVÁ, L. New Varieties and Perspective Genotypes of Hops. **KVASNY PRUMYSL**, v. 63, n. 5, p. 237–240-237–240, 2017.

NESVADBA, V.; ÈERNÝ, J.; KROFTA, K. Transfer of the hop (*Humulus lupulus* L.) alpha-bitter acid content to progenies of F. **Plant, Soil and Environment**, 49: 269–276. 2013.

NESVADBA, V.; KROFTA, K.; POLONCIKOVA, Z. New knowledge in Czech hop breeding. In: **International hop growers convention, Proceedings of the Scientific Commission**, p. 15-18. 2011.

NEVE, R.A. 1991. **Hops**. **Chapman and Hall**: London (1991), pp. 266. ISBN 0-412-30330-2.

PROHENS, J., RODRÍGUEZ-BURRUEZO, A., NUEZ, F. Breeding Andean Solanaceae fruit crop for adaptation to subtropical climates. **Acta Horticulturae**, p. 129 – 137. 2004.

REIF, J. C., HALLAUER, A. R., MELCHINGER, A. E. Heterosis and heterotic patterns in maize. **Maydica**, 50(3/4), 215. 2005

SANTOS, F. C.; DOS SANTOS, M.; HUEZSMANN, R. D.; CEOLA, D.; DE SOUZA, E. M. D., JUNIOR, C. F. D. S.; COIMBRA, J. L. M. Phenotypic Variability in the Induction of Alpha Acids in Hops (*Humulus lupulus* L.) in Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 14, n. 6, 2022.

SKOMRA, U.; BOCIANOWSKI, J.; AGACKA, M. Agro-morphological differentiation between European hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars in relation to their origin. **Journal of Food Agriculture & Environment**, v. 11, n. 3-4, p. 1123-1128, 2013.

SHULL, G.H. **The composition of a field of maize**. Am. Breed. Assoc. Rep. 4: p. 296-301. 1908.

SMALL, E. A numerical and nomenclatural analysis of morpho-geographic taxa of *Humulus*. **Systematic Botany**, p. 37-76, 1978.

TEMBROCK, L. R.; MCALEER, J. M.; GILLIGAN, T. M. A revision of native North American *Humulus* (Cannabaceae). **Journal of the Botanical Research Institute of Texas**, p. 11-30, 2016.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 496p.

ORTON, T.J. **Horticultural Plant Breeding**. Academic Press, 2019.

PATZAK, J.; HENYCHOVÁ, A. Evaluation of genetic variability within actual hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars by an enlarged set of molecular markers. **Czech Journal of Genetics and Plant Breeding**, v. 54, n. 2, p. 86-91, 2018.

ZHANG, Y.; KANG, M. S.; LAMKEY, K. R. DIALLEL-SAS05: A comprehensive program for Griffing's and Gardner-Eberhart Analyses. **Agronomy Journal**, 97(4):1097-1106, 2005.

WHITE, T.L.; ADAMS, W. T.; NEALE, D. B. (Ed.). **Forest genetics**. Cabi, 2007.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção lúpulo em escala comercial é uma realidade no Brasil, nos próximos anos o país superará a área de cultivo da Argentina e se tornará o maior produtor da América do Sul. O melhoramento deverá contribuir com o aumento da eficiência produtiva do lúpulo nos próximos anos. Este trabalho colabora com as pesquisas de identificação de genótipos e de combinações promissoras de lúpulo, auxiliando os melhoristas para o desenvolvimento de novas cultivares.

O genótipo Hallertauer deverá ser utilizado como genitor masculino e feminino. Recomenda-se não realizar hibridações indivíduos aparentados quando o objetivo é exploração os benefícios da heterose. As progênies masculinas são novos recursos genéticos e deveram ser utilizados nas hibridações e ciclos de seleções. Para atender a demanda, deverá ser selecionadas plantas fotoneutras, de base genética ampla com alelos favoráveis.

Há necessidade de novos estudos para avaliar o desempenho produtivo em outros ambientes de cultivo e caracterização cervejeira das progênies com desempenho produtivo superior aos seus genitores, uma vez que, o mercado de cervejas artesanais está em expansão, apto as novidades. As melhores combinações serão fixadas vegetativamente (estaquia) e disponibilizadas como novas variedades de lúpulo adaptados ao planalto Catarinense.

