



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

**DEFICIÊNCIA DE NUTRIENTES EM UMA CULTIVAR E
ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GENÉTICOS EM
POPULAÇÕES SEGREGANTES DE MANJERICÃO**

JOSÉ CARLOS FREITAS DE SÁ FILHO

2024



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

JOSÉ CARLOS FREITAS DE SÁ FILHO

**DEFICIÊNCIA DE NUTRIENTES EM UMA CULTIVAR E ESTIMATIVA DE
PARÂMETROS GENÉTICOS EM POPULAÇÕES SEGREGANTES DE
MANJERICÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Doutor em Ciências”.

Orientador
Prof. Dr. Arie Fitzgerald Blank

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2024

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

S111d Sá Filho, José Carlos Freitas de.
Deficiência de nutrientes em uma cultivar e estimativa de parâmetros genéticos em populações segregantes de manjerição / José Carlos Freitas de Sá Filho; orientadora Arie Fitzgerald Blank. – São Cristóvão, SE, 2024. 77 f.; il.

Tese (doutorado em Agricultura e Biodiversidade) – Universidade Federal de Sergipe, 2024.

1. Agrobiodiversidade. 2. Manjerição. 3. Plantas – Nutrição. 4. Genética vegetal. I. Blank, Arie Fitzgerald, orient. II. Título.

CDU635.71

JOSÉ CARLOS FREITAS DE SÁ FILHO

**DEFICIÊNCIA DE NUTRIENTES EM UMA CULTIVAR E ESTIMATIVA DE
PARÂMETROS GENÉTICOS EM POPULAÇÕES SEGREGANTES DE
MANJERICÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Doutor em Ciências”.

APROVADA em 29 de julho de 2024.

Prof. Dr. Airon José da Silva UFS/PPGAGRI

Dra. Daniela Aparecida de Castro Nizio UFS/PPGAGRI

Prof. Dr. José Luiz Sandes de Carvalho Filho UFRPE

Prof. Dr. José Magno Queiroz Luz UFU

Prof. Dr. Arie Fitzgerald Blank
(Orientador)

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL

*À minha família, em especial, aos meus pais
por todo apoio, carinho e amor.*
Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao bom Deus, em primeiro lugar, sempre, pela oportunidade da vida, pela força, saúde, coragem e sabedoria.

À Universidade Federal de Sergipe (UFS) e ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade (PPGAGRI) pela minha formação acadêmica ao longo desses anos.

Aos meus pais, José Carlos e Maria, a quem expresso sempre profunda admiração. Agradeço por sempre se alegrarem com meu sucesso, pela compaixão, pelo incentivo a não desistir dos meus sonhos e pela acolhida quando algo não vai bem.

Aos meus irmãos, Luciana e Wanderson, pela amizade e apoio de sempre.

Aos meus sobrinhos, Mariana e Fernando, que sempre são luzes que iluminam e alegram minha vida.

A Ana Paula, pelo amor e parceria tão fundamentais nos últimos tempos.

Aos amigos que são irmãos que eu escolhi: Gencivaldo, William, Luís, Vinícius, Gustavo, Ysabelle, Joice, Rosemeire, Gilmara, Tamiris e Joana.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arie Blank, meus sinceros agradecimentos por todo o ensinamento a mim transmitido, pela paciência, respeito e confiança que sempre me atribuiu. Foi uma imensa alegria e satisfação trabalhar com o senhor.

Aos meus coorientadores, Prof. Airon e Profa. Daniela (Dani), muito obrigado por me tratarem sempre muito bem, pelos conselhos e pela confiança.

Ao Grupo de Plantas Medicinais Aromáticas, Condimentares e Olerícolas (GPMACO), em especial aos amigos Luís, Ryan Ribeiro, Rosemeire, Emília, Lidiane, Valéria, Laura, Itamara, Fabiany, Ellen, Ryan Eduardo.

A todos os funcionários do Campus Rural da UFS, em especial a Lusivaldo pelo incentivo de sempre aos estudos e pela amizade, e também a Gilvan, Ezio, Júlio, Richard e Marise.

Ao Laboratório de Solos e Laboratório de Flavor e Análises Cromatográficas da UFS, principalmente aos meus amigos Idamar Lima e Rafael Donizete, tão importantes para a execução dessa tese.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de Doutorado.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização desse trabalho.

Obrigado!

