

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

RAQUEL CARLOS FERNANDES

**CULTIVO DE LÚPULOS CASCADE E CHINOOK SOB DIFERENTES UMIDADES
DE SOLO**

**LAGES, SC
2024**

RAQUEL CARLOS FERNANDES

**CULTIVO DE LÚPULOS CASCADE E CHINOOK SOB DIFERENTES
UMIDADES DE SOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Alves Moreira

**LAGES, SC
2024**

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

Fernandes, Raquel Carlos
Cultivo de lúpulos Cascade e Chinook sob diferentes
umidades de solo / Raquel Carlos Fernandes. -- 2024.
138 p.

Orientador: Marcelo Alves Moreira
Coorientador: Jackson Adriano Albuquerque
Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2024.

1. Humulus lupulus . 2. déficit hídrico. 3. capacidade de
campo. 4. alfa ácidos. 5. perfil de voláteis . I. Moreira, Marcelo
Alves . II. Albuquerque, Jackson Adriano . III. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do
Solo. IV. Título.

RAQUEL CARLOS FERNANDES

**CULTIVO DE LÚPULOS CASCADE E CHINOOK SOB DIFERENTES
UMIDADES DE SOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Ciência do Solo.

BANCA EXAMINADORA

Orientador:



Documento assinado digitalmente
MARCELO ALVES MOREIRA
Data: 29/02/2024 10:26:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Marcelo Alves Moreira
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membros:



Documento assinado digitalmente
DAVID JOSE MIQUELLUTI
Data: 29/02/2024 11:10:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. David José Miquelluti
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC



Documento assinado digitalmente
CRISTIANO ANDRE STEFFENS
Data: 29/02/2024 13:01:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Cristiano André Steffens
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC



Documento assinado digitalmente
VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN
Data: 29/02/2024 14:01:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Valeria Cristina Rodrigues Sarnighausen
Universidade Estadual Paulista



Documento assinado digitalmente
THIAGO BERGLER BITENCOURT
Data: 29/02/2024 12:42:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Thiago Bergler Bitencourt
Universidade Federal da Fronteira Sul

Lages, 28 de fevereiro de 2024

AGRADECIMENTOS

À Deus,
aos familiares,
aos amigos,
aos professores,
à UDESC,
às agências de fomento Capes e UNIEDU,
à cervejaria AMBEV.

“Os seres humanos podem ansiar pela certeza absoluta, podem aspirar a alcançá-la; [...] Mas a história da ciência – de longe o mais bem-sucedido conhecimento acessível aos humanos – ensina que o máximo que podemos esperar é um aperfeiçoamento sucessivo de nosso entendimento, um aprendizado por meio de nossos erros, uma abordagem assintótica do Universo, mas com a condição de que a certeza absoluta sempre nos escapará.”

Carl Sagan.

RESUMO

O lúpulo é usado comercialmente, em sua grande maioria, para a fabricação de cerveja e o Brasil é um importante produtor e consumidor da bebida no mundo. Entretanto, o cultivo do lúpulo no Brasil é recente e pouco é conhecido sobre os efeitos da umidade do solo na cultura. Este trabalho tem como objetivo avaliar diferentes níveis de irrigação durante o ciclo de cultivo do lúpulo sobre variáveis de rendimento e qualidade química das cultivares Cascade e Chinook. Os tratamentos foram níveis de umidade do solo mantidas a 97, 83 e 69% da capacidade de campo do solo (CC) durante todo o ciclo e 83% da CC mais 4 dias sem irrigação na pré-colheita dos cones (83CCpc). O experimento foi conduzido em estufa, no viveiro da Engenharia Florestal do CAV/UDESC em Lages, nas safras 2021/2022 e 2022/2023. As plantas foram cultivadas em vasos de capacidade de 25 litros, em sistema de condução vertical com sisal, e utilizou-se um solo classificado como Cambissolo Húmico alumínico típico. Duas vezes por semana, durante o cultivo, os vasos foram pesados em balança eletrônica e a umidade gravimétrica foi ajustada quando necessário. Avaliou-se duração do ciclo, altura de plantas, massa fresca da parte aérea, produção de cones por planta, comprimento e largura dos cones, massa fresca e seca dos cones, teores de alfa e beta ácidos, atividade antioxidante total, teor de compostos fenólicos totais e perfil de compostos voláteis. Durante o ciclo, foram determinadas as variáveis fisiológicas de taxa fotossintética líquida, transpiração, condutância estomática, eficiência do uso da água, concentração intercelular de CO₂ no mesófilo e relação da concentração intercelular de CO₂ no mesófilo sobre a concentração de CO₂ externa atual. Ao final das duas safras, avaliou-se massa fresca, massa seca, diâmetro, volume e comprimento total de raízes. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 (condições de umidade) x 2 (cultivares), com quatro repetições. As médias foram submetidas a análise de variância e ao teste Tukey ($p < 0,05$). As diferentes umidades do solo influenciaram nos teores de alfa e beta ácidos apenas na primeira safra, com maiores valores observados nas maiores disponibilidades hídricas. Este mesmo comportamento também foi observado na atividade antioxidante total e nos teores de compostos fenólicos totais. Em ambas as safras, observou-se que a redução da umidade do solo comprometeu a taxa fotossintética, condutância estomática e transpiração de lúpulo em ambas as cultivares apenas em fase mais avançada de desenvolvimento das plantas. O crescimento das plantas, no entanto, foi mais influenciado pelo fotoperíodo do que a disponibilidade de água no solo. O número de cones por planta foi influenciado apenas pela cultivar, com maior produção na cultivar Cascade, embora tenha se observado tamanho e peso de cones maiores na cultivar Chinook. Nas variáveis de raiz, as diferenças foram apenas entre as cultivares, com maior volume e diâmetro para o lúpulo Chinook. O perfil de compostos voláteis foi composto principalmente de terpenos, álcoois e ésteres, com maior diversidade de compostos detectados na cultivar Chinook. Os terpenos (-)- β -pineno, β -mirceno e humuleno foram detectados majoritariamente. De maneira geral, as restrições de água no solo durante o cultivo diminuíram a diversidade de compostos voláteis em ambas as safras nas duas cultivares.

Palavras-chave: *Humulus lupulus*, déficit hídrico, capacidade de campo, alfa ácidos, perfil de voláteis.

CULTIVATION OF CASCADE AND CHINOOK HOPS UNDER DIFFERENT SOIL MOISTURE

ABSTRACT

The vast majority of hops are used commercially for the manufacture of beer and Brazil is an important producer and consumer of the drink in the world. However, hop cultivation in Brazil is recent and little is known about the effects of soil moisture on the crop. This work aims to evaluate different levels of irrigation during the hop growing cycle on yield variables and chemical quality of Cascade and Chinook cultivars. The treatments were soil moisture levels maintained at 97, 83 and 69% of soil field capacity (FC) throughout the cycle and 83% of FC plus 4 days without irrigation in the pre-harvest of cones (83FCpc). The experiment was conducted in a greenhouse, at the CAV/UNESP Forestry Engineering nursery in Lages, in the 2021/2022 and 2022/2023 harvest seasons. The plants were grown in pots with a capacity of 25 liters, in a vertical conduction system with sisal, and a soil classified as typical Aluminic Humic Cambisol was used. Twice a week, during cultivation, the pots were weighed on an electronic scale and the gravimetric humidity was adjusted when necessary. Cycle duration, plant height, fresh mass of the aerial part, production of cones per plant, length and width of cones, fresh and dry mass of cones, alpha and beta acid content, total antioxidant activity, compound content were evaluated. total phenolics and volatile compounds profile. During the cycle, the physiological variables of net photosynthetic rate, transpiration, stomatal conductance, water use efficiency, intercellular CO₂ concentration in the mesophyll and the relationship between the intercellular CO₂ concentration in the mesophyll and the current external CO₂ concentration were determined. At the end of both harvests, fresh mass, dry mass, diameter, volume and total length of roots were evaluated. The experimental design was completely randomized, in a 4 (moisture conditions) x 2 (cultivars) factorial scheme, with four replications. The means were subjected to analysis of variance and the Tukey test ($p < 0.05$). The different soil moisture levels influenced the alpha and beta acid levels only in the first harvest, with higher values observed in greater water availability. This same behavior was also observed in the total antioxidant activity and in the levels of total phenolic compounds. In both harvests, it was observed that the reduction in soil moisture compromised the photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration of hops in both cultivars only at a more advanced stage of plant development. Plant growth, however, was more influenced by photoperiod than soil water availability. The number of cones per plant was influenced only by the cultivar, with greater production in the Cascade cultivar, although larger cone size and weight were observed in the Chinook cultivar. In root variables, the differences were only between cultivars, with greater volume and diameter for Chinook hops. The volatile compound profile was mainly composed of terpenes, alcohols and esters, with a greater diversity of compounds detected in the Chinook cultivar. The terpenes (-)- β -pinene, β -myrcene and humulene were mainly detected. In general, soil water restrictions during cultivation decreased the diversity of volatile compounds in both crops in both cultivars.

Key-words: *Humulus lupulus*, water deficit, field capacity, alpha acids, volatile profile.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Parte aérea de uma planta de lúpulo cultivar Cascade em fase final de ciclo no primeiro ano de cultivo, safra 2021/2022. Lages, SC.....	21
Figura 2 - Lupulina na base das brácteas em cone de lúpulo cultivar Cascade.	23
Figura 3 - Estruturas químicas dos alfa e beta ácidos encontrados em lúpulo.	24
Figura 4 - Separação das fases líquidas durante o processo de extração de alfa e beta ácidos em lúpulo.	37
Figura 5 - Cromatograma de uma amostra de lúpulo cultivar Cascade com a identificação dos alfa ácidos cohumulona e adhumulona e dos beta ácidos colupulona e adlupulona.	38
Figura 6 - Curva de retenção de água em função do potencial matricial do Cambissolo Húmico, coletado na Fazenda Experimental do CAV/UEDESC. Lages, SC.	43
Figura 7 - Temperatura (°C) da estufa durante o período do experimento, safra 2021/2022. Lages, SC. Lages, SC.....	44
Figura 8 - Umidade relativa do ar (%) na estufa durante o período de experimento, safra 2021/2022. Lages, SC.	44
Figura 9 - Umidades do solo de cada tratamento durante o cultivo de lúpulo Cascade em vasos, safra 2021/2022. Lages, SC.	45
Figura 10 - Graus-dia diário e somatório ao longo do ciclo de cultivo de lúpulo Cascade. Safra 2021/2022.	46
Figura 11 - Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (a), condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (b), transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (c) e eficiência do uso da água ($[\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]^{-1}$) (d) de plantas de lúpulo Cascade cultivadas sob diferentes níveis de umidade do solo em dezembro/2021 e janeiro/2022. Safra 2021/2022. Lages, SC.....	48
Figura 12 - Concentrações de alfa e beta ácidos em lúpulo Cascade cultivado sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.....	52
Figura 13 - Crescimento de lúpulo Cascade em diferentes umidades de solo ao longo do ciclo. Safra 2021/2022. Lages, SC.....	56
Figura 14 - Perfil de terpenos de lúpulo Cascade cultivado sob diferentes umidades de solo. Safra 2021/2022.	61

Figura 15 - Crescimento de lúpulo Chinook em diferentes níveis de umidade do solo ao longo do ciclo. Safra 2021/2022. Lages, SC.....	63
Figura 16 - Lúpulo cultivar Cascade com sintomas de queima nas folhas por prováveis temperaturas elevadas na fase final do cultivo.	64
Figura 17 - Brotos de cones de lúpulo cultivar Chinook queimados por prováveis temperaturas elevadas durante a fase reprodutiva.....	65
Figura 18 - Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (a), condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (b) e transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (c) de plantas de lúpulo Chinook cultivadas sob diferentes níveis de umidade do solo em dezembro de 2021 e janeiro de 2022. Safra 2021/2022. Lages, SC.	66
Figura 19 - Sintomas de ácaro rajado em folhas de lúpulo. Safra 2021/2022. Lages, SC.....	69
Figura 20 - Umidades do solo em cada tratamento durante o cultivo de lúpulo Cascade e Chinook em vasos, safra 2022/2023. Lages, SC.	78
Figura 21 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%) da estufa durante o período do experimento, safra 2022/2023. Lages, SC.....	78
Figura 22 - Graus-dia diário e somatório ao longo do ciclo de cultivo de lúpulos Cascade e Chinook. Safra 2022/2023.	80
Figura 23 - Consumo diário de água de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.....	80
Figura 24 - Estádios fenológicos do ciclo de cultivo de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.	82
Figura 25 - Taxa de crescimento de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo e fotoperíodo diário para Lages, SC. Safra 2022/2023.	83
Figura 26 - Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e eficiência do uso da água ($[\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]^{-1}$) de lúpulo Cascade cultivado em estufa sob diferentes umidades do solo em janeiro de 2023. Safra 2022/2023. Lages, SC.....	88
Figura 27 - Concentração intercelular de CO_2 e relação CO_2 intercelular/ CO_2 externo de lúpulo Cascade cultivado em estufa sob diferentes umidades do solo em janeiro de 2023. Safra 2022/2023. Lages, SC.	90

Figura 28 - Produção de cones por planta em lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.	92
Figura 29. Concentrações de alfa (a) e beta (b) ácidos de cones de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.....	95
Figura 30 - Comprimento total (m) de raízes de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safras 2021/2022 e 2022/2023. Lages, SC.	96
Figura 31 - Diâmetro médio (mm) de raízes de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safras 2021/2022 e 2022/2023. Lages, SC.	97
Figura 32. Volume de raízes (cm ³) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safras 2021/2022 e 2022/2023. Lages, SC.	97
Figura 33 - Raízes de lúpulo Chinook (a) e Cascade (b) após dois anos de cultivo em vasos.....	100
Figura 34 - Umidades do solo em cada tratamento durante o cultivo de lúpulo Cascade e Chinook em vasos, safra 2022/2023. Lages, SC.	106
Figura 35. Perfil de terpenos de lúpulos Cascade e Chinook cultivados sob diferentes umidades de solo. Safra 2022/2023.	111
Figura 36 - Cromatograma da análise de compostos voláteis de lúpulo Chinook. ...	116
Figura 37 - Cromatograma da análise de compostos voláteis de lúpulo Cascade. ..	117

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Análise química de um Cambissolo Húmico coletado em área de lavoura da Fazenda Experimental do CAV/UEDESC em Lages, SC.....41
- Tabela 2 - Atributos físicos do Cambissolo Húmico coletado na Fazenda Experimental do CAV/UEDESC e utilizado nos vasos para condução de lúpulo em estufa.42
- Tabela 3 - Consumo médio total (L) de água durante o ciclo do cultivo do lúpulo Cascade, no primeiro ano de experimento, cultivado em vasos com Cambissolo Húmico em ambiente de estufa sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.....47
- Tabela 4 - Concentração intercelular de CO₂ no mesófilo ($\mu\text{mol CO}_2$) e relação da concentração intercelular de CO₂ no mesófilo sobre a concentração de CO₂ externa atual ($\mu\text{mol CO}_2$) de lúpulo Cascade em duas épocas de um mesmo cultivo. Safra 2021/2022. Lages, SC.....51
- Tabela 5 - Atividade antioxidante (métodos ABTS e DPPH) e teor de Compostos Fenólicos Totais de lúpulo Cascade cultivado sob diferentes umidades de solo, safra 2021/2022. Lages, SC.....54
- Tabela 6 - Duração do ciclo de cultivo (dias), altura final da planta (cm) e massa fresca da parte aérea (g) de lúpulo Cascade, no primeiro ano de experimento, cultivado em vasos com Cambissolo Húmico em ambiente de estufa sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.....54
- Tabela 7 - Número de cones por planta, massa fresca total dos cones (g) e massa fresca média dos cones (g) de lúpulo Cascade, no primeiro ano de experimento, cultivado em vasos com Cambissolo Húmico em ambiente de estufa sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.....55
- Tabela 8 - Comprimento e largura médios (cm) das plantas de lúpulo Cascade, no primeiro ano de experimento, cultivado em vasos com Cambissolo Húmico em ambiente de estufa sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.55
- Tabela 9 - Descrição do perfil de compostos voláteis (% de área) de lúpulo Cascade cultivado sob diferentes umidades do solo, safra 2021/2022. Lages, SC..59

Tabela 10 - Consumo médio total de água durante o ciclo de cultivo de lúpulo cultivar Chinook sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.	63
Tabela 11 - Duração do ciclo de cultivo (dias), altura final da planta (cm) e massa fresca da parte aérea (g) de lúpulo cultivar Chinook em primeiro ano de cultivo em estufa sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.	65
Tabela 12 - Concentração intercelular de CO ₂ no mesófilo (μmol CO ₂), relação da concentração intercelular de CO ₂ no mesofilo sobre a concentração de CO ₂ externa atual (μmol CO ₂) e eficiência do uso da água ([μmol m ⁻² s ⁻¹] ⁻¹) de lúpulo Chinook em duas épocas de um mesmo cultivo. Safra 2021/2022. Lages, SC.	69
Tabela 13 - Taxa fotossintética líquida (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹), condutância estomática (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) e transpiração (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) de lúpulo Chinook após rebrote das plantas danificadas por calor excessivo durante o ciclo de cultivo. Safra 2021/2022. Lages, SC.	70
Tabela 14 - Concentração intercelular de CO ₂ no mesófilo (μmol CO ₂), relação da concentração intercelular de CO ₂ no mesofilo sobre a concentração de CO ₂ externa atual (μmol CO ₂) e eficiência do uso da água ([μmol m ⁻² s ⁻¹] ⁻¹) de lúpulo Chinook após rebrote das plantas danificadas por calor excessivo durante o ciclo de cultivo. Safra 2021/2022. Lages, SC.	70
Tabela 15 - Consumo total de água de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.	81
Tabela 16 - Fotossíntese líquida (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹) e condutância estomática (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.	85
Tabela 17 - Transpiração (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) e eficiência do uso da água ([μmol m ⁻² s ⁻¹] ⁻¹) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.	86
Tabela 18 - Concentração intercelular de CO ₂ (μmol CO ₂) e relação CO ₂ intercelular/CO ₂ externo (μmol CO ₂) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.	86

Tabela 19 - Duração do ciclo (dias), altura final (cm) e massa fresca da parte aérea (g) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.	91
Tabela 20 - Massa fresca (g), comprimento (cm) e largura (cm) de cones de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.	93
Tabela 21 - Massa fresca (g) e massa seca (%) de raízes de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safras 2021/2022 e 2022/2023. Lages, SC.	98
Tabela 22 - Teor de Compostos Fenólicos Totais (CFT) de cones de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.....	107
Tabela 23 - Atividade Antioxidante Total (métodos ABTS e DPPH expressos em $\mu\text{Mol trolox.100 g}^{-1}$) de cones de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.	108
Tabela 24 - Perfil de compostos voláteis (% de área e desvio padrão) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados sob diferentes umidades de solo. Safra 2022/2023.	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

pH	Potencial de hidrogênio
°C	Graus celsius
CC	Capacidade de Campo
PMP	Ponto de Murcha Permanente
AD	Água disponível
DS	Densidade do solo
PT	Porosidade total
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
CAV	Centro de Ciências Agroveterinárias
kPa	Kilopascal
hPa	Hectopascal
g	Gramas
µm	Micrômetros
mm	Milímetros
cm	Centímetros
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ O	Água
%	Porcentagem
µmol	Micromol
mmol	Milimol
MS	Massa seca
HCl	Ácido clorídrico
NPK	Nitrogênio – Fósforo – Potássio
GD	Graus-dia
Ψ _m	Potencial matricial
µl	Microlitro
ml	Mililitro
L	Litro

IR	Índice de retenção
IRGA	Infra Red Gas Analyzer
EAG	Equivalente de ácido gálico
Trolox	6-Hidroxi-2,5,7,8-tetrametilchroman-2-ácido carboxílico
NIST	National Institute of Standards and Technology
CLAE	Cromatografia líquida de alta eficiência
CG/EM	Cromatógrafo gasoso com espectômetro de massas
ABTS	2,2-azinobis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfônico
DPPH	1,1-difenil-2-picrilhidrazila
CV	Coefficiente de variação
AAT	Atividade Antioxidante Total
CFT	Compostos Fenólicos Totais
WP4C	Medidor de Potencial de Água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 Lúpulo.	21
2.2 Características químicas.	23
2.3 Condições ambientais e qualidade do lúpulo.	25
2.4 Qualidade pós-colheita do lúpulo.	27
2.5 Água no solo e estresse hídrico.	28
HIPÓTESES	31
3. A UMIDADE DO SOLO DURANTE O PRIMEIRO CULTIVO MELHORA CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LÚPULO CASCADE E NÃO INFLUENCIA NA FOTOSÍNTESE DE LÚPULO CHINOOK	32
RESUMO	32
3.1 INTRODUÇÃO	32
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
3.3.1 CULTIVAR CASCADE	45
3.3.2 CULTIVAR CHINOOK	62
3.4 CONCLUSÕES	71
4. PRODUÇÃO E QUALIDADE DE LÚPULOS CASCADE E CHINOOK SUBMETIDOS A DIFERENTES UMIDADES DE SOLO	72
RESUMO	72
4.1 INTRODUÇÃO	73
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	74
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.4 CONCLUSÕES	100
5. DIFERENTES UMIDADES DO SOLO NO CULTIVO DE LÚPULOS CASCADE E CHINOOK E SUA INFLUÊNCIA EM METABÓLITOS SECUNDÁRIOS	102
RESUMO	102
5.1 INTRODUÇÃO	102
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	103
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	105

5.4 CONCLUSÕES	118
CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
REFERÊNCIAS.....	120

1. INTRODUÇÃO GERAL

O lúpulo utilizado nas cervejas produzidas no Brasil é, em sua absoluta maioria, importado principalmente da Alemanha (MACHADO et al., 2018), pois a produção brasileira de lúpulo é recente e ainda é pequena (ALMEIDA et al., 2019). Essa produção não é suficiente para abastecer a demanda das cervejarias no país que tem crescido nos últimos anos, principalmente com o aumento no número de microcervejarias, uma tendência não apenas nacional, mas observada também em diversos países europeus (MACHADO et al., 2019).

A elevada demanda por lúpulo e a baixa oferta de um produto nacional, provocaram iniciativas para estimular a produção dessa planta no Brasil nos últimos anos, e como sua composição, em especial o teor de alfa ácidos, reflete diretamente no aroma e sabor final da cerveja, é necessário investigar maneiras de produzir um produto de alta qualidade. Embora a quantidade de alfa ácidos nos lúpulos seja variável de acordo com a cultivar (YAKIMA CHIEF, 2013), as condições de cultivo também podem influenciar na composição química dos cones (MORCOL et al., 2020). Pesquisas com lúpulos produzidos em condições brasileiras ainda são escassas, mas de acordo com o encontrado por Almeida et al. (2020), o teor de compostos fenólicos e alguns constituintes do óleo essencial do lúpulo podem ser maiores para uma mesma cultivar plantada no Brasil do que nas condições ambientais dos Estados Unidos. No entanto, Elrod et al. (2019) afirmam que um teor mais elevado de compostos fenólicos e atividade antioxidante está relacionado com menor teor de alfa ácidos.

Os alfa ácidos do lúpulo são metabólitos secundários e sua produção pela planta pode ser alterada em condições de estresses bióticos e abióticos (DURASAMY et al., 2016). Dessa forma, submeter a planta a uma condição adversa pode resultar em maior quantidade destes compostos nos cones. Embora alguns trabalhos não tenham encontrado diferenças na composição de alfa ácidos em lúpulos submetidos a diferentes níveis de irrigação (FANDIÑO et al., 2015; NAKAWURA et al., 2017), tais restrições ainda não foram investigadas em condições edafoclimáticas brasileiras. Um estresse hídrico é uma alternativa de fácil implementação pelos produtores e pode resultar em um produto de maior qualidade, beneficiando toda a cadeia produtiva cervejeira no Brasil.

A pesquisa agrônômica na área de produção de lúpulo brasileiro ainda é

insignificante. Os comportamentos e exigências de diferentes cultivares em solos brasileiros e sob regimes hídricos, de temperatura e luminosidade que caracterizam o Brasil, principalmente a região sul do país, ainda são pouco conhecidos e amplamente possíveis de serem investigados por pesquisadores e colaboradores da cadeia produtiva do lúpulo.

Embora a produção de lúpulo brasileira seja incipiente, é necessário que se conheça as variáveis que interferem no seu cultivo, para que dessa forma, seja possível fornecer uma assistência técnica confiável, baseada na pesquisa científica, e obter um produto que atenda as exigências do mercado cervejeiro. Além disso, o conhecimento técnico agrônômico poderá incentivar a implantação de áreas de produção como mais uma opção de renda, principalmente para pequenos produtores rurais, e criar um mercado que movimente e fortaleça a economia nacional.

Não existem pesquisas sobre as alterações na composição e teor de alfa ácidos em plantas de lúpulo submetidas a estresse hídrico no Brasil, especialmente na região serrana de Santa Catarina, onde o cultivo da planta tem sido incentivado e mobilizado um expressivo número de produtores. Um provável efeito do estresse hídrico sobre o lúpulo, resultando em um aumento no teor de alfa ácidos poderá contribuir para a obtenção de uma cerveja de melhor qualidade e com características específicas brasileiras, uma vez que a produção da bebida no Brasil é dependente quase que exclusivamente da importação de lúpulo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Lúpulo.

O lúpulo (*Humulus lupulus* L.) é uma planta herbácea, nativa de regiões de clima temperado do Hemisfério Norte, e pertence à ordem Rosales, família Cannabaceae. Atualmente, existem diversas cultivares de lúpulo cultivadas comercialmente em todo o mundo, e são separadas em três principais categorias: lúpulos de amargor, de aroma e de dupla aptidão (amargor e aroma) (SPÓSITO et al., 2019), destinados em grande parte para a produção cervejeira.

Figura 1 - Parte aérea de uma planta de lúpulo cultivar Cascade em fase final de ciclo no primeiro ano de cultivo, safra 2021/2022. Lages, SC.



Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

Entre os lúpulos de amargor, algumas cultivares importantes mundialmente são a 'Admiral', nativa da Grã-Bretanha, a 'Nugget', originária dos Estados Unidos e a alemã 'Magnum'. Pertencem à categoria de aroma, as cultivares como 'Cascade e Citra', ambas nativas dos Estados Unidos, a 'Hallertau', da Alemanha, a 'Saaz', nativa da República Tcheca e 'Mantiqueira', primeira cultivar brasileira. As cultivares norte-americanas 'Chinook', 'Centennial' e 'Columbus' são consideradas de dupla aptidão (SPÓSITO et al., 2019). A produção mundial de lúpulo atualmente é liderada pelos Estados Unidos, Etiópia e Alemanha. Além destes, outros países como a China, Polônia, Nova Zelândia e Espanha também possuem cultivos comerciais (FAOSTAT, 2020).

A aplicação do lúpulo vai além de sua utilização como ingrediente de cervejas e a planta possui potencial para diferentes propósitos na área medicinal. Seus benefícios à saúde estão relacionados com o controle de distúrbios do sono por atuar no sistema nervoso central, na ativação de funções gástricas e como potencial agente quimioprotetivo de câncer (ZANOLI; ZAVATTI, 2008). Os compostos bioativos do lúpulo podem ser benéficos à saúde por atuarem também como antioxidantes, indiretamente estimulando enzimas que controlam espécies reativas de oxigênio, e apresentarem efeitos antiglicêmico e antiobesidade (BOLTON et al., 2019). Além disso, alguns autores relatam que o extrato de lúpulo pode ser promissor para amenizar sintomas da menopausa, devido às substâncias presentes estarem envolvidas em rotas hormonais, como a atividade do estrogênio (POSSEMIERS et al., 2006; KEILER; ZIERAU; KRETZSCHMAR, 2013).

O plantio do lúpulo pode ser realizado em diferentes tipos de solos, mas a planta se desenvolve de maneira mais satisfatória em condições de pH do solo entre 6,5 a 7,0, com textura franco-arenosa e profundos. Os rizomas não são adaptados a ambientes muito secos, portanto, é necessário que o solo esteja sempre úmido e com boa porosidade, para um bom desenvolvimento radicular (SPÓSITO et al., 2019). A redução da disponibilidade hídrica diminui principalmente a taxa fotossintética e compromete o metabolismo de obtenção de carbono (KOLENC et al., 2016). No entanto, em condições de adversidades ambientais, os metabolitos secundários podem exercer um papel importante em uma tentativa de sobrevivência da planta ao ambiente (VERPOORTE; ALFERMANN, 2000), e em lúpulo, os alfa ácidos são formados a partir do metabolismo secundário (STEENACKERS; DE COOMAN; DE VOS, 2015) o que poderia, em

hipótese, resultar em uma maior produção destes químicos em ambientes mais secos.

A propagação vegetativa do lúpulo é comumente realizada por rizomas (HENNING; COGGINS; PETERSON, 2015), mas pode ser realizada com estacas, e possui elevado enraizamento, alcançando até 97% de pegamento das estacas sem utilização de reguladores de crescimento (GOMES et al., 2018). A propagação reprodutiva por sementes tem baixa porcentagem de germinação e é utilizada em programas de melhoramento para obtenção de novas variedades (LIBERATORE et al., 2018).

2.2 Características químicas.

O destino principal da produção de lúpulo é a indústria cervejeira, devido à produção de compostos do metabolismo secundário pelas glândulas de lupulina nas inflorescências femininas da planta, como os alfa e beta ácidos e o óleo essencial. Estes metabólitos secundários fornecem à cerveja durante sua fermentação características de amargor e funções de aromatizante e conservante (STEENACKERS et al., 2015).

Figura 2 - Lupulina na base das brácteas em cone de lúpulo cultivar Cascade.

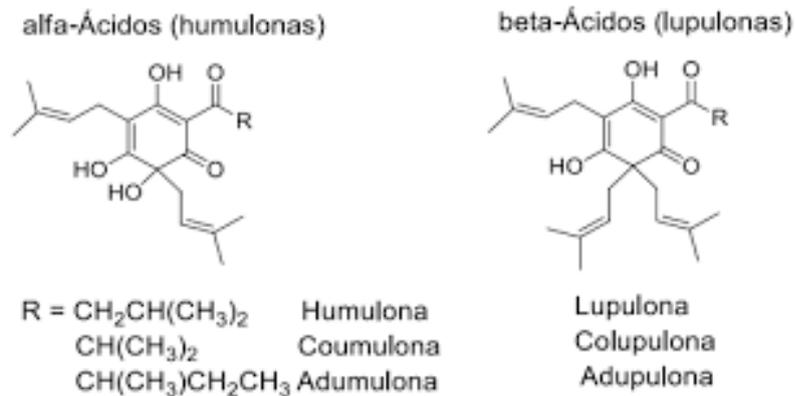


Fonte: PEREIRA, 2022.

A produção de alfa e beta ácidos, humulonas e lupulonas aumenta gradualmente durante o desenvolvimento da inflorescência, e embora se utilize apenas os cones como

material comercial na fabricação da cerveja, estes compostos também estão presentes nas inflorescências masculinas e na planta como um todo (KEUKELEIRE et al., 2003).

Figura 3 - Estruturas químicas dos alfa e beta ácidos encontrados em lúpulo.



Fonte: KEUKELEIRE, 2000

A composição química do lúpulo tem recebido grande atenção pelos produtores e pesquisadores, uma vez que durante o seu processo de fermentação na produção de cerveja, os constituintes químicos do lúpulo conferem à bebida o aroma e o sabor característico da planta utilizada (LAFONTAINE et al., 2019). Inui et al. (2013) estimam que há mais de 100 diferentes compostos químicos aromáticos presentes no lúpulo que dão origem a diferentes tipos de cerveja, que podem influenciar o aroma e sabor não apenas por sua composição, mas pelo efeito com outros constituintes presentes na bebida. Schönberger e Kostelecky (2011) afirmam que os compostos podem contribuir para o aroma da cerveja ao interagir entre si e gerar efeitos aditivos ou sinérgicos.

Analisando diferentes cervejas, Oladokun et al. (2016) observaram que bebidas com alto teor de polifenóis e ácidos de lúpulo apresentaram amargor com característica “áspera”, e que cervejas mais lupuladas continham amargor mais “forte” e “instantâneo”. Os ácidos são os constituintes de maior importância nas resinas do lúpulo, e são constituídos por uma mistura de três compostos análogos principais: humulona, cohumulona e adhumulona (JASKULA-GOIRIS et al., 2010). De acordo com Silva e Faria (2008), as frações de iso- α -ácidos possuem diferentes contribuições no amargor final da cerveja, com a intensidade decrescente na seguinte ordem: cis-isohumulona, trans-isohumulona, cis-isocohumulona e por último, e menos intenso, trans-isocohumulona.

Além dos teores de alfa e beta ácidos, a produção e qualidade do óleo essencial

e o perfil de compostos voláteis do lúpulo também é mundialmente investigada. A composição química de diversas cultivares já foi investigada por análises de cromatografia gasosa e comumente os autores observam variações significativas entre as diferentes amostras (NANCE; SETZER, 2011; ABERL et al. 2012; VÁZQUEZ-ARAÚJO et al. 2013; MORCOL et al. 2020).

O óleo essencial de lúpulo é composto principalmente por hidrocarbonetos terpenos, e alguns compostos comumente encontrados são citronelol, limoneno, humuleno, β -farneseno, linalol, geraniol e cariofileno (EYRES; DUFOUR, 2009). No entanto, seu constituinte majoritário é o β -mirceno (POŁEĆ et al. 2020).

Su e Yin (2021) sugerem forte influência de fatores ambientais e práticas agronômicas no perfil de compostos voláteis em lúpulo, uma vez que os autores observam grande variabilidade entre amostras avaliadas. Da Rosa Almeida et al. (2021) encontraram diferenças no perfil aromático da cultivar Cascade cultivada no Brasil e nos Estados Unidos. O lúpulo brasileiro apresentou majoritariamente em sua composição trans- β -farneseno, β -selineno, mirceno, e α -selineno, enquanto o lúpulo norte americano era composto principalmente por α -humuleno, mirceno, β -cariofileno e trans- β -farneseno. Cada composto, dependendo da sua concentração, confere aroma específico ao lúpulo e ao aroma final da cerveja. O mirceno confere um aroma pungente de lúpulo fresco na bebida, enquanto o β -cariofileno, por exemplo, apresenta aroma amadeirado e de especiarias (ALMAGUER et al., 2014).

2.3 Condições ambientais e qualidade do lúpulo.

A composição química é dependente de fatores genéticos, que distinguem as variedades de lúpulo entre si, além de fatores ambientais durante seu desenvolvimento e as técnicas pós-colheita aplicadas ao material vegetal (RETTBERG et al., 2018). De acordo com Morcol et al. (2020), as condições ambientais do local de produção e características genéticas da cultivar interferem na composição aromática do lúpulo, principalmente nos níveis de glicosídeos. Como os alfa ácidos do lúpulo são metabólitos secundários e sua produção pela planta pode ser alterada em condições de estresses bióticos e abióticos (DURASAMY et al., 2016), submeter a planta a uma condição adversa pode resultar em maior quantidade destes compostos nos cones.

A disponibilidade de água durante o desenvolvimento da cultura e sua resposta

sobre a produtividade e qualidade foi investigada por Nakawura et al. (2017) nas cultivares Mt. Hood, Columbus, Willamette e Chinook, que observaram maior produtividade nos maiores níveis de irrigação, embora as concentrações de alfa e beta ácidos não tenham sido afetadas nos dois anos de avaliação. Resultados similares foram encontrados por Fandiño et al. (2015), que também não observaram influência do manejo da irrigação sobre a síntese dos ácidos de amargor no lúpulo.

Embora a disponibilidade hídrica aparentemente não interfira na composição dos ácidos do lúpulo, a fertilização nitrogenada pode resultar em alterações na quantidade de alfa-ácidos, segundo Krofta et al. (2019). Estes autores observaram declínio na concentração de alfa-ácidos e na produção de biomassa dos cones imediatamente após o término da fertilização. Iskra et al. (2019) observaram que o aumento nas concentrações da adubação nitrogenada resulta em maiores produtividades do lúpulo. No entanto, essas mesmas plantas tendem a apresentar menores conteúdos de óleo essencial e alfa-ácidos. O teor de matéria seca e conteúdo de beta-ácidos não mostraram correlação com a adubação de nitrogênio. Os autores ainda concluem que a resposta dos atributos de qualidade do lúpulo à adubação nitrogenada é muito dependente do ano de avaliação, devido à fatores ambientais locais.

A provável influência de contaminação por doenças ou viroses em plantas de lúpulo na produção das substâncias que lhe conferem o amargor característico já foi pesquisada por Pistelli et al. (2018). De acordo com estes autores, a contaminação por viroses parece não interferir no metabolismo secundário que resulta na produção de α e β -ácidos e óleo essencial em cinco cultivares ('Lubelski' 'Magnat' 'Marynka' 'Pulawski' 'Sybilla'), apenas no rendimento de biomassa dos cones. Jelínek et al. (2012) também não observaram diferenças no teor de óleo essencial entre plantas saudas e contaminadas pelo vírus HLVD, embora as plantas doentes tenham redução nos teores dos ácidos e seus compostos análogos.

Segundo Matsui et al. (2013), a idade da planta também influencia no metabolismo secundário do lúpulo. De acordo com estes autores, cervejas produzidas com material de plantas cultivadas a partir de raízes jovens possuem um aroma menos lupulado, com menos atributos florais, frutados e cítricos, devido a uma menor produção de monoterpenos pelo vegetal. Em plantas mais jovens, o período entre a poda e a floração foi maior quando comparado às plantas mais velhas, indicando que o crescimento vegetativo é priorizado em relação ao reprodutivo, podendo alterar o metabolismo

secundário e a produção de substâncias aromáticas.

Além disso, o período de colheita também pode atribuir características distintas ao material vegetal. Segundo Lafontaine et al. (2019), a cultivar Cascade quando colhida tardiamente (com teor de matéria seca superior a 26%), confere à cerveja um aroma mais cítrico, devido à maior concentração dos compostos voláteis do óleo essencial. Matsui et al. (2016) também observaram maior intensidade na composição aromática do lúpulo em colheitas mais tardias, principalmente os monoterpenos linalol, geraniol e mirceno na cultivar Saaz. Na cultivar Willamette, cultivada na região de Oregon, EUA, Sharp et al. (2014) observaram que colheita tardia resulta em maior acúmulo de óleo essencial nas plantas quando comparado aos períodos precoce e recomendável para a colheita, alterando também a própria composição do óleo, com maior acúmulo de compostos como linalol, α -Pino, β -Pino, mirceno e limoneno. Tais alterações são dependentes da cultivar, já que no mesmo estudo, os autores não observaram diferença na concentração de óleo para a cultivar Cascade entre os períodos de colheita tardio e recomendada, no mesmo ano de cultivo que a cultivar Willamette. Inui et al. (2016) observaram que a colheita tardia aumenta as concentrações de humulona e os componentes que caracterizam o óleo essencial como floral, frutado e cítrico, e sugerem que além da época de colheita, o período entre a data de poda e a floração das plantas pode afetar o conteúdo dos álcoois, ésteres, terpenóides e ácidos, originados do metabolismo secundário.

2.4 Qualidade pós-colheita do lúpulo.

Alterações na composição do lúpulo também ocorrem após a colheita, na fase de armazenamento do produto, seja em pellets ou nos próprios cones da planta, como afirmam Tedone et al. (2020). Estes autores observaram um declínio nas quantidades de alfa e beta ácidos, ocasionado pela oxidação destes compostos durante a fase pós-colheita, além da diminuição da concentração de óleo essencial no material em todas as variedades avaliadas (Cascade, Galaxy e Vic Secret).