As técnicas de *Speed Breeding*, marcadores moleculares modernos, associados aos clássicos métodos melhoramento serão importantes ferramentas para acelerar etapas do programa e/ou possibilitaram nos próximos anos grandes avanços do cultivo de lúpulo em Santa Catarina para atender o mercado Brasileiro.

BIBLIOGRAFIA

ALLARD, R.W. **Principies of plant breeding**. 2.ed. NewYork: John Wiley & Sons, 1999. 254 p.

ALMAGUER, C. et al. *Humulus lupulus*—a story that begs to be told. A review. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 120, n. 4, p. 289-314, 2014.

APROLÚPULO. Associação Brasileira de Produtores de Lúpulo. **ESTATÍSTICAS**. Disponível em: < <https://aprolupulo.com.br/estatisticas>>. Acesso em: 28 MAR. 2022.

ARRUDA, A. L.; SOLDI, C.; AGOSTINI, E.; RUFATO, L.; RUFATO, D. P.; Kretzchmar, A. A. Análise da relação entre a caracterização química de cervejas e o conteúdo de alfa ácidos presente em dois cultivares de lúpulo. **REVISTA DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS**, 2023.

BARTHHAAS_REPORT. **Estatistic**. Disponível em: <https://www.barthhaas.com/resources/barthhaas-report#:~:text=The%20worldwide%20hop%20acreage%20rose,Republic%20at%20about%205%2C000%20hectares.<Acessado em: 22 03 2023.>

BASSIL, N.V.; GILMORE, B.S.; OLIPHANT, J.M.; HUMMER, K.E.; HENNING, J.A. Genic SSRs for European and North American Hop (*Humulus lupulus* L.). **Genetic resources and crop evolution**, v. 55, n. 7, p. 959-969, 2008.

BAUERLE, W.L. Disentangling photoperiod from hop vernalization and dormancy for global production and speed breeding. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1-8, 2019.

BAUERLE, Wi. L. Gibberellin A3 induced flowering intensification in *Humulus lupulus* L.: Synchronizing vegetative phase change and photoperiod induction. **Scientia Horticulturae**, v. 302, p. 111183, 2022.

BEATSON, R. A.; ALSPACH, P. A. The use of empirical breeding values to improve genetic progress in hops. In: **II International Humulus Symposium 848**. p. 93-100. 2008.

BEVERLEY, A.J. **The effect of timing of stripping on hop production under south african conditions**. 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomy, University Of Stellenbosch, Stellenbosch, 2015.

BOTAIN, J. **On the origin of Hops: Genetic variability, phylogenetic relationships, and Ecological Plasticity of Humulus (Cannabaceae)**. Doutorado em botânica na University of Hawaii at Manoa, EUA, 2014.

BORÉM A; MIRANDA G.V. **Melhoramento de plantas**. Viçosa: UFV, 523.p. 2013.

BRASILa. Decreto nº 6871, de 04 de junho de 2009. Regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. **Diário Oficial da União, Brasília**, DF, v. 134, n. 248, 04 jun. 2009. Seção 1, p. 27834-2784.

BRASILb. MAPA- Ministério da Agricultura e Pecuária. **LÚPULO NO BRASIL: PERSPECTIVAS E REALIDADES.** 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/arquivos/livro_lupulo-no-brasil-perspectivas-e-realidade_baixa_semmarcacao.pdf> Acesso em: 28 06 2023.

BREWBAKER, J.L. **Heterose.** In: **Genética na Agricultura.** Tradução de Gurgel, J.T.A. and Vencovsky, R. p.107-131. São Paulo: Polígono. 1969.

BRITS, G. **Breeding strategy for the hop industry.** South African Breweries Hop Farms, George. 2008.

CABRAS, I.; HIGGINS, D. M. Beer, brewing, and business history. **Business History**, v. 58, n. 5, p. 609-624, 2016.

CARDELLINO, R.A.; ROVIRA, J. **Mejoramiento genético animal.** Montevideo: Editora Agropecuária Hemisfério Sur, 253 p. 1987.

CASTRO, P.; LUZ, E.; MOREIRA, Gladston. Dataset for Hop varieties classification. **Data in Brief**, v. 38, p. 107312, 2021.

CORNELL, M. **Beer: The Story of the Pint.** Reino Unido, Londres: Headline, 2004.

CROW J.F. 90 years ago: The beginning of hybrid maize. **Genetics.** 148: p.923-928. 1998.