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
4. ARTIGO 1: NUTRITIONAL DEFICIENCIES OF MACRO AND MICRONUTRIENTS IN PLANTS OF BASIL CULTIVAR ITALIAN LARGE LEAF	22
Abstract	22
4.1. Introduction	22
4.2. Material and Methods	23
4.3. Results	24
4.4. Discussion	32
4.5. Conclusion	35
4.6. Bibliographic References	36
5. ARTIGO 2: ANÁLISE GENÉTICA EM UMA POPULAÇÃO SEGREGANTE DO HÍBRIDO TRIPLO DE MANJERICÃO (ANISE X CINNAMON) X ITALIAN LARGE LEAF	40
Resumo	40
5.1. Introdução	41
5.2. Material e Métodos	42
5.3. Resultados e Discussão	45
5.4. Conclusões	54
5.5. Referências Bibliográficas	54
6. ARTIGO 3: PARÂMETROS GENÉTICOS EM UMA POPULAÇÃO SEGREGANTE DO HÍBRIDO TRIPLO DE MANJERICÃO (MRS. BURNS x CINNAMON) x ITALIAN LARGE LEAF: UMA COMBINAÇÃO DOS AROMAS LIMÃO, CANELA E PESTO	58
Resumo	58
6.1. Introdução	59
6.2. Material e Métodos	60
6.3. Resultados e Discussão	63
6.4. Conclusões	73
6.5. Referências Bibliográficas	74
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

Figura	Página
1 Comparison of growth parameters of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutriente solution with nitrogen omission.....	25
2 Comparison of growth parameters of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutriente solution with phosphorus omission.....	26
3 Comparison of growth parameters of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutriente solution with potassium omission.....	26
4 Comparison of growth parameters of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutriente solution with calcium omission	27
5 Comparison of growth parameters of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutriente solution with magnesium omission.....	27
6 Comparison of growth parameters of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutriente solution with sulfur omission.....	28
7 Comparison of growth parameters of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutriente solution with boron omission.....	28
8 Comparison of growth parameters of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutriente solution with copper omission	29
9 Comparison of growth parameters of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutriente solution with iron omission	29
10 Comparison of growth parameters of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutriente solution with Zinc omission.....	30

ARTIGO 2

Figura		Página
1	Via de biossíntese de E-metil cinamato, metilchavicol, eugenol e metileugenol em <i>Ocimum basilicum</i> . Adaptado de Kapteyn et al. (2007).	50
2	Dendrograma bidimensional representando a similaridade entre 60 genótipos segregantes de <i>Ocimum basilicum</i> e seus parentais, para características morfológicas, agronômicas e composição química dos óleos essenciais	52

ARTIGO 3

Figura		Página
1	Proposta biogenética para formação de linalol, geranial e neral (Niculau, 2011).	69
2	Dendrograma bidimensional representando a similaridade entre 42 genótipos segregantes de <i>Ocimum basilicum</i> e seus parentais, para características morfológicas, agronômicas e composição química dos óleos essenciais	72

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela	Página
1 Average pH values: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass in <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf.	24
2 Contents of essential elements in Italian Large Leaf basil under omission of essential nutrientes.	30
3 Color attributes of the regions of the lamina and leaf edge of <i>Ocimum basilicum</i> cultivar Italian Large Leaf in the metrics of the CIELAB system	32

ARTIGO 2

Tabela	Página
1 Dados meteorológicos registrados na área experimental no período de cultivo (setembro-dezembro de 2022)	43
2 Estimativas de deviance e variâncias para características morfoagronômicas e químicas de genótipos segregantes e seus parentais de (Anise x Cinnamom) x Italian Large Leaf, <i>Ocimum basilicum</i> (São Cristóvão, Sergipe, Brasil, 2022)	46
3 Herdabilidade no sentido amplo (h_a^2), coeficientes de variação genética (CV_g), fenotípica (CV_f), ganho genético (GG) e GGM (ganho genético como % da média) de uma população segregante de (Anise x Cinnamom) x Italian Large Leaf, <i>Ocimum basilicum</i>	47
4 Teores (%) dos principais constituintes químicos do óleo essencial de 71 genótipos de manjeriço, compostos por 3 cultivares, 2 híbridos e 66 indivíduos segregantes da autofecundação de um híbrido triplo, cultivados no município de São Cristóvão, Sergipe, Brasil.	49
5 Autovalor, explicação dos componentes principais e correlações entre variáveis e componentes principais	50
6 Valores médios $\pm$ erro padrão da média (EPM) das características fenotípicas da população F_2 de <i>O. basilicum</i>	53

ARTIGO 3

Tabela

Página

1	Dados meteorológicos registrados na área experimental no período de cultivo (setembro-dezembro de 2023)	61
2	Estimativas de deviance e variâncias para características morfoagronômicas e químicas de genótipos segregantes e seus parentais de (Mrs. Burns x Cinnamom) x Italian Large Leaf, <i>Ocimum basilicum</i> (São Cristóvão, Sergipe, Brasil, 2023).....	64
3	Herdabilidade no sentido amplo (h_a^2), coeficientes de variação genética (CV_g), fenotípica (CV_f), ganho genético (GG) e GGM (ganho genético como % da média) de uma população segregante de (Mrs. Burns x Cinnamom) x Italian, <i>Ocimum basilicum</i>	65
4	Valores médios e erro padrão da média (EPM) e variação de valores das características morfoagronômicas e químicas na população segregante de <i>Ocimum basilicum</i>	67
5	Teores (%) dos principais constituintes químicos do óleo essencial de 47 genótipos de manjeriço, compostos por 3 cultivares, 2 híbridos e 42 indivíduos segregantes da autofecundação do híbrido triplo, cultivados no município de São Cristóvão, Sergipe, Brasil	68
6	Autovalor, explicação dos componentes principais e correlações entre variáveis e componentes principais.	70
7	Valores médios $\pm$ erro padrão da média (EPM) das características fenotípicas da população F_2 de <i>O. basilicum</i>	73