A temperatura de armazenamento do material pode interferir diretamente nos processos de oxidação dos alfa e beta ácidos, com uma tendência de maior formação dos produtos resultantes da oxidação (humulinonas, 4'-hidroxi-alohumulonas e huluponas) conforme a elevação da temperatura do ambiente (TANIGUCHI et al.,

2013). Além da temperatura, Mikyška e Krofta (2012) afirmam que o armazenamento em condições anaeróbicas (à vácuo) combinado com temperatura de 2°C por 12 meses mantém os parâmetros de qualidade do lúpulo em níveis satisfatórios, com pouca redução nas concentrações dos ácidos nas cultivares Saaz, Sládek, Premiant e Agnus. A oxidação do lúpulo após o armazenamento deve ser considerada no processo de fabricação da cerveja, uma vez que os compostos originados da oxidação (humunilonas e hupulonas) possuem alto potencial de gerar amargor na bebida (ALGAZZALI; SHELLHAMMER, 2016).

Atualmente, o lúpulo utilizado nas cervejas produzidas no Brasil é importado, principalmente da Alemanha (MACHADO et al., 2018). A produção brasileira não é suficiente para abastecer a demanda das cervejarias no país que tem crescido nos últimos anos, principalmente com o aumento no número de microcervejarias, uma tendência não apenas nacional, mas observada também em diversos países europeus (MACHADO et al., 2019).

Devido a essa alta demanda e baixa oferta de um produto nacional, iniciativas para estimular a produção de lúpulo no Brasil têm sido desenvolvidas nos últimos anos, e como a composição do lúpulo, em especial o teor de alfa ácidos, reflete diretamente no aroma e sabor final da cerveja, é necessário investigar maneiras de produzir um produto de alta qualidade. Embora a quantidade de alfa ácidos no lúpulo é variável de acordo com a cultivar (YAKIMA CHIEF, 2013), as condições de cultivo também podem influenciar na composição química dos cones (MORCOL et al., 2020). Pesquisas com lúpulos produzidos em condições brasileiras ainda são escassas, mas de acordo com o encontrado por Almeida et al. (2020), o teor de compostos fenólicos e alguns constituintes do óleo essencial do lúpulo podem ser maiores para uma mesma cultivar plantada no Brasil do que nas condições ambientais dos Estados Unidos. No entanto, Elrod et al. (2019) afirmam que teor mais elevado de compostos fenólicos e atividade antioxidante está relacionado com menor teor de alfa ácidos.

2.5 Água no solo e estresse hídrico.

A água no solo compõe uma das fases do ciclo hidrológico, e é fortemente influenciada pela frequência e intensidade dos fatores como precipitação, evaporação, transpiração, infiltração, percolação, escoamento superficial e absorção pela

vegetação no local (WANG et al., 2019). Estas diferentes fontes de interação, atuando simultaneamente com condições meteorológicas são responsáveis pelo balanço hídrico do solo, fundamental para estimar sistemas de irrigação e necessidade hídrica de diferentes culturas (ZHU et al., 2023; ZHANG et al., 2023).

O solo é a principal fonte de armazenamento e disponibilidade de água às plantas, que retém a água das chuvas pelos processos de capilaridade e absorção. A facilidade da planta em extrair água deste solo dependerá da quantidade do recurso hídrico armazenado, e tende a se tornar cada vez mais difícil à medida que o solo seca (TOMASELLA; ROSSATO, 2005).

A água presente no solo capaz de ser absorvida pelas plantas é chamada de água disponível, compreendida entre a Capacidade de Campo (CC) e o Ponto de Murcha Permanente (PMP). Estas medições estão diretamente relacionadas com características próprias do perfil do solo, como porosidade, textura, teor de matéria orgânica densidade e estrutura (KLEIN; LIBARDI, 2000; KLEIN et al., 2010).

A textura do solo está relacionada com as proporções das frações areia, silte e argila presentes no solo. De acordo com a porcentagem de cada uma delas, o solo pode ser classificado desde arenoso até muito argiloso (PEQUENO et al., 2002). A fração argila é responsável pela formação dos microporos, que possuem raio menor que 15 μm e atuam principalmente na armazenagem de água no solo. Os macroporos, formados pela fração areia possuem raio maior que 50 μm e são responsáveis pela aeração do solo e a movimentação da água no processo de infiltração (LIBARDI, 2010). São entre os espaços porosos destas frações que a água fica armazenada do solo e se movimenta pelos potenciais matricial, osmótico, gravitacional e de pressão (COUTO et al., 2002).

A umidade do solo possui três principais pontos: saturação, quando todos os poros estão preenchidos por água; capacidade de campo, que corresponde ao máximo de água absorvida pelo solo; e ponto de murcha permanente, quando a água contida no solo não é mais possível de ser absorvida pelas plantas. A quantidade de água no solo, que pode ser expressa em porcentagem, tende a estar próxima do ponto de saturação durante ou após um evento de precipitação ou irrigação. Aos poucos, o conteúdo hídrico é drenado para camadas mais profundas, evaporado para atmosfera nas camadas mais superficiais, e absorvido pelas raízes presentes neste solo. À medida que este solo seca, mais fortemente a água restante fica retida nos microporos

e mais difícil é absorção pelas raízes (BROUWER et al., 1985).

Em condições de restrição hídrica no solo, deve-se considerar o sistema solo-planta-atmosfera como um todo, pois envolve características específicas de cada um de seus componentes e não apenas as condições do solo, como demonstrado por diversos trabalhos científicos (STRACK; STOLL, 2022; WU et al., 2024; BALDI et al., 2024).

HIPÓTESES

1. A restrição no fornecimento de água da irrigação na fase reprodutiva de *Humulus lupulus* aumenta a produção de alfa ácidos em seus cones.
2. Plantas de *Humulus lupulus* com maior disponibilidade hídrica durante o ciclo de cultivo produzem maior quantidade de cones.
3. O perfil de compostos voláteis em plantas de *Humulus lupulus* é alterado pela umidade do solo.
4. Cada cultivar de lúpulo apresenta uma resposta fisiológica específica aos diferentes níveis de umidade do solo aplicados.

3. A UMIDADE DO SOLO DURANTE O PRIMEIRO CULTIVO MELHORA CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LÚPULO CASCADE E NÃO INFLUENCIA NA FOTOSÍNTESE DE LÚPULO CHINOOK

RESUMO

O cultivo brasileiro de lúpulo ainda é recente e há poucas informações a respeito da influência das condições edafoclimáticas sobre o desenvolvimento da planta e a qualidade de seu produto. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da umidade do solo no desenvolvimento do lúpulo e na qualidade dos cones em cultivar Cascade. O experimento foi realizado no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (Campus Lages) na safra 2021/2022 em estufa, com plantas Cascade cultivadas em vaso. Após a determinação da curva de retenção de água no solo, foram avaliados os seguintes tratamentos: CC97: umidade do solo mantida entre 90 a 100% da CC durante todo o cultivo; CC83: umidade mantida entre 75 a 85% da CC durante todo o cultivo; CC69: umidade mantida entre 60 a 70% da CC durante todo o cultivo, e CC83pc: umidade mantida entre 75 a 85% da CC durante todo o cultivo com corte da irrigação quatro dias antes da colheita dos cones. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com 4 tratamentos e 4 repetições. Avaliaram-se respostas fisiológicas e qualidade química dos cones, como teor de alfa e beta ácidos, atividade antioxidante total e teor de compostos fenólicos e perfil de compostos voláteis. As plantas mantidas com maior umidade de solo (97CC) apresentaram maiores valores para taxa fotossintética líquida, condutância estomática e transpiração, além de maiores concentrações de alfa e beta ácidos, teor de compostos fenólicos e maior atividade antioxidante. A maioria dos compostos voláteis majoritários identificados via cromatografia gasosa estiveram mais relacionados com os tratamentos de maior umidade do solo.

Palavras-chave: *Humulus lupulus*, água no solo, alfa ácidos, fisiologia.

3.1 INTRODUÇÃO

O lúpulo utilizado nas cervejas produzidas no Brasil é, em sua absoluta maioria, importado principalmente da Alemanha (MACHADO et al., 2018), pois a produção brasileira de lúpulo é recente e ainda é pequena (ALMEIDA et al.,

2020). A elevada demanda por lúpulo e a baixa oferta de um produto nacional, provocaram iniciativas para estimular a produção dessa planta no Brasil nos últimos anos, e como sua composição, em especial o teor de alfa ácidos, reflete diretamente no aroma e sabor final da cerveja, é necessário investigar maneiras de produzir um produto de alta qualidade.

Embora a quantidade de alfa ácidos nos lúpulos seja variável de acordo com a cultivar (YAKIMA CHIEF, 2013), as condições de cultivo também podem influenciar na composição química dos cones (MORCOL et al., 2020). Pesquisas com lúpulos produzidos em condições brasileiras ainda são escassas, mas de acordo com o encontrado por Almeida et al. (2020), o teor de compostos fenólicos e alguns constituintes do óleo essencial do lúpulo podem ser maiores para uma mesma cultivar plantada no Brasil do que nas condições ambientais dos Estados Unidos. No entanto, Elrod et al. (2019) afirmam que um teor mais elevado de compostos fenólicos e atividade antioxidante está relacionado com menor teor de alfa ácidos.

Os alfa ácidos do lúpulo são metabólitos secundários e sua produção pela planta pode ser alterada em condições de estresses bióticos e abióticos (DURASAMY et al., 2016), dessa forma, submeter a planta a uma condição adversa pode resultar em maior quantidade destes compostos nos cones. Embora alguns trabalhos não tenham encontrado diferenças na composição de alfa ácidos em lúpulos submetidos a diferentes níveis de irrigação (FANDIÑO et al., 2015; NAKAWURA et al., 2017), tais restrições ainda não foram investigadas em condições edafoclimáticas brasileiras. A redução da umidade do solo é uma alternativa de fácil implementação pelos produtores, principalmente em regiões com histórico de pouca pluviometria, e pode resultar em um produto de maior qualidade, beneficiando toda a cadeia produtiva cervejeira no Brasil.

A pesquisa agrônômica brasileira na área de produção de lúpulo ainda é pequena. Os comportamentos e exigências de diferentes cultivares em solos brasileiros e sob regimes hídricos, de temperatura e luminosidade que caracterizam o Brasil, principalmente a região sul do país, ainda são pouco conhecidos e amplamente possíveis de serem investigados por pesquisadores e colaboradores da cadeia produtiva do lúpulo.

Embora a produção de lúpulo brasileira seja incipiente, é necessário que se conheça as variáveis que interferem no seu cultivo, para que dessa forma,

seja possível fornecer uma assistência técnica confiável, baseada na pesquisa científica, e obter um produto que atenda as exigências do mercado cervejeiro. Além disso, o conhecimento técnico agrônômico poderá incentivar a implantação de áreas de produção como mais uma opção de renda, principalmente para pequenos produtores rurais, e criar um mercado que movimente e fortaleça a economia nacional.

Não existem pesquisas sobre as alterações no teor de compostos fenólicos e atividade antioxidante, no perfil de compostos voláteis e no teor de alfa ácidos em cones de lúpulo submetidos a estresse hídrico no Brasil, especialmente na região serrana de Santa Catarina, onde o cultivo da planta tem sido incentivado e mobilizado um expressivo número de produtores. Um provável efeito do estresse hídrico sobre o lúpulo, modificando seu teor de alfa ácidos e sua composição química, de maneira geral, poderá contribuir para a obtenção de uma cerveja de melhor qualidade e com características específicas brasileiras. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da umidade do solo no desenvolvimento do lúpulo e na qualidade dos cones da cultivar Cascade.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na safra 2021/2022 em uma estufa no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, CAV/UEDESC em Lages/SC (27°47'34"S 50°18'04"O). O solo utilizado é classificado como um Cambissolo Húmico alumínico típico e foi coletado de uma área de lavoura da Fazenda Experimental do CAV, na camada de 0 a 30 cm. Do solo coletado, uma amostra foi levada ao laboratório de análises de rotina do CAV para caracterização química.

Para a determinação da granulometria do solo, utilizou-se o método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986) modificado conforme tratamento prévio e tempo de agitação do solo sugerido por Suzuki et al. (2015), classificando-o como de textura franca.

Para a determinação da curva de retenção de água no solo foram coletadas amostras do solo em anéis metálicos, da mesma maneira com que os vasos foram preenchidos, com solo peneirado e com leves batidas para sua acomodação. Os anéis foram mantidos em uma bandeja com água até o solo

atingir a saturação por água e então, pesados em balança analítica. Em seguida, foram levados para uma mesa de tensão de areia para realizar as tensões de 1, 6, 10 kPa. Em câmaras de Richards foram submetidas as tensões de 33, 100 e 300 kPa. Após cada tensão as amostras eram pesadas para determinar a retenção de água. Na sequência foram secas em estufa a 105°C e pesadas novamente.

O potencial hídrico dos pontos de 500, 1000 e 1500 kPa foram obtidos pelo aparelho WP4C (METER Group, Pullman, CA, USA). Dois dias antes da análise, foi preparado uma pequena amostra de solo (aproximadamente 300 g): triturado, peneirado em malha de 2mm, levemente umidificado e mantido em geladeira para uniformizar e manter a umidade da amostra. Nas cápsulas metálicas do próprio WP4C, adicionou-se uma pequena quantidade de amostra de solo, pesou-se em balança analítica e inseriu-se a cápsula no aparelho para leitura do potencial hídrico. Este procedimento de pesagem da amostra e leitura no aparelho foram realizadas diversas vezes, com diferentes pontos de umidade do solo, que permaneceu na bancada secando ao ar livre. Com os diversos pontos obtidos, calculou-se uma curva em escala logarítmica de retenção de água. Com a curva de retenção foi calculada a porosidade total, macroporosidade, microporosidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível.

Com os dados de capacidade de campo foram estabelecidos quatro tratamentos:

CC97 – Umidade mantida entre 90 a 100% da CC durante todo o cultivo;

CC83 - Umidade mantida entre 75 a 85% da CC durante todo o cultivo;

CC69 - Umidade mantida entre 60 a 70% da CC durante todo o cultivo;

CC83pc - Umidade mantida entre 75 a 85% da CC durante todo o cultivo,

mas com corte da irrigação quatro dias antes da colheita dos cones

O solo para o cultivo foi peneirado em uma malha de 2,25 cm² e então colocado nos vasos plásticos de capacidade de 25 litros. O transplante das mudas ocorreu em 23 de agosto de 2021. Utilizou-se as cultivares Cascade e Chinook provenientes do viveiro de mudas de lúpulo da cervejaria AmBev, de Lages/SC. A adubação foi realizada com NPK solúvel, de acordo com o resultado da análise de solo e a recomendação para cultura conforme Rufato et al. (2021).

Os tratamentos iniciaram no dia 21 de setembro de 2021. Para o controle dos níveis de capacidade de campo, os vasos foram pesados duas vezes por semana em uma balança eletrônica, e por umidade gravimétrica, calculado a necessidade de água para cada vaso. Todo o volume de água adicionado foi registrado. A condução das plantas foi realizada em sisal, mantendo dois ramos por planta, e semanalmente, a altura das plantas foram medidas com uma trena.

Periodicamente, foi feito controle fitossanitário para ácaro e controle preventivo para doenças fúngicas com produtos químicos e biológicos. Para registro da temperatura e umidade durante todo o ciclo, utilizou-se um datalogger modelo LogBox-RHT-LCD, com registros a cada 30 minutos.

A partir dos dados de temperatura, calculou-se o conceito de graus-dia (GD), seguindo as metodologias de Piconi et al. (2021) e Gonsaga (2021), utilizando a seguinte fórmula:

$$GD = \frac{(T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}})}{2} - T_b$$

onde:

$T_{\text{máx}}$ = temperatura máxima do dia (°C)

$T_{\text{mín}}$ = temperatura mínima do dia (°C)

T_b = temperatura basal inferior (10°C para o lúpulo)

Durante o ciclo de cultivo, realizou-se análises fisiológicas com o o medidor portátil de fotossíntese IRGA (Infra-Red Gas Analyzer), modelo LI-6400 (LI-COR). Para cada planta, obteve-se as variáveis de taxa fotossintética líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), eficiência do uso da água da planta ($[\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]^{-1}$), concentração intercelular de CO_2 no mesófilo ($\mu\text{mol CO}_2$), relação da concentração intercelular de CO_2 no mesófilo sobre a concentração de CO_2 externa atual ($\mu\text{mol CO}_2$). Estas avaliações foram realizadas nos dias 01/12/2021 e 7/01/22 para a cultivar Cascade e nos dias dias 01/12/2021, 07/01/22 e 21/03/22 para a cultivar Chinook, em todas as plantas de todos os tratamentos, em folhas saudáveis, localizadas aproximadamente na altura do peito.

As plantas foram colhidas conforme o ponto de colheita, ocasionando em dias distintos para cada planta, e não todas no mesmo dia. O ponto de colheita foi determinado pelo toque e aspecto visual, com o cone apresentando suas brácteas verdes, secos ao toque e com a lupulina de coloração amarela dourada. Avaliou-se a duração do ciclo (em dias), altura final da planta, número de cones,

comprimento (cm), largura (cm) e peso médio (g) dos cones, massa fresca (g) e seca dos cones (%) e massa fresca da parte aérea (g) e consumo total de água durante o ciclo (l). A determinação da matéria seca foi realizada utilizando alguns cones de cada planta, secando-os até peso constante e aplicando a seguinte fórmula:

$$MS (\%) = [(massa\ fresca\ cones\ (g))/massa\ seca\ cones]*100$$

O restante dos cones colhidos foram secos em estufa de circulação forçada a $35 \pm 2^\circ\text{C}$ até 10% de umidade, seguindo a seguinte fórmula:

$$10\% \text{ umidade} = (MS (\%)/90) * massa\ fresca\ da\ amostra$$

Após a secagem, as amostras foram acondicionadas em embalagens plásticas à vácuo e armazenadas em freezer para posterior análise de alfa e beta ácidos e perfil de compostos voláteis.

Para a extração dos alfa e beta ácidos, foi utilizado 1 grama de cone macerado em nitrogênio líquido. Em seguida, foram adicionados 2 ml de metanol, 4 ml de HCl 0,1 M e 10 ml de éter etílico em um erlemeyer coberto com papel alumínio e mantido sob agitação em ultrassom por 15 min. Após este período, filtrou-se as amostras com papel filtro e esperou-se a separação das fases móveis, para em seguida coletar a fase superior e filtrar em filtro de seringa 45 micras. Posteriormente, as amostras foram diluídas 20 vezes e mantidas em freezer para análise cromatográfica.

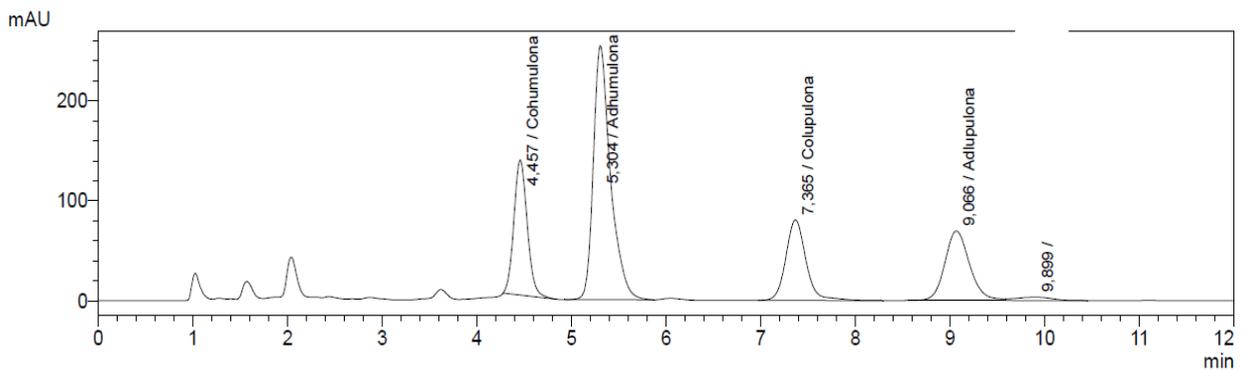
Figura 4 - Separação das fases líquidas durante o processo de extração de alfa e beta ácidos em lúpulo.



Fonte: PEREIRA, 2022.

A quantificação dos alfa e beta ácidos foi realizada em um CLAE Shimadzu modelo LC-2050, em uma coluna RESTEK C18 5 μm 4,6x150 mm. A fase móvel foi composta por 85% de metanol e 15% de água acidificada com ácido fosfórico (0,025%), em um fluxo de 1,4 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$, injeção de 20 μL da amostra, com forno a 40 $^{\circ}\text{C}$, comprimento de onda de 314 nm e detector DAD. Para a curva de calibração, utilizou-se o padrão ICE 4 - ASBC (American Society of Brewing Chemists), e quantificou-se os alfa ácidos cohumulona e adhumulona e os beta ácidos colupulona e adlupulona.

Figura 5 - Cromatograma de uma amostra de lúpulo cultivar Cascade com a identificação dos alfa ácidos cohumulona e adhumulona e dos beta ácidos colupulona e adlupulona.



Fonte: elaborado pela autora, 2023.

As análises de compostos voláteis foram realizadas por cromatografia a gás. Amostras de 0,5 g dos cones macerados previamente com nitrogênio líquido foram acondicionados em vial de 40 ml para headspace, adicionados 6 ml de água destilada e levado à placa aquecedora (30 ± 1 $^{\circ}\text{C}$) com barra magnética. O vial permaneceu em equilíbrio sob agitação por 10 minutos, e em seguida a fibra SPME (DVB/CAR/PDMS) foi exposta ao headspace por mais 10 minutos, para adsorção dos compostos voláteis. Em seguida, a fibra 50/30 μm DVB/CAR/PDMS Metal alloy/Metal alloy (1 cm) Gray/plain foi injetada no cromatógrafo a gás acoplado com espectrômetro de massas (sistema Perkin Elmer; modelo Clarus 680 GC/ SQ8S MS) (Perkin Elmer), utilizando hélio como gás de arraste a um fluxo de 1 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Utilizou-se uma coluna ZB-624plus, marca Zebron, de 30 metros de comprimento. A fibra permaneceu no injetador

pelos primeiros 5 minutos de corrida. A temperatura do detector foi de 220°C, e utilizou-se um Split de 25 ml.min⁻¹. A temperatura inicial do forno foi de 60°C, com uma rampa de aquecimento de 3°C.min⁻¹ até o máximo de 200°C. As temperaturas do detector e da transferline foram de 250 e 200°C, respectivamente, e a duração total da corrida foi de 46,67 minutos.

Os compostos foram identificados pela comparação dos espectros de massa, através da biblioteca do *National Institute of Standards and Technology* (NIST), versão 2.0, 2014 para cada composto. Para auxiliar a identificação dos compostos voláteis, 3 µL uma mistura padrão de n-alcenos (C7 a C40, Sigma-Aldrich) na concentração de 10 µL.ml⁻¹ foi injetada no CG/EM, e analisada nas mesmas condições da amostra. Os tempos de retenção dos alcanos foram utilizados para calcular o índice de retenção (IR) de cada composto volátil na amostra, comparando com os índices de retenção já encontrados para colunas de mesma polaridade.

Para avaliação da atividade antioxidante e teor de compostos fenólicos totais, preparou-se previamente um extrato, realizado com 0,5g de cone macerado e 20 ml de etanol 50%, mantidos em banho maria (60°C) por 1 hora. Em seguida, as amostras foram centrifugadas em uma centrífuga Himac (modelo CR22N, Shimadzu, Japão) por 10 minutos a 8000 rpm e em seguida, filtradas e armazenadas em freezer.

A quantificação dos compostos fenólicos totais foi realizada pelo método Folin-Ciocalteu, conforme descrito por Roesler (2007), com uso de ácido gálico como padrão. A solução de ácido gálico foi preparada utilizando 10 mg de ácido gálico em 100 mL de metanol. A curva padrão foi obtida com diferentes alíquotas da solução de ácido gálico e metanol, em concentrações de 0, 20, 40, 60, 80 e 100 µL L⁻¹. Para a leitura das amostras foi utilizado 100 µL do extrato dos frutos adicionado de 605 µL de Folin-Ciocalteu (em proporção 1 de Folin-Ciocalteu: 3 de água destilada) e 1 mL de carbonato de cálcio (10%). A solução foi mantida em escuro por 30 minutos e a leitura realizada em uma leitora de microplacas modelo EnSpire (PerkinElmer, USA) no comprimento de onda de 765 nm, expresso em equivalente de ácido gálico (EAG; mg EAG 100 g⁻¹ massa fresca).

A atividade antioxidante total foi obtida pelos métodos DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidrazila) descrita por Rufino et al. (2007a) com adaptações e ABTS (2,2-azinobis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfônico) de acordo com Rufino et al.

(2007b).

Para o preparo da solução de DPPH 60 μM foram dissolvidos 2,4 mg de DPPH em álcool metílico e adicionado álcool metílico até completar o volume de 100 ml em um balão volumétrico. Para cada amostra foi utilizado 0,1 ml do extrato com 3,9 mL do radical DPPH, adicionados em tubo falcon. Em ambiente escuro a amostra foi agitada em Vortex e mantida em repouso por 30 minutos. Para leitura da solução, foram adicionados 2 ml da solução na placa e lida em comprimento de onda de 515 nm na leitora de microplacas modelo EnSpire (PerkinElmer, USA), expressa em μMol de equivalente Trolox 100 g^{-1} de massa fresca.

No método ABTS foi preparado uma solução estoque de ABTS 7 mM dissolvendo 192 mg de ABTS em água destilada até atingir o volume de 50 mL. A solução de persulfato de potássio 140 mM foi obtida com 378,4 mg de persulfato de potássio dissolvido em água destilada e completado seu volume para 10 mL com água destilada. O radical ABTS foi preparado a partir da reação de 5 mL da solução estoque de ABTS com 88 μL da solução de persulfato de potássio, que foi mantida em ambiente escuro e temperatura ambiente por 16 horas. Após este período, foi diluído 1 mL desta mistura em álcool etílico e ajustado com a adição de mais reagente se necessário até que atingir uma absorção de $0,7 \text{ nm} \pm 0,05 \text{ nm}$ a 734 nm. A solução padrão de trolox foi obtida com a dissolução de 25 mg de trolox em álcool etílico e completado o volume com álcool etílico para 50 mL.

A curva padrão de trolox foi realizada utilizando uma alíquota de 30 μL solução de trolox preparada anteriormente em concentrações de 100 μM , 500 μM , 1000 μM , 1500 μM e 2000 μM e agitada com 3 mL da solução do radical ABTS. A leitura foi realizada após 6 minutos da mistura em 734 nm. A partir da leitura das soluções foi calculada a equação da reta, utilizada para calcular a absorbância referente a 1000 μM de trolox.

As leituras das amostras foram realizadas em triplicata utilizando 30 μL do extrato dos frutos obtido anteriormente misturados a 3 mL do radical ABTS. A solução foi agitada em vortex e realizada a leitura 6 minutos depois da agitação. O valor obtido foi utilizado na equação da reta e expresso em μM trolox g de massa fresca.

Para análise estatística, nesta safra, se considerou um experimento para

cada cultivar. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e 4 repetições. Cada repetição foi representada por 1 planta. Os resultados foram submetidos à análise de variância, após o teste de normalidade e homogeneidade de variâncias. As médias foram avaliadas pelo teste estatístico Tukey ($p < 0,05$), pelo software SAS® Studio.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises químicas do Cambissolo Húmico utilizado estão apresentados na Tabela 1, e os atributos físicos na Tabela 2. Com as porcentagens de 44, 28 e 28% de areia, silte e argila, respectivamente, o solo se classifica como de textura franca/média. A textura média é característica de Cambissolos, que são facilmente encontrados na região serrana de Santa Catarina, onde as condições de relevo e clima são propícias à sua formação (EMBRAPA, 2004).

A textura do solo influenciará diretamente na capacidade de retenção de água. A partir da determinação da Capacidade de Campo é possível se trabalhar com irrigação conhecendo-se os limites máximo e mínimo de absorção de água do solo em questão, sem desperdício de água e energia durante o cultivo, além de não saturar o solo e não comprometer o desenvolvimento das raízes em ambientes anóxicos.

Tabela 1 - Análise química de um Cambissolo Húmico coletado em área de lavoura da Fazenda Experimental do CAV/UEDESC em Lages, SC.

Registro	Cx.	Cel.	Identificação da amostra	Área (ha)	Georref.	Compl.	Entrada	Emissão
40026	1083	38	FECAV	-	-	-	21/07/2021	04/08/2021

Registro	pH-H ₂ O (1:1)	Índice SMP	Ca	Mg	Al	H + Al	CTC efetiva	Saturação (%)	
			cmolc/dm ³					Alumínio	Bases
40026	5.8	6.2	9.27	4.58	0.00	3.50	14.87	0.00	80.96

Registro	M. O.	C. O.	Argila	P Mehlich	P Resina	S	Na	K	CTC pH 7,0	K
----------	-------	-------	--------	-----------	----------	---	----	---	------------	---

	%			-----mg/dm3-----					cmolc/dm3	
40026	4.6	2.67	34	15.1	-x-	-x-	1	400	18.37	1.023

Registro	Cu	Zn	B	Fe	Mn	Relações				
	Mehlich	Mehlich		Mehlich		mg/dm3			Ca/Mg	(Ca+Mg)/K
40026	4.5	1.6	-x-	54.1	3.3	2.0	13.539	0.275		

OBS: Carbono orgânico semi-total.

Fonte: Laboratório de rotina, CAV/UEDESC.

Tabela 2 - Atributos físicos do Cambissolo Húmico coletado na Fazenda Experimental do CAV/UEDESC e utilizado nos vasos para condução de lúpulo em estufa.

Areia	Silte	Argila	PT	Macro	Micro	CC	PMP	AD	DS
-----g 100g ⁻¹ -----			-----m ³ m ⁻³ -----			----- Mg m ⁻³ -----			
44	28	28	0,58	0,15	0,43	0,42	0,19	0,23	1,12

PT: Porosidade Total; Macro: Macroporosidade; Micro: Microporosidade; CC: Capacidade de Campo; PMP: Ponto de Murcha Permanente; AD: Água Disponível; DS: Densidade do Solo.

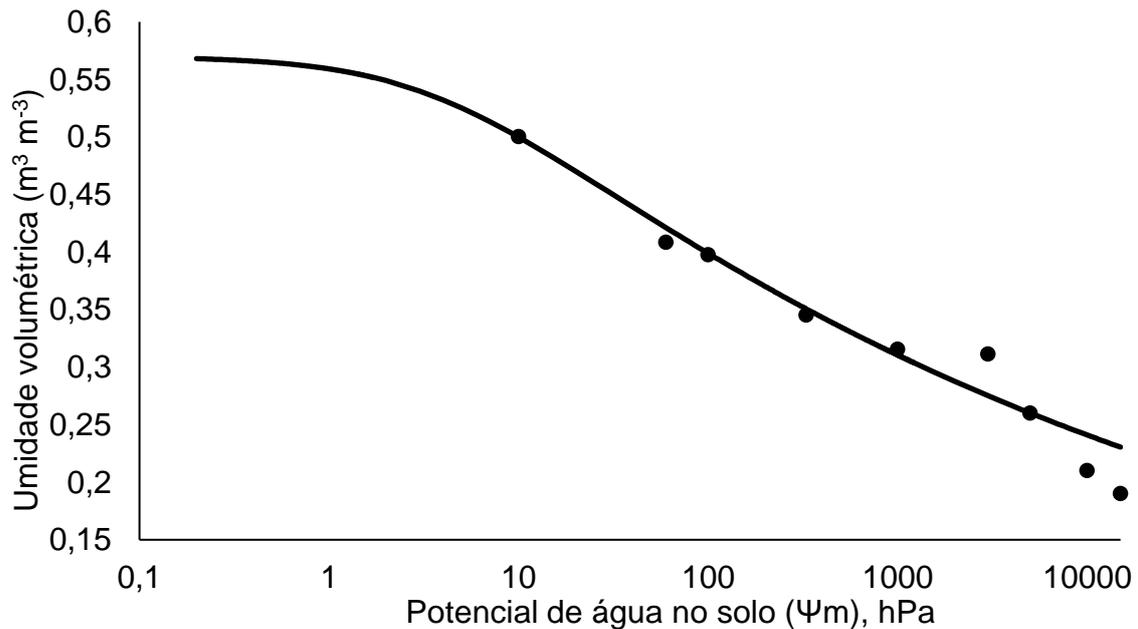
Fonte: elaborado pela autora, 2023.

A água disponível para o cultivo de plantas se encontra na faixa de 0,19 a 0,42 m³ m⁻³ (Tabela 1 e Figura 2). Antinoro et al. (2017) demonstraram que a umidade do solo, e consequentemente a curva de retenção de água, é variável de acordo com as relações de areia, silte e argila do solo, evidenciando que não se pode atribuir valores gerais de capacidade de armazenamento de água para solos em geral.

A proporção dessas partículas no solo interfere diretamente no tamanho dos poros onde a água fica retida. Partículas maiores, como a areia, tendem a resultar em poros grandes, enquanto partículas menores, como é o caso da argila, proporcionam ao solo, poros de menor tamanho (DING et al, 2016). A qualidade física do solo e sua relação com a disponibilidade de água foi estudada por Zangiabadi et al. (2020), que concluíram que solos com poros menores e maior diversidade de tamanho de poros tendem a ter mais água disponível, e consequentemente, uma menor limitação ao crescimento de vegetais em geral. Além disso, solos de textura mais fina (geralmente mais argilosos) possuem maior capilaridade, e esta característica confere ao solo maior capacidade de

retenção de água quando comparado com solos de textura média ou grossa (REYNOLDS, 2018).

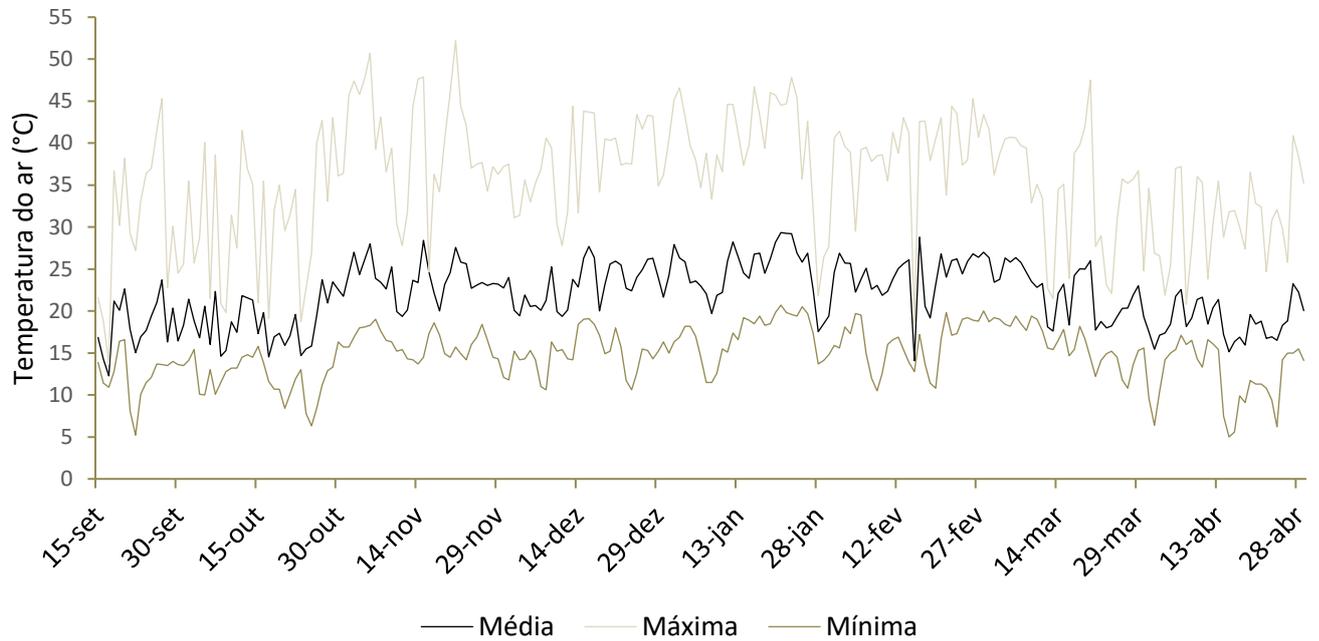
Figura 6 - Curva de retenção de água em função do potencial matricial do Cambissolo Húmico, coletado na Fazenda Experimental do CAV/UEDESC. Lages, SC.



Fonte: elaborado pela autora, 2023.

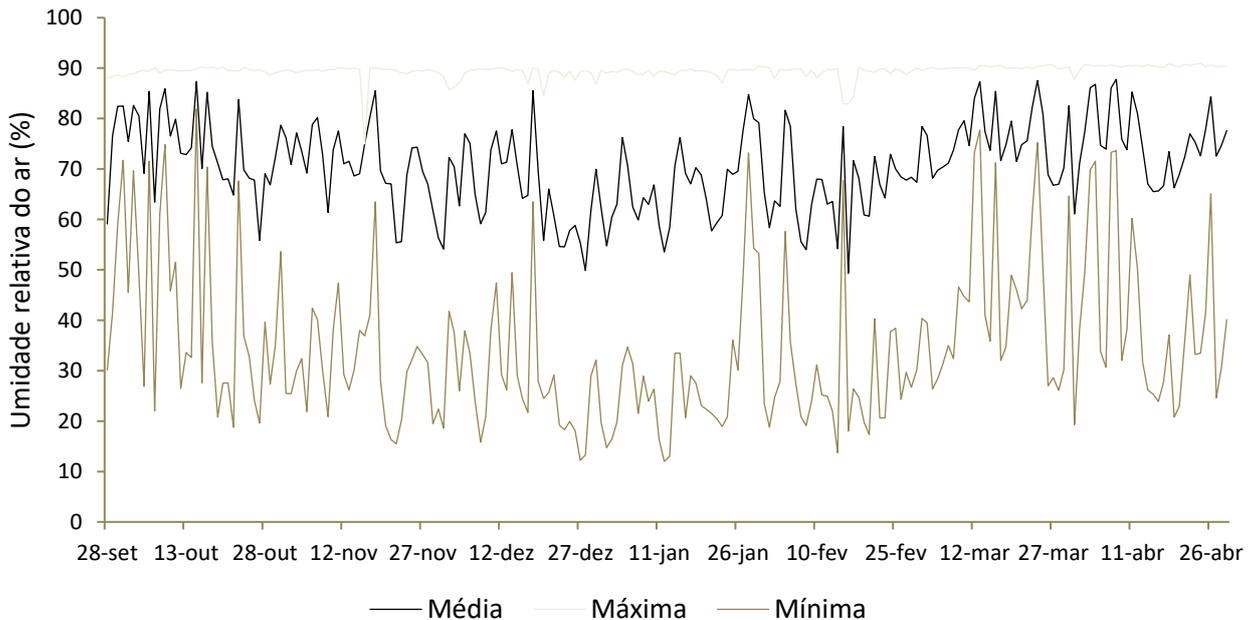
Nas Figuras 7 e 8 estão ilustradas as temperaturas e umidades do ar ao longo do período de experimento. Por estar localizado na região serrana de Santa Catarina, foi comum observar grandes amplitudes térmicas durante o período de safra, e por ser um ambiente de estufa, foram registrados alguns dias de temperaturas extremas (superiores a 45°C), não naturais para a região. Muito provavelmente, essas condições induziram algum grau de estresse térmico nas plantas avaliadas, pois temperaturas muito elevadas afetam a assimilação de carbono e reações fotoquímicas, inativam enzimas, reduzem a eficiência fotossintética e podem causar morte celular (ZAHRA et al. 2023).