CROSSA, J.; FRITSCHÉ-NETO, R.; MONTESINOS-LOPEZ, O. A.; COSTA-NETO, G.; DREISIGACKER, S.; MONTESINOS-LOPEZ, A.; BENTLEY, A. R. The modern plant breeding triangle: optimizing the use of genomics, phenomics, and enviromics data. *Frontiers in plant science*, v. 12, p. 651480, 2021. CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.;

CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético.** 3.ed. Viçosa: Ed. da UFV. 480p. 2012.

DARBY, P. The history of hop breeding and development. **Brew Hist**, v. 121, p. 94-112, 2005.

DA ROSA, A. A.; MACIEL, M. V. D. O. B., CARDOSO, G. G. B.; MACHADO, M. H., TEIXEIRA, G. L., BERTOLDI, F. C.: BARRETO, P. L. M. Brazilian Grown Cascade Hop (*Humulus lupulus* L.): LC-ESI-MS-MS and GC-MS Analysis of Chemical Composition and Antioxidant Activity of Extracts and Essential Oils. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, p. 1-11, 2020.

DAVENPORT. Degeneration, albinism and inbreeding. **Science**, 28, p. 454 – 455. 1908.

DE LANGE, W. J.; MAHUMANI, B. K.; ENGELBRECHT, F. A. Climate change impacts on South African hop producer prices. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 7, p. 653-659, 2015.

DODDS, K. **Hops a guid for a new growers.** 2019 Disponível em: <<https://www.plantgrower.org/uploads/6/5/5/4/65545169/hops-guide-for-new-growers.pdf>>. Acesso em: 19 de fev. 2020.

DONNER, P. et al. Influence of weather conditions, irrigation and plant age on yield and alpha-acids content of Czech hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars. *Plant, Soil and Environment*, v. 66, n. 1, p. 41-46, 2020.

DURELLO, R. S.; SILVA, L. M.; BOGUSZ, S. Química do lúpulo. **Química Nova**, v. 42, p. 900-919, 2019.

EAST, E.M. **Inbreeding in corn**. Rep. Conn. Agric. Exp. Stn. p. 419-428. 1908.

EBERHART, S. A.; RUSSEL, W. A. Stability parameters for comparing varieties. **Crop Science**, Madison, v. 6, n. 1, p. 36-40, 1966.

ENT, D. H.; BARBOUR, J. D.; DREVES, A. J.; JAMES, D. G.; PARKER, R.; WALSH, D. B.; O'NEAL, S. **Field Guide for Integrated Pest Management in Hops**. Washington Hop Commission, Moxee, WA, USA <https://ipm.wsu.edu/field/pdf/hophandbook2009.pdf>, 2009.

FALCONER, D.S.; MACKAY, T.F.C. **Introduction to quantitative genetics**. Harlow, UK: Longman; 1996.

FIESC- Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina. **Indústria de cervejas e chopes em Santa Catarina**. Disponível em: <<https://observatorio.fiesc.com.br/sites/default/files/2022-08/Ind%C3%BAstria%20de%20cervejas%20e%20chopes%20em%20SC.pdf>> Acesso em: 22 03 2023.

FORTUNA, G. C et al. Agronomic performance of *Humulus lupulus* L. varieties cultivated in organic and conventional systems in São Paulo center-west, Brazil. **Ciência Rural**, v. 53, 2023.

FRANCKE, J. R.; MUNOZ, A. B.; TREVINO, M. Effect of Growing Conditions on Alpha-Acids Content of Hops Grown in Mexico. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 40, n. 2, p. 50-52, 1982.

FU, H., H.K. DOONER. Intraspecific violation of genetic colinearity and its implications in maize. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99: p. 9573-9578. 2002.

GARDNER, C. O.; EBERHART, S. A. Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. **Biometrics**, p. 439-452, 1966.

GONSAGA, R. F. Desenvolvimento de híbridos de lúpulo adaptados às condições tropicais. 113 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – FCAV-UNESP, Jaboticabal. 2021.

GRABOWSKA-JOACHIMIAK, Aleksandra et al. Genome size in *Humulus lupulus* L. and *H. japonicus* Siebold and Zucc.[Cannabaceae]. **Acta Societatis Botanicorum Poloniae**, v. 75, n. 3, p. 207-214, 2006.

GRDIŠA, Martina et al. High Genetic Diversity and Low Population Differentiation in Wild Hop (*Humulus lupulus* L.) from Croatia. **Applied Sciences**, v. 11, n. 14, p. 6484, 2021.