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

UFS	Universidade Federal de Sergipe
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
UR	Umidade relativa do ar
°C	Graus Celsius
TNT	Tecido-Não-Tecido
ANOVA	Análise de Variância
ANADEV	Análise de deviance
ACP/PCA	Análise de componentes principais
BLUP	Melhor Predição Linear Não Enviezada
REML	Máxima verossimilhança restrita
NIST	National Institute of Standards & Technology
IR	Índice de retenção
CIELAB	Espaço de cores definido pela Comissão Internacional de Iluminação
L*	Luminosidade
C*	Cromaticidade
H*	Ângulo hue
F ₂	Segunda geração filial
h _a ²	Herdabilidade no sentido amplo
h _r	Herdabilidade de sentido restrito
CV _f	Coefficiente fenotípico de variabilidade
CV _g	Coefficiente de variação genética
GG	Ganho genético
B	Boro
Ca	Cálcio
Cl	Cloro
Cu	Cobre
Fe	Ferro
K	Potássio
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
P	Fósforo
S	Enxofre
Zn	Zinco
CCMT	Carboxil metiltransferase
CVOMT	Chavicol O-metiltransferase
EOMT	Eugenol O-metiltransferase
OMT	O-metiltransferases
pH	Potencial hidrogeniônico
CTC	Capacidade de troca de cátions
Cmolc	Centimol de carga
Da	Dalton
cm	Centímetros
dm	Decímetro
mg	Miligramas
mL	Mililitros
μL	Microlitro

RESUMO

SÁ FILHO, José Carlos Freitas de. **Deficiência de nutrientes em uma cultivar e estimativa de parâmetros genéticos em populações segregantes de manjerição**. São Cristóvão: UFS, 2024. 77p. (Tese – Doutorado em Agricultura e Biodiversidade). *

O manjerição (*Ocimum basilicum* L.) é uma planta medicinal, aromática e condimentar amplamente cultivada em todo o mundo. Ele apresenta uma grande variabilidade fenotípica, manifestada em diversas características, como porte, formato, coloração de folhas e flores e composição química do óleo essencial (OE), que apresenta atividade antioxidante. Essa variabilidade é resultado da interação entre fatores genéticos e ambientais como a forma de cultivo, adubação, luminosidade, entre outros. A interação entre genótipo e ambiente é complexa e determina a variabilidade fenotípica observada na população de manjerição. No Capítulo 1 avaliou-se a influência da deficiência de macronutrientes e micronutrientes no crescimento do manjerição cultivar Italian Large Leaf. A ausência de nutrientes afetou significativamente o crescimento das plantas, com destaque para as deficiências de nitrogênio e fósforo, que causaram reduções marcantes na massa seca de parte aérea (-N = -96% e -P = -99%), massa seca de raízes (-N = -94% e -P = -96%), altura de planta (-N = -72% e -P = -93%) e área foliar (-N = -78% e -P = -97%) das plantas. Sintomas visuais típicos de deficiências nutricionais foram observados como amarelecimento das folhas na deficiência de N, enrolamento das ponteiros na deficiência de Ca e queima das bordas da folha na deficiência de K. Conclui-se que o manjerição é sensível às deficiências nutricionais, destacando a importância de um equilíbrio adequado de nutrientes para o crescimento favorável. No Capítulo 2 estimaram-se os parâmetros genéticos em uma população segregante derivada do híbrido triplo de manjerição (Anise x Cinnamon) x Italian Large Leaf. A população F₂ apresentou variabilidade genética significativa, com altos coeficientes de variação genética (CV_g) e fenotípica (CV_f). Observou-se alta herdabilidade no sentido amplo (h_a^2) para massa seca ($h_a^2 = 82,0\%$), altura da planta ($h_a^2 = 80,0\%$), diâmetro da copa ($h_a^2 = 84,0\%$), ângulo hue da flor ($h_a^2 = 95,0\%$), luminosidade ($h_a^2 = 80,0\%$), croma ($h_a^2 = 90,0\%$), ângulo hue ($h_a^2 = 99,9\%$) do caule, toeres de 1,8-cineol ($h_a^2 = 88,0\%$), linalol ($h_a^2 = 96,0\%$), metil chavicol ($h_a^2 = 97,0\%$), eugenol ($h_a^2 = 71,0\%$), E-metil cinamato ($h_a^2 = 73,0\%$), β -elemeno ($h_a^2 = 98,0\%$), metil eugenol ($h_a^2 = 99,0\%$), E- α -bergamoteno ($h_a^2 = 88,0\%$) e δ -cadineno ($h_a^2 = 97,0\%$). A combinação de alta h_a^2 e alto ganho genético (GGM) sugere que as variáveis massa seca, altura da planta, diâmetro da copa, ângulo hue da flor, luminosidade, croma e ângulo hue do caule, 1,8-cineol, linalol, metil chavicol, eugenol, E-metil cinamato, β -elemeno, metil eugenol, E- α -bergamoteno, δ -cadineno e epi- α -cadinol são controladas por ação de genética aditiva, tornando a seleção fenotípica eficaz para o melhoramento genético nesta população. No Capítulo 3 estimaram-se os parâmetros genéticos em uma população segregante derivada do híbrido triplo de manjerição (Mrs. Burns x Cinnamon) x Italian Large Leaf. Houve significativa variabilidade genética, confirmada pelos altos (>20%) CV_g e CV_f. Observou-se alta h_a^2 para massa seca ($h_a^2 = 89,0\%$), altura ($h_a^2 = 73,0\%$), croma de folha ($h_a^2 = 83,0\%$), luminosidade ($h_a^2 = 91,0\%$), croma ($h_a^2 = 86,0\%$), ângulo hue ($h_a^2 = 99,0\%$) da flor e luminosidade ($h_a^2 = 95,0\%$), croma ($h_a^2 = 93,0\%$), ângulo hue ($h_a^2 = 99,9\%$) do caule, toeres de linalol ($h_a^2 = 95,0\%$), metil chavicol ($h_a^2 = 83,0\%$), neral ($h_a^2 = 90,0\%$), geranial ($h_a^2 = 87,0\%$), Z-metil cinamato ($h_a^2 = 96,0\%$), eugenol ($h_a^2 = 85,0\%$), E-metil cinamato ($h_a^2 = 94,0\%$), E- α -bergamoteno ($h_a^2 = 97,0\%$) e epi- α -cadinol ($h_a^2 = 99,0\%$). Em conjunto, os resultados ressaltam a importância da nutrição adequada e do estudo genético para o cultivo e melhoramento do manjerição, respectivamente.