Figura 7 - Temperatura (°C) da estufa durante o período do experimento, safra 2021/2022. Lages, SC. Lages, SC.



Fonte: elaborado pela autora, 2023.

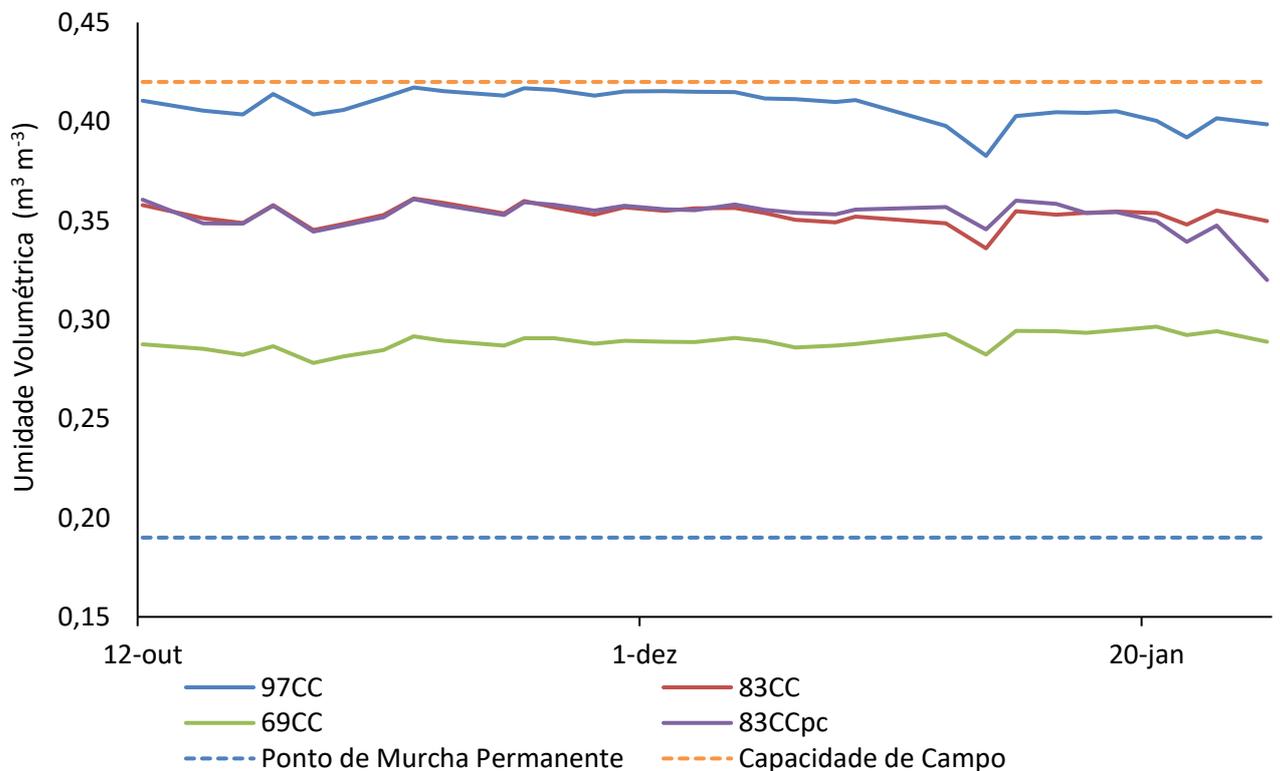
Figura 8 - Umidade relativa do ar (%) na estufa durante o período de experimento, safra 2021/2022. Lages, SC.



Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Na Figura 9 estão representados os teores de umidade do solo mantidos em cada tratamento durante o experimento, dentro do intervalo de água disponível para o solo utilizado (entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo).

Figura 9 - Umidades do solo de cada tratamento durante o cultivo de lúpulo Cascade em vasos, safra 2021/2022. Lages, SC.



97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

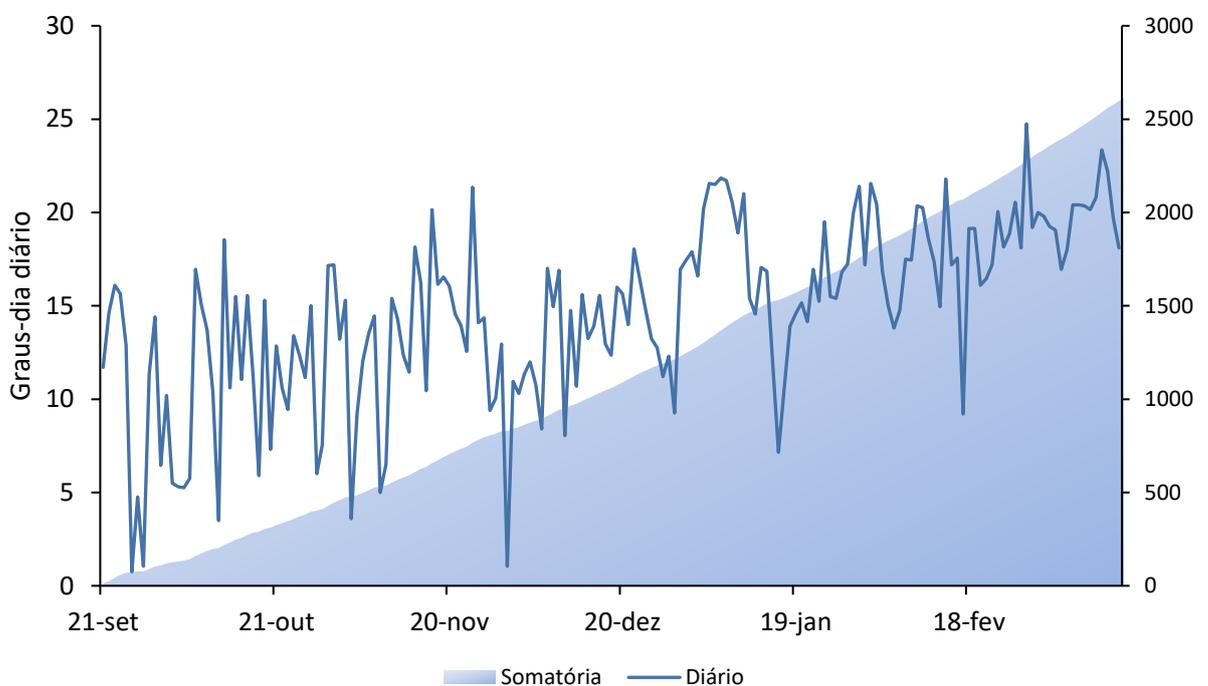
Os dados de cada cultivar serão apresentados a seguir separadamente.

3.3.1 CULTIVAR CASCADE

O acúmulo de graus-dia ao longo de todo o ciclo na cultivar Cascade alcançou valores próximos a a 2800, com uma grande variação nos valores diários, desde 5 até 24 graus-dia, como consequência da variação de temperatura dentro da estufa. A determinação dos graus-dia pode auxiliar no entendimento da exigência térmica das plantas, e servir como base para

determinar áreas de zoneamento climático para as culturas (ASSAD et al. 2008). Como o acumulado em graus-dia está diretamente relacionado com as condições de temperatura do ambiente de cultivo, a duração do ciclo do lúpulo, e de outras culturas em geral, pode variar conforme a localidade. Esta situação foi demonstrada por Marceddu et al. (2020), que observaram acúmulos de graus-dia diferentes para cada estágio fenológico de lúpulos cultivados em duas regiões da Itália.

Figura 10 - Graus-dia diário e somatório ao longo do ciclo de cultivo de lúpulo Cascade. Safra 2021/2022.



Fonte: elaborado pela autora, 2023.

O consumo médio de água por planta em cada condição de umidade (Tabela 3) resultou em uma diferença de até 30 litros entre os tratamentos de maior e menor umidade do solo. Entretanto, a diferença na necessidade de água para manter as umidades de cada condição foi sendo visualizada com mais facilidade conforme as plantas foram se desenvolvendo e a temperatura ambiente diária foi se elevando. Plantas maiores e temperaturas mais altas aumentam a evapotranspiração nos vasos, necessitando que o controle de umidade fosse verificado com maior frequência na fase final do cultivo em relação ao início da brotação das plantas, principalmente nas plantas mantidas no tratamento de 97CC. Bakhshoodeh et al. (2022) observaram menor

evapotranspiração (mm/dia) em plantas com limitada disponibilidade de água devido à redução da transpiração pela planta enquanto a evaporação do solo continuou a ocorrer.

Tabela 3 - Consumo médio total (L) de água durante o ciclo do cultivo do lúpulo Cascade, no primeiro ano de experimento, cultivado em vasos com Cambissolo Húmico em ambiente de estufa sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.

Tratamento	Consumo médio total de água (litros)
97CC	98,0
83CC	74,1
69CC	67,9
83CCpc	73,4

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

A fotossíntese líquida, condutância estomática e a taxa transpiratória não diferiram entre os tratamentos quando avaliadas em dezembro/2021 (Figura 11). Entretanto, no mês seguinte (janeiro/2022), onde as plantas já estavam mais desenvolvidas, iniciando a fase de floração ou já desenvolvendo cones, estes mesmos parâmetros foram superiores nas plantas do tratamento 97CC, diferindo das demais condições hídricas. Para a eficiência do uso da água, no entanto, em nenhum dos momentos de avaliação observou-se diferença entre as condições de umidade do solo.

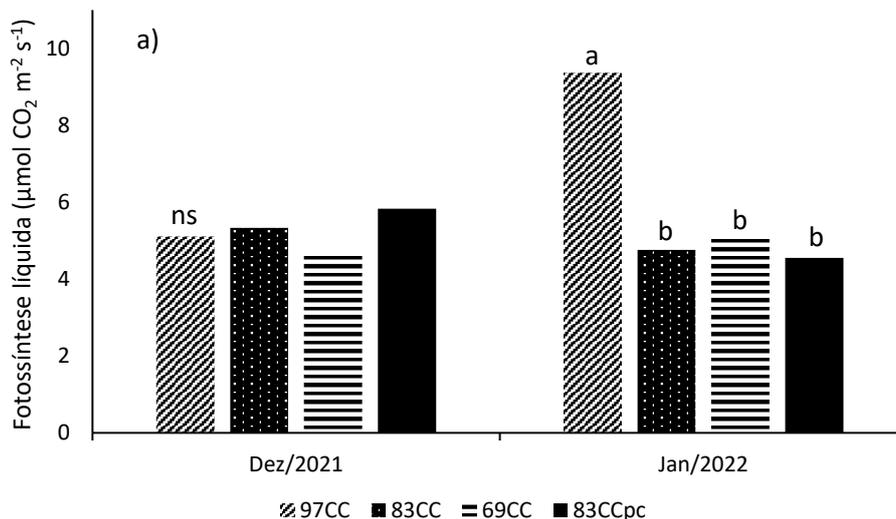
A redução na condutância estomática e na transpiração em ambiente com pouca disponibilidade hídrica, ou em condições de baixa umidade aliada a altas temperaturas, também foi observada por Eriksen et al. (2021). Condições de redução hídrica induzem o fechamento dos estômatos, restringindo a assimilação de carbono e trocas gasosas nas folhas (AHMAD et al. 2022).

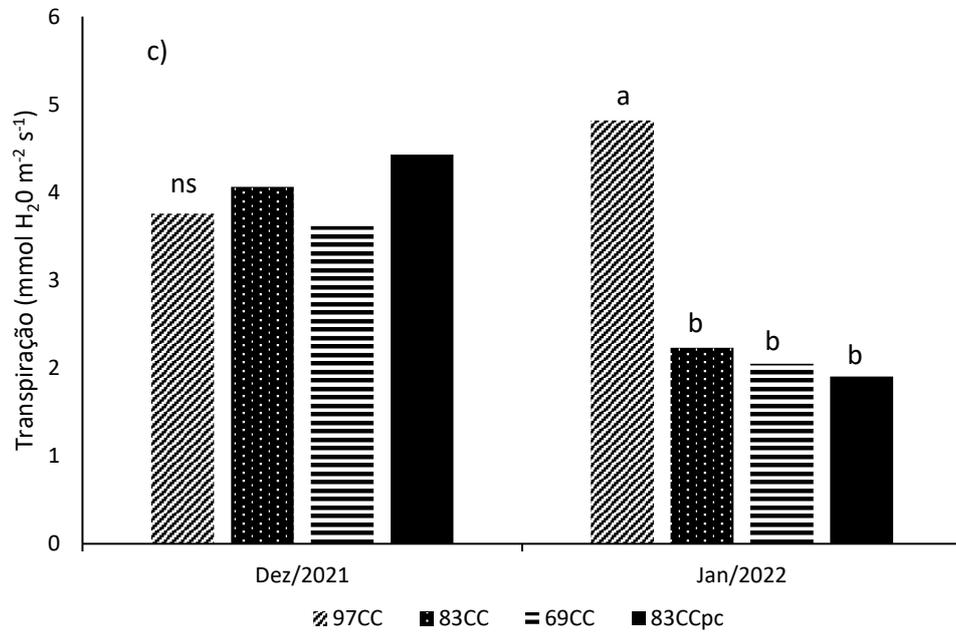
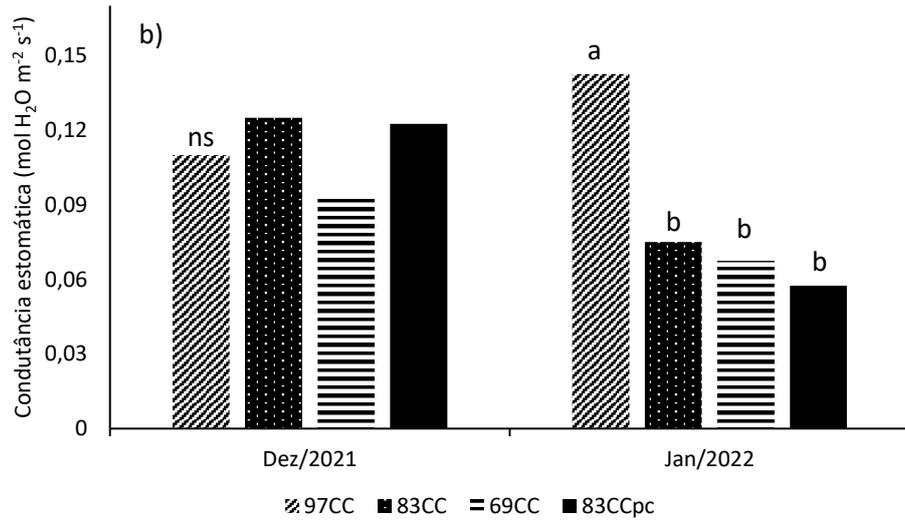
A fotossíntese é o principal processo afetado pela baixa disponibilidade hídrica, ocasionado pelo fechamento estomático e/ou baixo potencial hídrico das células na planta (KOLEC et al. 2016). Segundo os mesmos autores, várias

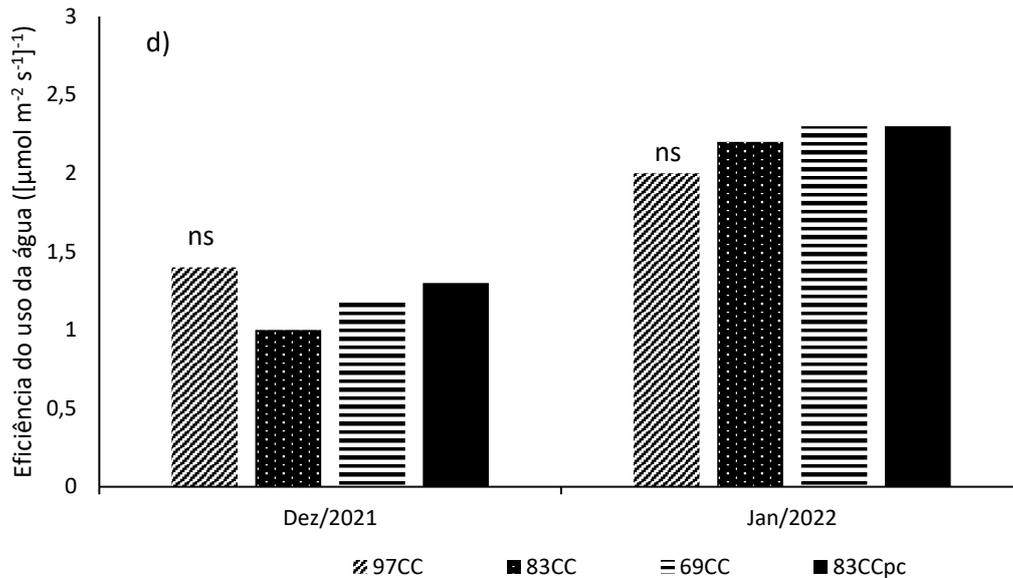
proteínas envolvidas no processo fotossintético tiveram suas expressões alteradas em plantas de lúpulo submetidas a condições de estresse hídrico.

De acordo com Farooq et al. (2009), a fotossíntese pode ser inibida sob déficit hídrico por diferentes mecanismos fisiológicos como: acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS) devido ao desequilíbrio entre ROS e a defesa antioxidante; redução do influxo de CO₂, devido ao fechamento estomático, direcionando mais elétrons para a formação de ROS; redução das atividades das enzimas rubisco, PEPcase, NADP-málica, FBPase e piruvato ortofosfato diquinase; e diminuição da síntese de ATP. Além da redução da fotossíntese líquida e da condutância estomática, outras respostas fisiológicas da planta são listadas por Ahmad et al. (2022), como perda do turgor celular e ajuste osmótico, redução do potencial hídrico e menor concentração interna de CO₂ nas células.

Figura 11 - Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (a), condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (b), transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (c) e eficiência do uso da água ($[\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]^{-1}$) (d) de plantas de lúpulo Cascade cultivadas sob diferentes níveis de umidade do solo em dezembro/2021 e janeiro/2022. Safra 2021/2022. Lages, SC.







Médias seguidas pela mesma letra na barra não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Para as variáveis de concentração intercelular de CO_2 e relação de CO_2 interna/externa, não se observou diferença estatística em ambos os meses de avaliação (Tabela 4). O carbono é absorvido pelos estômatos e utilizado na fotossíntese na etapa do ciclo de Calvin, sendo reduzido a açúcares (GAN et al. 2019). Portanto, uma vez que a condutância estomática e fotossíntese tenham sido reduzida, era esperado que a concentração intercelular também fosse menor, como observado por Kwon et al. (2019) em plantas de cravo submetidas a estresse salínico.

É possível que, uma vez que a taxa fotossintética foi reduzida, as reações da fase de assimilação do carbono pela enzima Rubisco também tenham sido reduzidas e muito pouco do CO_2 absorvido pelos estômatos foi utilizado, resultando em concentrações que não foram significativamente diferentes entre as condições de umidade. Além disso, diversos autores já relataram que a atividade da enzima Rubisco é reduzida em temperaturas mais elevadas (GUERRA et al. 2014; PERDOMO et al. 2017), e embora a atividade da Rubisco não tenha sido avaliada neste experimento, as temperaturas ambientes foram frequentemente altas (Figura 7).

Tabela 4 - Concentração intercelular de CO₂ no mesófilo (μmol CO₂) e relação da concentração intercelular de CO₂ no mesófilo sobre a concentração de CO₂ externa atual (μmol CO₂) de lúpulo Cascade em duas épocas de um mesmo cultivo. Safra 2021/2022. Lages, SC.

Tratamento	CO ₂		CO ₂ intercelular/ CO ₂ externo	
	1/dez	7/jan	1/dez	7/jan
97CC	97 ^{ns}	155 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,6 ^{ns}
83CC	107	166	0,6	0,6
69CC	93	130	0,5	0,5
83CCpc	92	126	0,5	0,5
Média	97	144	0,5	0,5
CV%	10	20	10,8	23,5

ns: não significativo pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

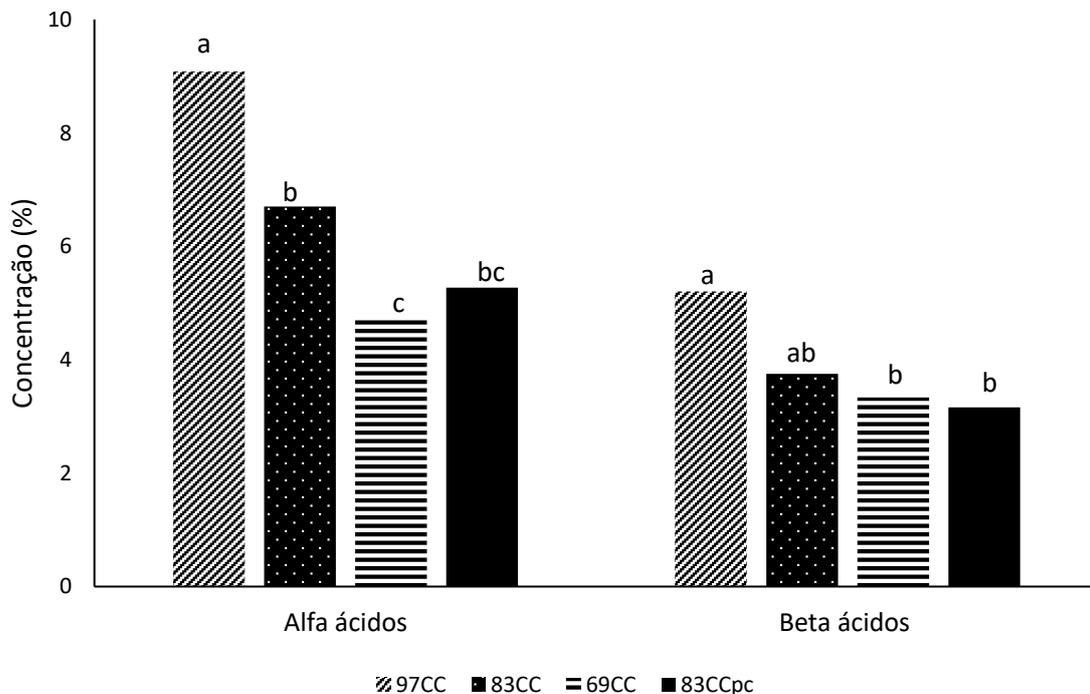
Fonte: elaborado pela autora, 2023.

As concentrações de alfa e beta ácidos foram significativamente maiores nas plantas submetidas a maior disponibilidade hídrica e observou-se uma redução destes compostos conforme a umidade do solo foi sendo restringida (Figura 4a, 4b). Estes resultados divergem dos encontrados por Nakawuka et al. (2017), que não observaram diferenças significativas nos teores de alfa ácidos de lúpulos Chinook, Columbus, Willamette e Mt. Hood, quando avaliados em níveis de irrigação de 100, 80 e 60%. Tais divergências podem ser explicadas pelas diferentes conduções dos experimentos, uma vez que Nakawuka et al. (2017) conduziram as plantas a campo aberto, e a variação de umidade no solo foi maior devido às precipitações naturais durante a safra que ocorreram em todos os tratamentos.

Concentrações de alfa ácidos próximos a 10% na cultivar Cascade também foi relatado por Afonso et al. (2021), enquanto que Rodolfi et al. (2019) obtiveram valores entre 3 e 7% para esta mesma cultivar. Embora a produção de alfa ácidos no lúpulo é considerada resultado do metabolismo secundário (DE KEUKELEIRE et al, 2003; JELÍNEK et al, 2012), estes compostos são produzidos a partir dos aminoácidos leucina, valina e isoleucina, que são

inicialmente dependentes da taxa fotossintética das plantas (metabolismo primário) (CLARK, et al. 2013). A fotossíntese, por sua vez, tem forte relação com a disponibilidade hídrica do solo e utilização da água pela planta, de maneira que plantas com maior suprimento de água, tendem a ter maior taxa fotossintética líquida (TAIZ et al. 2017). Os resultados desta pesquisa indicam que as plantas Cascade com maior taxa fotossintética (Figura 5a), e também maior disponibilidade hídrica, resultaram em teores mais elevados de alfa e beta ácidos, sugerindo que o metabolismo primário também interfere nos teores de alfa e beta ácidos.

Figura 12 - Concentrações de alfa e beta ácidos em lúpulo Cascade cultivado sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.



Médias seguidas pela mesma letra na barra não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$). 97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

A atividade antioxidante (ambos os métodos de avaliação) e o teor de compostos fenólicos também foram superiores no tratamento de maior umidade do solo (97CC) em relação às demais condições (Tabela 5). Segundo Arruda et al. (2021), o lúpulo, que tem grande potencial de uso na indústria farmacêutica devido a suas propriedades antioxidantes, pode ter a concentração destes

compostos alterados devido às suas condições de crescimento. Chrisfield et al. (2021) também afirmam que o lúpulo contém altas concentrações de antioxidantes, mas que ainda não se pode concluir se esta capacidade é devido aos ácidos presentes na planta, ou a combinação dos ácidos com demais compostos fenólicos. De acordo com Krofta et al. (2008), a capacidade da atividade antioxidante tem forte ligação com a quantidade total de polifenóis.

Os valores para o teor de compostos fenólicos foram semelhantes aos encontrados por Arruda et al. (2021) mas foram até 3 vezes maiores do que aqueles encontrados por Santos et al. (2020), na cultivar Cascade. Segundo Afonso et al. (2022), a acumulação de fenólicos pela planta é influenciada por diferentes fatores, incluindo o ano de cultivo, que envolve variáveis ambientais de precipitação, temperaturas e radiação solar, o que pode explicar essa diferença. Diversos compostos fenólicos já foram identificados em extratos alcoólicos de cones de lúpulo, como catequina, ácido cafeico, rutina, ácido vanílico, ácido p-cumárico ácido clorogênico e ácido gálico (SOTTO, et al. 2018; KESKIN et al., 2019). De acordo com Biendl, Pinzl (2009), o lúpulo também possui resveratrol, embora em baixas concentrações, e xanthohumol, benéficos à saúde devido as suas propriedades antioxidantes.

Assim como os alfa ácidos, os compostos fenólicos, embora se classifiquem como metabólitos secundários, dependem inicialmente da acumulação de metabólitos primários, como carboidratos, para sua formação. Essa produção de carboidratos se inicia com a fotossíntese e a absorção de CO₂ e água pela planta (KHARE et al. 2020). Uma vez que a absorção de água seja reduzida ou comprometida, o restante das reações bioquímicas também poderá ser influenciado e conseqüentemente, reduzido, o que explicaria a menor concentração nos tratamentos de menor umidade do solo.

Diferentes autores relatam aumento de compostos secundários pela planta em situações de estresse abiótico, como em situações de déficit hídrico, por exemplo, (MA et al. 2014; WANG et al. 2016) o que divergiria do encontrado nesta pesquisa. Entretanto, não se avaliou individualmente os compostos fenólicos, e pode ter ocorrido acúmulo de algum composto específico em detrimento de outros. Por outro lado, as condições de umidade em que as plantas foram submetidas podem não ter causado um estresse significativo a nível de aumentar a produção destes compostos como mecanismo de defesa.

Tabela 5 - Atividade antioxidante (métodos ABTS e DPPH) e teor de Compostos Fenólicos Totais de lúpulo Cascade cultivado sob diferentes umidades de solo, safra 2021/2022. Lages, SC.

Tratamento	ABTS ($\mu\text{Mol trolox.100 g}^{-1}$)	DPPH ($\mu\text{Mol trolox.100 g}^{-1}$)	CFT (mgEAG 100g ⁻¹)
97CC	72024 a	20442 a	2957,5 a
83CC	55004 b	6838 c	2144,0 b
69CC	56204 b	2972 d	1683,2 b
83CCpc	65977 a	13484 b	2098,4 b
CV (%)	4,9	10,5	12,8

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).
 97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo;
 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

As diferentes disponibilidades hídricas durante o cultivo em estufa não resultaram em diferenças significativas na duração do ciclo, na altura e na massa fresca da parte aérea das plantas, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Duração do ciclo de cultivo (dias), altura final da planta (cm) e massa fresca da parte aérea (g) de lúpulo Cascade, no primeiro ano de experimento, cultivado em vasos com Cambissolo Húmico em ambiente de estufa sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.

Tratamento	Ciclo (dias)	Altura de planta (cm)	Massa fresca parte aérea (g)
97CC	136 ^{ns}	400 ^{ns}	162 ^{ns}
83CC	118	454	201
69CC	127	440	150
83CCpc	124	450	172
Média	126	436	171
CV %	10	9	24

ns: não significativo pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo;

69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Os tratamentos também não influenciaram no número de cones por planta e na massa fresca total dos cones. Entretanto, quando se avaliou a massa fresca média total dos cones, observou-se que a condição de 69CC apresentou a maior massa média individual, diferindo, no entanto, apenas do tratamento de 83CCpc (Tabela 7). A massa seca dos cones no momento da colheita foi, em média de 30,7%.

Tabela 7 - Número de cones por planta, massa fresca total dos cones (g) e massa fresca média dos cones (g) de lúpulo Cascade, no primeiro ano de experimento, cultivado em vasos com Cambissolo Húmico em ambiente de estufa sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022. Lages, SC.

Tratamento	Número de cones.planta ⁻¹	Massa	
		fresca total dos cones (g)	Massa fresca média dos cones (g)
97CC	71 ^{ns}	24,8 ^{ns}	0,35 ab
83CC	81	35,6	0,44 ab
69CC	61	33,4	0,55 a
83CCpc	69	20,8	0,30 b
Média	71	28,7	-
CV %	22	26	26

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Em relação as demais características do cone (comprimento e largura médios), também não foram observadas diferenças entre os tratamentos, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Comprimento e largura médios (cm) das plantas de lúpulo Cascade, no primeiro ano de experimento, cultivado em vasos com Cambissolo Húmico em ambiente de estufa sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra

2021/2022. Lages, SC.

Tratamento	Comprimento	Largura média
	médio dos cones (cm)	dos cones (cm)
97CC	1,7 ^{ns}	1,3 ^{ns}
83CC	1,9	1,5
69CC	1,9	1,4
83CCpc	1,5	1,2
Média	1,8	1,3
CV %	14	14

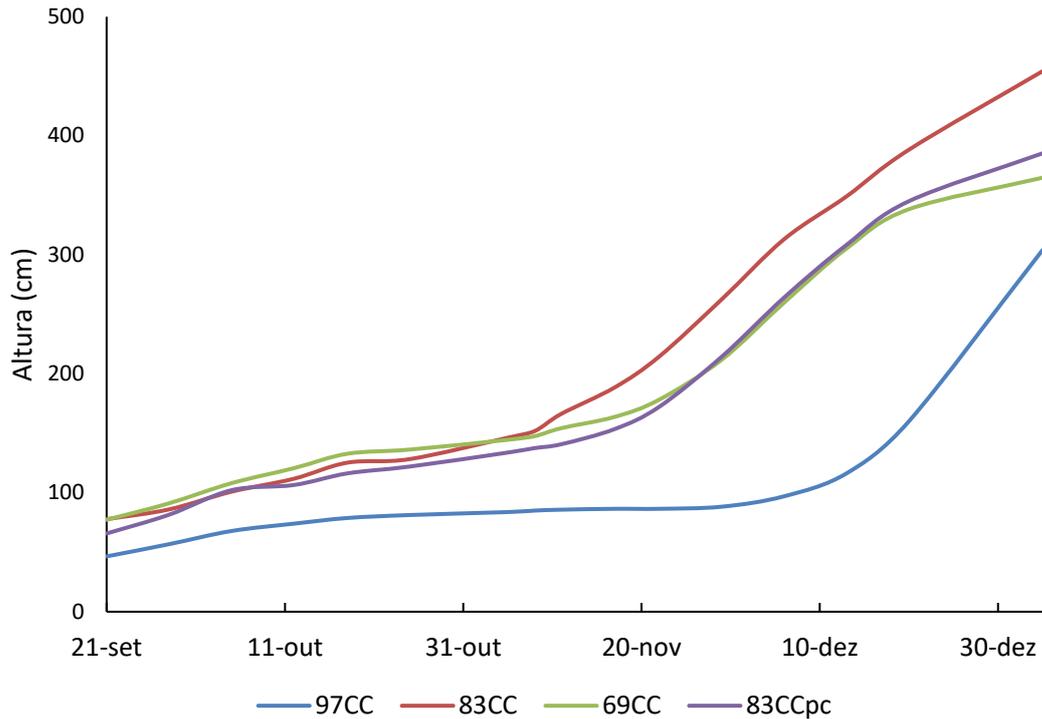
ns: não significativo pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Na figura 8, está ilustrado o comportamento de crescimento das plantas Cascade durante a safra 2021/2022. Embora a altura final não tenha apresentado diferença entre os tratamentos (Tabela 2), as plantas com maior disponibilidade hídrica (97CC) cresceram de forma mais lenta no início do ciclo, comparado aos demais tratamentos. O maior incremento em altura foi observado nas plantas de todos os tratamentos praticamente no mesmo período (entre dezembro/2021 e janeiro/2022), o que sugere que a cultivar tem maior resposta ao fotoperíodo dos dias, e não à disponibilidade hídrica do solo.

Figura 13 - Crescimento de lúpulo Cascade em diferentes umidades de solo ao longo do ciclo. Safra 2021/2022. Lages, SC.



97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

No perfil aromático do lúpulo Cascade foram identificados 14 terpenos, 6 ésteres, 2 álcoois e 1 aldeído (Tabela 3). A síntese desses compostos envolve vias metabólicas, genes e enzimas que atuam em funções de reprodução e defesa do vegetal (DUDAREVA et al 2008). Muitos destes compostos voláteis são subprodutos do metabolismo da planta ou se originam de reações oxidativas de moléculas precursoras destes voláteis (RETTBERG et al. 2018).

Os compostos β -Mirceno e (-)- β -Pineno foram os compostos detectados majoritários, independente das condições de umidade em que as plantas foram submetidas. O β -Mirceno também foi predominante nas análises de lúpulo Cascade e Chinook realizadas por Su et al. (2021). De acordo com Surendran et al. (2021), este composto possui atividades antienvhecimento, antioxidante, anti-inflamatória, antinoceptiva e influencia em atividades neurocomportamentais.

A maioria dos compostos voláteis majoritários, com exceção dos compostos β -Mirceno e 1-Octen-3-ol, estão mais relacionados com as plantas que se desenvolveram em altas condições de umidade de solo (entre 83 e 97% da capacidade de campo) (Figura 6). As variações nos compostos voláteis de

lúpulo devido a diferentes condições de ambiente foram demonstradas por Féchir et al. (2022), mas pouco se sabe sobre a influência específica da umidade do solo sobre estes compostos. Além disso, as condições de temperatura ambiental da estufa onde as plantas foram conduzidas foram extremamente altas (Figura 3), o que não caracteriza uma condição real de campo fácil de ser comparada com outros locais de produção.

A composição majoritária de terpenos no perfil de compostos voláteis foi identificada em diversas cultivares de lúpulo (PISTELLI et al. 2018; YAN et al. 2018; HONG et al. 2022). Os terpenos podem ser classificados em diversas classes, devido diferenças estruturais entre si, mas de maneira geral, um composto classificado como terpeno apresenta uma estrutura em bloco de cinco carbonos, ligadas entre si pela ordem “cabeça-a-cauda” (FELIPE et al. 2017). De acordo com Dietz et al. (2021), sesquiterpenos conferem aromas de amargor, adstringência e terroso, enquanto sesquiterpenos alcoois estão mais ligados a aromas frutados e ácidos.

Su et al. (2021) também avaliaram o perfil aromático da cultivar Cascade e detectaram o mesmo número de compostos ésteres, embora sejam diferentes do encontrado na atual pesquisa. Segundo os mesmos autores, a concentração de ésteres em lúpulo está fortemente relacionada com sua qualidade, e sugerem que a diferença do perfil aromático de uma mesma cultivar conduzida em diferentes regiões pode ser atribuída a disparidades ambientais.

Tabela 9 - Descrição do perfil de compostos voláteis (% de área) de lúpulo Cascade cultivado sob diferentes umidades do solo, safra 2021/2022. Lages, SC.

N°	Composto	IR_ref.	IR_calc.	% área				Descritor de aroma
				97CC	83CC	69CC	83CCpc	
Terpenos								
1	(-)-β-Pineno	1004	997	52,04 ± 29,80	45,84 ± 29,98	24,26 ± 40,97	26,56 ± 32,50	pinho, resina
2	β-Mirceno	993	1001	nd	24,39 ± 25,23	52,27 ± 8,92	47,69 ± 19,88	balsâmico, mosto, especiarias
3	Limoneno	1045	1044	0,98 ± 0,80	0,48 ± 0,40	0,30 ± 0,49	0,30 ± 0,18	limão, laranja
4	β-felandreno	1056	1050	2,91 ± 2,21	1,94 ± 1,80	0,88 ± 1,38	1,17 ± 0,90	menta, terebintina
5	cis-β-ocimeno	1058	1060	1,40 ± 0,71	1,20 ± 1,19	0,65 ± 1,06	0,51 ± 0,34	doce, erva
6	Copaeno	1410	1399	0,47 ± 0,35	0,27 ± 0,19	0,15 ± 0,33	0,23 ± 0,06	madeira, especiaria
7	Cariofileno	1456	1456	5,51 ± 3,73	3,30 ± 2,46	2,76 ± 3,32	2,66 ± 1,05	madeira
8	(E)-β-Farneseno	1471	1469	5,21 ± 3,45	3,20 ± 1,79	1,48 ± 2,04	2,55 ± 1,29	citros, verde
9	β-Copaene-4α-ol	1565	1460	0,54 ± 0,32	0,36 ± 0,22	0,26 ± 0,50	0,29 ± 0,09	
10	Humuleno	1488	1492	24,47 ± 15,94	15,85 ± 9,87	15,29 ± 16,29	14,87 ± 4,32	madeira, erva
11	γ-Muuroleno	1502	1501	0,36 ± 0,21	0,25 ± 0,16	0,22 ± 0,25	0,23 ± 0,08	erva, madeira, especiaria
12	β-Selineno	1530	1524	0,41 ± 0,27	0,22 ± 0,12	0,19 ± 0,26	0,21 ± 0,06	erva
13	α-Selineno	1510	1530	0,48 ± 0,33	0,19 ± 0,12	0,19 ± 0,26	0,15 ± 0,06	erva, madeira
14	Cadina-1(6),4-dieno	-	1543	0,85 ± 0,59	0,43 ± 0,26	0,44 ± 0,52	0,48 ± 0,15	especiaria, fruta

Alcoóis								
15	1-Octen-3-ol	1012	1020	nd	nd	nd	0,24 ± 0,09	terroso
16	Linalol	1122	1139	0,51 ± 0,04	0,28 ± 0,17	nd	0,17 ± 0,09	flor, lavanda
Ésteres								
17	Metil isoheptanoato	963	1012	0,70 ± 0,28	nd	0,23 ± 0,39	0,34 ± 0,11	
18	Isopentil isobutirato	1000	1034	0,67 ± 0,19	0,46 ± 0,25	nd	0,35 ± 0,09	frutado
19	2-Metilbutil isobutirato	1023	1038	1,05 ± 0,54	0,75 ± 0,31	0,30 ± 0,12	0,50 ± 0,23	frutado
20	Metil 4-metileno hexanoato	-	1056	0,24 ± 0,13	0,12 ± 0,05	nd	0,13 ± 0,01	
21	Metil 6-metil heptanoato	1068	1111	0,52 ± 0,17	0,36 ± 0,26	nd	0,29 ± 0,01	frutado
22	Metil 4-decenoato	-	1331	0,20 ± 0,15	0,12 ± 0,11	nd	0,09 ± 0,01	frutado
Aldeídos								
23	2-Hexenal, (E)-	-	NC	0,48 ± 0,35	nd	0,14 ± 0,05	nd	verde, folha

NC: não calculado; nd: não detectado.