GRIFFING, B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. **Australian Journal of Biological Sciences**, v. 9, p. 463-493, 1956.

HAMPTON, R.; SMALL, E.; HAUNOLD, A. Habitat and variability of *Humulus lupulus* var. *lupuloides* in upper Midwestern North America: a critical source of American hop germplasm. **Journal of the Torrey Botanical Society**, p. 35-46, 2001.

HAUNOLD, A. Hop production, breeding, and variety development in various countries. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 39, n. 1, p. 27-34, 1981.

HENNING, J. The breeding of hop. In: *Brewing*. Woodhead Publishing, p. 102-122. 2006.

HENNING, J. A.; TOWNSEND, M. S. **Field-based estimates of heritability and genetic correlations in hop**. **Crop science**, v. 45, n. 4, p. 1469-1475, 2005.

HENNING, J.A.; TOWNSEND, M. S.; KENNY, S. Potential heterotic crosses in hops as estimated by AFLP-based genetic diversity and coefficient of coancestry. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 62, n. 2, p. 63-70, 2004.

HENNING, J. H.; TOWNSEND, M. S.; MATTHEWS, P. A. U. L. Predicting offspring performance in hop (*Humulus lupulus* L.) using AFLP markers. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 68, n. 3, p. 125-131, 2010.

HENNING, J.; HAUNOLD, A.; NICKERSON, G. Genetic parameter estimates for five traits in male hop accessions: a preliminary study. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 55, n. 4, p. 157-160, 1997.

HENNING, J.A.; TOWNSEND, M. S.; KENNY, S. Potential heterotic crosses in hops as estimated by AFLP-based genetic diversity and coefficient of coancestry. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 62, n. 2, p. 63-70, 2004.

HIERONYMUS, S. **For the love of hops: The practical guide to aroma, bitterness and the culture of hops**. Brewers publications, 2012.

HILL, Steven T. et al. HopBase: a unified resource for *Humulus* genomics. **Database**, v. 2017, 2017.

HULL, F.H. Recurrent selection for specific combining ability in corn. **J. Am. Soc. Agron.** 37: p.134-145. 1945.

JASTROMBEK, J. M.; FAGUERAZZI, M. M.; DE CÁSSIO PIEREZAN, H.; RUFATO, L., SATO, A. J.; DA SILVA RICCE, W.; ROBERTO, S. R. HOP: AN EMERGING CROP IN SUBTROPICAL AREAS IN BRAZIL. **HORTICULTURAE**, V. 8, N. 5, P. 393, 2022.

JINKS, J.L. A análise da variação contínua em um cruzamento dialélico variedades de *Nicotiana rustica*. **Genetics**, v. 39, n. 6, p. 767, 1954.

KORPELAINEN, H.; PIETILÄINEN, M. Hop (*Humulus lupulus* L.): Traditional and present use, and future potential. **Economic botany**, v. 75, n. 3-4, p. 302-322, 2021.

LEMMENS, G. W. The breeding and parentage of hop varieties. **Brewers Digest.**, p. 16-26, 1998.

LIGER.; OTTO. CHIMICA ANALYPTICA – LUPULO DE SÃO LOURENÇO NO RIO GRANDE DO SUL. **Revista agrícola do instituto de agricultura**. Rio de Janeiro: typographia do imperial instituto artístico, n. 1, pg. 160, março de 1885.

MAFAKHERI, M.; KORDROSTAMI, M.; RAHIMI, M.; MATTHEWS, P. D. Evaluating genetic diversity and structure of a wild hop (*Humulus lupulus* L.) germplasm using morphological and molecular characteristics. **Euphytica**, v. 216, n. 4, p. 1-19, 2020.

MARCUSSO, E. F.; MÜLLER, C. V. **Anuário da cerveja no Brasil 2019: Crescimento e inovação**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/pasta-publicacoes-DIPOV/anuario-da-cerveja-no-brasil-2018/view>, 2019>. Acesso em: 18 de fev. 2020.

MÁRQUEZ GUTIÉRREZ, Robert et al. Genome-Wide Analyses of MADS-Box Genes in *Humulus lupulus* L. Reveal Potential Participation in Plant Development, Floral Architecture, and Lupulin Gland Metabolism. **Plants**, v. 11, n. 9, p. 1237, 2022.