Palavras-chave: *Ocimum basilicum*, nutrição mineral, parâmetros genéticos.

* Comitê Orientador: Arie Fitzgerald Blank – UFS (Orientador), Airon José da Silva – UFS (Coorientador).

ABSTRACT

SÁ FILHO, José Carlos Freitas de. **Nutrient Deficiency in a Cultivar and Genetic Parameter Estimation in Segregating Populations of Basil.** São Cristóvão: UFS, 2024. 77p. (Thesis - Doctor of Science in Agriculture and Biodiversity). *

Basil (*Ocimum basilicum* L.) is a medicinal, aromatic and condiment plant widely cultivated around the world. It exhibits considerable phenotypic variability, manifested in various traits such as plant size, leaf and flower coloration, essential oil (EO) composition, and antioxidant activity. This variability comes from the interaction between genetic and environmental factors such as cultivation methods, fertilization, and light conditions. The interaction between genotype and environment is complex and determines the phenotypic variability observed in basil populations. In Chapter 1, the influence of macronutrient and micronutrient deficiencies on the growth of an Italian Large Leaf basil cultivar was evaluated. Nutrient deficiencies significantly affected plant growth, with nitrogen and phosphorus deficiencies causing marked reductions in aerial dry mass (-N = -96% and -P = -99%), root dry mass (-N = -94% and -P = -96%), plant height (-N = -72% and -P = -93%), and leaf area (-N = -78% and -P = -97%). Visual symptoms typical of nutritional deficiencies were observed, such as leaf yellowing in nitrogen deficiency, tip curling in calcium deficiency, and leaf edge burning in potassium deficiency. It was concluded that basil is sensitive to nutritional deficiencies, highlighting the importance of adequate nutrient balance for favorable growth. In Chapter 2, genetic parameters were estimated in a segregating population derived from triple hybrid basil (Anise x Cinnamon) x Italian Large Leaf. The F₂ population showed significant genetic variability, with high (>20%) coefficients of genetic variation (CV_g) and phenotypic variation (CV_f). High broad-sense heritability (h_a^2) was observed for dry mass ($h_a^2 = 82.0\%$), plant height ($h_a^2 = 80.0\%$), canopy diameter ($h_a^2 = 84.0\%$), flower hue angle ($h_a^2 = 95.0\%$), luminosity ($h_a^2 = 80.0\%$), chroma ($h_a^2 = 90.0\%$), hue angle ($h_a^2 = 99.9\%$) of the stem, 1,8-cineole contents ($h_a^2 = 88.0\%$), linalool ($h_a^2 = 96.0\%$), methyl chavicol ($h_a^2 = 97.0\%$), eugenol ($h_a^2 = 71.0\%$), E-methyl cinnamate ($h_a^2 = 73.0\%$), β -elemene ($h_a^2 = 98.0\%$), methyl eugenol ($h_a^2 = 99.0\%$), E- α -bergamotene ($h_a^2 = 88.0\%$), and δ -cadinene ($h_a^2 = 97.0\%$). The combination of high h_a^2 and high genetic gain (GGM) suggests that traits such as dry mass, plant height, canopy diameter, flower hue angle, luminosity, chroma, and hue angle of the stem, 1,8-cineole, linalool, methyl chavicol, eugenol, E-methyl cinnamate, β -elemene, methyl eugenol, E- α -bergamotene, δ -cadinene, and epi- α -cadinol are controlled by additive genetic action, making phenotypic selection effective for genetic improvement in this population. In Chapter 3, genetic parameters were estimated in a segregating population derived from a triple hybrid of basil (Mrs. Burns x Cinnamon) x Italian Large Leaf. Significant genetic variability was observed, confirmed by high CV_g and CV_f. High h_a^2 was observed for dry mass ($h_a^2 = 89.0\%$), height ($h_a^2 = 73.0\%$), leaf chroma ($h_a^2 = 83.0\%$), luminosity ($h_a^2 = 91.0\%$), chroma ($h_a^2 = 86.0\%$), flower hue angle ($h_a^2 = 99.0\%$), stem luminosity ($h_a^2 = 95.0\%$), chroma ($h_a^2 = 93.0\%$), and hue angle ($h_a^2 = 99.9\%$), as well as for linalool ($h_a^2 = 95.0\%$), methyl chavicol ($h_a^2 = 83.0\%$), neral ($h_a^2 = 90.0\%$), geranial ($h_a^2 = 87.0\%$), Z-methyl cinnamate ($h_a^2 = 96.0\%$), eugenol ($h_a^2 = 85.0\%$), E-methyl cinnamate ($h_a^2 = 94.0\%$), E- α -bergamotene ($h_a^2 = 97.0\%$), and epi- α -cadinol ($h_a^2 = 99.0\%$). Together, the results underscore the importance of adequate nutrition and genetic study for the cultivation and improvement of basil.