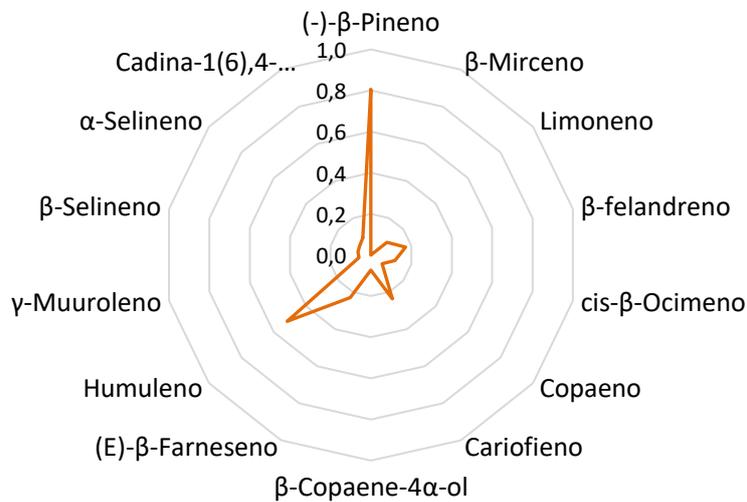
97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

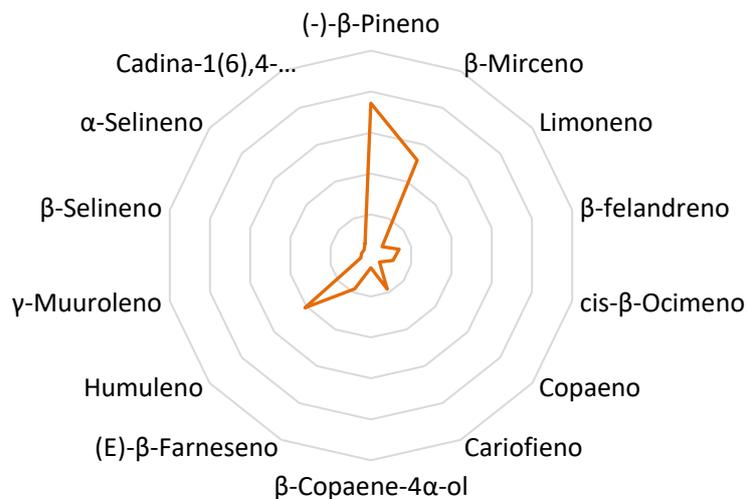
A variabilidade da composição de terpenos devido às condições de umidade pode ser mais facilmente visualizada na Figura 15. Os compostos (-)- β -Pineno e β -Mirceno apresentaram comportamentos inversos. Enquanto o primeiro apresentou maiores concentrações na condição de maior umidade, o segundo parece estar mais relacionado com menor disponibilidade hídrica, pois as maiores concentrações foram observadas nos tratamentos 69CC e 83CCpc.

Figura 14 - Perfil de terpenos de lúpulo Cascade cultivado sob diferentes umidades de solo. Safra 2021/2022.

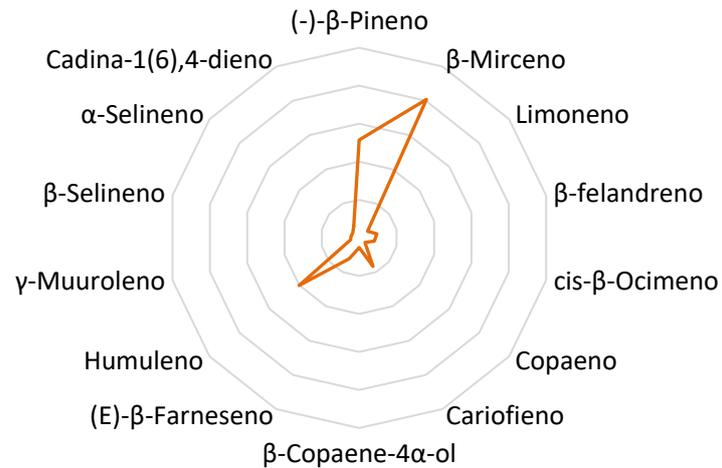
97CC



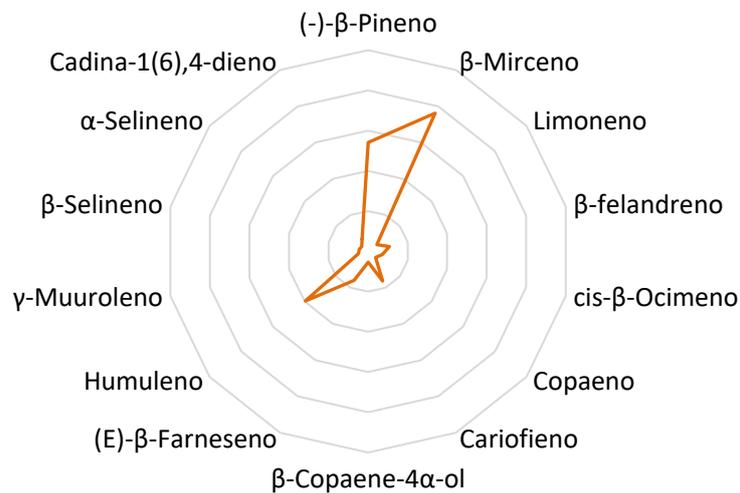
83CC



69CC



83CCpc



97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

3.3.2 CULTIVAR CHINOOK

Os graus-dia e seu acumulado durante o ciclo para a cultivar Chinook não foi realizado, uma vez que o ciclo de diversas plantas foi comprometido devido a condições ambientais adversas, e este cálculo não representaria valores reais.

O consumo médio total de água durante o ciclo de cultivo da cultivar Chinook para cada tratamento está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Consumo médio total de água durante o ciclo de cultivo de lúpulo cultivar Chinook sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022.

Lages, SC.

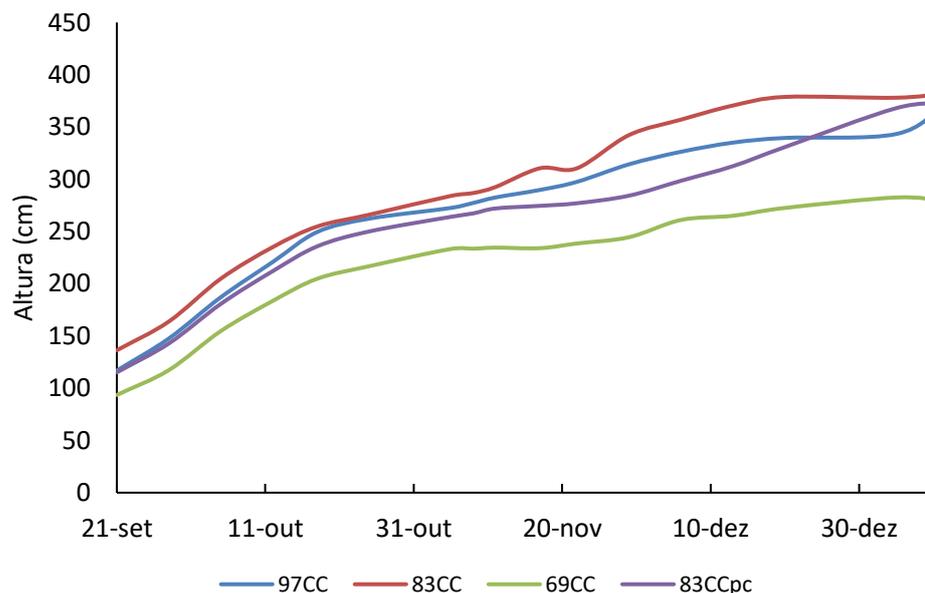
Tratamento	Consumo médio total de água (litros)
97CC	141,2
83CC	126,5
69CC	91,9
83CCpc	127,4

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

O crescimento das plantas Chinook apresentaram comportamento semelhante entre os tratamentos (Figura 15), sem um salto de crescimento tão pronunciado como observado na cultivar Chinook, por talvez ser menos sensível ao fotoperíodo. As plantas com menor disponibilidade hídrica (69CC) apresentaram a menor taxa de crescimento, embora na altura final das plantas, não tenham diferido dos demais tratamentos (Tabela 11).

Figura 15 - Crescimento de lúpulo Chinook em diferentes níveis de umidade do solo ao longo do ciclo. Safra 2021/2022. Lages, SC.



97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Nem todas as plantas da cultivar Chinook produziram cones, provavelmente pelo excesso de calor durante a safra. Os principais danos observados nas plantas foram queima e queda das folhas, principalmente as mais velhas, devido às altas temperaturas registradas na safra, principalmente nas últimas semanas de dezembro de 2021 e primeiras semanas de janeiro de 2022 (Figura 16). As plantas rebrotaram e emitiram novas folhas após o período mais quente, prolongando o tamanho do ciclo de cultivo. Apesar da recuperação das plantas, a produção de cones foi comprometida e nem todas as repetições tiveram colheita, algumas chegaram a apresentar emissão de brotos floríferos, mas não completaram o desenvolvimento, conforme Figura 17. As plantas que não produziram foram cortadas um dia após a última planta com cone ser colhida, e registrados os dados de altura e massa fresca da parte aérea.

Figura 16 - Lúpulo cultivar Cascade com sintomas de queima nas folhas por prováveis temperaturas elevadas na fase final do cultivo.



Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Figura 17 - Brotos de cones de lúpulo cultivar Chinook queimados por prováveis temperaturas elevadas durante a fase reprodutiva.



Fonte: elaborado pela autora, 2022.

A duração do ciclo de cultivo e altura final da planta do lúpulo Chinook não foram influenciados pela disponibilidade hídrica. A massa fresca da parte aérea foi superior no tratamento de 97CC, diferindo apenas do tratamento de 83CC, conforme Tabela 11. Considerou-se a duração do ciclo todo o período de avaliação, incluindo a fase de rebrote das plantas, e isto provavelmente significou um período maior do que as condições normais de cultivo, sendo, portanto, uma situação atípica e de difícil comparação com demais cultivos.

Tabela 11 - Duração do ciclo de cultivo (dias), altura final da planta (cm) e massa fresca da parte aérea (g) de lúpulo cultivar Chinook em primeiro ano de cultivo em estufa sob diferentes níveis de umidade do solo. Safra 2021/2022.

Lages, SC.

Treatmento	Ciclo (dias)	Altura de planta (cm)	Massa fresca parte aérea (g)
------------	--------------	-----------------------	------------------------------

97CC	204 ^{ns}	380 ^{ns}	183a
83CC	210	324	107b
69CC	190	385	125ab
83CCpc	204	344	154ab
Média	202	358	-
CV %	13	12	21

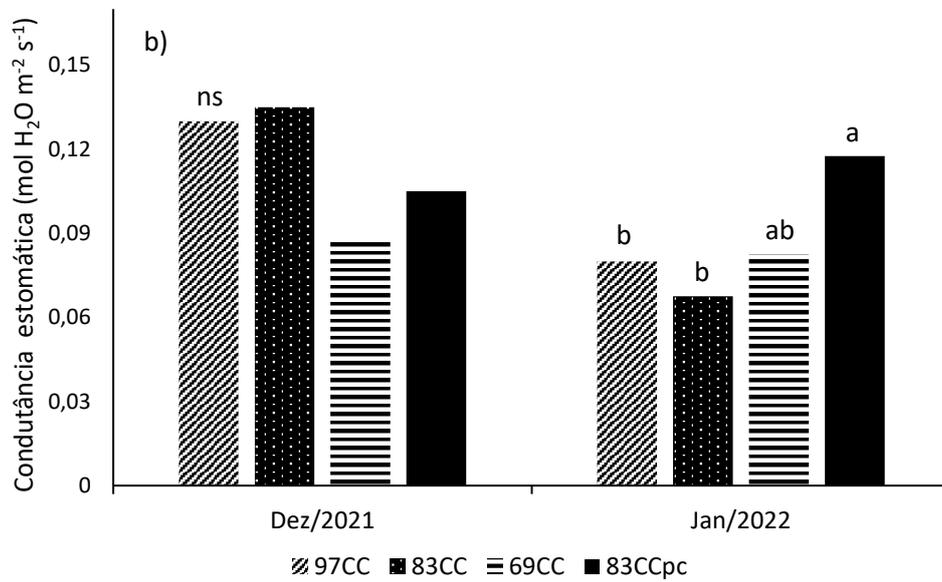
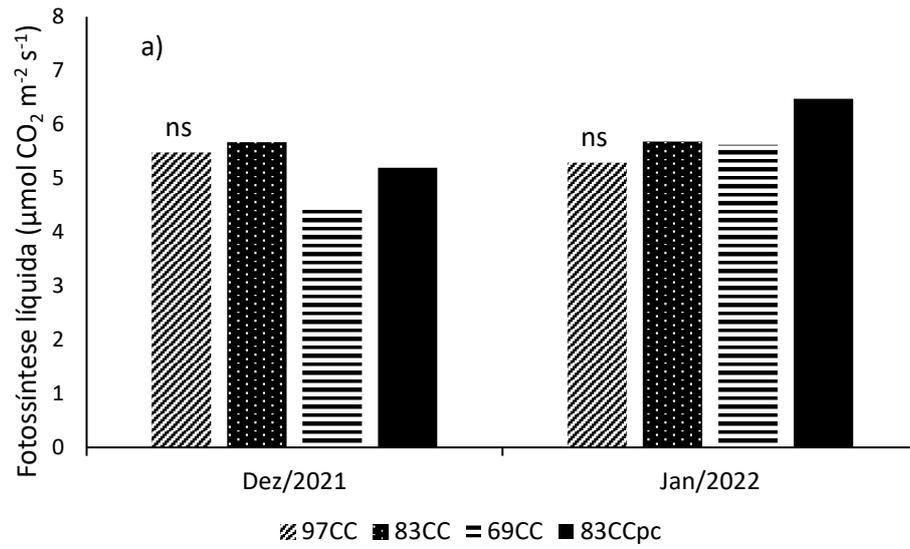
Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

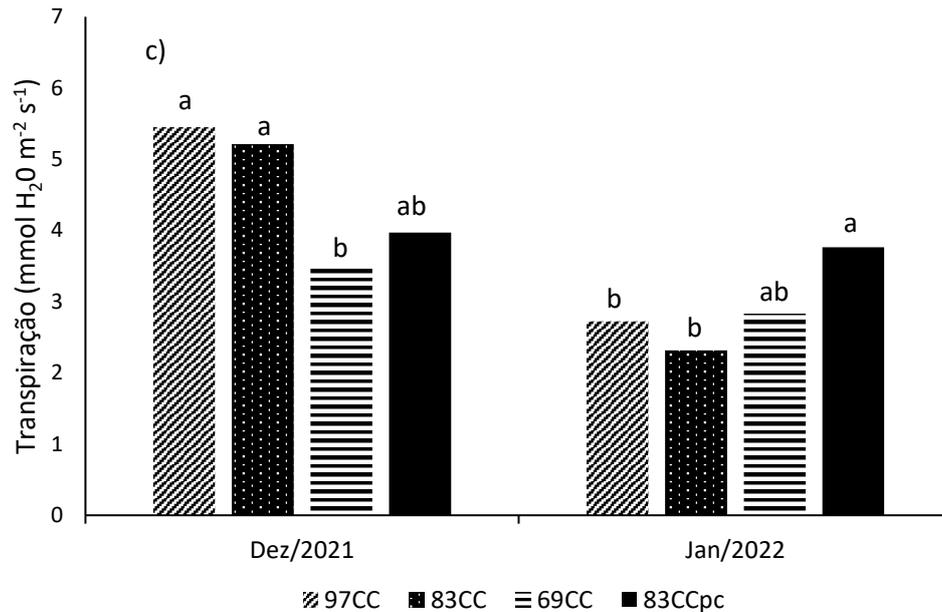
97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

As avaliações fisiológicas foram realizadas nos mesmos dias da cultivar Cascade, e após o rebrote das plantas, uma terceira avaliação foi realizada no dia 21 de março de 2022. A fotossíntese líquida não apresentou diferença entre os tratamentos quando avaliada nos meses de dezembro e janeiro (Figura 19a). Para a variável de condutância estomática, os tratamentos não diferiram entre si em dezembro (Figura 18b), enquanto que no mês seguinte, a condição de 83CCpc teve os maiores valores, embora não diferindo da condição de 69CC. Os dados de transpiração em dezembro indicam maior transpiração nas plantas com maior disponibilidade de água no solo (Figura 19c), e em janeiro, a menor transpiração foi observada nos tratamentos de 97CC e 83CC, comportamento inverso ao observado na análise do mês anterior.

Figura 18 - Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (a), condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (b) e transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (c) de plantas de lúpulo Chinook cultivadas sob diferentes níveis de umidade do solo em dezembro de 2021 e janeiro de 2022. Safra 2021/2022. Lages, SC.





Médias seguidas pela mesma letra na barra não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p > 0,05$); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Para as variáveis de concentração intercelular de CO_2 , relação da concentração intercelular de CO_2 no mesófilo sobre a concentração de CO_2 externa atual e eficiência do uso da água, não se observou diferença entre os tratamentos na primeira época de avaliação. Já no mês seguinte, os tratamentos de 83CC e 83CCpc foram os únicos tratamentos que diferiram entre si para estas mesmas variáveis (Tabela 12). Tais resultados, divergentes do esperado conforme relatado na literatura e observado na cultivar Cascade, podem ter sido influenciados pela incidência de ácaros, que embora não tenha sido quantificado, não foi uniforme entre as plantas, e algumas sofreram maiores danos do que outras. Além disso, visivelmente, as plantas Chinook foram mais suscetíveis aos danos dos ácaros e as altas temperaturas da safra do que a cultivar Cascade.

O dano causado pelo ácaro decorre do rompimento das células da epiderme da folha, afetando a fotossíntese dessas células, que se tornam cloróticas e em estágios mais avançados de ataque, se tornam amarronzadas e secam, podendo levar a planta a morte se o ataque for muito intenso (GOMEZ, 2021). Os danos observados nas plantas de lúpulo estão apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Sintomas de ácaro rajado em folhas de lúpulo. Safra 2021/2022.
Lages, SC.



Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Tabela 12 - Concentração intercelular de CO₂ no mesófilo (μmol CO₂), relação da concentração intercelular de CO₂ no mesófilo sobre a concentração de CO₂ externa atual (μmol CO₂) e eficiência do uso da água ([μmol m⁻² s⁻¹]⁻¹) de lúpulo Chinook em duas épocas de um mesmo cultivo. Safra 2021/2022. Lages, SC.

Tratamento	CO ₂		CO ₂ intercelular/ CO ₂ externo		Eficiência do uso da água	
	dez/2021	jan/2022	dez/2021	jan/2022	dez/2021	jan/2022
97CC	103 ^{ns}	148 ab	0,6 ^{ns}	0,5ab	1,2 ^{ns}	1,9ab
83CC	104	127b	0,6	0,5b	1,1	2,3a
69CC	95	148ab	0,5	0,5ab	1,4	2,0ab
83CCpc	109	158a	0,6	0,6a	1,1	1,7b
Média	103	-	0,6	-	1,2	-
CV%	11	9	9	10	26	11

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey (p<0,05); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Após o rebrote das plantas, uma terceira avaliação indicou que não haviam diferenças significativas entre os tratamentos para as variáveis de taxa fotossintética líquida, condutância estomática, transpiração (Tabela 13), e eficiência do uso da água (Tabela 14). Ambas as variáveis de concentração intercelular de CO₂ no mesófilo e relação da concentração intercelular de CO₂ no mesófilo sobre a concentração de CO₂ externa atual foram menores no tratamento com menor disponibilidade hídrica (Tabela 14).

Tabela 13 - Taxa fotossintética líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de lúpulo Chinook após rebrote das plantas danificadas por calor excessivo durante o ciclo de cultivo. Safra 2021/2022. Lages, SC.

Tratamento	Taxa fotossintética líquida	Condutância estomática	Transpiração
97CC	8,0 ^{ns}	0,1 ^{ns}	2,7 ^{ns}
83CC	9,2	0,2	2,9
69CC	8,7	0,1	2,7
83CCpc	8,0	0,1	2,7
Média	8,5	0,1	2,7
CV%	15,5	23,8	21,4

ns: não significativo pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Tabela 14 - Concentração intercelular de CO₂ no mesófilo ($\mu\text{mol CO}_2$), relação da concentração intercelular de CO₂ no mesofilo sobre a concentração de CO₂ externa atual ($\mu\text{mol CO}_2$) e eficiência do uso da água ($[\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]^{-1}$) de lúpulo Chinook após rebrote das plantas danificadas por calor excessivo durante o ciclo de cultivo. Safra 2021/2022. Lages, SC.

Tratamento	CO ₂	CO ₂ intercelular/	Eficiência do uso da água
------------	-----------------	-------------------------------	---------------------------

		CO ₂ externo	
97CC	149ab	0,62ab	3,00 ^{ns}
83CC	157a	0,64a	2,83
69CC	138c	0,56b	3,34
83CCpc	145bc	0,58ab	3,20
Média	-	-	3,1
CV%	3	6	10

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

3.4 CONCLUSÕES

Plantas de lúpulo Cascade conduzidas sob umidade do solo próximo a capacidade de campo durante todo seu primeiro ciclo de cultivo apresentaram maior concentração de alfa e beta ácidos em relação as demais condições de menor umidade do solo. A atividade antioxidante e o teor de compostos fenólicos dos cones também foram reduzidos com a menor disponibilidade hídrica. A redução da umidade do solo reduziu a taxa fotossíntese, condutância estomática e transpiração em fase mais avançada do ciclo de cultivo.

De maneira geral, a maioria dos compostos voláteis majoritários apresentaram comportamento semelhante aos demais compostos secundários avaliados, estando mais relacionados com as condições de maior umidade do solo.

O ciclo do lúpulo Chinook foi fortemente comprometido pelo excesso de calor do ambiente, impossibilitando a colheita e avaliação dos cones e indicando maior sensibilidade da cultivar às condições ambientais, comparada à cultivar Cascade. As umidades do solo não influenciaram na taxa fotossintética líquida em nenhum dos momentos de avaliação e nem na altura de plantas.

4. PRODUÇÃO E QUALIDADE DE LÚPULOS CASCADE E CHINOOK SUBMETIDOS A DIFERENTES UMIDADES DE SOLO

RESUMO

A restrição hídrica é uma preocupação entre pesquisadores e produtores rurais, pois tal situação tem se tornado cada vez mais frequente e pode comprometer a produção e lucratividade agrícola. No cultivo do lúpulo, um estresse hídrico pode além de diminuir a produção, alterar a qualidade química do produto final e interferir na formulação da cerveja, principal destino dos cones produzidos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da umidade do solo sobre as características químicas, fisiológicas e de produção das cultivares de lúpulo Cascade e Chinook. O experimento foi conduzido safra 2022/2023 com plantas Cascade e Chinook de dois anos, cultivadas em vasos com Cambissolo Húmico mantidos em estufa, em Lages, Santa Catarina. Avaliaram-se os tratamentos de umidade do solo mantida entre 90 a 100% da capacidade de campo (CC) durante todo o cultivo (97CC); umidade mantida entre 75 a 85% da CC durante todo o cultivo (83CC); umidade mantida entre 60 a 70% da CC durante todo o cultivo (69CC) e umidade mantida entre 75 a 85% da CC durante todo o cultivo, mas com corte da irrigação quatro dias antes da colheita dos cones (83CCpc). A manutenção da umidade nos vasos foi monitorada duas vezes por semana por umidade gravimétrica. Os cones foram secos em estufa de ar forçados e os alfa e beta ácidos avaliados por cromatografia líquida. O delineamento foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 4 x 2, com quatro repetições. A maior umidade do solo resultou em maior consumo de água por planta, mas os diferentes tratamentos não interferiram nos teores de alfa e beta ácidos, nem alteraram a produção de cones por planta, a duração do ciclo, taxa de crescimento da parte aérea e as respostas fisiológicas de transpiração, condutância estomática e fotossíntese líquida. Observou-se efeito de cultivar, com maior consumo de água por planta e maior produção de cones para a cultivar Cascade. Cones de lúpulo Cascade apresentaram maior tamanho e teores de alfa ácidos mais elevados.

Palavras-chave: *Humulus lupulus*, alfa ácidos, beta ácidos, déficit hídrico, umidade gravimétrica.

4.1 INTRODUÇÃO

O lúpulo (*Humulus lupulus* L.) é uma planta herbácea, nativa de regiões de clima temperado do Hemisfério Norte, e pertence à ordem Rosales, família Cannabaceae. É uma planta dióica, e o interesse comercial está nos cones ou estróbilos, que são produzidos nas plantas femininas. Atualmente, existem diversas cultivares de lúpulo cultivadas comercialmente em todo o mundo, e são separadas em três principais categorias: lúpulos de amargor, de aroma e de dupla aptidão (amargor e aroma) destinados em grande parte para a produção cervejeira (SPÓSITO et al., 2019; AGEHARA, 2020).

A cultivar Cascade foi a primeira variedade de lúpulo desenvolvida pelo programa de melhoramento do USDA, dos Estados Unidos, liberada para cultivo na década de 1970. Esta cultivar de aroma foi inicialmente desenvolvida e adaptada para as áreas de produção de Washington, Oregon e Idaho (HAUNOLD et al. 1985). Seu nome é originado da cordilheira Cascade, que se estende ao longo da costa oeste entre Canadá e Estados Unidos (NEZI et al. 2022).

A cultivar Chinook também foi desenvolvida pelo programa de melhoramento do USDA, e liberada em 1985 (TAKOI, 2019). Seu nome foi originado de uma tribo indígena nativa americana da região do estado de Washington, e é considerada uma cultivar de duplo propósito (NEZI et al. 2022).

A composição química do lúpulo é dependente de fatores genéticos, que distinguem as variedades de lúpulo entre si, além de fatores ambientais durante seu desenvolvimento e as técnicas pós-colheita aplicadas ao material vegetal (RETTBERG et al., 2018). De acordo com Morcol et al. (2020), as condições ambientais do local de produção e características genéticas da cultivar interferem na composição aromática do lúpulo, principalmente nos níveis de glicosídeos. Como os alfa ácidos do lúpulo são metabólitos secundários e sua produção pela planta pode ser alterada em condições de estresses bióticos e abióticos (DURASAMY et al., 2016), submeter a planta a uma condição adversa pode resultar em maior quantidade destes compostos nos cones.

O estresse abiótico causado pela redução da disponibilidade hídrica tem sido estudado em diversas culturas devido aos riscos de seca cada vez mais frequentes, causados pelas mudanças climáticas que tem atingido todo o planeta de maneira geral (CHOUDHARY et al. 2020; AMMAR et al. 2022). A água é o recurso mais abundante e limitante para o desenvolvimento vegetal, e a

disponibilidade deste recurso limita a produtividade das culturas agrícolas e ecossistemas naturais (TAIZ et al. 2017). Condições de estresse hídrico podem alterar o comportamento das plantas com respostas fisiológicas de perturbação ou até mesmo de adaptação (LYNCH, 2022). Até o momento, poucas pesquisas têm relatado os efeitos da redução hídrica no cultivo de lúpulo de maneira geral, principalmente nos cultivos recentes das regiões brasileiras.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da umidade do solo durante o ciclo de cultivo sobre as características químicas, fisiológicas e de produção das cultivares de lúpulo Cascade e Chinook.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na safra 2022/2023, com plantas de lúpulos Cascade e Chinook em seu segundo ano de produção. As plantas foram cultivadas em vasos de 25 litros preenchidos com Cambissolo Húmico alumínico típico, conduzidas com dois fios de sisal por vaso, e mantidas em estufa, no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, CAV/UDESC em Lages/SC (27°47'34"S 50°18'04"O).

Para a aplicação dos tratamentos, determinou-se previamente a curva de retenção de água do solo com a mesa de tensão de areia, câmaras de Richard e psicrômetro, conforme metodologias descritas por Embrapa (2017), obtendo-se os pontos de Capacidade de Campo (CC) e Ponto de Murcha Permanente (PMP). Avaliaram-se os seguintes tratamentos: CC97 - Umidade do solo mantida entre 90 a 100% da CC durante todo o cultivo; CC83 - Umidade mantida entre 75 a 85% da CC durante todo o cultivo; 69CC - Umidade mantida entre 60 a 70% da CC durante todo o cultivo, e 83CCpc - Umidade mantida entre 75 a 85% da CC durante todo o cultivo, mas com corte da irrigação quatro dias antes da colheita dos cones. A manutenção dos tratamentos durante o cultivo ocorreu por determinação da umidade gravimétrica, onde os vasos foram pesados 2 vezes por semana em balança analítica e irrigado, se necessário, conforme a necessidade.

Com a instalação de um datalogger modelo LogBox-RHT-LCD registrando periodicamente a temperatura e umidade relativa do ar na estufa, calculou-se o conceito de graus-dia (GD), utilizando a metodologia utilizada por Piconi et al. (2021) e Gonsaga (2021).

Durante o ciclo de cultivo, quantificou-se taxa fotossintética líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), eficiência do uso da água da planta ($[\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]^{-1}$), concentração intercelular de CO_2 no mesófilo ($\mu\text{mol CO}_2$) e relação da concentração intercelular de CO_2 no mesófilo sobre a concentração de CO_2 externa atual ($\mu\text{mol CO}_2$) com o medidor portátil de fotossíntese IRGA (Infra-Red Gas Analyzer), modelo LI-6400 (LI-COR). No momento da avaliação, utilizou-se 1 folha sadia por planta, localizada aproximadamente a altura do peito.

As plantas foram colhidas conforme o ponto de colheita, que foi determinado pelo toque e aspecto visual, com o cone aparentando suas brácteas verdes, secos ao toque e com a lupulina de coloração amarela dourada, apresentando, em média, 30% de matéria seca. Avaliou-se a duração do ciclo (dias), altura final da planta (cm), número de cones por planta, comprimento (cm), largura (cm), peso médio (g) e massa fresca (g) dos cones, massa fresca da parte aérea (g) e consumo total de água durante o ciclo (l). Após a colheita, os cones foram secos em estufa de circulação de ar forçado, a 35°C até atingir de 10 a 12% de umidade.

Para a extração dos alfa e beta ácidos, foi utilizado 1 grama de cone previamente macerado em nitrogênio líquido. Adicionaram-se 2 ml de metanol, 4 ml de HCl 0,1 M e 10 ml de éter etílico em um erlemeyer envolto em papel alumínio e mantido sob agitação em ultrassom por 15 min. Em seguida, filtrou-se as amostras com papel filtro quantitativo de filtragem rápida e esperou-se a separação das fases móveis, para em seguida coletar a fase superior e filtrar em filtro de seringa 45 micras. Posteriormente, as amostras foram diluídas 20 vezes e mantidas em freezer para análise cromatográfica.

A quantificação dos alfa e beta ácidos foi realizada em um CLAE Shimadzu modelo LC-2050, em uma coluna RESTEK C18 $5 \mu\text{m}$ $4,6 \times 150 \text{ mm}$. A fase móvel foi composta por 85% de metanol e 15% de água acidificada com ácido fosfórico (0,025%), em um fluxo de $1,4 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, injeção de $20 \mu\text{L}$ da amostra, com forno a 40°C , comprimento de onda de 314 nm e detector DAD. Para a curva de calibração, utilizou-se o padrão ICE 4 - ASBC (American Society of Brewing Chemists), e quantificou-se os alfa ácidos cohumulona e adhumulona e os beta ácidos colupulona e adlupulona.

Para avaliação da atividade antioxidante (AAT) e teor de compostos

fenólicos totais (CFT), preparou-se previamente um extrato com 0,5g de cone macerado e 20 ml de etanol 50%. Esta solução foi mantida em banho maria (60°C) por 1 hora. Em seguida, as amostras foram centrifugadas em uma centrífuga Himac (modelo CR22N, Shimadzu, Japão) por 10 minutos a 8000 rpm e em seguida, filtradas em papel filtro quantitativo de filtração rápida e armazenadas em freezer até o momento das avaliações. A metodologia para teor de compostos fenólicos totais e atividade antioxidante pelos métodos DPPH e ABTS foi realizada conforme realizada por Stanger et al. (2018).

Após a colheita de todas as plantas, as raízes foram retiradas cuidadosamente dos vasos, lavadas com auxílio de um lava-jato, escaneadas no aparelho Epson Expression 12000 XL scanner, e analisadas pelo software WinRhizo Pro (2020). Para cada leitura, as raízes foram cortadas e distribuídas uniformemente, sem sobreposição, na cuba do aparelho que foi preenchida com água. Obteve-se as variáveis de comprimento total (cm), diâmetro médio (mm) e volume (cm³). Em seguida, as amostras foram pesadas em balança analítica e colocadas em estufa com circulação de ar (105°C) até peso constante e pesadas novamente, para obtenção de massa fresca (g) e massa seca (%).

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 (cultivares) x 4 (tratamentos), com quatro repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância, após o teste de normalidade e homogeneidade de variâncias. As médias foram avaliadas pelo teste estatístico Tukey (p<0,05), pelo software SAS® Studio.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o Cambissolo Húmico utilizado no experimento, a capacidade de campo encontrada foi de 0,42 m³ m⁻³ e o ponto de murcha permanente de 0,19 m³ m⁻³ (Figura 2), resultando em 0,23 m³ m⁻³ de água disponível. Através da quantificação e monitoramento da água disponível no solo é possível determinar a quantidade de água que chega ao sistema radicular das plantas, e por isto esta informação é tão relevante para o desenvolvimento das culturas de maneira geral, pois tem relação direta nas interfaces solo-água-planta (CARDUCCI, et al 2017). Esta importância é visualizada no potencial hídrico vegetal, que está diretamente relacionado com a umidade do solo, e uma forte redução da umidade do solo reduz drasticamente o potencial hídrico das células vegetais,

podendo comprometer diversas reações fisiológicas de condutância estomática, transpiração e absorção de CO₂ (BERGONCI e PEREIRA, 2002). Plantas de lúpulo bem irrigadas apresentaram maior potencial hídrico foliar quando comparadas a plantas em ambientes mais secos, independente se o monitoramento foi realizado ao amanhecer ou ao meio dia (GLOSER et al. 2013).

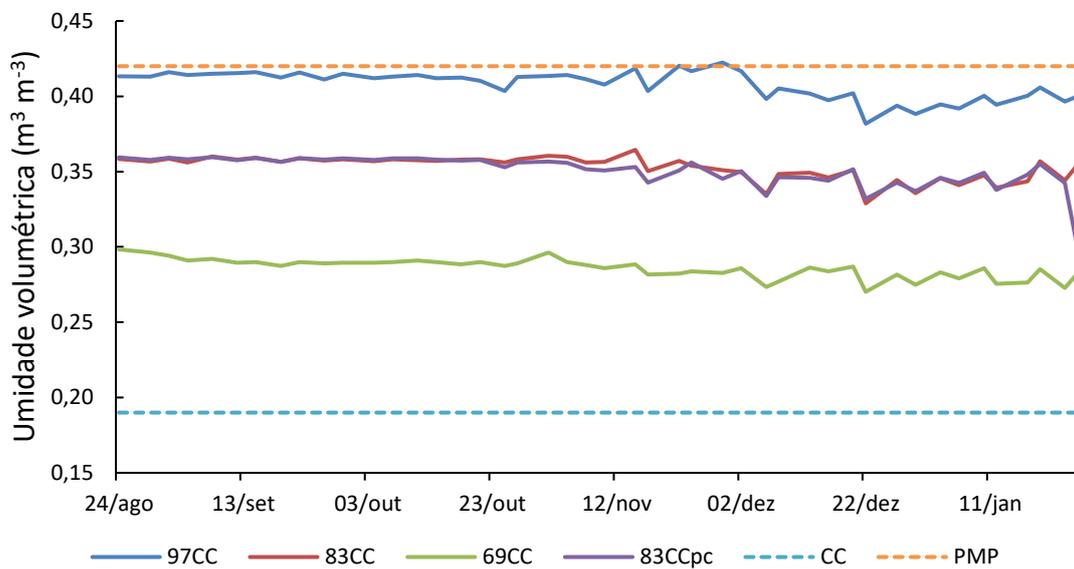
As temperaturas e umidade relativa do ar no ambiente de estufa durante o experimento estão apresentadas na Figura 21. Observou-se uma grande amplitude térmica (até 34°C em alguns dias) e grande variação nos valores médios para a temperatura durante o ciclo de cultivo. O mesmo vale para os dados de umidade relativa do ar. De acordo com Eriksen et al. (2020), o intervalo ótimo de crescimento para a cultivar Cascade estaria entre 21 a 39°C, e temperaturas além de 39°C já reduziriam as eficiências do fotossistema II e da enzima rubisco, a taxa de transferência de elétrons, assimilação de carbono. O estresse causado por temperaturas extremas também afeta o conteúdo de clorofila, mudanças físicas e químicas nas membranas plasmáticas e inibe a atividade de enzimas oxidativas (LEE et al, 2021). Estas informações sugerem que as plantas conduzidas sob o ambiente de estufa tenham sofrido um certo nível de estresse térmico e comprometido tais reações fisiológicas, já que foram registradas temperaturas acima de 40°C em vários dias durante o experimento. Este estresse pode ainda ter influenciado na produtividade final das plantas, pois segundo projeções realizadas por Mozny et al. (2009), o aquecimento na temperatura do ar diminuiu a qualidade e estagnou rendimentos de plantas de lúpulo ao longo dos anos. No entanto, segundo Leite e Pandolfo (2022) não existe unanimidade quanto à faixa ideal de temperatura para o desenvolvimento do lúpulo, o que exigiria mais pesquisas no tema.

Na Figura 22 estão ilustrados os graus-dia diário e a somatória ao longo do ciclo. A avaliação de graus-dia é muito comum em diversas culturas anuais, como trigo, canola, cevada, e é uma das ferramentas utilizadas para prever duração de ciclo ou estádios de desenvolvimento, uma vez que se basear apenas no calendário anual pode haver muitos erros, já que as temperaturas diárias podem variar muito entre os anos (MILLER et al. 2001).

Como houve muitas variações na temperatura, os graus-dia também foram bem variáveis entre os dias de cultivo, sendo observado valores de 0,75 até 25,65 graus-dia. Desde o começo da aplicação dos tratamentos até o final

do ciclo, as plantas somaram até 2984 graus-dia. Este valor está dentro do esperado por Piconi et al. (2021) para lúpulos produzidos na região de Botucatu, São Paulo (entre 2000 e 3500 graus-dia). A avaliação de graus-dia para lúpulo foi estudado por Ruggeri et al. (2018), mas os autores relacionaram a necessidade de soma térmica com a emergência de brotos da planta, e não durante o ciclo produtivo.