MATAMALA, J.D.; MARTÍNEZ, E. **El Lúpulo en la Argentina: historia de su introducción**. 2013. Disponível em: <<https://pulsocervecerero.com/el-lupulo-en-la-argentina-historia-de-su-introduccion/>> Acesso em: 26 abr. 2020.

MCADAM, E. L.; VAILLANCOURT, R. E.; KOUTOULIS, A.; WHITTOCK, S. P. Quantitative genetic parameters for yield, plant growth and cone chemical traits in hop (*Humulus lupulus* L.). **BMC genetics**, v. 15, n. 1, p. 22, 2014.

MENDES FAGHERAZZI, M.; PEREIRA, F. S.; NERBASS, F. R.; RUFATO, L.; GONCALVES, M. J.; BOGO, A.; CASA, R. T.; NASCIMENTO, F. First report of *Podosphaera macularis* causing hop (*Humulus lupulus*) powdery mildew in Brazil. **PLANT DISEASE**, v. 1, p. 02-07, 2021.

MOBOT/Tropicos. Tropicos.org. Missouri Botanical Garden. 2023 <<https://tropicos.org/publication/850>>. Acesso em 14 de julho de 2023.

MOZNY, M.; TOLASZ, R.; NEKOVAR, J.; SPARKS, T.; TRNKA, M.; ZALUD, Z. The impact of climate change on the yield and quality of Saaz hops in the Czech Republic. **Agricultural and forest meteorology**, v. 149, n. 6-7, p. 913-919, 2009.

MULLOY, P. Climate change's impact on beer: What you need to know. **The growler**. Vol. 462, No. 7276, p.1052-1059. 2015. Disponível em: <<https://growlermag.com/climate-changes-impact-on-beer-what-you-need-to-know/>>. Acesso em: 25 06 de jun. 2020.

NESVADBA, V. Breeding process aimed at dwarf hops. **Kvasný průmysl**, v. 62, n. 6, p. 166–172-166–172, 2016.

NESVADBA, V.; CHARVÁTOVÁ, J.; ŠTEFANOVÁ, L. New Varieties and Perspective Genotypes of Hops. **KVASNY PRUMYSL**, v. 63, n. 5, p. 237–240-237–240, 2017.

NESVADBA, V.; ÈERNÝ, J.; KROFTA, K. Transfer of the hop (*Humulus lupulus* L.) alpha-bitter acid content to progenies of F. **Plant, Soil and Environment**, 49: 269–276. <https://doi.org/10.17221/4124-PSE>

NESVADBA, V.; KROFTA, K.; POLONCIKOVA, Z. New knowledge in Czech hop breeding. In: **International hop growers convention, Proceedings of the Scientific Commission**, p. 15-18. 2011.

NEVE, R.A. **Hops**. Chapman and Hall: London (1991), pp. 266. ISBN 0-412-30330-2. 1991.

NEVE, R. A. Hop breeding worldwide—Its aims and achievements. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 92, n. 1, p. 21-24, 1986.

NEVE, R.A. **Plant breeding section: The year's work**. Dept. of hop research annual report, Wye College London, U.k. 1965.

OBERHOLLENZER, K.; SEIGNER, E.; LUTZ, A.; EICHMANN, R.; HÜCKELHOVEN, R. Resistance mechanisms of different hop genotypes to hop powdery mildew. **Of the Scientific Commission**, p. 21, 2011.

OLSOVSKA, J. et al. *Humulus lupulus* L.(hops)—a valuable source of compounds with bioactive effects for future therapies. **Mil. Med. Sci. Lett**, v. 85, n. 1, p. 19-30, 2016.

ORTON, T.J. **Horticultural Plant Breeding**. Academic Press, 2019.

PATZAK, J.; HENYCHOVÁ, A. Evaluation of genetic variability within actual hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars by an enlarged set of molecular markers. **Czech Journal of Genetics and Plant Breeding**, v. 54, n. 2, p. 86-91, 2018.

PATZAK, J.; NESVADBA, V.; KROFTA, K.; HENYCHOVA, A.; MARZOEV, A. I.; RICHARDS, K. Evaluation of genetic variability of wild hops (*Humulus lupulus* L.) in Canada and the Caucasus region by chemical and molecular methods. **Genome**, v. 53, n. 7, p. 545-557, 2010.

PAVOLOVIČ, V.; ČERENAK, A; PAVOLOVIČ, M.; KOŠIR, I.J.; ROZMAN, Č.; BOHANEK, M.; ČEH, B.; NAGLIČ, B. **Modelling of quality prediction for hops (*Humulus lupulus* L.) in relation to meteorological variables**. In Balwois, Ohrid, Republic of Macedonia. 2010.