Key-words: *Ocimum basilicum*, mineral nutrition, genetic parameters.

* Guidance Committee: Arie Fitzgerald Blank–UFS (Advisor), Airon José da Silva – UFS (Adjunct advisor).

1. INTRODUÇÃO GERAL

O manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) é uma planta aromática e medicinal de grande valor econômico e cultural, amplamente cultivada e apreciada em diversas partes do mundo devido ao seu aroma característico e propriedades terapêuticas (Chenni *et al.*, 2016; Abubashem *et al.*, 2023;). Além de ser uma fonte rica de óleos essenciais, compostos bioativos com propriedades antibacterianas, antifúngicas e antioxidantes (Couto *et al.*, 2019; Macari *et al.*, 2021; Kamelnia *et al.*, 2023). Os óleos essenciais são o principal produto do manjeriço, utilizados em diversas indústrias, como a de alimentos, cosméticos e farmacêutica.

A deficiência nutricional é um dos principais desafios enfrentados pelos produtores de manjeriço, podendo comprometer o crescimento, a produtividade e a qualidade das plantas. Estudos demonstram que a gestão adequada de nutrientes é essencial para garantir o desenvolvimento e a produção de manjeriço (Song *et al.*, 2024). Macronutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, bem como micronutrientes, são fundamentais para o crescimento saudável das plantas e para a maximização da produção de óleos essenciais (Fischer *et al.*, 2016; Mao *et al.*, 2018; Khan *et al.*, 2023).

A interação genótipos por ambientes é um fator preponderante no cultivo de manjeriço, influenciando diretamente a expressão de características agronômicas e a qualidade dos óleos essenciais produzidos (Alves *et al.*, 2019). Diferenças na composição de nutrientes no solo e variações ambientais podem afetar significativamente o desenvolvimento da planta. Fatores ambientais como temperatura, luminosidade e umidade do solo desempenham um papel importante na biossíntese e na composição química dos óleos essenciais, podendo alterar a quantidade e a qualidade dos compostos voláteis produzidos (Watts *et al.*, 2023). A variabilidade ambiental pode, portanto, criar desafios para a produção consistente de manjeriço com a qualidade desejada.

A influência genética desempenha um papel fundamental no desenvolvimento do manjeriço. Várias características do manjeriço, como o rendimento de folhas, a altura da planta, o teor e a composição dos óleos essenciais, são altamente influenciadas por fatores genéticos (Thorogood *et al.*, 2023). A seleção de genótipos com características desejáveis pode levar ao desenvolvimento de cultivares superiores. A herança dessas características é complexa e pode envolver múltiplos genes (Alves *et al.*, 2019), o que torna a compreensão dos parâmetros genéticos essencial para o sucesso dos programas de melhoramento.

Os parâmetros genéticos, como herdabilidade, variância genética e ambiental, e ganho genético, são fundamentais para o melhoramento de manjeriço. A herdabilidade indica a proporção da variação fenotípica que é devida à variação genética (Bernardo, 2020), sendo essencial para prever o sucesso da seleção. A variância genética e ambiental permite entender a contribuição relativa de fatores genéticos e ambientais para a variação observada nas características da planta (Ramalho; Pinto, 2008). O ganho genético estimado a partir da seleção proporciona uma medida do progresso esperado em resposta à seleção (Seck *et al.*, 2023).