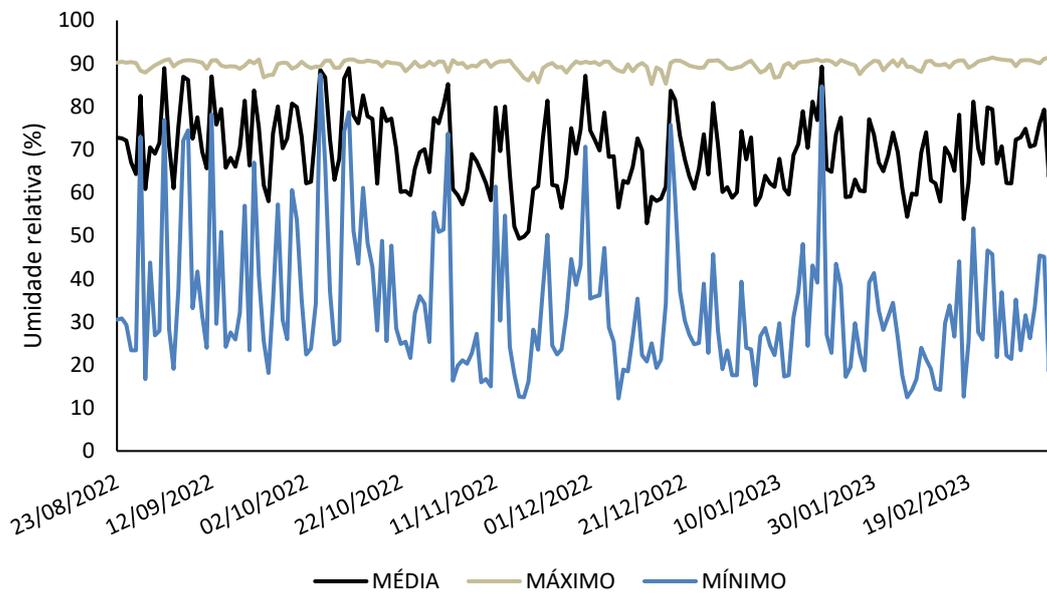
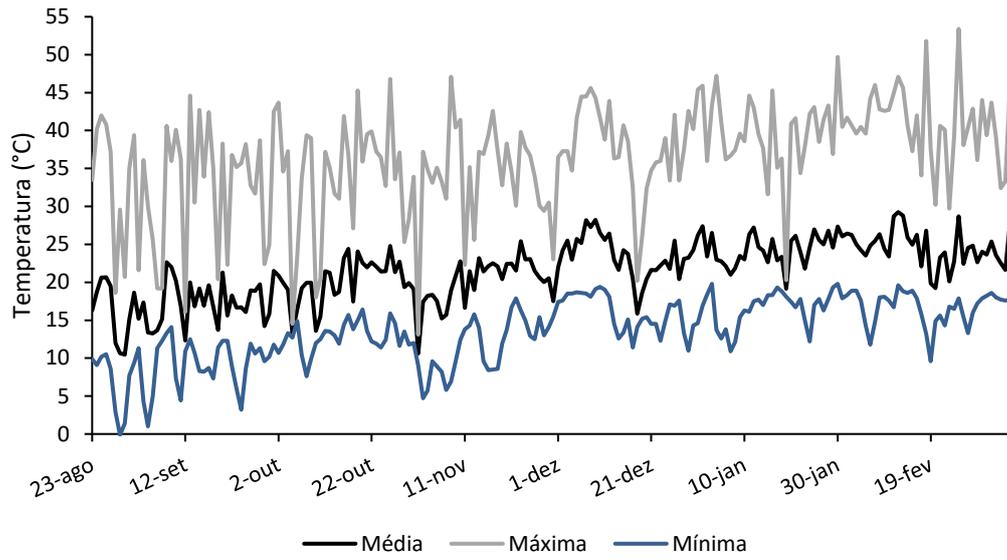
Figura 20 - Umidades do solo em cada tratamento durante o cultivo de lúpulo Cascade e Chinook em vasos, safra 2022/2023. Lages, SC.



97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita; CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente.

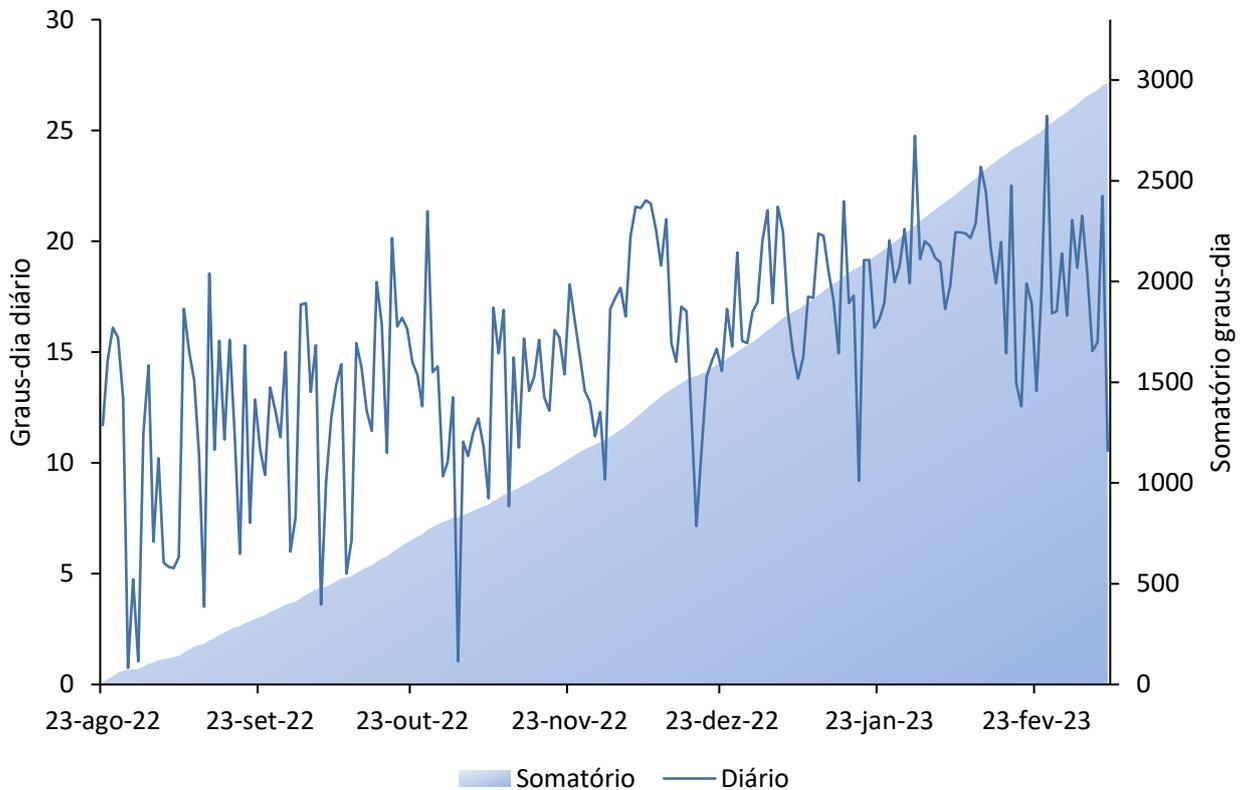
Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Figura 21 - Temperatura (°C) e umidade relativa do ar (%) da estufa durante o período do experimento, safra 2022/2023. Lages, SC.



Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Figura 22 - Graus-dia diário e somatório ao longo do ciclo de cultivo de lúpulos Cascade e Chinook. Safra 2022/2023.

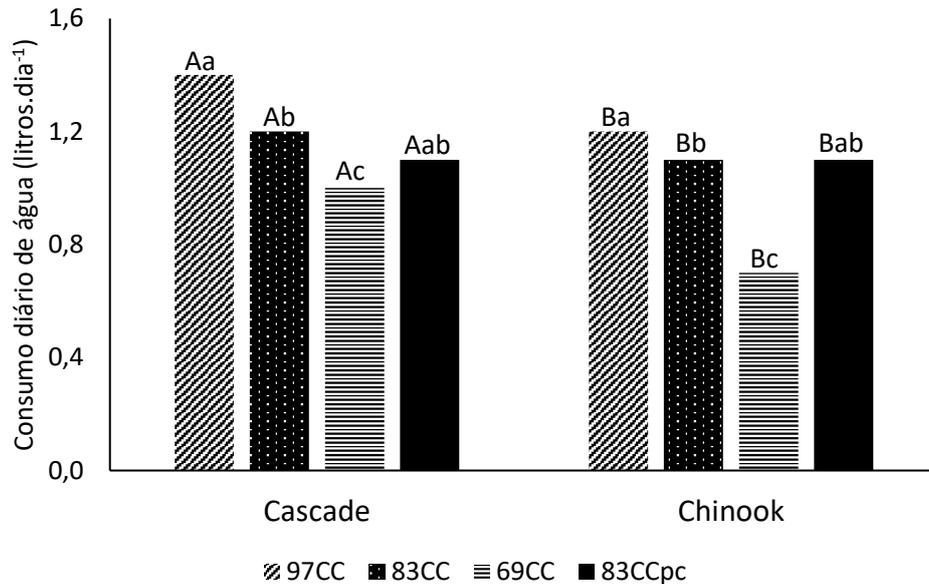


Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Independente do tratamento, a cultivar Cascade consumiu mais água que a Chinook, seja em consumo médio diário (Figura 23) ou em consumo total de água durante o ciclo (Tabela 15). O maior consumo médio diário registrado nesse experimento (1,4 litros) está muito aquém da estimativa de 50 litros por dia, realizado por Graf et al. (2019). Esta discrepância de dados pode ser decorrente das condições de experimento de cada autor, uma vez que o cultivo das plantas na atual pesquisa foi realizado em vasos, o que limita a disponibilidade de solo e água, e Graf et al. (2019) avaliaram plantas a campo. Além disso, as plantas eram de cultivares (Hercules, Cascade e Chinook) e idades distintas (dois e seis anos). Jackson et al. (2019) recomendam 57 litros de água por planta por semana, mas alertam para considerar o tipo de solo, o sistema de irrigação e a frequência de irrigação.

Figura 23 - Consumo diário de água de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages,

SC.



Médias seguidas pela mesma letra maiúscula e minúscula não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Tabela 15 - Consumo total de água de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.

Tratamentos	Água total	
	Cascade	Chinook
97CC	213,4 Aa	184,8 Ba
83CC	187,8 Ab	148,6 Bb
69CC	157,9 Ac	104,2 Bc
83CCpc	178,1 Aab	168,0 Bab
CV (%)	13,4	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

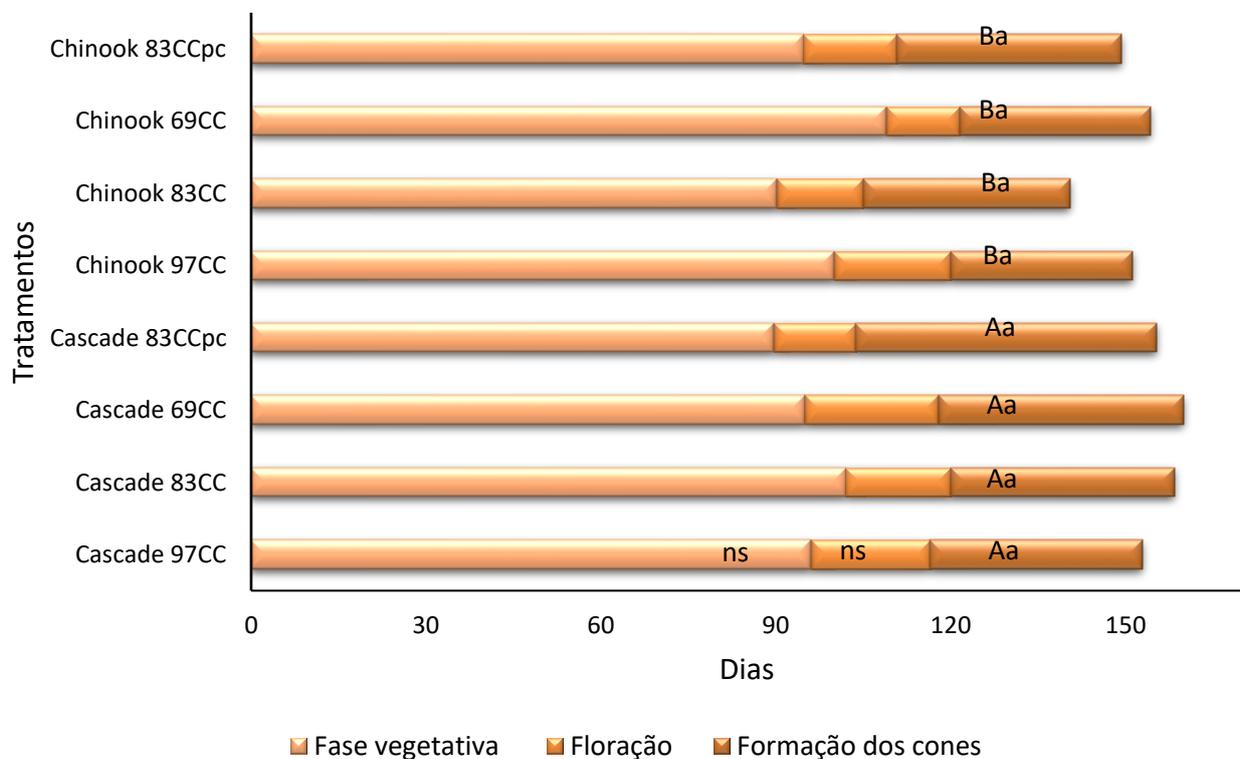
Fonte: elaborado pela autora, 2023.

As diferentes umidades de solo parecem não ter interferido nos estádios fenológicos de lúpulos Cascade e Chinook (Figura 24). A maior parte do ciclo a planta esteve em estágio vegetativo, e o estágio de menor duração observado

foi a fase de floração. A única diferença observada no ciclo foi a duração do período de formação dos cones entre as cultivares, e não entre os tratamentos aplicados. Embora seja uma planta perene, a parte aérea do lúpulo tem comportamento anual, com a brotação do rizoma e consequente desenvolvimento vegetativo de ramos principais e laterais na primavera, floração no verão e início da senescência no outono, entrando em dormência no inverno (LEITE e PANDOLFO, 2022).

Os cones da cultivar Chinook se desenvolveram em menor tempo se comparado com os cones de Cascade. Resultados contrários foram obtidos por Marceddu et al. (2020), que observaram um período maior para maturação dos cones na cultivar Chinook em relação a Cascade, em duas safras consecutivas. No entanto, o ciclo completo de cultivo (130 a 147 dias) foi muito semelhante ao encontrado na atual pesquisa, com a maior parte do tempo também em estágio vegetativo.

Figura 24 - Estádios fenológicos do ciclo de cultivo de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.



Médias seguidas pela mesma letra maiúscula e minúscula não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

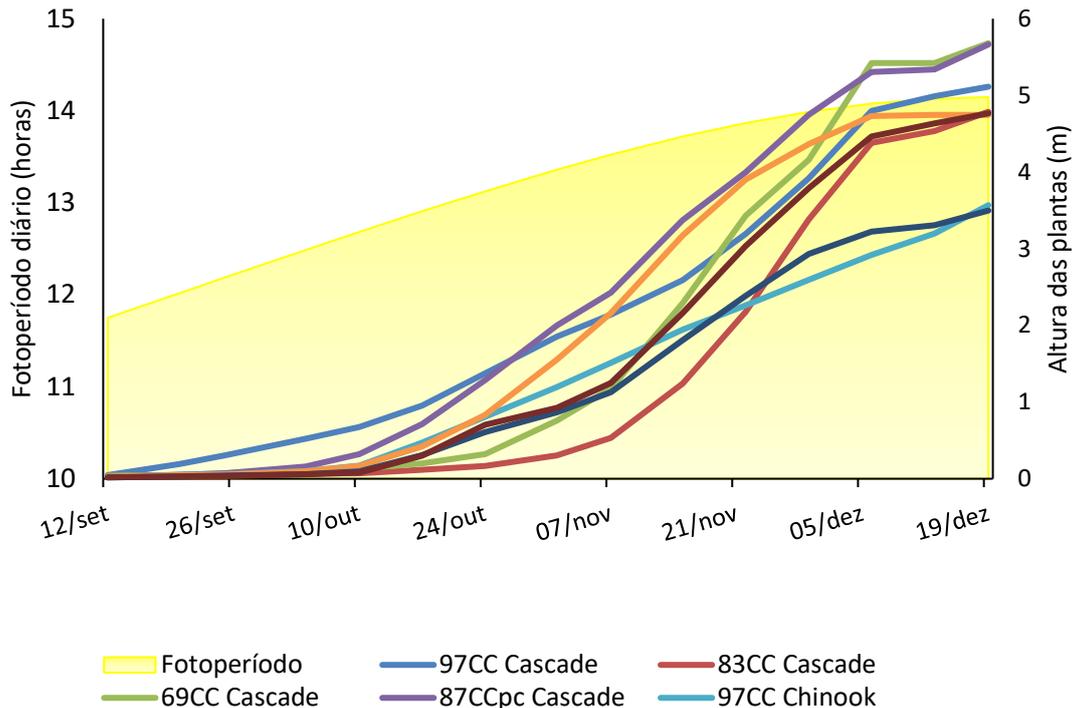
97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

A velocidade de crescimento da parte aérea das plantas também não teve influência da umidade do solo (Figura 25), o que supõe que o fotoperíodo tem mais relevância no comportamento do lúpulo do que a própria umidade de solo. O lúpulo responde ao fotoperíodo de forma que dias longos induzem o crescimento vegetativo, e o início de dias curtos induzem o florescimento, o que o classifica como uma planta de dia curto (THOMAS e SCHWABE, 1969; AGEHARA, 2020). Desta forma, condições naturais de luz nas latitudes próximas a 46°N, como é o caso da região de Yakima Valley, Washington, são as ideais para um crescimento vegetativo adequado ao lúpulo antes de iniciar o florescimento, pois os dias mais longos possuem um comprimento de até 16 horas de luz. De acordo com Yang et al. (2019), a luz é um dos fatores mais importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas, e embora a quantidade de luz inadequada, seja em excesso ou em baixa quantidade, afete as características agrônômicas, as plantas possuem mecanismos fisiológicos, bioquímicos e moleculares para detectar e responder à luz flutuante.

Figura 25 - Taxa de crescimento de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo e fotoperíodo diário para Lages, SC.

Safra 2022/2023.



97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

A variáveis fisiológicas de fotossíntese líquida, condutância estomática (Tabela 16), transpiração e eficiência do uso da água (Tabela 17) não apresentaram diferenças entre os tratamentos e as cultivares. O crescimento e desenvolvimento de plantas é dependente de fatores abióticos, que incluem as características ambientais em que estão condicionadas. Determinadas condições ambientais caracterizadas como ótimas para cada espécie podem ser crucial para atingir o máximo de produtividade, assim como condições desfavoráveis podem baixar seu potencial produtivo (DECOTEAU, 1998). Possivelmente, as condições de umidade em que as plantas Chinook e Cascade estavam submetidas não foram tão extremas a ponto de modificar suas respostas fisiológicas.

Além disso, a idade da planta pode ter influência conjunta neste comportamento. Osterc e Štampar (2011) observaram transportes e concentrações diferentes do ácido indolacético em plantas adultas e juvenis em uma variedade de cereja ornamental. Segundo Zhang et al (2023), pseudobulbos de orquídeas de diferentes idades possuem composições distintas quanto ao teor de matéria seca e água armazenada, e apresentam respostas fisiológicas e metabólicas diferentes quando submetidas a estresse hídrico.

Tabela 16 - Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.

Tratamentos	Fotossíntese líquida			Condutância estomática		
	Cascade	Chinook	Média	Cascade	Chinook	Média
97CC	13,9	12,3	13,1 ^{ns}	0,26	0,20	0,23 ^{ns}
83CC	15,6	13,1	14,4	0,37	0,21	0,29
69CC	13,2	14,0	13,6	0,18	0,28	0,23
83CCpc	14,7	12,0	13,4	0,26	0,17	0,22
Média	14,4 ^{ns}	12,9		0,27 ^{ns}	0,22	
CV (%)	16,9			31,5		

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Em situações de déficit hídrico, a fotossíntese e a homeostase da água são os processos que mais severamente são perturbados, e somado a isso, a perda de água por transpiração pode ainda ser maior em plantas em estágio mais avançado de desenvolvimento (SUKU et al. 2014; PAWŁOWICZ e MASAJADA, 2019). Como não se observou diferenças entre os tratamentos aplicados, pode-se supor que a restrição de água não foi suficiente para gerar um estresse hídrico significativo ou as plantas ainda estariam muito jovens no seu estágio de desenvolvimento, uma vez que no momento da avaliação ainda se encontravam em estágio vegetativo.

Além disso, algumas proteínas podem ter atuado em alguns processos fisiológicos, embora não se tenha avaliado nesta pesquisa. Segundo Pawłowicz e Masajada (2019), diversas plantas podem lidar com a tolerância a estresses abióticos, como a falta de água, através da expressão das aquaporinas, que ajudam na manutenção do balanço hídrico e nos processos fotossintéticos.

A eficiência do uso da água (EUA) corresponde à relação entre a acumulação de biomassa e o consumo de água pela planta (BRENDDEL, 2021). Segundo Yoo et al. (2009), a EUA está fortemente relacionada com o mecanismo

de transpiração, embora outros fatores também sejam importantes de considerar, como genética, e características anatômicas e fisiológica, como os estômatos e cutícula das folhas. Os mesmos autores sugerem que a principal forma de alterar significativamente a EUA seria através de modificações na transpiração, podendo levar a uma economia no consumo de água pela planta ao longo do período de cultivo. Esta relação da transpiração e EUA pode ser visualizada nesta pesquisa, uma vez que as duas variáveis se comportaram de forma semelhante entre os tratamentos e cultivares.

Tabela 17 - Transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e eficiência do uso da água ($[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]^{-1}$) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.

Tratamentos	Transpiração			Eficiência do uso da água		
	Cascade	Chinook	Média	Cascade	Chinook	Média
97CC	5,04	4,48	4,76 ^{ns}	3,01	2,75	2,88 ^{ns}
83CC	6,09	4,59	5,34	2,58	2,89	2,74
69CC	5,65	5,86	5,76	2,34	2,40	2,37
83CCpc	5,26	3,83	4,55	2,87	3,43	3,15
Média	5,51 ^{ns}	4,69		2,70 ^{ns}	2,87	
CV (%)	24,2			15,5		

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Tabela 18 - Concentração intercelular de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2$) e relação CO_2 intercelular/ CO_2 externo ($\mu\text{mol CO}_2$) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades do solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.

Tratamentos	Concentração intercelular de CO_2		Relação CO_2 intercelular/ CO_2 externo	
	Cascade	Chinook	Cascade	Chinook
	97CC	137,84 Aa	136,41 Aab	0,56 Aa
83CC	161,43 Aa	128,08 Aab	0,67 Aa	0,51 Aab
69CC	54,41 Bb	151,40 Aa	0,3 Bb	0,61 Aa

83CCpc	138,65 Aa	101,13 Ab	0,56 Aa	0,40 Ab
Média	-	129,25	-	0,52
CV (%)	14,6		15,7	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Os mesmos comportamentos encontrados para as avaliações de condutância estomática, fotossíntese e transpiração estão dentro do esperado, pois como apresentado por Xiong e Nadal (2020), a condutância estomática reflete diretamente na fotossíntese e na transpiração, embora tenha outros processos que apresentem correlação com essas variáveis, como por exemplo, a condutância hidráulica da folha.

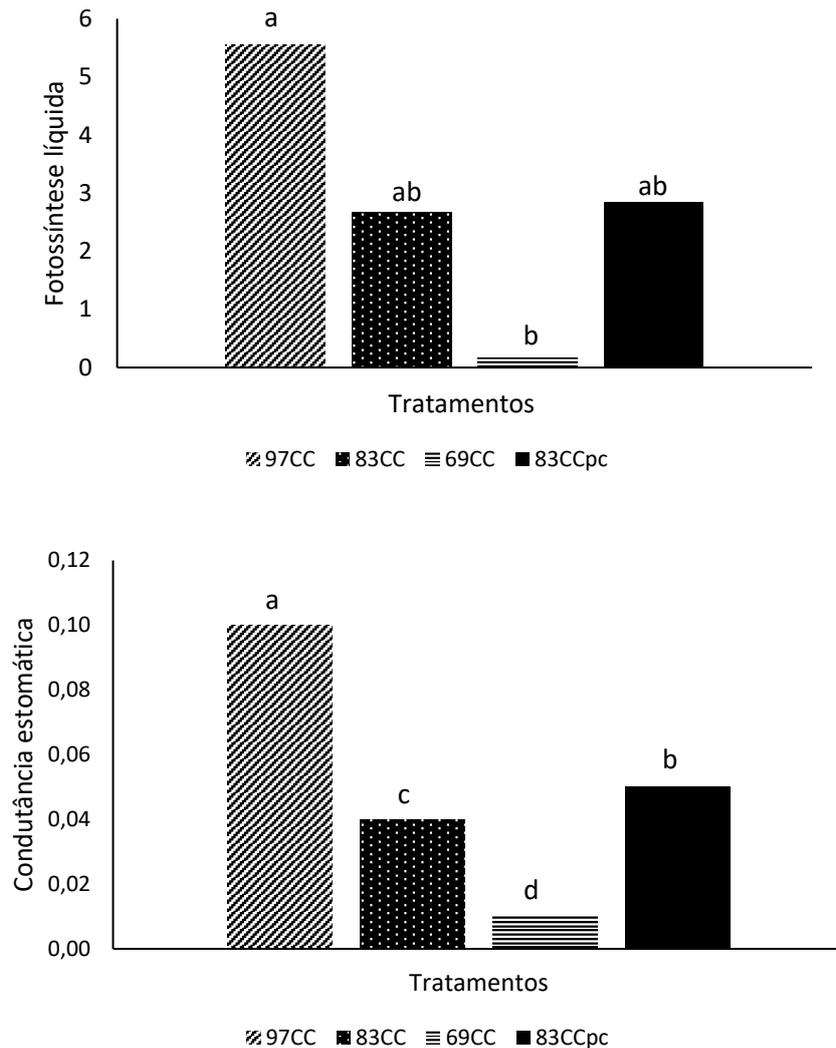
Observou-se interação entre os fatores quanto à concentração intercelular de CO_2 e a relação CO_2 intercelular/ CO_2 externo (Tabela 18). Entre os tratamentos, observou-se menor concentração de CO_2 no 69CC no lúpulo Cascade, embora a condutância estomática não tenha diferido entre os tratamentos (Tabela 16). De acordo com Zhang et al. (2018), a concentração interna de CO_2 reflete na diretamente na condutância estomática, de forma que, quando a concentração intercelular de CO_2 for maior que a contração do ambiente externo, ocorrerá o fechamento estomático.

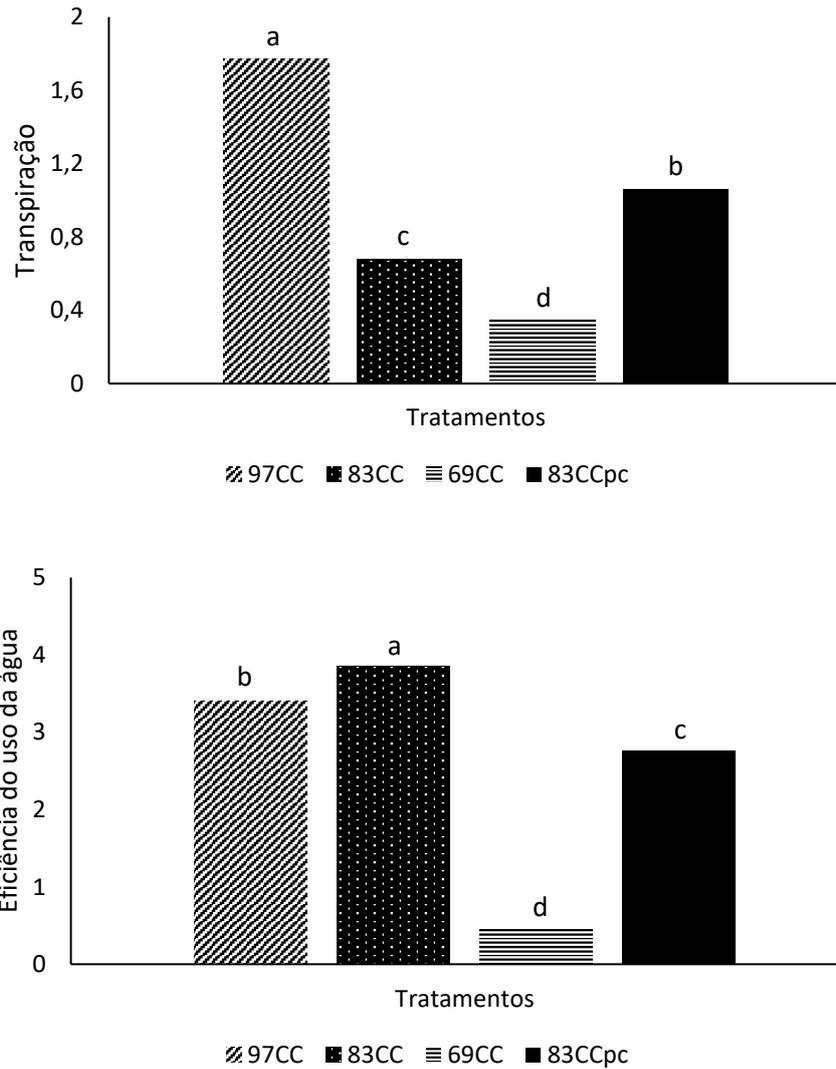
Uma segunda avaliação com o Irga foi realizada em jan/2023 apenas com as plantas da cultivar Cascade, uma vez que já haviam sido colhidas algumas plantas Chinook. Com as plantas em fase mais adiantada de desenvolvimento, observou-se maior fotossíntese líquida, condutância estomática e transpiração no tratamento de 97CC, e a menor umidade de solo avaliada resultou nos menores valores para estas mesmas variáveis fisiológicas (Figura 26). Este comportamento já tinha sido observado nas mesmas plantas na safra anterior (Figura 11).

Os resultados do tratamento 83CCpc indicam que um déficit hídrico, mesmo que localizado, e por pouco período (neste caso 4 dias prévios à colheita) já é suficiente para diminuir processos fisiológicos primários em plantas de lúpulo, pois foram significativamente menores em relação ao 97CC, mas não tão drásticos quanto a menor umidade de solo durante todo o ciclo (69CC). Quanto

à eficiência do uso da água, o tratamento de 83CC foi superior em relação aos demais.

Figura 26 - Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e eficiência do uso da água ($[\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]^{-1}$) de lúpulo Cascade cultivado em estufa sob diferentes umidades do solo em janeiro de 2023. Safra 2022/2023. Lages, SC.





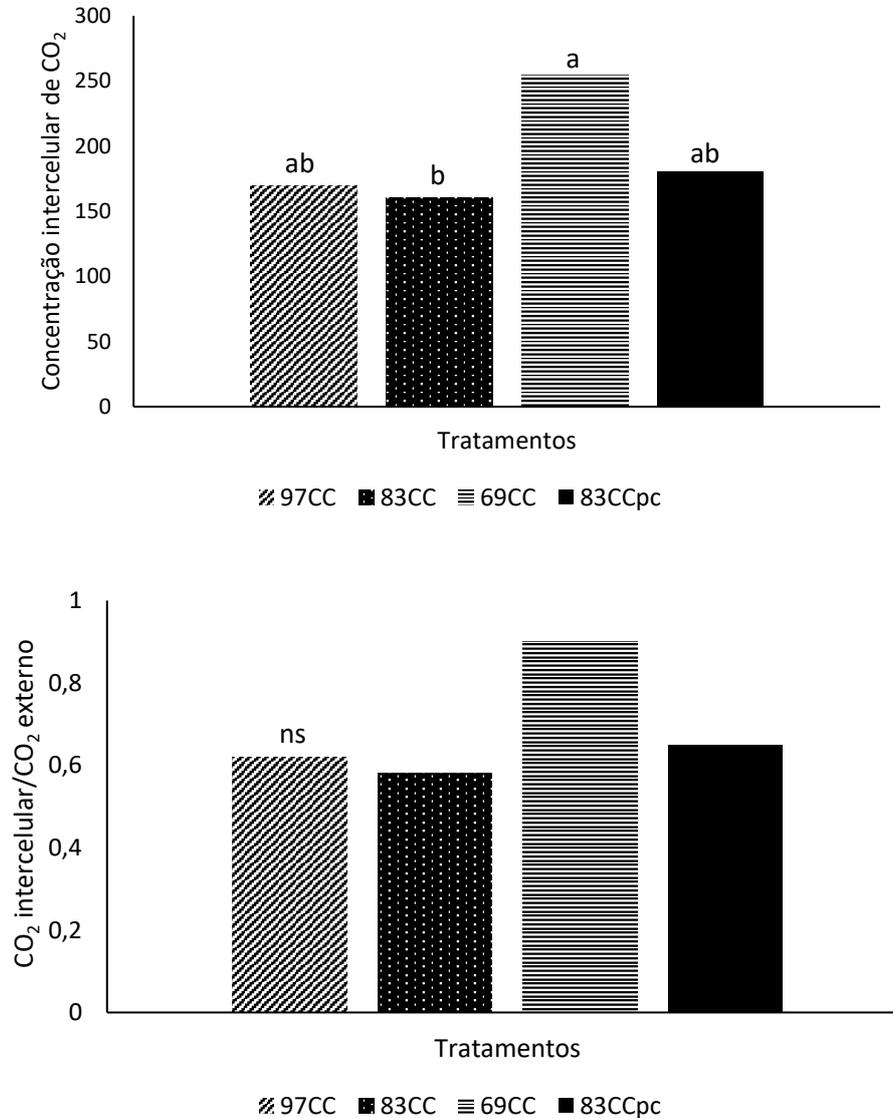
Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

A concentração intercelular de CO₂ se diferenciou significativamente apenas entre os tratamentos 83CC e 69CC, e a relação CO₂ intercelular/CO₂ externo não diferiu entre os tratamentos (Figura 27).

Figura 27 - Concentração intercelular de CO₂ e relação CO₂ intercelular/CO₂ externo de lúpulo Cascade cultivado em estufa sob diferentes umidades do solo em janeiro de 2023. Safra 2022/2023. Lages, SC.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

A duração do ciclo não foi influenciada pelas diferentes umidades do solo ou pela cultivar. A altura final e a massa fresca da parte aérea foram diferentes apenas entre as cultivares, com maiores valores para a cultivar Cascade (Tabela 19). O efeito da cultivar nas características agrônômicas também foi relatado por

Sasso (2021), que observou plantas Cascade significativamente mais altas quando comparadas com Chinook, cultivadas a campo também na região serrana catarinense.

Rossini et al. (2016) encontraram interação entre a altura final de plantas e ano de cultivo para diversas cultivares de lúpulo, incluindo Cascade. Os autores observaram crescimento normal das plantas nos anos com condições ótimas de temperatura para o cultivo, e na safra com altas temperaturas e baixa pluviosidade, o crescimento das plantas parou e induziu precocemente a fase reprodutiva, reduzindo em média 80 cm entre as safras. Como a condição de estufa também proporcionou altas temperaturas, talvez as plantas não tenham atingido seu máximo potencial de crescimento.

Tabela 19 - Duração do ciclo (dias), altura final (cm) e massa fresca da parte aérea (g) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.

Tratamentos	Ciclo			Altura final			Massa fresca da parte aérea		
	Cascade	Chinook	Média	Cascade	Chinook	Média	Cascade	Chinook	Média
97CC	153	151,2	152,1 ^{ns}	526,5	467	496,7 a	884,5	623,5	754 ab
83CC	158,5	140,5	149,5	486,5	481,5	484 a	1134	654	894 a
69CC	160	154,2	157,1	543	449,5	496,2 a	1018	419	718,5 b
83CCpc	155,3	149,2	152,2	572	458,5	515,2 a	912	667,5	789,7 ab
Média	156,7 ^{ns}	148,8		532 A	464,1 B		987,1 A	591 B	
CV (%)	7,4			8,3			21,4		

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

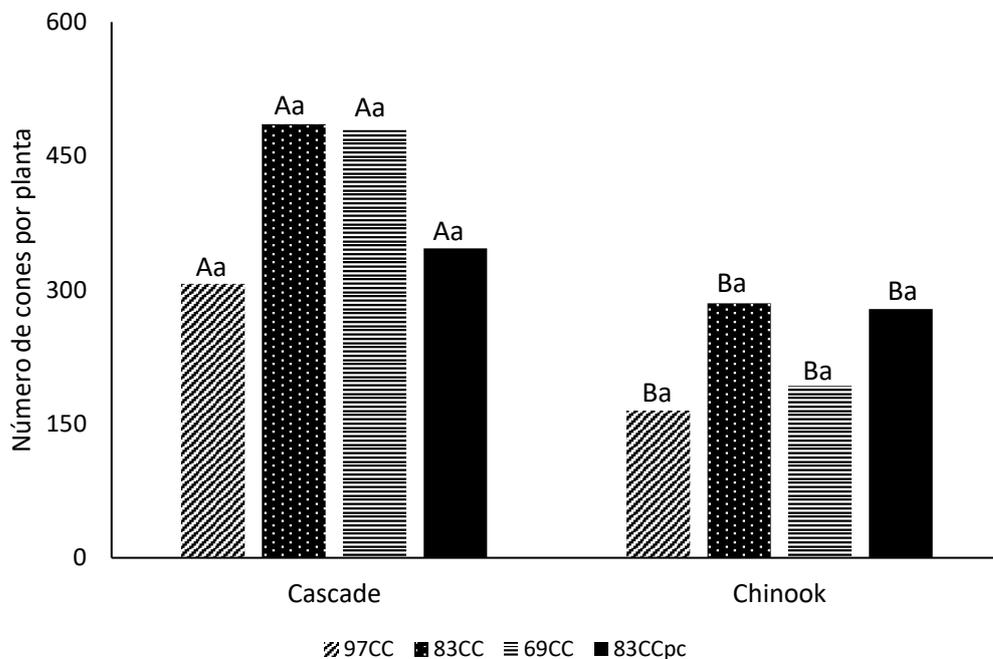
97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Os tratamentos também não influenciaram na produção de cones por planta, e novamente se observou o efeito das cultivares, onde a produção foi maior na Cascade do que na Chinook (Figura 28). Estes resultados divergem do encontrado por Marceddu et al. (2020), que observaram maior produtividade de cones em lúpulos Chinook quando comparados ao Cascade, cultivados na região de Palermo, Itália. Uma redução de produtividade de 19% foi observado por Nakawuka et al. (2017) em lúpulo Chinook, a campo, quando reduzido a

irrigação de 100 para 60% da necessidade da cultura. No segundo ano de cultivo, a diferença entre estes níveis foi menor, e os autores atribuem ao um melhor desenvolvimento radicular, que possibilita uma melhor exploração do solo em busca de água. Como na presente pesquisa não se observou diferenças entre os tratamentos, e os níveis de umidade se basearam na capacidade de campo do solo, talvez a menor umidade aplicada não tenha alcançado um nível restritivo para as plantas, e possibilitou o crescimento e produção iguais entre os tratamentos.

Figura 28 - Produção de cones por planta em lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes umidades de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.



Médias seguidas pela mesma letra maiúscula e minúscula não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Embora a produção de cones por planta não tenha diferido entre os tratamentos, a redução da umidade do solo diminuiu a massa fresca dos cones, sendo significativamente menor na condição de 69CC quando comparada a umidade de 97CC, em ambas as cultivares. O tamanho dos cones apresentou efeito apenas de cultivar, com maior comprimento e largura observados na

Chinook (Tabela 20). O tamanho dos cones é uma das características avaliadas no processo de avaliação e registro de novas cultivares, junto com diâmetro, peso e formato (GUIMARÃES et al. 2021).

Tabela 20 - Massa fresca (g), comprimento (cm) e largura (cm) de cones de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.