PEARSON, B.J. Florida Edible Garden Plants: Hops (*Humulus lupulus*). **Apopka: Mid-Florida Research And Education Center**, 2013.

RADTKE, V.M. **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 1999.

RAMIRES, A. Ambev lança projeto de incentivo à cultura de lúpulo. **Revista da Cerveja** 2020. Disponível em: <<https://revistadacerveja.com.br/ambbev-lanca-projeto-de-incentivo-a-cultura-de-lupulo/>> Acesso em: 23 de maio 2020.

RODRIGUES, M.A.; MORAIS, J. S.; CASTRO, J. P. M. **Jornada de lúpulo e cerveja: novas oportunidades de negócios**. Livro de Atas. Bragança. 2015.

ROSSINI, F., et al. Agronomic performance and beer quality assessment of twenty hop cultivars grown in Central Italy. **Italian Journal of Agronomy**, v. 11, n. 3, p. 180-187, 2016.

ROOD, S.B., R.I. BUZZELL, L.N. MANDER, D. PEARCE, R.P. PHARIS. Gibberellins: A phytohormonal basis for heterosis in maize. *Science* 241: p. 1216-1218. 1988.

SALMON, E.S. **Two New Hops Resistant to Verticillium Wilt**. Wye College, Kent. 1949.

SALMON, E.S. and W.M. WARE. **The downy mildew of the hop and its epidemic occurrence in 1924**. *Ann. Biol.*, 12(2): 121±151. 1925.

SANTOS, F. C.; DOS SANTOS, M.; HUEZSMANN, R. D.; CEOLA, D.; DE SOUZA, E. M. D., JUNIOR, C. F. D. S.; COIMBRA, J. L. M. Phenotypic Variability in the Induction of Alpha Acids in Hops (*Humulus lupulus* L.) in Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 14, n. 6, 2022.

SEBRAE- Serviço de apoio as pequenas empresas. **O mercado de cervejas artesanais no Brasil e em Santa Catarina**. 2018. Disponível em: <<https://atendimento.sebrae-sc.com.br/inteligencia/cenario/o-mercado-de-cervejas-artesanais-no-brasil-e-em-santa-catarina>> Acesso em: 31 de maio de 2020.

SEEFELDER, S.; EHRMAIER, H.; SCHWEIZER, G.; SEIGNER, E. Genetic diversity and phylogenetic relationships among accessions of hop, *Humulus lupulus*, as determined by amplified fragment length polymorphism fingerprinting compared with pedigree data. **Plant breeding**, v. 119, n. 3, p. 257-263, 2000.

SEIGNER, E.; LUTZ, A.; OBERHOLLENZER, K.; SEIDENBERGER, R.; SEEFELDER, S.; FELSENSTEIN, F. BREEDING OF HOP VARIETIES FOR THE FUTURE. **Acta Horticulturae**, (848), 49–58. 2009.

SILVA, C.T.D. **CARACTERIZAÇÕES QUÍMICAS DOS PRIMEIROS CULTIVARES DE LÚPULO (*Humulus lupulus* L.) PRODUZIDOS NO BRASIL**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2015.

SILVA, M A. Introdução do lúpulo pelo senhor comendador Antônio José Gomes Pereira Bastos. **Revista agrícola do imperial instituto fluminense de agricultura**. n 1. p 58. 1868.

SHEPHARD, H. L. et al. Sexual development and sex chromosomes in hop. **New Phytologist**, v. 148, n. 3, p. 397-411, 2000.

SHULL, G.H. **The composition of a field of maize**. Am. Breed. Assoc. Rep. 4: p. 296-301. 1908.

SHULL, G. H. **Beginnings of the heterosis concept**. In: GOWEN, J. W. (Ed. Heterosis. Ames: Iowa State Uni. Press), p. 14 – 48. 1952.

SKOF, S.; CERENAK, A.; JAKSE, J.; BOHANEK, B.; JAVORNIK, B. Ploidy and sex expression in monoecious hop (*Humulus lupulus*). **Botany**, v. 90, n. 7, p. 617-626, 2012.