Dessa forma, esse estudo tem como objetivo investigar a deficiência nutricional na cultivar Italian Large Leaf de *Ocimum basilicum* e estimar parâmetros genéticos em uma população segregante F₂ da autopolinização do híbrido triplo (Anis x Canela) x Italian Large Leaf.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Origem e Botânica do Manjericão

O manjericão (*Ocimum basilicum* L.) é uma erva originária das regiões tropicais da África Central e do Sudeste Asiático, atualmente cultivada e utilizada em todo o mundo (Abuhashem *et al.*, 2023). No Brasil, a planta é conhecida por várias denominações, como Manjericão, Manjericão-grande, Manjericão-de-Molho, Manjericão-comum, Basílico, Alfavaca cheirosa, Alfavaca e Basilicão (Favorito *et al.*, 2011; Antar, 2020). Internacionalmente, é chamado de "Sweetbasil" nos EUA, "Albahaca" na Espanha e "Basilic" na França (Shahrajabian *et al.*, 2020).

Esta planta é a espécie mais cultivada da família Lamiaceae no Brasil (Blank *et al.*, 2010; Alves *et al.*, 2021). A família Lamiaceae é composta por mais de 240 gêneros, conhecidos por suas características aromáticas, derivadas de estruturas glandulares que produzem óleos voláteis (Silva *et al.*, 2021). Essa família é valorizada pela composição de seus metabólitos secundários com propriedades medicinais (Cocan *et al.*, 2017; Mesquita *et al.*, 2018; Çelik *et al.*, 2020).

O gênero *Ocimum*, que compreende mais de 65 espécies, destaca-se dentro da Lamiaceae (Mulugeta; Pluhár; Radácsi, 2023). Apresenta ampla diversidade morfológica devido ao cultivo generalizado e à facilidade de polinização cruzada, resultando em inúmeras subespécies, variedades e formas (Chowdhury *et al.*, 2017). Entre as espécies mais conhecidas e renomadas por suas fortes propriedades aromáticas estão *Ocimum gratissimum*, *Ocimum sanctum* e *Ocimum americanum*, sendo *Ocimum basilicum* L. o mais importante devido ao seu óleo aromático (Singh *et al.*, 2020).

Botanicamente, *O. basilicum* é descrito como um arbusto que varia de 30 a 100 cm de altura, com caule ramificado e folhas opostas, simples, lanceoladas e muito aromáticas (Ribeiro *et al.*, 2022). As flores, dispostas em racemos nas extremidades das ramificações, apresentam cores que variam entre branco, rosa e lilás, enquanto os frutos são aquênios contendo sementes oblongas pequenas e preto-azuladas (Pinto, 2017).

Evidências arqueológicas sugerem que o manjericão sagrado (*Ocimum sanctum*) era utilizado na cultura egípcia antiga como condimento alimentar e para fins medicinais (Abuhashem *et al.*, 2023). O manjericão não é endêmico e pode ser encontrado em todas as regiões do Brasil (Nascimento *et al.*, 2022). A introdução do manjericão no Brasil é atribuída aos imigrantes italianos, que utilizavam a erva extensivamente na culinária (Alves *et al.*, 2021; Toscano, 2022). Atualmente, 38 cultivares da espécie *O. basilicum* L. estão registradas no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil (MAPA, 2024). No Brasil, especialmente em regiões como o Nordeste, o manjericão pode ser cultivado como planta perene, permitindo múltiplos cortes ao longo do ano devido às condições climáticas favoráveis (Alves *et al.*, 2021).

Diferentes fenótipos podem ser estabelecidos entre as cultivares com base no tamanho da folha, forma e cor, altura da planta, peso, ramificação e folhagem (Gong *et al.*, 2023). As cultivares comerciais contemporâneas de manjericão apresentam uma ampla diversidade em hábito de crescimento, cores de flores, folhas e caules (Spence, 2024). Variedades como "Genovese", "Italian large leaf", "Mammoth", "Napoletano" e "Sweet" dominam os mercados americanos de ervas culinárias frescas e secas (Lal *et al.*, 2018).

O conhecimento botânico é imprescindível para o melhoramento genético de *O. basilicum* L. A espécie possui mais de 60 variedades e uma alta taxa de hibridação, consequência da polinização cruzada, gerando uma diversidade de subespécies, variedades e formas (Blank *et al.*, 2004; Pinto, 2017).

2.2 Usos e importância econômica do manjericão

O manjericão desempenha um papel fundamental na indústria alimentícia como condimento. Suas folhas secas são amplamente utilizadas em pratos como pizzas e lasanhas,

enquanto as folhas frescas são valorizadas em saladas e na culinária devido ao seu aroma característico (Spence, 2024).