Tratamentos	Massa			Comprimento			Largura		
	Cascade	Chinook	Média	Cascade	Chinook	Média	Cascade	Chinook	Média
97CC	0,49	0,54	0,52 a	2,0	2,4	2,2 a	1,3	1,5	1,4 a
83CC	0,39	0,50	0,44 ab	1,7	2,4	2,1 a	1,1	1,4	1,3 a
69CC	0,43	0,32	0,38 b	1,9	2,0	2,0 a	1,1	1,3	1,2 a
83CCpc	0,37	0,38	0,38 ab	1,8	2,3	2,0 a	1,1	1,4	1,3 a
Média	0,42 A	0,4 A		1,8 B	2,3 A		1,2 B	1,4 A	
CV (%)	23,3			12,8			10,3		

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Para a concentração de alfa ácidos, observou-se apenas efeito de cultivar, com maiores teores para Chinook (Figura 29a). Entre as cultivares, Cascade apresentou menores concentrações de alfa ácidos que a Chinook. De acordo com McAdam et al. (2014), características químicas do cone, como teor de alfa ácidos são significativamente correlacionadas geneticamente com características de crescimento, de forma que cultivares que apresentam crescimento vegetativo mais vigoroso foram associadas com níveis mais baixos de alfa ácidos. Esta associação também foi encontrada nesta pesquisa, onde Cascade teve maior altura final e massa da parte aérea (Tabela 4) com menor concentração de alfa ácidos (Figura 9).

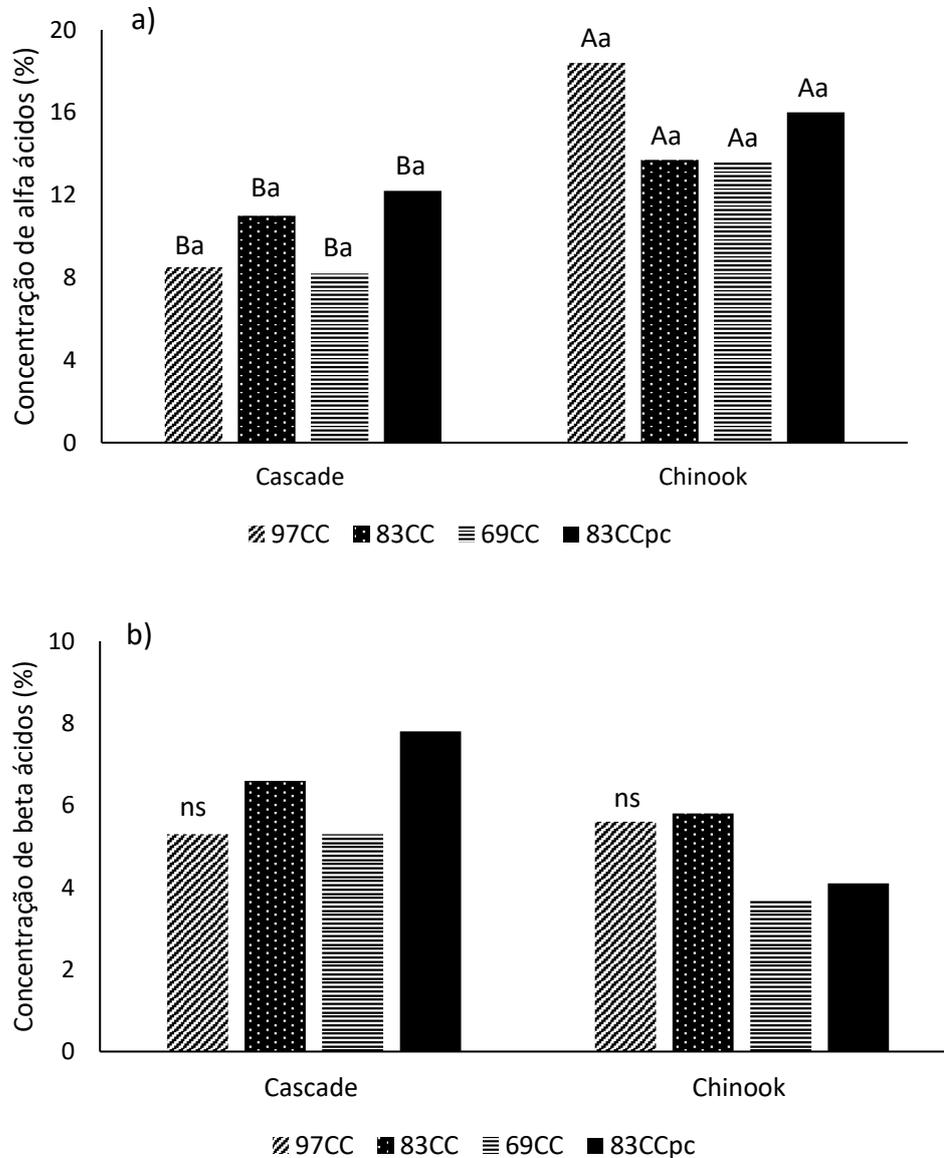
Os valores médios encontrados nesta pesquisa para Cascade (8 a 12% aproximadamente) e Chinook (em média 13 a 18%) são mais altos do que relatado por Paguet et al. (2022), que são de até 9% para Cascade e máximo de 14% para Chinook.

Outros autores também não observaram diferenças na concentração de alfa ácidos em diferentes cultivares de lúpulo aplicando diferentes manejos na irrigação (FANDIÑO et al., 2015; DONNER et al., 2020). Bauerle (2019) concluiu que as concentrações de alfa e beta ácidos são pouco influenciadas pelas condições ambientais, e que a cultivar é o que indica quanto destes compostos o lúpulo produzirá. Entretanto, segundo Donner et al. (2020), altas temperaturas durante o verão foi o fator que mais comprometeu o conteúdo de alfa ácidos quando avaliado nas cultivares Saaz, Sládek, Premiant e Agnus.

De acordo com Patzak (2015), os alfa e beta ácidos são produzidos exclusivamente pelas glândulas de lupulina, e a quantidade desses compostos dependem do número e tamanho das glândulas na superfície das brácteas dos cones. Provavelmente, a cultivar Chinook tenha mais e/ou maiores glândulas de lupulina nos cones.

Para os teores de beta ácidos, não se observou diferença entre os tratamentos e as cultivares (Figura 29b). As concentrações de beta ácidos são comumente menores do que os alfa ácidos, podendo ser encontrado valores entre 3 e 8% aproximadamente, dependendo da cultivar (ALMAGUER et al., 2014). Embora Nakawuka et al. (2017) tenham encontrado valores mais baixos de beta ácidos para a cultivar Chinook (em média 3%), os teores destes compostos para a cultivar Cascade estão muito semelhantes ao encontrado por Forteschi et al. (2019), que variaram de 6 a 9%. Estes valores semelhantes podem ser resultado das condições de temperatura, já que Forteschi et al. (2019) conduziram as plantas na região do Mediterrâneo e as plantas foram submetidas a temperaturas mais altas, assim como esta pesquisa, do que nas condições de temperatura da região do Vale Yakima, EUA, onde Nakawuka et al. (2017) realizaram a investigação.

Figura 29. Concentrações de alfa (a) e beta (b) ácidos de cones de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.



Médias seguidas pela mesma letra maiúscula e minúscula não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo.

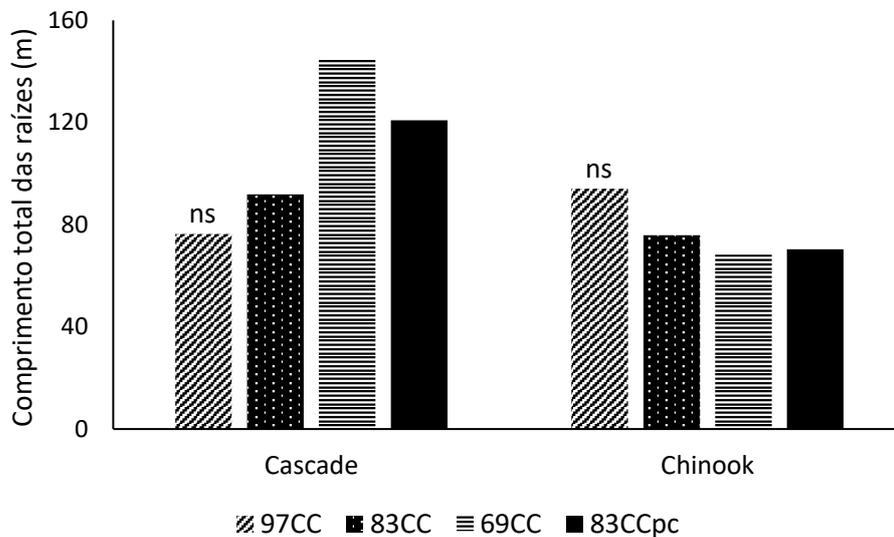
97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

O comprimento total das raízes após o segundo ano de cultivo não foi influenciado pelos tratamentos de umidade, nem apresentou diferença entre as cultivares (Figura 30). No entanto, na avaliação de diâmetro médio, a cultivar Chinook foi significativamente maior que a Cascade (Figura 31). Como o diâmetro interfere diretamente no volume de raízes, o mesmo comportamento

observado no diâmetro médio também ocorreu para volume de raízes (Figura 32). O resultado não significativo para o comprimento total das raízes pode ter sido influenciado pela limitação de espaço de crescimento devido a condução do experimento em vasos. Comumente, pesquisas que visam avaliar desenvolvimento e características de crescimento de raízes são conduzidas em vasos pela dificuldade de manter a umidade e homogeneidade do solo em ambientes a campo. No entanto, de acordo com Turner (2019), o volume do vaso interferiu na biomassa, área foliar, uso da água, biomassa radicular e concentração de ácido abscísico no xilema em genótipos de feijão de corda. Kolenc et al. (2016) também não conseguiram discernir diferenças na arquitetura de raízes de cultivares de lúpulo cultivados em vasos por limitação de espaço físico.

Figura 30 - Comprimento total (m) de raízes de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safras 2021/2022 e 2022/2023. Lages, SC.

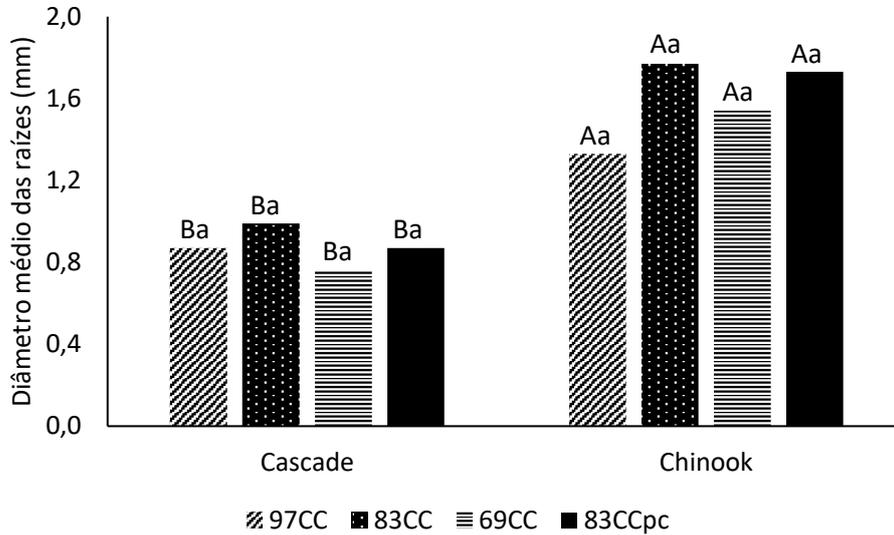


ns: não significativo pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Figura 31 - Diâmetro médio (mm) de raízes de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safras 2021/2022 e 2022/2023. Lages, SC.

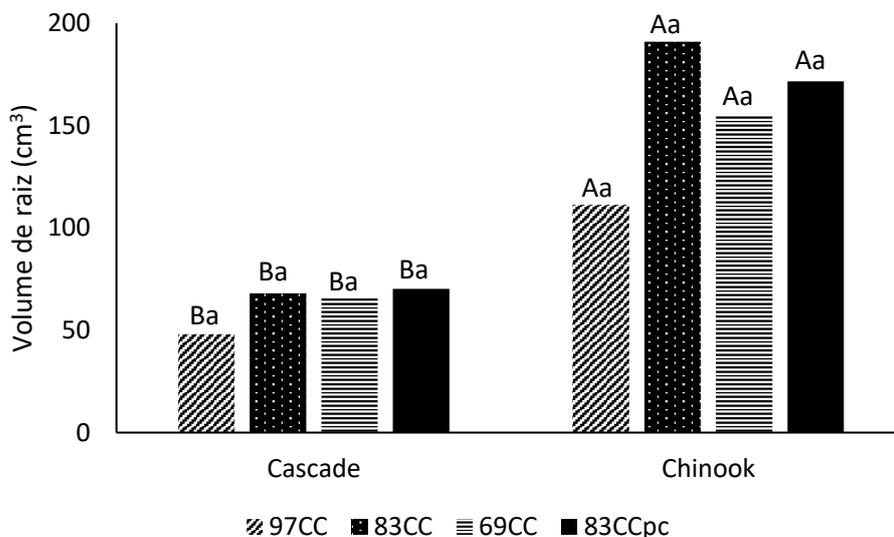


Médias seguidas pela mesma letra maiúscula e minúscula não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Figura 32. Volume de raízes (cm^3) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safras 2021/2022 e 2022/2023. Lages, SC.



Médias seguidas pela mesma letra maiúscula e minúscula não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo;

69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Brant et al. (2020) encontraram raízes de lúpulos em cultivo comercial a campo com profundidade variando de 1 a 2,25 metros e largura de até 1,5 metros em plantas de 3 a 15 anos, inclusive com sobreposição de raízes de plantas vizinhas, apesar da maior densidade de raízes ser encontrada na região próxima à base da planta. Embora não sejam as mesmas cultivares avaliadas nesta pesquisa, estas informações deixam claro que sem a limitação de espaço dos vasos, é muito provável que as raízes teriam se desenvolvido muito mais em tamanho e possíveis diferenças fossem observadas entre os tratamentos. De acordo com Guerra et al. (2021), o tamanho do vaso pode diminuir o crescimento da planta e reduzir a produção, em função da limitação física. Segundo Poorter et al. (2012), o tamanho do vaso é extremamente relevante para uma produção ótima.

Para massa fresca de raízes também não se observou interação entre umidades do solo e cultivares. Entre os tratamentos, as únicas umidades que se diferenciaram significativamente foram 97CC e 83CC, com o tratamento de 83CC apresentando maior massa fresca (Tabela 21).

Tabela 21 - Massa fresca (g) e massa seca (%) de raízes de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safras 2021/2022 e 2022/2023. Lages, SC.

Tratamentos	Massa fresca (g)			Massa seca (%)	
	Cascade	Chinook	Média	Cascade	Chinook
97CC	165,87	324,12	239,99 b	18,42 Ba	23,27 Aa
83CC	263,20	534,89	444,33 a	22,32 Aa	19,93 Aab
69CC	314,65	343,10	337,41 ab	21,62 Aa	19,73 Ab
83CCpc	276,32	445,05	372,74 ab	22,98 Aa	22,45 Aab
Média	233,35 B	409,29 A		-	-
CV (%)	27,6			9,2	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Possivelmente, a maior umidade comprometeu o acúmulo de massa fresca por excesso de água e falta de oxigênio para um desenvolvimento ótimo do sistema radicular do lúpulo. Ebrahimi-Mollabashi et al. (2019) concluíram que a profundidade e o crescimento de raízes de soja são afetados pela profundidade do lençol freático e o crescimento vertical da raiz é inibido quando a umidade do solo é próxima de 3% abaixo da saturação. Afonso et al. (2020) sugerem que a drenagem ineficiente do solo no período do inverno, resultando em áreas de alagamento e condições anóxicas para as raízes, parece ser mais prejudicial ao desenvolvimento do lúpulo do que uma distribuição hídrica deficiente no verão. De acordo com Dinneny (2019), as diferenças na disponibilidade de água e macroporos preenchidos com ar no solo afetam a padronização de desenvolvimento das raízes laterais, de forma que na presença de água, novas raízes laterais são estimuladas e formadas, e em regiões de bolsas de ar em contato com a raiz principal, há menor produção de raízes adventícias.

Entre as cultivares, a massa fresca foi maior para a cultivar Chinook, condizendo com as avaliações de maior diâmetro e volume de raízes. Para a massa seca de raízes, a cultivar Cascade não foi influenciada pelas umidades de solo, mas na cultivar Chinook os tratamentos de maior e menor umidade resultaram em maior e menor porcentagem de massa seca, respectivamente.

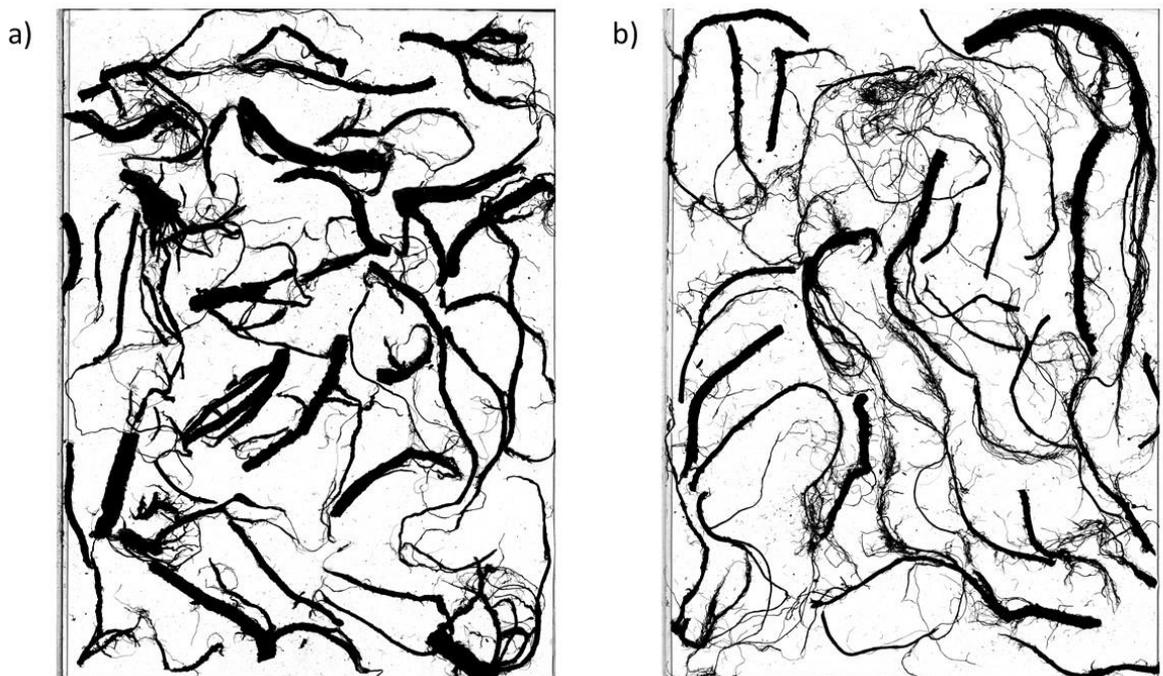
A absorção de água pelas raízes é estimulada pela demanda hídrica das folhas através da transpiração, criando assim uma tensão que se propaga até as raízes e induz a entrada de água na camada da rizosfera (BAYALA e PRIETO, 2020). Rodriguez-Dominguez e Brodribb (2020) encontraram que a condutância hidráulica da raiz em oliveiras é o primeiro regulador do uso de água pela planta em um déficit hídrico inicial, servindo como um importante fator para o fechamento estomático nas folhas. Segundo os mesmos autores, a resistência hidráulica da raiz constituiu 81% de toda a resistência de plantas não estressadas, chegando até 95% sob estresse hídrico moderado.

Lozano et al. (2020) observaram que várias espécies de plantas diminuem a área superficial específica da raiz em resposta à seca. Esta variável não foi possível de quantificar neste experimento devido ao tamanho das raízes que não permitiu colocá-las inteiras no scanner, e ao cortá-las para avaliação, as pontas dos cortes acabaram se somando ao restante da área, resultando em um valor superestimado. Os mesmos autores também encontraram que as respostas das

características da raiz à seca são mais heterogêneas do que as respostas das folhas, concluindo que características radiculares sob situação de estresse são muito específicas de cada espécie vegetal.

Apesar de não encontrar diferenças no comprimento total, diâmetro médio e volume das raízes entre as diferentes umidades do solo, uma possível alteração fitoquímica pode ter ocorrido, embora não tenha sido avaliado. Korovetska et al. (2016) encontraram maiores concentrações de ácido jasmônico e redução de auxinas em folhas de lúpulo conforme a umidade do solo foi sendo reduzida. O ácido jasmônico é um fitohormônio considerado uma molécula sinalizadora de plantas em situações de estresse (DEUNER et al. 2015).

Figura 33 - Raízes de lúpulo Chinook (a) e Cascade (b) após dois anos de cultivo em vasos.



Fonte: elaborada pela autora, 2023.

4.4 CONCLUSÕES

O cultivo de lúpulos Cascade e Chinook sob diferentes umidades de solo resultou em maior consumo de água no tratamento com maior disponibilidade hídrica, mas não interferiu na taxa de crescimento das plantas, na duração do ciclo, altura final das plantas, produção de cones por planta, respostas

fisiológicas e teores de alfa e beta ácidos. As características de raízes não apresentaram diferenças entre os tratamentos, provavelmente por limitação física do volume dos vasos.

Entre as cultivares, a Cascade apresentou maior consumo hídrico por planta e maior duração do estágio fenológico de formação dos cones. Embora a Chinook tenha apresentado menor produção de cones por planta, o tamanho dos cones foi superior à cultivar Cascade.

5. DIFERENTES UMIDADES DO SOLO NO CULTIVO DE LÚPULOS CASCADE E CHINOOK E SUA INFLUÊNCIA EM METABÓLITOS SECUNDÁRIOS

RESUMO

A restrição da irrigação durante o cultivo do lúpulo pode resultar em alterações químicas dos cones, que são o principal produto comercializado pelos produtores. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da umidade do solo sobre compostos do metabolismo secundário de lúpulos Cascade e Chinook. O experimento foi conduzido com plantas Cascade e Chinook de segundo ano, cultivadas em vaso e estufa, na safra 2022/2023. Aplicaram-se os seguintes tratamentos: umidade do solo entre 90 e 100% da capacidade de campo (CC) (97CC); umidade entre 75 e 85% da CC (83CC); umidade mantida entre 60 e 70% da CC; todas durante todo o ciclo de cultivo; e umidade mantida entre 75 e 85% da CC durante todo o cultivo, mas com corte da irrigação quatro dias antes da colheita dos cones (83CCpc). O delineamento foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 (cultivares) x 4 (tratamentos), com quatro repetições. Após a colheita, os cones foram secos a 10% de umidade e avaliados quanto ao teor de compostos fenólicos totais (CFT) e atividade antioxidante total (AAT) por espectrofotometria, e o perfil de compostos voláteis analisado por cromatografia gasosa acoplado com espectrômetro de massas. As umidades de solo avaliadas pouco interferiram no CFT e AAT em ambas as cultivares. Quanto ao perfil de compostos voláteis, este é muito específico para cada cultivar, e a redução da umidade do solo reduziu alguns compostos, principalmente terpenos.

PALAVRAS-CHAVE: *Humulus lupulus*; atividade antioxidante; compostos fenólicos; perfil aromático.

5.1 INTRODUÇÃO

Em lúpulo, a irrigação normalmente é requerida em grandes quantidades para alcançar alto rendimento e qualidade do produto, embora a quantidade de água a ser fornecida possa variar muito entre os locais de cultivo, a depender das condições ambientais específicas (TURNER et al. 2011). Em cultivos comerciais a campo, condições ambientais adversas podem afetar diretamente a qualidade da produção. Uma restrição no fornecimento de água, por exemplo,

pode alterar a produção de alguns metabólitos na planta devido ao um estresse abiótico durante seu desenvolvimento (HANAKA et al. 2022). Os compostos fenólicos e sua atividade antioxidante total (AAT) e os compostos aromáticos voláteis são alguns dos produtos do metabolismo secundário da planta que podem apresentar alterações em situações de seca.

A capacidade da AAT das plantas em geral, é formado por um sistema antioxidante que inclui mecanismos enzimáticos e não enzimáticos para detecção, eliminação ou neutralização de espécies reativas de oxigênio. No mecanismo não enzimático, se encontram os compostos fenólicos, junto com açúcares, carotenoides e outros compostos (SOARES et al. 2019).

Os compostos voláteis são sintetizados por diferentes rotas metabólicas e exercem diferentes funções na planta, que incluem atrair polinizadores e dispersores de sementes, e proteção contra estresses bióticos, como patógenos e doenças, e abióticos, como excesso de luminosidade e altas temperaturas (DUDAREVA et al. 2012). São biossintetizados em todos os órgãos da planta, mas são nas flores que são encontrados e liberados em maior quantidade e diversidade (MUHLEMANN et al. 2014).

Embora já se tenha um bom conhecimento dos efeitos do déficit hídrico sobre a fisiológica de cultivares de lúpulo (MARCEDDU et al. 2022) ainda há pouca informação a respeito desta condição de restrição hídrica sobre outros compostos do metabolismo secundário da planta. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da restrição hídrica no teor de compostos fenólicos, na atividade antioxidante e no perfil de compostos voláteis de lúpulos Cascade e Chinook.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado com as cultivares Cascade e Chinook em seu segundo ano de cultivo, em vasos de 25 litros preenchidos com Cambissolo Húmico mantidos em estufa, no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, CAV/UDESC em Lages, SC (27°47'34"S 50°18'04"O) na safra 2022/2023. Após a determinação da curva de retenção de água no solo conforme metodologias da mesa de tensão de areia, câmaras de Richard e psicrômetro descritas por Embrapa (2017) aplicaram-se os seguintes tratamentos: 97CC: umidade do solo mantida entre 90 e 100% da capacidade de campo (CC) durante todo o cultivo; 83CC: umidade do solo entre

75 e 85% da CC durante todo o cultivo; 69CC: umidade mantida entre 60 e 70% da CC durante todo o cultivo, e 83CCpc: umidade mantida entre 75 e 85% da CC durante todo o cultivo, mas com corte da irrigação quatro dias antes da colheita dos cones. Duas vezes por semana, os vasos foram pesados, e por umidade gravimétrica adicionado água conforme a necessidade de cada repetição. Cada vaso continha uma planta, representando uma repetição.

Os cones foram colhidos de acordo com a maturação fisiológica, avaliados visualmente e pelo toque das mãos. Foram considerados padrões de colheita as brácteas de coloração verde, secas ao toque e apresentando lupulina amarela dourada, o que resultou em aproximadamente 30% de matéria seca. Os cones foram secos em estufa de circulação de ar forçado (35 °C) até atingirem umidade de 10 a 12%. Após a secagem, os cones foram macerados em nitrogênio líquido e mantidos em freezer até o momento das avaliações.

Para avaliação da atividade antioxidante (AAT) e teor de compostos fenólicos totais (CFT), preparou-se previamente um extrato com 0,5 g de cone macerado e 20 ml de etanol 50%. Esta solução foi mantida em banho maria (60 °C) por 1 hora. Em seguida, as amostras foram centrifugadas em uma centrífuga Himac (modelo CR22N, Shimadzu, Japão) por 10 minutos a 8000 rpm e em seguida, filtradas em papel filtro quantitativo de filtração rápida e armazenadas em freezer até o momento das avaliações. A metodologia para teor de compostos fenólicos totais e atividade antioxidante pelos métodos DPPH e ABTS foi realizada conforme realizada por Stanger et al. (2018).

O perfil de compostos voláteis foi avaliado por cromatografia a gás. Amostras de 0,5 g dos cones macerados previamente foram acondicionados em vial de 40 ml para headspace, adicionados 6 ml de água destilada e levado à placa aquecedora (30 ± 1 °C) com barra magnética. O vial permaneceu em equilíbrio sob agitação por 10 minutos, e em seguida a fibra SPME 50/30 µm DVB/CAR/PDMS Metal alloy/Metal alloy (1 cm) Gray/plain foi exposta ao headspace da amostra por 10 minutos, para adsorção dos compostos voláteis. Em seguida, a fibra foi injetada no cromatógrafo a gás acoplado com espectrômetro de massas (sistema Perkin Elmer; modelo Clarus 680 GC/ SQ8S MS) (Perkin Elmer), durante 5 minutos para a dessorção térmica e análise dos voláteis, utilizando hélio como gás de arraste a um fluxo de 1 ml.min⁻¹. Utilizou-se uma coluna ZB-624plus, marca Zebron, de 30 metros de comprimento. A

temperatura do detector foi de 220 °C, e utilizou-se um Split de 25 ml.min⁻¹. A temperatura inicial do forno foi de 60 °C, com uma rampa de aquecimento de 3 °C.min⁻¹ até o máximo de 200 °C. As temperaturas do detector e da transferline foram de 250 e 200°C, respectivamente, e a duração total da corrida foi de 46,67 minutos.

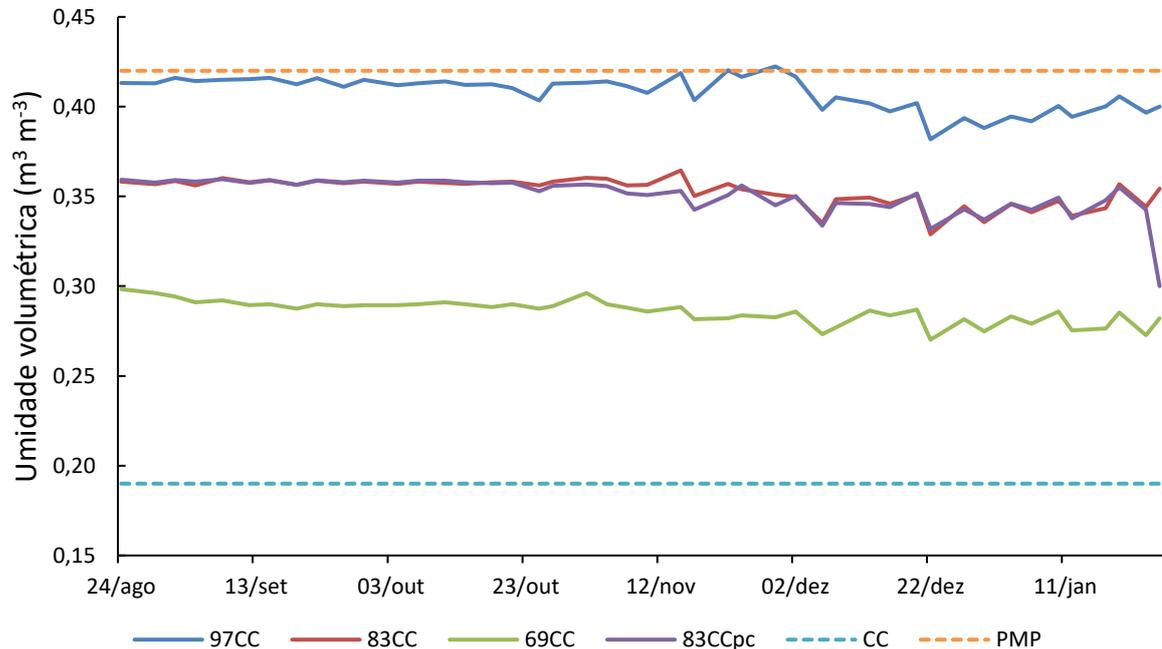
Os compostos foram identificados pela comparação dos espectros de massa, através da biblioteca do *National Institute of Standards and Technology* (NIST), versão 2.0, 2014 para cada composto. Para auxiliar a identificação dos compostos voláteis, uma mistura padrão de n-alcenos (C7 a C40, Sigma-Aldrich) na concentração de 10 µL.ml⁻¹ foi injetada no CG/EM, e analisada nas mesmas condições da amostra. Os tempos de retenção dos alcanos foram utilizados para calcular o índice de retenção (IR) de cada composto volátil na amostra, comparando com os índices de retenção já encontrados para colunas de mesma polaridade.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 (cultivares) x 4 (tratamentos), com quatro repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância, após o teste de normalidade e homogeneidade de variâncias. As médias foram avaliadas pelo teste estatístico Tukey (p<0,05), pelo software SAS® Studio.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 34 estão ilustrados os diferentes tratamentos aplicados durante o cultivo dos lúpulos Cascade e Chinook. As maiores variações de umidade dos vasos ocorreram na metade final de cultivo, onde as plantas já estavam mais desenvolvidas e a temperatura ambiente mais elevada conforme se aproximava o verão, o que resultou em um maior consumo de água diário por maior evapotranspiração.

Figura 34 - Umidades do solo em cada tratamento durante o cultivo de lúpulo Cascade e Chinook em vasos, safra 2022/2023. Lages, SC.



97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita; CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente.

Fonte: elaborada pela autora, 2023.

O teor de compostos fenólicos totais não diferiu entre os tratamentos para a cultivar Chinook. No lúpulo Cascade, o tratamento 83CCpc foi significativamente menor em compostos fenólicos que as demais condições de umidade (Tabela 22). Embora diversos autores relatem que a produção de compostos fenólicos pela planta pode aumentar em situações de estresse (MICHALAK, 2006; JACOBO-VELÁZQUEZ; CISNEROS-ZEVALLOS, 2012; GHARIBI et al. 2019), este comportamento não foi observado.

A diminuição dos compostos fenólicos devido à restrição hídrica foi relatada por Kamalizadeh et al. (2019) em *Dracocephalum moldavica*, mas apenas para alguns compostos como quercetina e elagitanino, enquanto que o ácido clorogênico e o ácido p-cumárico aumentaram quando as plantas foram submetidas a um estresse hídrico moderado. Além do comportamento individual de cada composto, a duração do estresse também parece interferir. Jia et al. (2015) não encontraram diferenças na concentração dos flavonoides calicosina-7-O-b-D-glicosídeo e ononina até o quarto dia de estresse hídrico aplicado em

Radix astragali, mas após 6 dias, os níveis destes compostos foram significativamente mais elevados.

Avaliando a relação do fornecimento de água com conteúdo de polifenóis em lúpulo, Čeh et al. (2007) observaram que a concentração de polifenóis, xantohumol e alfa ácidos está mais relacionada com a característica da própria cultivar do que com a condição hídrica em que as plantas foram submetidas. Albergaria et al. (2020) concluíram que a ideia amplamente aceita de que a resposta ao déficit hídrico é um aumento generalizado de compostos fenólicos, é muitas vezes incorreta, e que ainda existem lacunas quanto à composição de compostos fenólicos em espécies arbustivas e arbóreas em diferentes condições ecofisiológicas em ambientes naturais.

Tabela 22 - Teor de Compostos Fenólicos Totais (CFT) de cones de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.

Tratamentos	CFT (mgEAG 100g ⁻¹)	
	Cascade	Chinook
97CC	1762,6 ABa	2363,5 Aa
83CC	2624,5 Aa	2286,5 Aa
69CC	1560,7 ABa	2049,9 Aa
83CCpc	1120,9 Bb	2667,9 Aa
Média	-	2341,95
CV (%)	14,9	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p > 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83 CC: média 83% da capacidade de campo; 69 CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83 CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborada pela autora, 2023.

Para a atividade antioxidante, houve diferença significativa entre os tratamentos apenas para a cultivar Cascade no método DPPH, onde apenas os tratamentos 83CC e 69CC diferiram entre si. A interação entre as cultivares e os tratamentos foi observado apenas no tratamento 83CCpc, com valores superiores de atividade antioxidante para a cultivar Chinook.

A AAT de plantas é fortemente relacionada ao seu teor e perfil de compostos fenólicos (MARTINS et al., 2016), uma vez que a atividade

antioxidante destes compostos está associada com a capacidade de inativar espécies reativas de radicais (OLSZOWY, 2019). Desta forma, é esperado que os resultados das avaliações de CFT e AAT se apresentem com comportamentos semelhantes, como encontrado nesta pesquisa. A importância da AAT para defesa da planta em situações de estresse foi relatada por Lima et al. (2018), que observaram que a atividade antioxidante contribuiu para evitar o acúmulo de espécies reativas de oxigênio em plantas de cajueiros em ambiente de seca associado a alta luminosidade.

A similaridade da AAT entre o tratamento 83CCpc e as demais condições de umidade pode estar relacionado ao tempo de exposição da restrição hídrica. Çelik et al. (2017) observaram aumento significativo da atividade da enzima antioxidante peroxidase apenas a partir do quinto dia de estresse hídrico em genótipos de tomateiro. Provavelmente, o período de corte de água de apenas 4 dias não foi danoso para as plantas de lúpulo, já que não houve diferença na atividade antioxidante para ambas as cultivares.

Tabela 23 - Atividade Antioxidante Total (métodos ABTS e DPPH expressos em $\mu\text{Mol trolox.}100\text{ g}^{-1}$) de cones de lúpulos Cascade e Chinook cultivados em estufa sob diferentes níveis de umidade de solo. Safra 2022/2023. Lages, SC.

Tratamentos	ABTS			DPPH	
	Cascade	Chinook	Média	Cascade	Chinook
97CC	58417,3	74004,0	66210,7 a	11096,4 Aab	17368,6 Aa
83CC	69415,1	68792,9	69104,0 a	16309,1 Aa	11343,7 Aa
69CC	53548,4	61481,8	57515,1 a	2710,4 Ab	12230,4 Aa
83CCpc	49835,9	75481,8	62658,8 a	5155,7 Bab	18553,7 Aa
Média	57804,2 A	69940,1 A	-	-	14874,1
CV (%)	12,3			31,2	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,05$).

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83CC: média 83% da capacidade de campo; 69CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborada pela autora, 2023.

Os lúpulos Chinook e Cascade apresentaram diferentes perfis de compostos voláteis. Na cultivar Chinook foram identificados 37 compostos, divididos em 20 terpenos e 17 ésteres. No lúpulo Cascade, 28 compostos foram

identificados, dos quais 15 são classificados como terpenos e 13 como ésteres.

Em ambas as cultivares, os terpenos (-)- β -Pineno e β -Myrceno foram os compostos majoritários. O (-)- β -Pineno foi detectado em elevada porcentagem de área em todas as condições de umidade, enquanto o β -Myrceno não foi detectado nos tratamentos com menor disponibilidade hídrica (69CC e 83CCpc).

Estes dois terpenos são originados de diversas reações enzimáticas que inicialmente são derivadas da Acetil-CoA (PAN et al., 2023), que é formada a partir da conversão direta do piruvato, que por sua vez, depende dos açúcares inicialmente obtidos na fotossíntese (LIAN et al., 2014). Embora sejam metabólitos secundários, são indiretamente resultados da fotossíntese, processo primário que ocorre na presença de água (ZHEN et al., 2022). Uma redução na disponibilidade hídrica poderia diminuir a taxa fotossintética líquida, comprometendo todas as reações enzimáticas seguintes de formação de glicose, piruvato, Acetil-CoA e compostos voláteis. Por não ter observado uma redução como o β -Mirceno, talvez para a formação do (-)- β -Pineno seja necessário uma quantidade muito pequena de substrato, que não foi significativamente reduzida nas umidades de solo testada.

O β -Mirceno também é encontrado em outros produtos vegetais, como cacau (AKOA et al., 2023), romã (LU et al., 2023) e uva (XIE et al., 2023). Duarte et al. (2020) encontraram este composto como um dos terpenos em maiores concentrações em várias cultivares de lúpulo, como Cascade, Magnum, Columbus, Nugget e Citra.