SPÓSITO, M. B.; ISMAEL, R. V.; DE ALCÂNTARA BARBOSA, C. M.; TAGLIAFERRO, A. L. **A cultura do lúpulo**. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Caio_Morais_De_Alcantara_Barbosa/publication/334672293_A_Cultura_do_Lupulo/links/5d3dcb5a299bf1995b524c08/A-Cultura-do-Lupulo.pdf> Acesso em: 02 de mai. 2020.

STAJNER, N. et al. Genetic structure and differentiation in hop (*Humulus lupulus* L.) as inferred from microsatellites. **Euphytica**, v. 161, p. 301-311, 2008.

ŠVÉCAROVÁ, M.; NAVRÁTILOVÁ, B.; HAŠLER, P.; ONDŘEJ, V. Artificial induction of tetraploidy in *humulus lupulus* L. using oryzalin. **Acta agrobotanica**, v. 72, n. 2, 2019.

SPLICHAL, K.; HATTERMAN-VALENTI, H.; BERGMAN, J.; TJELDE, T. Hop Selections for North Dakota. In: **2017 ASHS Annual Conference**. ASHS, 2017.

SUNG, S., AMASINO, R.M. Molecular genetic studies of the memory of winter. **Journal of Experimental Botany**. v. 57, n. 13, p. 3369-3377, 2006.

TEMBROCK, L. R.; MCALEER, J. M.; GILLIGAN, T. M. A revision of native North American *Humulus* (Cannabaceae). **Journal of the Botanical Research Institute of Texas**, p. 11-30, 2016.

THOMAS, G.G.; SCHWABE W.W. Factors controlling flowering in the hop (*Humulus lupulus* L.) **Ann Bot.** p.33:781–793. 1969.

TOWNSEND, M. Shaun; HENNING, John A. Potential heterotic groups in hop as determined by AFLP analysis. **Crop Science**, v. 45, n. 5, p. 1901-1907, 2005.

TROCHINE, A. et al. Chemical characterization of the two major hop varieties produced in Patagonia (Argentina) for the brewing industry. **Monatsschrift für Brauwissenschaft**, v. 73, p. 96, 2020.

TROJAK-GOLUCH, A.; DEPTA, A.; AGACKA, M. Induction of tetraploids in hop (*Humulus lupulus* L.) using in vitro cultures. **Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica**. Supplement, v. 1, n. 51, 2009.

TROJAK-GOLUCH, A.; SKOMRA, U. Artificially induced polyploidization in *Humulus lupulus* L. and its effect on morphological and chemical traits. **Breeding science**, v. 63, n. 4, p. 393-399, 2013.

TROJAK-GOLUCH, A.; SKOMRA, U. Breeding of triploid common hop cultivars (*Humulus lupulus* L.). **Polish Journal of Agronomy**, 3-10, 2018.

TSAFTARIS, A.S. Molecular aspects of heterosis in plants. *Physiol. Plant.* 94: p. 362-370. 1995.

VAN HOLLE, Ann et al. Single nucleotide polymorphisms and biochemical markers as complementary tools to characterize hops (*Humulus lupulus* L.) in brewing practice. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 67, n. 13, p. 3761-3771, 2019.

VEIGA, R. D.; FERREIRA, D. F.; RAMALHO, M. A. P. Eficiência dos dialelos circulantes na escolha de genitores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 7, p. 1395-1406, 2000.

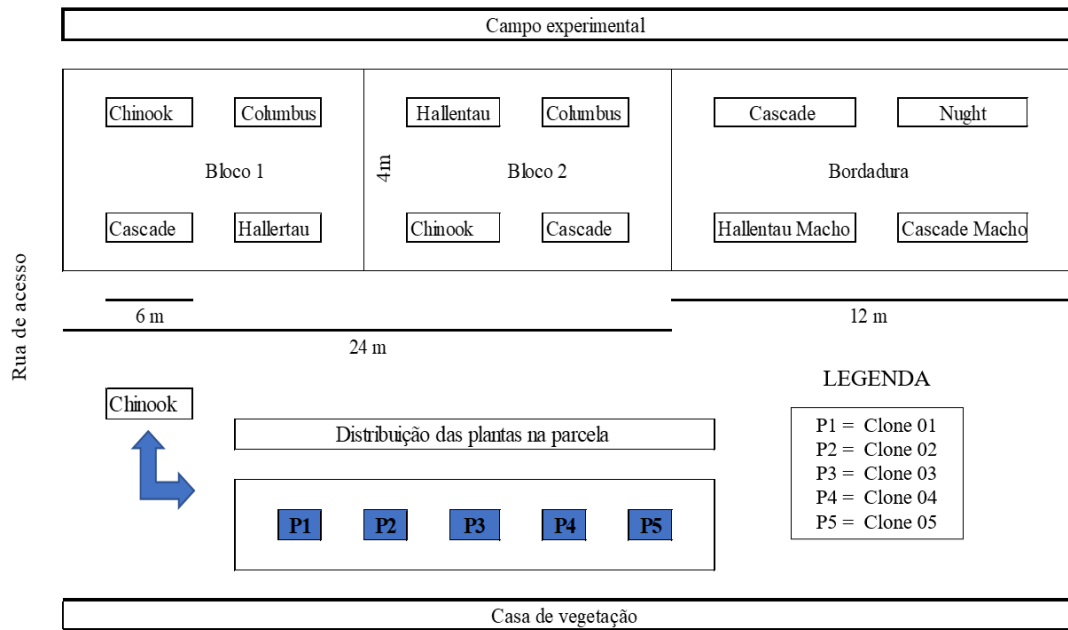
VENCOVSKY, R., BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 395p.