Reconhecido por suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas, o manjeriço é essencial na preservação de alimentos frescos e no desenvolvimento de produtos farmacêuticos e terapias naturais (Macari *et al.*, 2021). Sua composição inclui flavonoides, ácidos fenólicos e óleos essenciais, que conferem diversos benefícios medicinais, como efeitos antioxidantes (Couto *et al.*, 2019), anti-inflamatórios (Kamelnia *et al.*, 2023) e antimicrobianos (Macari *et al.*, 2021). Estudos indicam seu uso tradicional no tratamento de distúrbios digestivos, infecções respiratórias e problemas dermatológicos, além de seu potencial para o manejo de doenças crônicas como câncer, diabetes e doenças cardiovasculares (Mousavi *et al.*, 2018; Shahrajabian *et al.*, 2020).

No final do século XX, o mercado global de manjeriço fresco alcançou um valor estimado de 4 milhões de dólares, com destaque para França, Hungria, Estados Unidos da América e Iugoslávia como principais produtores (Paton; Putievsky, 1996; Romano *et al.*, 2022). O óleo essencial de manjeriço, especialmente de *O. basilicum*, emergiu como uma commodity significativa, com produção global atingindo aproximadamente 250.000 toneladas (Lawrence, 1992; Chenni *et al.*, 2016; Prajapati *et al.*, 2016).

Em 2017, na Itália, foram cultivados 27.132 hectares de manjeriço em estufas, resultando em uma produção de 8.908 toneladas, com destaque para a Ligúria, conhecida pela produção do manjeriço "Genovese", fundamental para o prestigiado "Pesto Genovese" (Romano *et al.*, 2022). Atualmente, o mercado global de folhas de manjeriço está em expansão, impulsionado pelo aumento da demanda na indústria alimentícia e farmacêutica (Transparency Market Research, 2024). A crescente demanda por óleos essenciais, valorizados por suas propriedades medicinais, é especialmente notável em aplicações culinárias e *fast food* como pizzas e lanches e bebidas (Romano *et al.*, 2022), com empresas investindo em tecnologias avançadas e expandindo suas capacidades de produção, lideradas por consumidores na América do Norte, Japão e Europa (Transparency Market Research, 2024).

Além de suas aplicações culinárias e medicinais, o manjeriço é utilizado no paisagismo devido à sua diversidade de formas e cores, contribuindo para a estética de jardins e áreas verdes (França *et al.*, 2017). Essa versatilidade destaca *O. basilicum* L. como uma planta com uma ampla gama de usos e propriedades bioativas que refletem sua importância global e seu potencial para crescimento em diversos mercados (Singh *et al.*, 2020).

2.3 Óleos essenciais de manjeriço

Os óleos essenciais são produtos naturais derivados de plantas e contêm compostos aromáticos voláteis. Essas misturas são constituídas principalmente por mono e sesquiterpenoides, benzenos e fenilpropanoides (Siddiqui *et al.*, 2024). Eles podem ser extraídos de flores, folhas, talos, frutos e raízes e são resultantes do metabolismo secundário de plantas aromáticas e estão presentes em estruturas como células parenquimáticas diferenciadas, canais oleíferos e tricomas glandulares (Guan *et al.*, 2022). O odor e o sabor desses óleos variam conforme os tipos e quantidades dos constituintes presentes (Siddiqui *et al.*, 2024).

A presença de óleos essenciais com constituintes distintos determina o aroma e sabor específicos do manjeriço e seu potencial industrial. Diversos estudos demonstram a importância do óleo essencial de manjeriço na medicina, comprovando efeitos como imunomodulador, hiperglicêmico, anti-inflamatório, antimutagênico, antimicrobiano, antifúngico, antioxidante, antiviral e antitérmico (Agatonovic-Kustrin *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2020).

Os manjeriços são classificados de formas diferentes dependendo dos parâmetros de referência. Em relação ao aroma, o manjeriço pode ser doce, limão, canela, cânfora, anis e cravo (Spence, 2024). Na classificação baseada na composição do óleo essencial, as espécies são denominadas tipo Europeu, Francês ou Doce, Egípcio, Reunião ou Comoro, Búlgaro, Java ou Cinamato de metila e Eugenol (Costa *et al.*, 2014). Essa classificação considera o

constituente químico predominante no óleo. Marotti *et al.* (1996) explicam que muitos quimiotipos de manjerição doce cultivados na Europa têm como principais constituintes do óleo essencial o linalol e o metilchavicol, que produzem aromas finos. O manjerição tipo reunião possui alta concentração de metilchavicol (Murarikova *et al.*, 2017). No manjerição tipo java, cultivado em regiões tropicais, predomina o cinamato de metila, enquanto os cultivados no norte da África, na Rússia, na Europa Oriental e em partes da Ásia geralmente são do quimiotipo eugenol, com alto teor de eugenol (Costa *et al.*, 2014).

No manjerição, como em outras espécies da família Lamiaceae, o óleo essencial é armazenado em tricomas glandulares. Os tricomas glandulares de *O. basilicum* apresentam duas morfologias: tricomas peltados e capitados (Hazzoumi *et al.*, 2020). Os tricomas glandulares capitados são ricos em compostos terpenoides, como 1,8-cineol, linalol, neral e geranial, enquanto os tricomas glandulares peltados são ricos em fenilpropenos, como eugenol, metileugenol, chavicol e metilchavicol (Türkay; Öztürk, 2023).