Sharp et al. (2014) avaliaram a composição química de cones das cultivares Cascade e Willamette, e observaram uma forte correlação da quantidade de óleo com a concentração dos compostos α -pineno, β -pineno, mirceno, limoneno e linalol. Apesar de não tenha sido possível avaliar nesta pesquisa, a produção de óleo em diferentes condições de umidade de solo pode ter sido influenciada e reduzido a presença do mirceno e β -pineno. Os terpenos linalol e limoneno parecem não ter sido influenciados, talvez pela baixa porcentagem relativa que representam no perfil de voláteis.

As variações entre cultivares pode ser notada na ausência dos compostos α -cubebeno, ylangeno, cubeneno, selina-3,7(11)-diene, α -cadineno, que não foram detectados em nenhum dos tratamentos de umidade na Cascade, enquanto na Chinook, estes compostos apareceram quase todas as umidades.

Além dos terpenos, alguns ésteres também não foram detectados na Cascade, como ácido octanóico, 4-metil-, éster metílico, ácido butanóico, éster 3-metil-, 2-metilbutílico, Metil 6-metiloctanoato, ácido propanoico, 2-metil-, 2-metilpropil éster e ácido nonanóico, éster metílico. O éster geranil acetato foi o único composto detectado na Cascade que não foi detectado em nenhuma condição de umidade na cultivar Chinook.

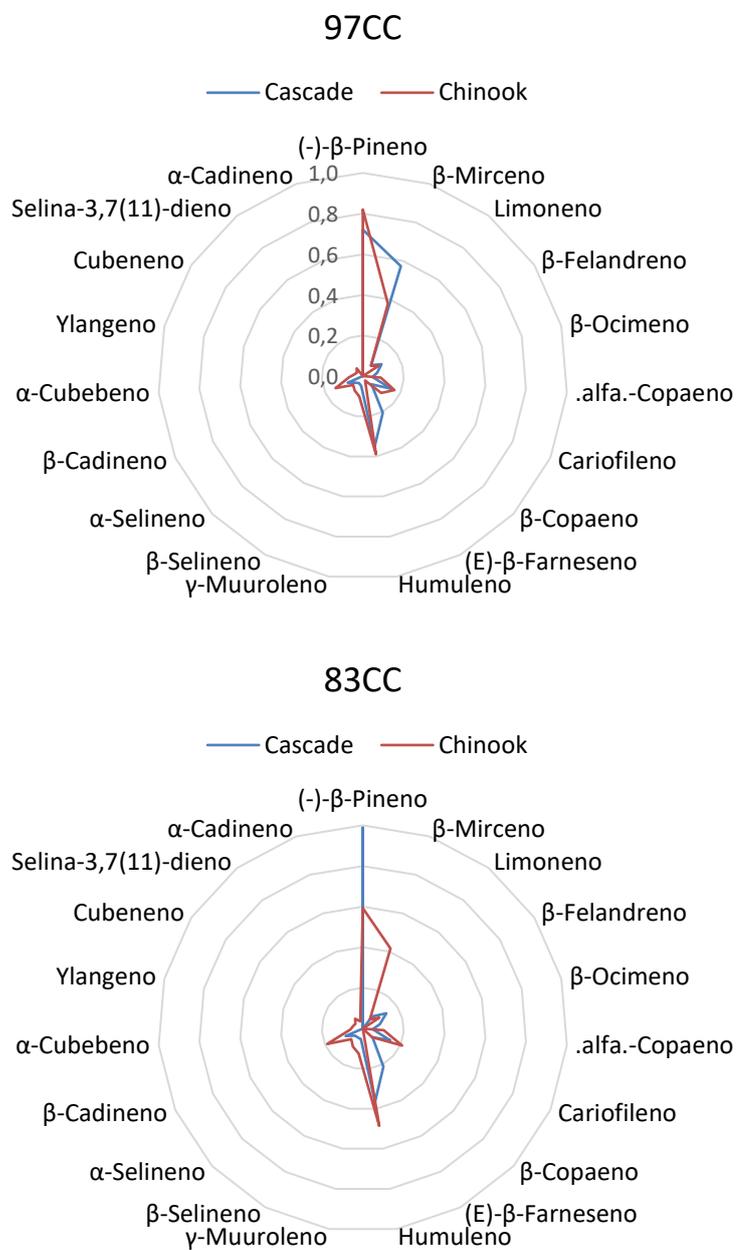
Su e Yin (2021) também compararam o aroma de Cascade e Chinook por cromatografia acoplada com espectrômetro de massas e diversos compostos encontrados pelos autores também foram detectados nesta pesquisa, como é o caso do selina-3,7(11)-dieno encontrado apenas na Chinook, o geranil acetato presente apenas na Cascade e o cariofileno encontrado em ambas as cultivares.

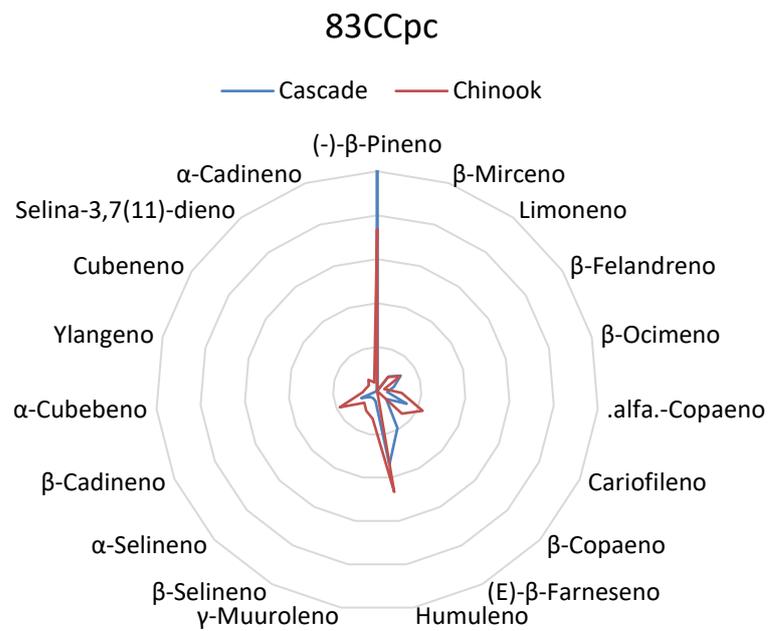
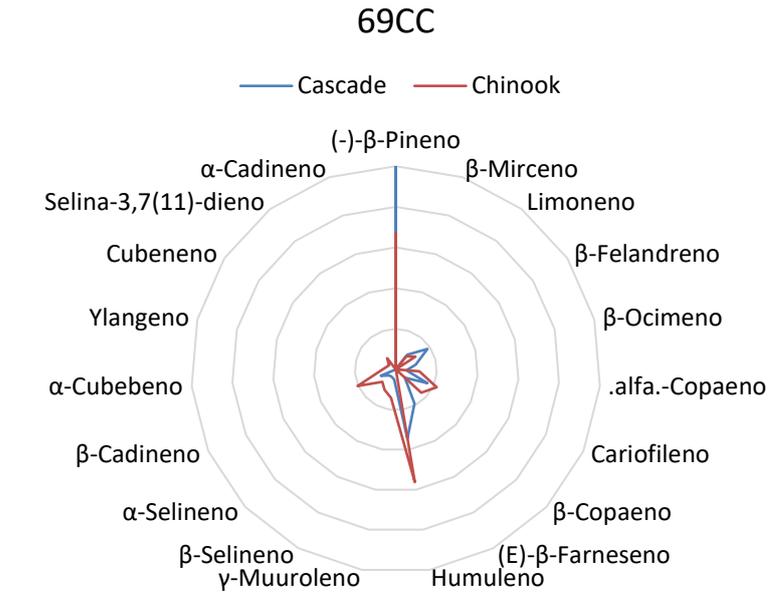
No perfil de voláteis do lúpulo, a maioria dos compostos se classifica como terpeno. A síntese de terpenos é formada por duas vias metabólicas distintas: a via dependente do mevalonato, que acontece no citosol das células, e a via 2-C-metil-D-eritritol-4-fosfato, localizada nos plastídios. Essas duas rotas podem ser realizadas a partir de mais de um substrato, o que pode levar a importantes mudanças no perfil de terpenos no metabolismo de plantas quando por algum motivo estiverem sob algum tipo de estresse (PAZOUKI; NILNEMETS, 2016). A alteração de alguns dos terpenos nas cultivares testadas pode ser decorrente da diminuição da umidade do solo e possível redução de algum substrato específico, visto que nem todos os terpenos foram alterados. O humuleno e o cariofileno por exemplo, parecem não terem sido afetados em ambas as cultivares, enquanto o β -mirceno na Cascade e Chinook, e o (E)- β -Farneseno na Chinook foram detectados apenas nas condições de maior disponibilidade hídrica.

Além disso, a restrição hídrica pode ter atuado nas atividades enzimáticas. O efeito do estresse hídrico na biossíntese de monoterpenos foi avaliado por Radwan et al. (2017) em sálvia, e observaram um aumento no conteúdo destes compostos. Segundo os autores, o estresse elevou a expressão das enzimas bornil difosfato sintase e sabineno sintase.

As diferenças entre as cultivares e a influência da umidade do solo no perfil de terpenos voláteis podem ser mais bem visualizadas na Figura 35.

Figura 35. Perfil de terpenos de lúpulos Cascade e Chinook cultivados sob diferentes umidades de solo. Safra 2022/2023.





97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83 CC: média 83% da capacidade de campo; 69 CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83 CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita.

Fonte: elaborada pela autora, 2023.

Tabela 24 - Perfil de compostos voláteis (% de área e desvio padrão) de lúpulos Cascade e Chinook cultivados sob diferentes umidades de solo. Safra 2022/2023.

Composto	Cascade						Chinook			
	IR_ref.	IR_calc.	97CC	83CC	69CC	83CCpc	97CC	83CC	69CC	83CCpc
Terpenos										
(-)-β-Pineno	1004	997	43,56 ± 13,06	69,71 ± 8,75	70,61	75,23 ± 6,73	53,48 ± 10,04	31,17 ± 21,19	38,58 ± 13,99	45,19 ± 21,73
β-Mirceno	993	995	29,35 ± 27,01	nd	nd	nd	13,49 ± 7,02	16,42 ± 26,72	nd	nd
Limoneno	1045	1042	0,46 ± 0,24	0,55 ± 0,28	0,84	0,69 ± 0,12	0,41 ± 0,26	0,32 ± 0,12	0,66 ± 0,19	0,64 ± 0,29
β-Felandreno	1056	1048	1,17 ± 0,51	1,85 ± 0,82	3,36	1,61 ± 0,42	0,86 ± 0,31	0,92 ± 0,43	1,30 ± 0,34	1,50 ± 0,68
β-Ocimeno	1058	1058	0,54 ± 0,25	0,75 ± 0,34	1,00	0,61 ± 0,08	nd	nd	nd	0,11 ± 0,14
.alfa.-Copaeno	1398	1397	0,23 ± 0,09	0,24 ± 0,08	0,26	0,21 ± 0,09	0,77 ± 0,28	1,05 ± 0,29	1,32 ± 0,36	1,23 ± 0,45
Cariofileno	1456	1453	2,33 ± 0,95	2,14 ± 0,45	2,81	2,11 ± 0,77	2,82 ± 1,21	4,33 ± 1,45	4,68 ± 1,63	4,94 ± 1,85
β-Copaeno	1460	1458	0,34 ± 0,11	0,41 ± 0,12	0,35	0,30 ± 0,12	1,49 ± 0,50	0,39 ± 0,12	2,83 ± 0,58	2,30 ± 0,86
(E)-β-Farneseno	1471	1467	4,10 ± 1,60	4,45 ± 1,23	3,61	3,62 ± 0,92	0,06 ± 0,08	nd	nd	nd
Humuleno	1488	1490	11,76 ± 4,48	12,77 ± 3,20	11,40	11,11 ± 3,93	14,42 ± 4,97	21,76 ± 5,90	28,40 ± 5,44	20,18 ± 10,82
γ-Muuroleno	1502	1499	0,23 ± 0,11	0,28 ± 0,08	0,26	0,22 ± 0,09	1,02 ± 0,35	1,55 ± 0,39	1,98 ± 0,37	1,63 ± 0,50
β-Selineno	1530	1522	0,15 ± 0,12	0,25 ± 0,07	0,17	0,14 ± 0,04	0,67 ± 0,25	1,02 ± 0,23	1,30 ± 0,23	1,05 ± 0,38
α-Selineno	1510	1527	0,22 ± 0,07	0,26 ± 0,07	0,19	0,17 ± 0,04	0,42 ± 0,16	0,60 ± 0,14	0,80 ± 0,23	0,62 ± 0,20
β-Cadineno	1536	1541	0,64 ± 0,26	0,83 ± 0,27	0,63	0,62 ± 0,16	2,10 ± 0,69	3,55 ± 0,87	4,10 ± 0,85	3,36 ± 1,16
α-Cubebeno	1361	1363	nd	nd	nd	nd	0,46 ± 0,37	0,38 ± 0,12	0,54 ± 0,22	0,43 ± 0,17
Ylangeno	1396,1	1390	nd	nd	nd	nd	0,16 ± 0,06	0,24 ± 0,04	0,23 ± 0,20	0,26 ± 0,05
Cubeneno	1527	1559	nd	nd	nd	nd	0,11 ± 0,10	0,19 ± 0,13	0,15 ± 0,21	0,20 ± 0,16

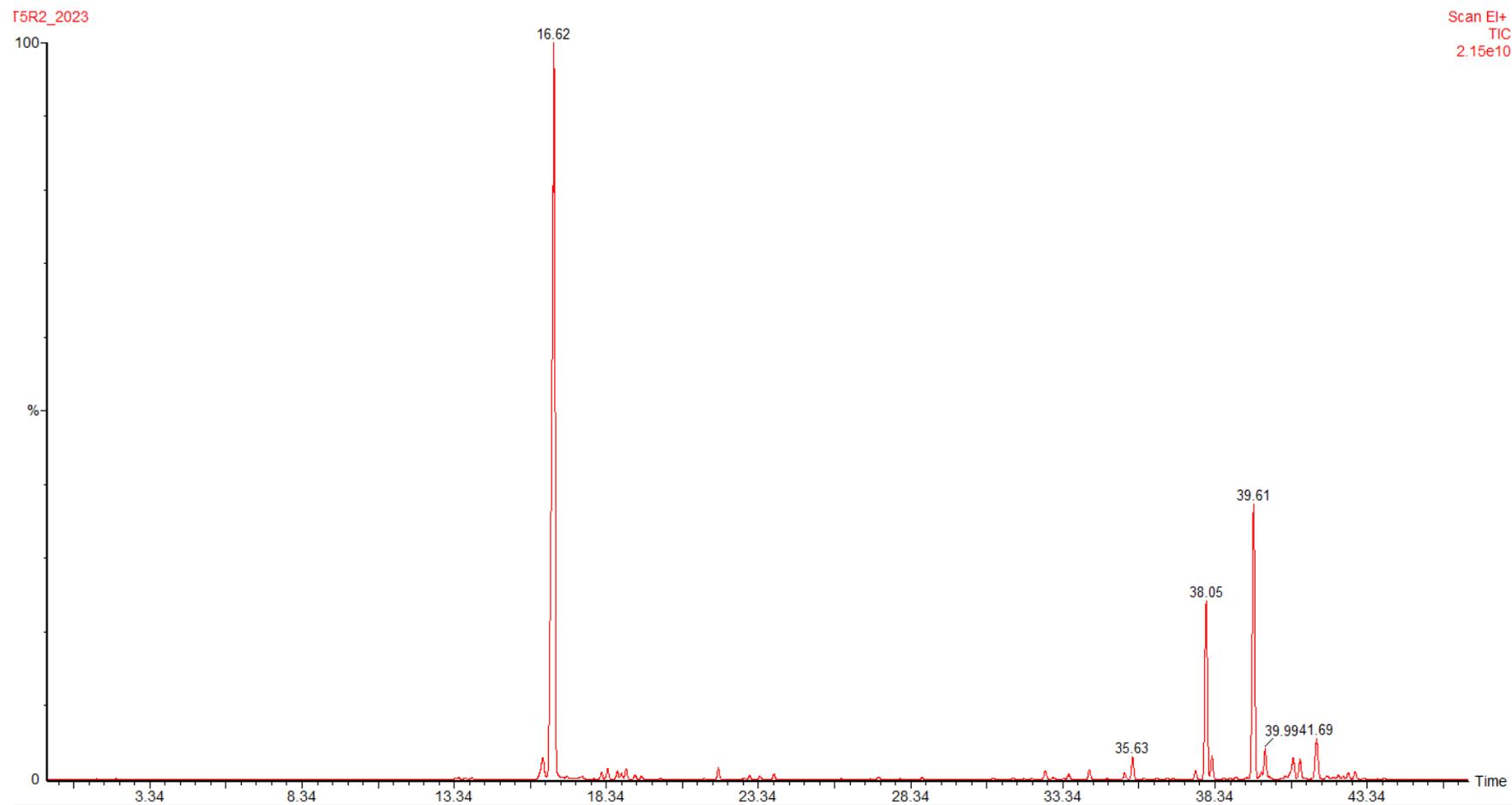
Selina-3,7(11)-dieno	1562	1572	nd	nd	nd	nd	$0,24 \pm 0,10$	$0,37 \pm 0,09$	$0,48 \pm 0,09$	$0,42 \pm 0,16$
α -Cadineno	1546	1562	nd	nd	nd	nd	nd	$0,14 \pm 0,10$	nd	$0,17 \pm 0,13$
Linalol	1122	1136	$0,37 \pm 0,20$	$0,37 \pm 0,14$	0,26	$0,26 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,03$	$0,34 \pm 0,11$	$0,36 \pm 0,12$	$0,29 \pm 0,09$
Ésteres										
Ácido hexanóico, 5-metil-, éster metílico	963	1009	$0,46 \pm 0,25$	$0,75 \pm 0,57$	nd	nd	$0,28 \pm 0,08$	$0,13 \pm 0,18$	$0,35 \pm 0,15$	$0,48 \pm 0,23$
Ácido propanoico, éster 2-metil-, 2-metilbutílico	1023	1036	nd	$1,18 \pm 0,44$	1,20	$1,21 \pm 0,18$	$1,95 \pm 1,01$	$4,83 \pm 0,99$	$4,04 \pm 2,39$	$5,20 \pm 1,66$
Ácido propanoico, éster 2-metil-, 3-metilbutílico	1000	1032	$1,51 \pm 0,77$	$0,57 \pm 0,27$	0,57	$0,51 \pm 0,04$	$0,70 \pm 0,18$	$1,35 \pm 0,35$	$1,46 \pm 0,50$	$1,37 \pm 0,79$
Metil 6-metil heptanoato	1068	1108	$0,43 \pm 0,19$	$0,48 \pm 0,20$	0,43	$0,30 \pm 0,05$	$1,11 \pm 0,13$	$1,69 \pm 0,15$	$1,65 \pm 0,52$	$1,95 \pm 0,36$
Ácido 4-decenóico, éster metílico	-	1329	$0,43 \pm 0,19$	$0,17 \pm 0,07$	0,14	$0,11 \pm 0,03$	$0,29 \pm 0,04$	$0,43 \pm 0,07$	$0,38 \pm 0,19$	$0,47 \pm 0,19$
Ácido heptanóico, éster metílico	1026	1045	$0,57 \pm 0,35$	$0,81 \pm 0,51$	0,69	$0,47 \pm 0,19$	$0,66 \pm 0,15$	$0,61 \pm 0,21$	$0,65 \pm 0,60$	$0,24 \pm 0,07$
Ácido 2-pentenóico, 3-etil-, éster metílico	-	1054	$0,07 \pm 0,05$	nd	nd	nd	nd	nd	$0,21 \pm 0,06$	$0,13 \pm 0,03$
Ácido octanóico, éster metílico	1138	1146	$0,43 \pm 0,14$	$0,46 \pm 0,23$	0,47	$0,24 \pm 0,22$	$0,71 \pm 0,03$	$0,97 \pm 0,29$	$0,90 \pm 0,49$	$1,13 \pm 0,41$

Metil 7,8-octadecadienoato	-	1335	0,18 ± 0,07	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,24 ± 0,09
Ácido trans-gerânico metil ester	1336	1347	0,28 ± 0,14	0,32 ± 0,11	nd	nd	0,45 ± 0,19	1,17 ± 0,33	1,06 ± 0,33	1,04 ± 0,25
Geranil acetato	1391	1405	0,46 ± 0,25	0,40 ± 0,09	0,31	nd	nd	nd	nd	nd
Ácido hexanóico, 4-metileno-, éster	-	1054	nd	nd	0,06	nd	0,11 ± 0,05	0,10 ± 0,08	nd	nd
Ácido octanóico, 4-metil-, éter metílico	1187	1019	nd	nd	nd	nd	0,09 ± 0,07	0,10 ± 0,12	0,22 ± 0,05	nd
Ácido butanoico, éster 3-metil-, 2-metilbutílico	1113	1129	nd	nd	nd	nd	0,30 ± 0,09	0,68 ± 0,12	0,65 ± 0,16	0,64 ± 0,33
Metil 6-metiloctanoato	1198	1215	nd	nd	nd	nd	0,23 ± 0,07	0,41 ± 0,07	0,29 ± 0,25	0,43 ± 0,03
Ácido propanoico, 2-metil-, 2-metilpropil éster	925	933	nd	nd	nd	nd	nd	0,38 ± 0,06	nd	0,56 ± 0,06
Ácido nonanóico, éster metílico	1231	1243	nd	nd	nd	nd	nd	0,26 ± 0,18	nd	0,30 ± 0,22
3-Metil-apopineno	-	944	nd	nd	0,38	nd	nd	nd	nd	0,22 ± 0,12

97CC: média de 97% da capacidade de campo; 83 CC: média 83% da capacidade de campo; 69 CC: média de 69% da capacidade de campo, e 83CCpc: média de 83% da capacidade de campo com corte de irrigação 4 dias pré-colheita. nd: não detectado.

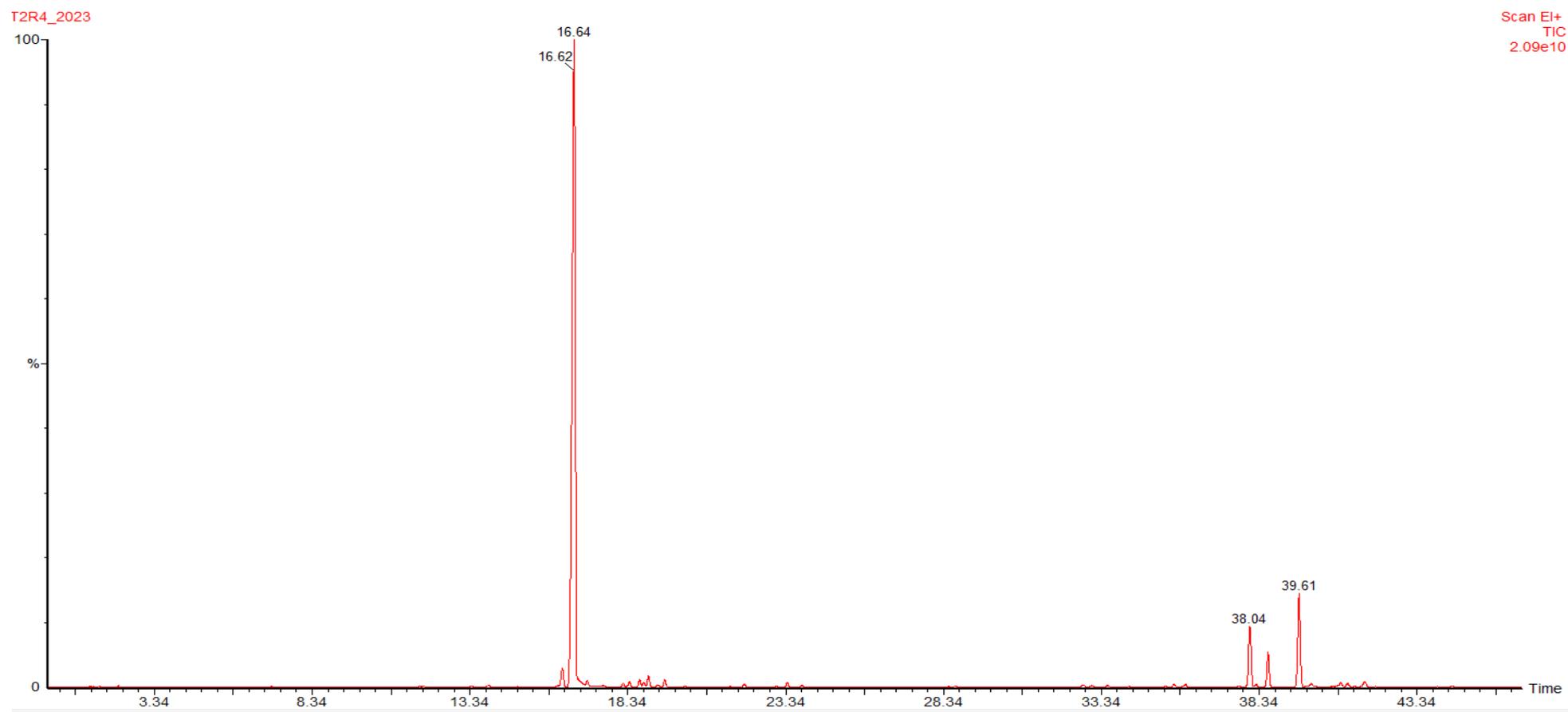
Fonte: elaborada pela autora, 2023.

Figura 36 - Cromatograma da análise de compostos voláteis de lúpulo Chinook.



Fonte: elaborada pela autora, 2023.

Figura 37 - Cromatograma da análise de compostos voláteis de lúpulo Cascade.



Fonte: elaborada pela autora, 2023.

5.4 CONCLUSÕES

As diferentes umidades de solo durante o cultivo de lúpulo Chinook não interferiram no teor de compostos fenólicos totais e na atividade antioxidante total. No lúpulo Cascade, a restrição hídrica próxima a colheita reduziu o teor de compostos fenólicos, embora a atividade antioxidante tenha tido pouca ou nenhuma alteração.

Os perfis de compostos voláteis de lúpulos Cascade e Chinook são compostos majoritariamente por terpenos, mas a composição é específica para cada cultivar. A redução da umidade do solo durante o ciclo influenciou em alguns dos compostos, reduzindo-os ou não sendo detectados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As umidades do solo de 97%, 83%, 69% da Capacidade de Campo e 83% da Capacidade de Campo mais 4 dias sem irrigação pré-colheita de um Cambissolo Húmico em condições de vasos em estufa, não interferiram nas variáveis de altura de planta, velocidade de crescimento da parte aérea, massa da parte aérea, produção de cones por planta e características de raízes para os lúpulos Cascade e Chinook nas duas safras.

O efeito da cultivar foi observado nas avaliações de tamanho de cone, produção por planta e características de raízes. Embora com cones menores, a produção do lúpulo Cascade foi maior comparado à Chinook. As raízes da cultivar Chinook apresentaram maior diâmetro e volume ao final da segunda safra.

As avaliações fisiológicas em ambas as cultivares e nas duas safras indicaram que a fotossíntese líquida, condutância estomática e transpiração tendem a ser reduzidas em menor disponibilidade hídrica em estágio mais avançado de desenvolvimento da planta.

O fornecimento de água influenciou nos teores de alfa e beta ácidos e atividade antioxidante apenas na primeira safra, resultando em menores concentrações nos tratamentos com menor disponibilidade hídrica. Na safra seguinte, os tratamentos não apresentaram diferenças.

O perfil de compostos voláteis de lúpulos Cascade e Chinook foi composto majoritariamente por terpenos, álcoois, ésteres e aldeídos, com composições diferentes entre as cultivares. O perfil aromático se mostrou sensível às umidades de solo em ambas as cultivares, de forma que, de maneira geral, menor disponibilidade hídrica reduziu o número de compostos detectados.

Os resultados da cultivar Chinook foram em partes comprometidos pelas condições climáticas adversas da safra 2021/2022 e ataque mais severo de ácaro nesta cultivar, uma vez que a sensibilidade para o ataque de ácaros se mostrou maior quando comparada a cultivar Cascade, e devido ao excesso de calor, o controle sanitário também foi dificultado.

De maneira geral, a cultivar Cascade demonstrou ser mais tolerante às altas temperaturas, não exigir tanta água durante o período de safra e ter maior rusticidade no manejo durante o cultivo, em comparação à Chinook.

REFERÊNCIAS

ABERL, A.; COELHAN, M. Determination of Volatile Compounds in Different Hop Varieties by Headspace-Trap GC/MS - In Comparison with Conventional Hop Essential Oil Analysis. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 60, n. 11, p. 2785-2792, 2012.

ALBERGARIA, E. T.; OLIVEIRA, A. F. M.; ALBUQUERQUE, U. P. The effect of water deficit stress on the composition of phenolic compounds in medicinal plants. **South African Journal of Botany**, v. 131, p. 12-17, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.02.002>

AFONSO, S.; ARROBAS, M.; RODRIGUES, M. Â. Agronomic and chemical evaluation of hop cultivars grown under Mediterranean conditions. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 19, n. 3, p. e0904-e0904, 2021. <https://doi.org/10.5424/sjar/2021193-17528>

AFONSO, S., DIAS, M. I., FERREIRA, I. C., ARROBAS, M., CUNHA, M., BARROS, L., RODRIGUES, M. Â. The Phenolic Composition of Hops (*Humulus lupulus* L.) Was Highly Influenced by Cultivar and Year and Little by Soil Liming or Foliar Spray Rich in Nutrients or Algae. **Horticulturae**, v. 8, n. 5, p. 385, 2022. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050385>

AFONSO, S.; ARROBAS, M.; RODRIGUES, M. A. Soil and plant analyses to diagnose hop fields irregular growth. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 4, p. 1999-2013, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00270-6>

AGEHARA, S. Using Supplemental Lighting to Control Flowering of Hops in Florida: HS1365, 4/2020. **EDIS**, v. 2020, n. 2, 2020.

AHMAD, S.; BELWAL, V.; PUNIA, S. S.; RAM, M.; RAJPUT, S. S.; KUNWAR, R.; MEENA, M. K.; GUPTA, D.; KUMAWAT, G. L.; HUSSAIN, T.; MOHAMED, H. I. Role of Plant Secondary Metabolites and Phytohormones in Drought Tolerance: A Review. **Gesunde Pflanzen**, p. 1-18, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00795-z>

AKOA, S. P.; BOULANGER, R.; ONOMO, P. E.; LEBRUN, M.; ONDOBO, M. L.; LAHON, M. C.; MENDO, S. A. N.; NIEMENAK, N.; DJOCGOUE, P. F. Sugar profile and volatile aroma composition in fermented dried beans and roasted nibs from six controlled pollinated Cameroonian fine-flavor cocoa (*Theobroma cacao* L.) hybrids. **Food Bioscience**, v. 53, p. 102603, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102603>

ALMEIDA, A. R.; MACIEL, M. V. O. B.; MACHADO, M. H.; BAZZO, G. C.; ARMAS, R. D.; VITORINO, V. B.; VITALI, L.; BLOCK, J. M.; BARRETO, P. L. M. Bioactive compounds and antioxidant activities of Brazilian hop (*Humulus lupulus* L.) extracts. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 55, n. 1, p. 340-347, 2020. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14311>

ALGAZZALI, V.; SHELLHAMMER, T. Bitterness Intensity of Oxidized Hop Acids: humulinones and hulupones. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 74, n. 1, p. 36-43, 2016. <http://dx.doi.org/10.1094/asbcj-2016-1130-01>.

AMMAR, A.; AISSA, I. B.; GOUIAA, M.; MARS, M. Fig (*Ficus carica* L.) vulnerability to climate change: Combined effects of water stress and high temperature on ecophysiological behaviour of different cultivars. **South African Journal of Botany**, v. 147, p. 482-492, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.02.014>

ANTINORO, C.; ARNONE, E.; NOTO, L. V. The use of soil water retention curve models in analyzing slope stability in differently structured soils. **Catena**, v. 150, p. 133-145, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.019>

ALMAGUER, C.; SCHÖNBERGER, C.; GASTL, M.; ARENDT, E. K.; BECKER, T. *Humulus lupulus* - a story that begs to be told. A review. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 120, n. 4, 289–314p, 2014. <https://doi.org/10.1002/jib.160>

ARRUDA, T. R.; PINHEIRO, P. F.; SILVA, P. I.; BERNARDES, P. C. A new perspective of a well-recognized raw material: Phenolic content, antioxidant and antimicrobial activities and α - and β -acids profile of Brazilian hop (*Humulus lupulus* L.) extracts. **Lwt**, v. 141, p. 110905, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110905>

ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J. Zoneamento agrícola de riscos climáticos do Brasil: base teórica, pesquisa e desenvolvimento. **Informe Agropecuário**, v. 29, n. 246, p. 47-60, 2008.

BAKHSHOODEH, R.; OCAMPO, C.; OLDHAM, C. Evapotranspiration rates and evapotranspirative cooling of green façades under different irrigation scenarios. **Energy and Buildings**, v. 270, p. 112223, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112223>

BALDI, E.; QUARTIERI, M.; CHIARELLI, G.; LAROCCA, G. N.; MASTROLEO, M.; XYLOGIANNIS, E.; FALSONE, G.; TOSELLI, M. Water retention potentials of Italian soils and physiological responses of potted golden kiwifruit. **Scientia Horticulturae**, v. 329, p. 113013, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113013>

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. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52548-0>

BAYALA, J.; PRIETO, I. Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems. **Plant and Soil**, v. 453, p. 17-28, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04173-z>

BERGONCI, J. I.; PEREIRA, P. G. Comportamento do potencial da água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 229-235, 2002.

BRENDEL, O. The relationship between plant growth and water consumption: a history from the classical four elements to modern stable isotopes. **Annals of Forest Science**, v. 78, n. 2, p. 47, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01063-2>

BIENDL, M.; PINZL, C. Hops and health. **MBAA TQ**, v. 46, p. 1-7, 2009. <https://doi.org/10.1094/TQ-46-2-0416-01>

BRANT, V.; KROFTA, K.; KROULÍK, M.; ZÁBRANSKY, P.; PROCHAZKA, P.; POKORNÝ, J. Distribution of root system of hop plants in hop gardens with regular rows cultivation. **Plant, Soil and Environment**, v. 66, n. 7, p. 317-326, 2020. <http://dx.doi.org/10.17221/672/2019-PSE>

BROUWER, C.; GOFFEAU, A.; HEIBLOEM, M. **Irrigation Water Management: Training Manual No. 1 - Introduction to Irrigation**. Roma: Fao, 1985. Disponível em: <https://www.fao.org/3/r4082e/r4082e00.htm#Contents>. Acesso em: 07 mar. 2024.

BOLTON, J. L.; DUNLAP, T. L.; HAJIRAHIMKHAN, A.; MBACHU, O.; CHEN, S.; CHADWICK, L.; NIKOLIC, D.; VAN BREEMEN, R. B.; PAULI, G. F.; DIETZ, B. M. The Multiple Biological Targets of Hops and Bioactive Compounds. **Chemical Research in Toxicology**, v. 32, n. 2, p. 222-233, 2019. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.chemrestox.8b00345>.

CARDUCCI, C. E.; BOSCO, L. C.; KOHN, L. S.; BARBOSA, J. S.; BENEVENUTE, P. A. N.; REGAZOLLI, G. H. M. Dinâmica da água em cambissolo húmico sob cultivo do linho no planalto catarinense. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 1, p. 1-11, 2017. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v18i1.49885>

ČEH, B.; KAČ, M.; KOŠIR, I. J.; ABRAM, V. Relationships between xanthohumol and polyphenol content in hop leaves and hop cones with regard to water supply and cultivar. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 8, n. 9, p. 989-1000, 2007. <https://doi.org/10.3390/i8090989>

ÇELİK, Ö.; AYAN, A.; ATAK, Ç. Enzymatic and non-enzymatic comparison of two different industrial tomato (*Solanum lycopersicum*) varieties against drought stress. **Botanical Studies**, v. 58, p. 1-13, 2017. <https://doi.org/10.1186/s40529-017-0186-6>

CHOUDHARY, S.; GUHA, A.; KHOLOVA, J.; PANDRAVADA, A.; MESSINA, C. D.; COOPER, M.; VADEZ, V. Maize, sorghum, and pearl millet have highly contrasting species strategies to adapt to water stress and climate change-like conditions. **Plant Science**, 295, 110297. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110297>

CHRISFIELD, B. J.; HOPFER, H.; ELIAS, R. J. Impact of copper-based fungicides on the antioxidant quality of ethanolic hop extracts. **Food Chemistry**, v. 355, p. 129551, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129551>

CLARK, S. M.; Vaitheeswaran, V.; AMBROSE, S. J.; PURVES, R. W.; PAGE, J. E. Transcriptome analysis of bitter acid biosynthesis and precursor pathways in hop (*Humulus lupulus*). **BMC Plant Biology**, v. 13, n. 1, p. 1-14, 2013.

<https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-12>

COUTO, L.; SANS, L. M. A. **Características físico-hídricas e disponibilidade de água no solo**. 2002. Disponível em <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/486994/1/Circ21.pdf>. Acesso em: 29 fev 2023.

DA ROSA ALMEIDA, A.; MACIEL, M. V. O. B.; GANDOLPHO, B. C. G.; MACHADO, M. H.; TEIXEIRA, G. L.; BERTOLDI, F. C.; NORONHA, C. M.; VITALI, L.; BLOCK, J. M.; 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**, v. 79, n. 2, p. 156-166, 2021.

DECOTEAU, D. Plant physiology: environmental factors and photosynthesis. **Department of Horticulture, Pennsylvania State University, USA**, 1998.

DEUNER, C.; BORGES, C. T.; ALMEIDA, A. S.; MENEGHELLO, G. E.; TUNES, L. V. Ácido jasmônico como promotor de resistência em plantas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, n. 3, p. 275-281, 2015.

DE KEUKELEIRE, J.; OOMS, G.; HEYERICK, A.; ROLDAN-RUIZ, I.; BOCKSTAELE, E. V.; DE KEUKELEIRE, D. Formation and accumulation of α -acids, β -acids, desmethylxanthohumol, and xanthohumol during flowering of hops (*Humulus lupulus* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 15, p. 4436-4441, 2003. <https://doi.org/10.1021/jf034263z>

DIETZ, C.; COOK, D.; WILSON, C.; OLIVEIRA, P.; FORD, R. Exploring the multisensory perception of terpene alcohol and sesquiterpene rich hop extracts in lager style beer. **Food Research International**, v. 148, p. 110598, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110598>

DING, D.; ZHAO, Y.; FENG, H.; PENG, X.; SI, B. Using the double-exponential water retention equation to determine how soil pore-size distribution is linked to soil texture. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 119-130, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.007>

DINNENY, J. R. Developmental responses to water and salinity in root systems. **Annual Review of Cell and Developmental Biology**, v. 35, p. 239-257, 2019. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-100617-062949>

DONNER, P.; POKORNÝ, J.; JEŽEK, J.; KROFTA, K.; PATZAK, J.; PULKRÁBEK, J. 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. <https://doi.org/10.17221/627/2019-PSE>

DUARTE, L. M.; AMORIM, T. L.; GRAZUL, R. M.; OLIVEIRA, M. A. L. Differentiation of aromatic, bittering and dual-purpose commercial hops from their terpenic profiles: An approach involving batch extraction, GC-MS and multivariate analysis. **Food**

Research International, v. 138, p. 109768, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109768>

DURASAMY, G. S.; MISHRA, A. K.; KOCABEK, T.; MATOUŁEK, J. Identification and characterization of promoters and cis-regulatory elements of genes involved in secondary metabolites production in hop (*Humulus lupulus* L). **Computational Biology and Chemistry**, v. 64, p. 346-352, 2016.