WILLIAMS, W. Heterosis and the genetics of complex characters. **Nature**, 184(4685), p. 527.1959.

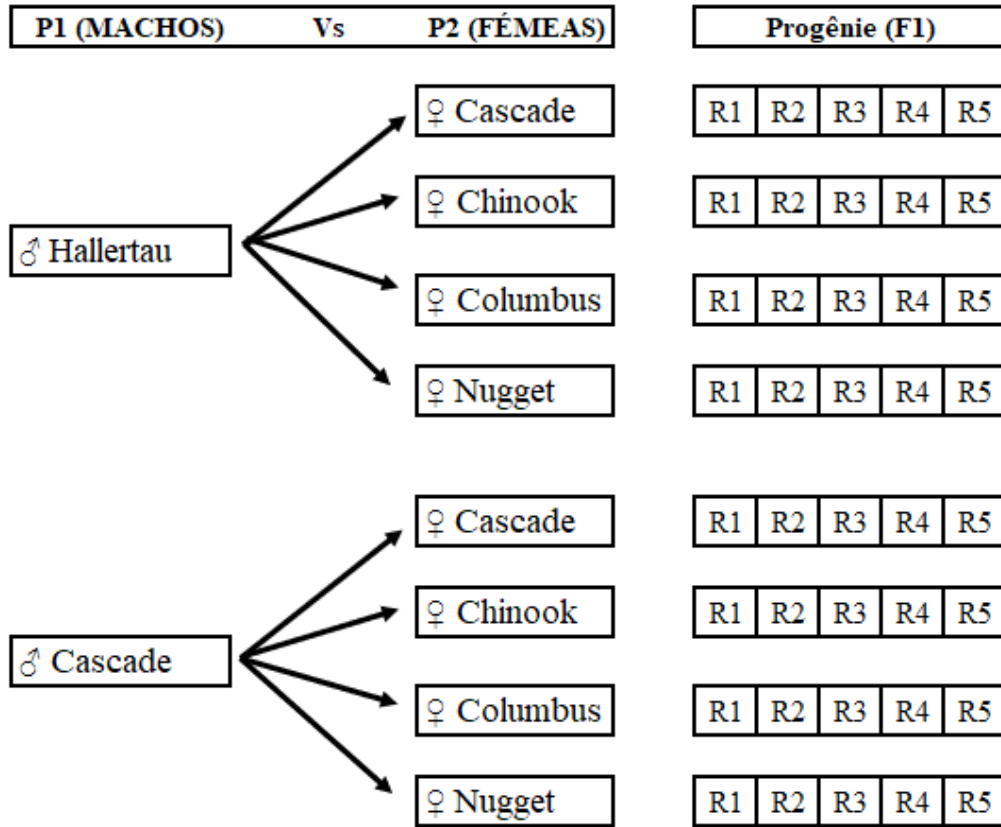
WHITE, T.L.; ADAMS, W. T.; NEALE, D. B. (Ed.). **Forest genetics**. Cabi, 2007.

YAKIMA CHIEF – HOPUNION LLC. **HOP VARIETY HANBOOK**. Yakima, Washington, 2016.

ANEXO I: Croqui experimento adaptação e genótipos parentais.



ANEXO II: Esquema de cruzamentos para o dialélo.



*R: Repetições

ANEXO III: Organograma