DUDAREVA, N.; PICHERSKY, E. Metabolic engineering of plant volatiles. **Current opinion in biotechnology**, v. 19, n. 2, p. 181-189, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.011>

DUDAREVA, N.; KLEMPIEN, A.; MUHLEMANN, J. K.; KAPLAN, I. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. **New Phytologist**, v. 198, n. 1, p. 16-32, 2013. <https://doi.org/10.1111/nph.12145>

DURASAMY, G. S.; MISHRA, A. K.; KOCABEK, T.; MATOUŁEK, J. Identification and characterization of promoters and cis-regulatory elements of genes involved in secondary metabolites production in hop (*Humulus lupulus* L). **Computational Biology and Chemistry**, v. 64, p. 346-352, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.compbiolchem.2016.07.010>

EBRAHIMI-MOLLABASHI, E.; HUTH, N. I.; HOLZWOTH, D. P.; ORDÓÑEZ, R. A.; HATFIELD, J. L.; HUBER, I.; CASTELLANO, M. J.; ARCHONTOULIS, S. V. Enhancing APSIM to simulate excessive moisture effects on root growth. **Field Crops Research**, v. 236, p. 58-67, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.014>

ELROD, S. M.; LANGLEY, C.; GREENSPAN, P.; HOFMEISTER, E. Relationship between phenolic and antioxidant concentration of *Humulus lupulus* and alpha acid content. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 77, n. 2, p. 134-139, 2019. <https://doi.org/10.1080/03610470.2019.1587701>

EMBRAPA. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2004.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF, 2017. 574p.

ERIKSEN, R. L.; RUTTO, L. K.; DOMBROWSKI, J. E.; HENNING, J. A. Photosynthetic activity of six hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars under different temperature treatments. **HortScience**, v. 55, n. 4, p. 403-409, 2020.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI14580-19>

ERIKSEN, R. L.; PADGITT-COBB, L.; TOWNSEND, M. S.; HENNING, J. A. Gene expression for secondary metabolite biosynthesis in hop (*Humulus lupulus* L.) leaf lupulin glands exposed to heat and low-water stress. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 5138, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84691-y>

EYRES, G.; DUFOUR, J. Hop essential oil: Analysis, chemical composition and odor

characteristics. In: **Beer in health and disease prevention**. Academic Press, 2009. p. 239-254.

FANDIÑO, M.; OLMEDO, J.L.; MARTÍNEZ, E.M.; VALLADARES, J.; PAREDES, P.; REY, B.J.; MOTA, M.; CANCELA, J.J.; PEREIRA, L.S. Assessing and modelling water use and the partition of evapotranspiration of irrigated hop (*Humulus Lupulus*), and relations of transpiration with hops yield and alpha-acids. **Industrial Crops and Products**, v. 77, p. 204-217, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.08.042>.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Sustainable agriculture**, p. 153-188, 2009. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2008021>

FAOSTAT. **Crops**. 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 23 ago. 2020.

FÉCHIR, M.; WEAVER, G.; ROY, C.; SHELLHAMMER, T. H. Exploring the Regional Identity of Cascade and Mosaic® Hops Grown at Different Locations in Oregon and Washington. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, p. 1-13, 2022. <https://doi.org/10.1080/03610470.2022.2089010>

FELIPE, L. O.; BICAS, J. L. Terpenos, aromas e a química dos compostos naturais. **Química Nova na Escola**, v. 39, n. 2, p. 120-130, 2017. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc39_2/04-QS-09-16.pdf>. Acesso em 18 abr 2023.

FORTESCHI, M.; PORCU, M. C.; FANARI, M.; ZINELLU, M.; SECCHI, N.; BUIATTI, S.; PASSAGHE.; BERTOLI, S.; PRETTI, L. Quality assessment of Cascade Hop (*Humulus lupulus* L.) grown in Sardinia. **European Food Research and Technology**, v. 245, p. 863-871, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3215-0>

GAN, P.; LIU, F.; LI, R.; WANG, S.; LUO, J. Chloroplasts—beyond energy capture and carbon fixation: tuning of photosynthesis in response to chilling stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 20, p. 5046, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijms20205046>

GHARIBI, S.; TABATABAEI, B. E. S.; SAEIDI, G.; TALEBI, M.; MATKOWSKI, A. The effect of drought stress on polyphenolic compounds and expression of flavonoid biosynthesis related genes in *Achillea pachycephala* Rech. f. **Phytochemistry**, v. 162, p. 90-98, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2019.03.004>

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.383-411. (Agronomy Series, 9)

GUERRA, A. M. N. M.; EVANGELISTA, R. S.; SILVA, M. G. M.; SANTOS, D. S.; SANTOS, L. B.; SANTOS, P. A. Produção de pimenta de cheiro em diferentes volumes de vaso Smeel pepper production in different pot volumes. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 10, p. 100867-100883, 2021.

<https://doi.org/10.34117/bjdv7n10-412>

GOMES, E. G.; MACHADO, M. P.; MIOLA, J.; DESCHAMPS, C. Leaf area and intermittent misting on hop plants propagation by stem cuttings. **Revista Colombiana de Ciências Hortícolas**, Bogotá, v. 12, n. 2, p. 508-513, 2018.

GOMEZ, D. R. S. **Ácaros**. 2021. Embrapa Soja. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/producao/manejo-integrado-de-pragas/pragas/pragas-que-atacam-folhas/acaros>. Acesso em: 22 jul. 2023.

GONSAGA, R. F. **Desenvolvimento de híbridos de lúpulo adaptados às condições tropicais**. 2021. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Agronomia, Departamento de Ciências da Produção Agrícola, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2021.

GLOSER, V.; BALAZ, M.; JUPA, R.; KOROVETSKA, H.; SVOBODA, P. The response of *Humulus lupulus* to drought: the contribution of structural and functional plant traits. **Acta Horticulture** v. 1010, p. 149-154, 2013. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1010.17>

GRAF, T.; BECK, M.; PORTNER, J.; BAUMGARTNER, A.; MAUERMEIER, M.; ISMANN, D.; MAIER, M.; SCHMIDHALTE, U. A new approach for predicting the water balance of hops. **Acta Horticulturae**, v. 1236, p. 63-74, 2019. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1236.10>

GUERRA, A.; BARBOSA, A. D. M.; GUIDORIZZI, K. A.; SOUZA, G. M. Efeitos da temperatura do ar na fotossíntese da cana-de-açúcar na fase inicial do desenvolvimento. **Agrarian**, v. 7, n. 24, p. 211-217, 2014.

GUIMARÃES, B. P.; NASCIMENTO, P. G. B. D.; GHESTI, G. F. Intellectual property and plant variety protection: Prospective study on Hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars. **World Patent Information**, v. 65, p. 102041, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2021.102041>

HANAKA, A.; MAJEWSKA, M.; JAROSZUK-ŚCISEŁ, J. Study of the influence of abiotic and biotic stress factors on horticultural plants. **Horticulturae**, v. 8, n. 1, p. 6, 2022. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010006>

HAUNOLD, A.; LIKENS, S. T.; HORNER, C. E.; BROOKS, S. N.; ZIMMERMANN, C. E. One-half century of hop research by the US Department of Agriculture. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 43, n. 3, p. 123-126, 1985.

HENNING, J. A.; COGGINS, J.; PETERSON, M. Simple SNP-based minimal marker genotyping for *Humulus lupulus* L. identification and variety validation. **Bmc Research Notes**, v. 8, n. 1, p. 1-12, 2015. <http://dx.doi.org/10.1186/s13104-015-1492-2>.

HONG, K.; XU, Z.; WANG, L.; JOHNPAUL, A., CHENG, Y., LV, C.; MA, C. Varietal differences in the phytochemical components' accumulation and aroma profile of three

Humulus lupulus cultivars. **Food Control**, v. 132, p. 108499, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108499>

INUI, T.; TSUCHIYA, F.; ISHIMARU, M.; OKA, K.; KOMURA, H. Different beers with different hops. Relevant compounds for their aroma characteristics. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 20, p. 4758-4764, 2013.

INUI, T.; MATSUI, H.; HOSOYA, T.; KUMAZAWA, S.; FUKUI, N.; OKA, K. Effect of Harvest Time and Pruning Date on Aroma Characteristics of Hop Teas and Related Compounds of Saaz Hops. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 74, n. 4, p. 231-241, 2016. <http://dx.doi.org/10.1094/asbcj-2016-4628-01>.

ISKRA, A. E.; LAFONTAINE, S. R.; TRIPPE, K. M.; MASSIE, S. T.; PHILLIPS, C. L.; TWOMEY, M. C.; SHELLHAMMER, T. H.; GENT, D. H. Influence of Nitrogen Fertility Practices on Hop Cone Quality. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 77, n. 3, p. 199-209, 2019.
<http://dx.doi.org/10.1080/03610470.2019.1616276>.

JACOBO-VELÁZQUEZ, D. A.; CISNEROS-ZEVALLOS, L. An alternative use of horticultural crops: stressed plants as biofactories of bioactive phenolic compounds. **Agriculture**, v. 2, n. 3, p. 259-271, 2012.
<https://doi.org/10.3390/agriculture2030259>

JASKULA-GOIRIS, B.; AERTS, G.; COOMAN, L. Hop α -acids isomerisation and utilisation: an experimental review. **Cerevisia**, v. 35, n. 3, p. 57-70, 2010.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cervis.2010.09.004>.

JACKSON, D.; SIEGLE, L.; SCOGGINS, H. L. Irrigation considerations for commercial hop producers. 2019. Disponível em:
<<https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/92714/SPES-95.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=lf%20hop%20plants%20take%20up,per%20square%20foot%20%3D%2015.2%20gallons.&text=Therefore%2C%20if%20no%20rainfall%20occurs,of%204.4%20hours%20per%20week>>. Acesso em 22 mai 2023.

JIA, X.; SUN, C.; LI, G.; LI, G.; CHEN, G. Effects of progressive drought stress on the physiology, antioxidative enzymes and secondary metabolites of Radix Astragali. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 37, p. 1-14, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-2015-4>

JELÍNEK, L.; DOLEČKOVÁ, M.; KARABÍN, M.; HUDCOVÁ, T.; KOTLÍKOVÁ, B.; DOSTÁLEK, P. Influence of growing area, plant age, and virus infection on the contents of hop secondary metabolites. **Czech Journal of Food Sciences**, v. 30, n. 6, p. 541-547, 2012. <https://doi.org/10.17221/50/2012-CJFS>

KAMALIZADEH, M.; BIHAMTA, M.; ZAREI, A. Drought stress and TiO₂ nanoparticles affect the composition of different active compounds in the Moldavian dragonhead plant. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, n. 2, p. 21, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s11738-019-2814-0>

KEILER, A.; ZIERAU, O.; KRETZSCHMAR, G. Hop Extracts and Hop Substances in Treatment of Menopausal Complaints. **Planta Medica**, v. 79, n. 07, p. 576-579, 2013. <http://dx.doi.org/10.1055/s-0032-1328330>.

KESKIN, Ş., ŞİRİN, Y., ÇAKIR, H. E., & KESKIN, M. An investigation of *Humulus lupulus* L.: Phenolic composition, antioxidant capacity and inhibition properties of clinically important enzymes. **South African Journal of Botany**, v. 120, p. 170-174, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.04.017>

KEUKELEIRE, J.; OOMS, G.; HEYERICK, A.; ROLDAN-RUIZ, I.; VAN BOCKSTAELE, E.; KEUKELEIRE, D. Formation and Accumulation of α -Acids, β -Acids, Desmethylxanthohumol, and Xanthohumol during Flowering of Hops (*Humulus lupulus*L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 15, p. 4436-4441, 2003. <http://dx.doi.org/10.1021/jf034263z>

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Ciência Rural**, v. 30, p. 959-964, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000600006>

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v. 40, p. 1550-1556, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000110>

KOLENC, Z.; VODNIK, D.; MANDELIC, S.; JAVORNIK, B.; KASTELEC, D.; ČERENAK, A. Hop (*Humulus lupulus* L.) response mechanisms in drought stress: proteomic analysis with physiology. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 105, p. 67-78, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.03.026>.

KOROVETSKA, H.; NOVÁK, O.; TUREČKOVÁ, V.; HÁJÍČKOVÁ, M.; GLOSER, V. Signalling mechanisms involved in the response of two varieties of *Humulus lupulus* L. to soil drying: II. changes in the concentration of abscisic acid catabolites and stress-induced phytohormones. **Plant Growth Regulation**, v. 78, p. 13-20, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0058-6>

KHARE, S.; SINGH, N. B.; SINGH, A.; HUSSAIN, I.; NIHARIKA, K. M.; YADAV, V.; BANO, C.; YADAV, R. K.; AMIST, N. Plant secondary metabolites synthesis and their regulations under biotic and abiotic constraints. **Journal of Plant Biology**, v. 63, p. 203-216, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12374-020-09245-7>

KROFTA, K.; KUČERA, J.; JEŽEK, J.; BEDNÁŘOVÁ, E.; POKORNÝ, J.; URBAN, J. Effect of fertilization on water use and yield of hops in mature hop plantation. **Acta Horticulturae**, n. 1236, p. 45-52, 2019. <http://dx.doi.org/10.17660/actahortic.2019.1236.7>.

KROFTA, K.; MIKYŠKA, A.; HAŠKOVÁ, D. Antioxidant characteristics of hops and hop products. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 114, n. 2, p. 160-166, 2008. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2008.tb00321.x>

KOLENC, Z.; VODNIK, D.; MANDELIC, S.; JAVORNIK, B.; KASTELEC, D.; CERENAK, A. Hop (*Humulus lupulus* L.) response mechanisms in drought stress: Proteomic analysis with physiology. **Plant physiology and biochemistry**, v. 105, p. 67-78, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.03.026>

KWON, O. K.; MEKAPOGU, M.; KIM, K. S. Effect of salinity stress on photosynthesis and related physiological responses in carnation (*Dianthus caryophyllus*). **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 60, p. 831-839, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13580-019-00189-7>

LAFONTAINE, S.; VARNUM, S.; ROLAND, A.; DELPECH, S.; DAGAN, L.; VOLLMER, D.; KISHIMOTO, T.; SHELLHAMMER, T. Impact of harvest maturity on the aroma characteristics and chemistry of Cascade hops used for dry-hopping. **Food Chemistry**, v. 278, p. 228-239, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.148>

LIAN, J.; SI, T.; NAIR, N. U.; ZHAO, H. Design and construction of acetyl-CoA overproducing *Saccharomyces cerevisiae* strains. **Metabolic Engineering**, v. 24, p. 139-149, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2014.05.010>

LIBARDI, P. L. Água no solo. **Física do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1-72, 2010. Disponível em: http://www.ler.esalq.usp.br/aulas/lce200/Agua_no_Solo_2016_simulado.pdf. Acesso em: 07 mar. 2024.

LIMA, C. S.; FERREIRA-SILVA, S. L.; CARVALHO, F. E. L.; NETO, M. C. L.; ARAGÃO, R. M.; SILVA, E. N.; SOUSA, R. M. J.; SILVEIRA, J. A. G. Antioxidant protection and PSII regulation mitigate photo-oxidative stress induced by drought followed by high light in cashew plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 149, p. 59-69, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.02.001>

LEE, H. J.; LEE, J. H.; WI, S.; JANG, Y.; AN, S.; CHOI, C. K.; JANG, S. Exogenously applied glutamic acid confers improved yield through increased photosynthesis efficiency and antioxidant defense system under chilling stress condition in *Solanum lycopersicum* L. cv. Dotaerang Dia. **Scientia Horticulturae**, v. 277, p. 109817, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109817>

LEITE, G. B.; PANDOLFO, C. Requerimentos agroclimáticos para a cultura do lúpulo. **Agropecuária Catarinense**, v. 35, n. 2, p. 83-86, 2022. <https://doi.org/10.52945/rac.v35i2.1273>

LIBERATORE, C. M.; MATTION, G.; RODOLFI, M.; GANINO, T.; FABBRI, A.; CHIANCONE, B. Chemical and physical pre-treatments to improve in vitro seed germination of *Humulus lupulus* L., cv. Columbus. **Scientia Horticulturae**, v. 235, p. 86-94, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.077>

LOZANO, Y. M.; AGUILAR-TRIGUEROS, C. A.; FLAIG, I. C.; RILLIG, M. C. Root trait responses to drought are more heterogeneous than leaf trait responses. **Functional**

Ecology, v. 34, n. 11, p. 2224-2235, 2020. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2435.13656>

LU, C.; ZHANG, Y.; ZHAN, P.; WANG, P.; TIAN, H. Characterization of the key aroma compounds in four varieties of pomegranate juice by gas chromatography-mass spectrometry, gas chromatography-olfactometry, odor activity value, aroma recombination, and omission tests. **Food Science and Human Wellness**, v. 12, n. 1, p. 151-160, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.033>

LYNCH, J. P. Edaphic stress interactions: Important yet poorly understood drivers of plant production in future climates. **Field Crops Research**, v. 283, p. 108547, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108547>

MA, D.; SUN, D.; WANG, C.; LI, Y.; GUO, T. Expression of flavonoid biosynthesis genes and accumulation of flavonoid in wheat leaves in response to drought stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 80, p. 60-66, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.024>

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, n. 7, p. 275-281, 2018. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v10n7p275>.

MACHADO, J. C.; FARIA, M. A.; FERREIRA, I. M.P.L.V.O. Hops: new perspectives for an old beer ingredient. **Natural Beverages**, p. 267-301, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-816689-5.00010-9>.

MARCEDDU, R.; CARRUBBA, A.; SARNO, M. Cultivation trials of hop (*Humulus lupulus* L.) in semi-arid environments. **Heliyon**, v. 6, n. 10, p. e05114, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05114>

MARCEDDU, R.; CARRUBBA, A.; SARNO, M. Resilience of hop (*Humulus lupulus* L.) to salinity, heat and drought stresses: A mini-review. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 4941, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1064922>

MARTINS, N.; BARROS, L.; FERREIRA, I. C. F. R. In vivo antioxidant activity of phenolic compounds: Facts and gaps. **Trends in Food Science & Technology**, v. 48, p. 1-12, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.008>

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. 1-18, 2014. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-15-22>

MATSUI, H.; INUI, T.; ISHIMARU, M.; HIDA, Y.; OKA, K. The influence of the age of a hop plant on the quality of hop aromas in beer. **Acta Horticulturae**, n. 1010, p. 171-182, 2013. <http://dx.doi.org/10.17660/actahortic.2013.1010.20>.

MATSUI, H.; INUI, T.; OKA, K.; FUKUI, N. The influence of pruning and harvest timing

on hop aroma, cone appearance, and yield. **Food Chemistry**, v. 202, p. 15-22, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.058>.

MICHALAK, A. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 15, n. 4, 2006.

MILLER, P.; LANIER, W.; BRANDT, S. Using growing degree days to predict plant stages. **Ag/Extension Communications Coordinator, Communications Services, Montana State University-Bozeman, Bozeman, MO**, v. 59717, n. 406, p. 994-2721, 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/J-Tarafdar/post/Is_there_a_database_containing_growth_stage_phenophase_by_accumulated_growing_degree_days_by_agricultural_crops_available_in_the_public_domain/attachment/5c57fa923843b0544e63ec8e/AS%3A722503433453568%401549269650262/download/mt200103ag.pdf>. Acesso em 5 jun 2023.

MIKYŁKA, A.; KROFTA, K. Assessment of changes in hop resins and polyphenols during long-term storage. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 118, n. 3, p. 269-279, 2012. <http://dx.doi.org/10.1002/jib.40>.

MORCOL, T. B.; NEGRIN, A.; MATTHEWS, P. D.; KENNELLY, E. J. Hop (*Humulus lupulus* L.) terroir has large effect on a glycosylated green leaf volatile but not on other aroma glycosides. **Food Chemistry**, v. 321, p. 126644-126651, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126644>

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. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.02.006>

MUHLEMANN, J. K.; KLEMPIEN, A.; DUDAREVA, N. Floral volatiles: from biosynthesis to function. **Plant, Cell & Environment**, v. 37, n. 8, p. 1936-1949, 2014. <https://doi.org/10.1111/pce.12314>

NAKAWUKA, P.; PETERS, T. R.; KENNY, S.; WALSH, D. Effect of deficit irrigation on yield quantity and quality, water productivity and economic returns of four cultivars of hops in the Yakima Valley, Washington State. **Industrial Crops and Products**, v. 98, p. 82-92, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.037>.

NANCE, M. R.; SETZER, W. N. Volatile components of aroma hops (*Humulus lupulus* L.) commonly used in beer brewing. **Journal of Brewing and Distilling**, v. 2, n. 2, p. 16-22, 2011.

NEZI, P.; CICALONI, V.; TINTI, L.; SALVINI, L.; IANNONE, M.; VITALINI, S.; GARZOLI, S. Metabolomic and Proteomic Profile of Dried Hop Inflorescences (*Humulus lupulus* L. cv. Chinook and cv. Cascade) by SPME-GC-MS and UPLC-MS-MS. **Separations**, v. 9, n. 8, p. 204, 2022. <https://doi.org/10.3390/separations9080204>

OLADOKUN, O.; TARREGA, A.; JAMES, S.; SMART, K.; HORT, J.; COOK, D. The

impact of hop bitter acid and polyphenol profiles on the perceived bitterness of beer. **Food Chemistry**, v. 205, p. 212-220, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.023>.

OLSZOWY, M. What is responsible for antioxidant properties of polyphenolic compounds from plants? **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 144, p. 135-143, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.039>

OSTERC, G.; ŠTAMPAR, F. Differences in endo/exogenous auxin profile in cuttings of different physiological ages. **Journal of Plant Physiology**, v. 168, n. 17, p. 2088-2092, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2011.06.016>

PAGUET, A. S.; SIAH, A.; LEFÈVRE, G.; SAHPAZ, S.; RIVIÈRE, C. Agronomic, genetic and chemical tools for hop cultivation and breeding. **Phytochemistry Reviews**, v. 21, n. 2, p. 667-708, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11101-022-09813-4>

PATZAK, J.; KROFTA, K.; HENYCHOVÁ, A.; NESVADBA, V. Number and size of lupulin glands, glandular trichomes of hop (*Humulus lupulus* L.), play a key role in contents of bitter acids and polyphenols in hop cone. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 50, n. 8, p. 1864-1872, 2015. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12825>

PAN, X.; BI, S.; LAO, F.; WU, J. Factors affecting aroma compounds in orange juice and their sensory perception: A review. **Food Research International**, p. 112835, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112835>

PAZOUKI, L.; NIINEMETS, Ü. Multi-substrate terpene synthases: their occurrence and physiological significance. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1019, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01019>

PAWŁOWICZ, I.; MASAJADA, K. Aquaporins as a link between water relations and photosynthetic pathway in abiotic stress tolerance in plants. **Gene**, v. 687, p. 166-172, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2018.11.031>

PEQUENO, P. L. L.; LEÔNIDAS, F. C.; MENDES, A. A.; VIEIRA, A. H.; MARTINS, E. P.; VASCONCELOS, L. P. **Água disponível do solo: algumas características físicas do solo importantes para quantificação**. 2002. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/215269/1/cpafro-6632-doc67.pdf>. Acesso em: 29 fev 2023

PISTELLI, L.; FERRI, B.; CIONI, P.L.; KOZIARA, M.; AGACKA, M.; SKOMRA, U. Aroma profile and bitter acid characterization of hop cones (*Humulus lupulus* L.) of five healthy and infected Polish cultivars. **Industrial Crops and Products**, v. 124, p. 653-662, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.009>.

PICONI, G. G.; CASSEMIRO, P. F.; LABIGALINI, V. G. M.; SANTOS, S. S.; RODRIGUES, S. A.; SARNIGHAUSEN, V. C. R.; PAI, A. D. Determinação da constante térmica do lúpulo (*Humulus lupulus*) por meio da metodologia de graus-dia. ENBRALÚPULO, 2., 2021, Botucatu. **Anais [...] Botucatu: Unesp**, 2021.

PISTELLI, L.; FERRI, B.; CIONI, P. L.; KOZIARA, M.; AGACKA, M.; SKOMRA, U. Aroma profile and bitter acid characterization of hop cones (*Humulus lupulus* L.) of five healthy and infected Polish cultivars. **Industrial Crops and Products**, v. 124, p. 653-662, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.009>

PERDOMO, J. A.; CAPÓ-BAUÇÀ, S.; CARMO-SILVA, E.; GALMÉS, J. Rubisco and rubisco activase play an important role in the biochemical limitations of photosynthesis in rice, wheat, and maize under high temperature and water deficit. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 490, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00490>

POŁEĆ, K. et al. The impact of β -myrcene—the main component of the hop essential oil—on the lipid films. **Journal of Molecular Liquids**, v. 308, p. 113028, 2020.

POORTER, H.; BÜHLER, J.; DUSSCHOTEN, D.; CLIMENT, J.; POSTMA, J. A. Pot size matters: a meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. **Functional Plant Biology**, v. 39, n. 11, p. 839-850, 2012. <http://dx.doi.org/10.1071/FP12049>

POSSEMIERS, S.; BOLCA, S.; GROOTAERT, C.; HEYERICK, A.; DECROOS, K.; DHOOGHE, W.; KEUKELEIRE, D.; RABOT, S.; VERSTRAETE, W.; WIELE, T. The Prenylflavonoid Isoxanthohumol from Hops (*Humulus lupulus* L.) Is Activated into the Potent Phytoestrogen 8-Prenylnaringenin In Vitro and in the Human Intestine. **The Journal of Nutrition**, v. 136, n. 7, p. 1862-1867, 2006. <http://dx.doi.org/10.1093/jn/136.7.1862>.

RADWAN, A.; KLEINWÄCHTER, M.; SELMAR, D. Impact of drought stress on specialised metabolism: biosynthesis and the expression of monoterpene synthases in sage (*Salvia officinalis*). **Phytochemistry**, v. 141, p. 20-26, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2017.05.005>

RETTBERG, N.; BIENDL, M.; GARBE, L. Hop aroma and hoppy beer flavor: chemical backgrounds and analytical tools—a review. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 76, n. 1, p. 1-20, 2018. <https://doi.org/10.1080/03610470.2017.1402574>

RODOLFI, M., CHIANCONE, B., LIBERATORE, C. M., FABBRI, A., CIRLINI, M., GANINO, T. Changes in chemical profile of Cascade hop cones according to the growing area. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 13, p. 6011-6019, 2019. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9876>

RODRIGUEZ-DOMINGUEZ, C. M.; BRODRIBB, T. J. Declining root water transport drives stomatal closure in olive under moderate water stress. **New Phytologist**, v. 225, n. 1, p. 126-134, 2020. <https://doi.org/10.1111/nph.16177>

ROESLER, R. et al. Atividade antioxidante de frutas do cerrado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 1, p. 53-60, 2007.

ROSSINI, F.; LORETI, P.; PROVENZANO, M. E.; SANTIS, D.; RUGGERI, R. 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. <https://doi.org/10.4081/ija.2016.746>

RUGGERI, R.; LORETI, P.; ROSSINI, F. Exploring the potential of hop as a dual purpose crop in the Mediterranean environment: Shoot and cone yield from nine commercial cultivars. **European Journal of Agronomy**, v. 93, p. 11-17, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.10.011>

RUFATO, L.; FAGHERAZZI, M. M. Aspectos técnicos da cultura do lúpulo. UDESC, 2022.

RUFINO, M. S. M. et al. **Metodologia Científica: Determinação da Atividade Antioxidante Total em Frutas pela Captura do Radical Livre DPPH**. Fortaleza: Embrapa, 2007a. Disponível em: http://www.cnpat.embrapa.br/cnpat/down/index.php?pub/Cot_127.pdf. Acesso em: 18 abr 2023.

RUFINO, M. S. M. et al. **Metodologia Científica: Determinação da Atividade Antioxidante Total em Frutas pela Captura do Radical Livre ABTS**. Fortaleza: Embrapa, 2007b. Disponível em: http://www.cnpat.embrapa.br/cnpat/down/index.php?pub/Cot_128.pdf. Acesso em: 18 abr 2023.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, B.; PEREIRA, O. R.; PEDRO, L.; SOUSA, M. J. Physical-chemical properties of the phenolic compounds of *Humulus lupulus* and aromatic plant terpenes: potential for use in a cosmetic formulation. In: **Medical Sciences Forum**. MDPI, 2020. p. 6.

SASSO, A. S. **Caracterização de cultivares de lúpulo (*Humulus lupulus* L.), nos dois primeiros ciclos produtivos, em Curitiba, SC**. 2021. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Curitiba, 2021

SHARP, D. C.; TOWNSEND, M. S.; QIAN, Y.; SHELLHAMMER, T. H. Effect of Harvest Maturity on the Chemical Composition of Cascade and Willamette Hops. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 72, n. 4, p. 231-238, 2014. <http://dx.doi.org/10.1094/asbcj-2014-1002-01>.

SILVA, P. H. A.; FARIA, F. C. Avaliação da intensidade de amargor e do seu princípio ativo em cervejas de diferentes características e marcas comerciais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 4, p. 902-906, 2008.

SCHÖNBERGER, C.; KOSTELECKY, T. 125th Anniversary Review: the role of hops in brewing. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 117, n. 3, p. 259-267, 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/j.2050-0416.2011.tb00471.x>.

SPÓSITO, M. B.; ISMAEL, R. V.; BARBOSA, C. M. A.; TAGLIAFERRO, A. L. **A cultura do lúpulo**. Piracicaba: ESALQ, 2019. 81 p.

STEENACKERS, B.; DE COOMAN, L.; DE VOS, D. Chemical transformations of characteristic hop secondary metabolites in relation to beer properties and the brewing process: A review. **Food Chemistry**, v.172, p.742-756, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.139>

STRACK, T.; STOLL, M. Soil water dynamics and drought stress response of *Vitis vinifera* L. in steep slope vineyard systems. **Agricultural Water Management**, v. 274, p. 107967, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107967>

SOARES, C.; CARVALHO, M. E.; AZEVEDO, R. A.; FIDALGO, F. Plants facing oxidative challenges—A little help from the antioxidant networks. **Environmental and Experimental Botany**, v. 161, p. 4-25, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.12.009>

STANGER, M. C.; STEFFENS, C. A.; SOETHE, C.; MOREIRA, M. A.; AMARANTE, C. V. T.; BOTH, V.; BRACKMANN, A. Phenolic compounds content and antioxidant activity of 'Galaxy' apples stored in dynamic controlled atmosphere and ultralow oxygen conditions. **Postharvest Biology and Technology**, v,144, p. 70-76, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.05.014>

SOTTO, A. D.; CHECCONI, P.; CELESTINO, I.; LOCATELLI, M.; CARISSIMI, S.; DE ANGELIS, M.; ROSSI, V.; LIMONGI, D.; TONIOLO, C.; MARTINOLI, L.; GIACOMO, S. D.; PALAMARA, A. T.; Nencioni, L. Antiviral and antioxidant activity of a hydroalcoholic extract from *Humulus lupulus* L. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, v. 2018, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5919237>

SURENDRAN, S.; QASSADI, F.; SURENDRAN, G.; LILEY, D.; HEINRICH, M. Myrcene—what are the potential health benefits of this flavouring and aroma agent?. **Frontiers in nutrition**, v. 8, p. 699666, 2021. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.699666>

SU, X.; YIN, Y. Aroma characterization of regional Cascade and Chinook hops (*Humulus lupulus* L.). **Food Chemistry**, v. 364, p. 130410, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130410>

SUKU, S.; KNIPFER, T.; FRICKE, W. Do root hydraulic properties change during the early vegetative stage of plant development in barley (*Hordeum vulgare*)?. **Annals of Botany**, v. 113, n. 3, p. 385-402, 2014. <https://doi.org/10.1093/aob/mct270>

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; KAISER, D. R. Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 64-70, 2015.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.03.005>.

TANIGUCHI, Y.; MATSUKURA, Y.; OZAKI, H.; NISHIMURA, K.; SHINDO, K. Identification and Quantification of the Oxidation Products Derived from α -Acids and β -Acids During Storage of Hops (*Humulus lupulus* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 12, p. 3121-3130, 2013. <http://dx.doi.org/10.1021/jf3047187>.

TAKOI, K. Flavor Hops” varieties and various flavor compounds contributing to their “varietal aromas”: A review. **Master Brewers Association of the Americas Tech. Q.**, v. 56, p. 113-123, 2019. <https://doi.org/10.1094/TQ-56-4-0930-01>

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

TEDONE, L.; STASKOVA, L.; YAN, D.; WHITTOCK, S.; SHELLIE, R.; KOUTOULIS, A. Hop (*Humulus lupulus* L.) Volatiles Variation During Storage. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 78, n. 2, p. 114-125, 2020. <http://dx.doi.org/10.1080/03610470.2019.1704674>.

THOMAS, G. G.; SCHWABE, W. W. Factors controlling flowering in the hop (*Humulus lupulus* L.). **Annals of Botany**, v. 33, n. 4, p. 781-793, 1969.

TOMASELLA, J.; ROSSATO, L. **BALANÇO HÍDRICO**. 2005. Tópicos em Meio Ambiente e Ciências Atmosféricas. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Javier-Tomasella/publication/41560239_Balanco_hidrico/links/00b49519caef96e7e1000000/Balanco-hidrico.pdf. Acesso em: 29 fev. 2024.

TURNER, S. F.; BENEDICT, C. A.; DARBY, H.; HOAGLAND, L. A.; SIMONSON, P.; SIRRINE, J. R.; MURPHY, K. M. Challenges and opportunities for organic hop production in the United States. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1645-1654, 2011. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.013>

TURNER, N. C. Imposing and maintaining soil water deficits in drought studies in pots. **Plant and Soil**, v. 439, p. 45-55, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3893-1>

VÁZQUEZ-ARAÚJO, L.; RODRÍGUEZ-SOLANA, R.; CORTÉS-DIÉGUEZ, S. M.; DOMÍNGUEZ, J. M. Use of hydrodistillation and headspace solid-phase microextraction to characterize the volatile composition of different hop cultivars. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 93, n. 10, p. 2568-2574, 2013.

VERPOORTE, R.; ALFERMANN, A. W. (Ed.). **Metabolic engineering of plant secondary metabolism**. Springer Science & Business Media, 2000.

WANG, F.; ZHU, H.; KONG, W.; PENG, R.; LIU, Q.; YAO, Q. The Antirrhinum AmDEL gene enhances flavonoids accumulation and salt and drought tolerance in transgenic

Arabidopsis. **Planta**, v. 244, p. 59-73, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2489-3>

WANG, C.; FU, B.; ZHANG, L.; XU, Z. Soil moisture–plant interactions: an ecohydrological review. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, p. 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2167-0>

WU, F.; GUO, S.; HUANG, W.; HAN, Y.; WANG, Z.; FENG, L.; WANG, G.; LI, X.; LEI, Y.; ZHI, X.; XIONG, S.; JIAO, Y.; XIN, M.; YANG, B.; LI, Y. Soil water movement may regulate soil water consumption and improve cotton yields under different cotton cropping systems. **Industrial Crops & Products**, p. 118278, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118278>

XIE, S.; WU, G.; REN, R.; XIE, R.; YIN, H.; CHEN, H.; YANG, B.; ZHANG, Z.; GE, M. Transcriptomic and metabolic analyses reveal differences in monoterpene profiles and the underlying molecular mechanisms in six grape varieties with different flavors. **LWT**, p. 114442, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114442>

XIONG, D.; NADAL, M. Linking water relations and hydraulics with photosynthesis. **The Plant Journal**, v. 101, n. 4, p. 800-815, 2020. <https://doi.org/10.1111/tpj.14595>

YAN, D.; WONG, Y. F.; TEDONE, L.; SHELLIE, R. A.; MARRIOTT, P. J.; WHITTOCK S. P.; KOUTOULIS, A. Chemotyping of new hop (*Humulus lupulus* L.) genotypes using comprehensive two-dimensional gas chromatography with quadrupole accurate mass time-of-flight mass spectrometry. **Journal of Chromatography A**, v. 1536, p. 110-121, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.08.020>

YANG, B.; TANG, J.; YU, Z.; KHARE, T.; SRIVASTAV, A.; DATIR, S.; KUMAR, V. Light stress responses and prospects for engineering light stress tolerance in crop plants. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 38, p. 1489-1506, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09951-8>

YAKIMA CHIEF. **Hop Varietal Guide**: high quality hops from the pacific northwest. High Quality Hops from the Pacific Northwest. 2013. Disponível em: <https://www.uvm.edu/sites/default/files/media/Hop-Varietal-Guide-2013.pdf>. Acesso em: 05 out. 2020.

YOO, C. Y.; PENCE, H. E.; HASEGAWA, P. M.; MICKELBART, M. V. Regulation of transpiration to improve crop water use. **Critical Reviews in Plant Science**, v. 28, n. 6, p. 410-431, 2009. <https://doi.org/10.1080/07352680903173175>

ZAHRA, N., HAFEEZ, M. B., GHAFAR, A., KAUSAR, A., AL ZEIDI, M., SIDDIQUE, K. H., FAROOQ, M. Plant photosynthesis under heat stress: Effects and management. **Environmental and Experimental Botany**, v. 206, p. 105178, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105178>

ZANGIABADI, M.; GORJI, M.; SHORAFI, M.; KHORASANI, S. K.; SAADAT, S. Effect of soil pore size distribution on plant-available water and least limiting water range as soil physical quality indicators. **Pedosphere**, v. 30, n. 2, p. 253-262, 2020.

[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60473-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60473-9)

ZANOLI, P.; ZAVATTI, M. Pharmacognostic and pharmacological profile of *Humulus lupulus* L. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 116, n. 3, p. 383-396, 2008.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jep.2008.01.011>.

ZHANG, J.; DE-OLIVEIRA-CECILIANO, P.; TAKAHASHI, Y.; SCHULZE, S.; DUBAUX, G.; HAUSER, F.; AZOULAY-SHEMER, T.; TÖLDSEPP, K.; KOLLIST, H.; RAPPEL, W. J.; SCHROEDER, J. I. Insights into the molecular mechanisms of CO₂-mediated regulation of stomatal movements. **Current Biology**, v. 28, n. 23, p. 1356-1363, 2018.

ZHANG, W.; DONG, X. M.; ZHANG, Y. W.; FAN, Z. X.; ZHANG, S. B. Age-related differences in physiological and metabolic responses of *Pleione aurita* (Orchidaceae) pseudobulbs to drought stress and recovery. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 197, p. 107655, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107655>

ZHANG, J.; XIANG, L.; ZHU, C.; LI, W.; JING, D.; ZHANG, L.; LIU, Y.; LI, T.; LI, J. Evaluating the irrigation schedules of greenhouse tomato by simulating soil water balance under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 283, p. 108323, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108323>

ZHEN, X.; ZHANG, Q.; SANZ-SAEZ, A.; CHEN, C. Y.; DANG, P. M.; BATCHELOR, W. D. Simulating drought tolerance of peanut varieties by maintaining photosynthesis under water deficit. **Field Crops Research**, v. 287, p. 108650, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108650>

ZHU, Y.; ZHAO, T.; MAO, W.; YE, M.; HAN, X.; JIA, B.; YANG, J. Development of flow model for partly and fully saturated soils using water balance and water table depth fluctuation analysis. **Journal of Hydrology**, v. 618, p. 129259, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129259>