Os constituintes do óleo essencial das plantas desempenham diferentes funções ecológicas, importantes no crescimento das plantas, assim como na competição planta-planta, na coevolução cooperativa, na atração de polinizadores e na defesa contra insetos e herbívoros (Watts *et al.*, 2023).

Diversos fatores influenciam a produção do óleo essencial do manjerição, desde a cultivar utilizada até os métodos de cultivo e colheita (Blank *et al.*, 2010). A composição química dos óleos essenciais pode variar entre plantas da mesma espécie, formando quimiotipos, e entre espécies diferentes, dependendo de condições genéticas e ambientais. Práticas culturais, formas de cultivo e armazenamento dos órgãos vegetais, bem como a extração, armazenamento e manipulação do óleo essencial, podem causar grandes variações na composição dos óleos essenciais (Souiy, 2024).

2.4 Influência ambiental e genética na produção de manjerição

A produção de manjerição é fortemente influenciada por uma interação complexa entre fatores genéticos e ambientais (Alves *et al.*, 2019). A variação genética entre diferentes cultivares pode determinar a produção de biomassa, o perfil de óleos essenciais e a resistência a doenças (Watts *et al.*, 2023).

As condições climáticas, incluindo temperatura, luz e umidade, são primordiais para a produção de manjerição. A planta prospera em climas quentes e ensolarados, com temperaturas ideais entre 20°C e 30°C para crescimento e produção de óleo essencial. A intensidade e duração da luz solar influenciam diretamente a fotossíntese e a síntese de compostos voláteis (Oliveira *et al.*, 2020).

O tipo de solo e a disponibilidade de água são determinantes na produtividade do manjerição. Solos bem drenados, ricos em matéria orgânica e com pH neutro a ligeiramente ácido, são ideais para o cultivo (Kalamartzis *et al.*, 2020). A irrigação adequada é essencial, mas o excesso de água pode levar ao apodrecimento das raízes e ao desenvolvimento de doenças fúngicas (Blank *et al.*, 2010). Práticas agrícolas, como o espaçamento entre plantas, afetam a circulação de ar e a incidência de doenças. Técnicas de cultivo, como a rotação de culturas, podem melhorar as condições do solo e a resistência da planta a pragas (Yu *et al.*, 2022).

Além das condições ideais, o manjerição é sensível a fatores estressantes como temperaturas extremas, seca e salinidade. A exposição a temperaturas muito altas ou baixas pode inibir o crescimento e reduzir a produção de óleo essencial (Oliveira *et al.*, 2020). A seca pode induzir a produção de compostos de defesa, alterando a composição do óleo essencial, enquanto a salinidade pode causar estresse osmótico, afetando a absorção de nutrientes e a saúde geral da planta (Bistgani *et al.*, 2024).

Compreender a influência dos fatores ambientais no crescimento e produção de manjerição é fundamental para otimizar seu cultivo. Além dos fatores climáticos e de manejo, a disponibilidade de nutrientes é crucial para a saúde e produtividade da planta. A deficiência

de nutrientes pode levar a problemas como crescimento reduzido, menor produção de folhas e alterações na composição do óleo essencial (Khan *et al.*, 2023).

2.4.1 Deficiências nutricionais

Um manejo eficiente da fertilização é essencial para reduzir os riscos de produção e atingir objetivos de sustentabilidade no cultivo do manjeriço. A composição nutricional e os benefícios medicinais do manjeriço estão diretamente ligados aos nutrientes presentes no tecido, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) (Song *et al.*, 2024). Portanto, é evidente que um fornecimento adequado de nutrientes é fundamental para assegurar a produção de manjeriço de alta qualidade.

Distúrbios nutricionais, especialmente a deficiência em alguns nutrientes, podem prejudicar o desenvolvimento vegetativo e causar anormalidades nas plantas, resultando em atrasos na colheita. A capacidade fotossintética é particularmente vulnerável a deficiências específicas de macronutrientes. A omissão de N pode reduzir significativamente a área foliar e a intensidade da fotossíntese, levando à descoloração das folhas. A falta de P pode limitar a fotossíntese devido ao seu papel crítico nos processos fosforilados do ciclo de redução de carbono (Khan *et al.*, 2023). Deficiências de K têm sido associadas ao fechamento estomático, impactando negativamente a fotossíntese líquida (Mao *et al.*, 2018).

Além de N, P e K, outros macronutrientes e micronutrientes desempenham papéis essenciais na saúde da planta. O cálcio (Ca) é um nutriente essencial para as plantas, com diversas funções celulares cruciais. Ele garante a estabilidade e integridade das membranas celulares, participa ativamente na divisão e alongamento celular, além de desempenhar um papel chave na transdução de sinais, onde variações nas concentrações de Ca^{2+} ativam processos metabólicos vitais (Duan *et al.*, 2022). O Ca^{2+} também regula funções estruturais, auxilia no transporte de nutrientes e é fundamental na formação da parede celular e na atividade enzimática (Wang *et al.*, 2020). O magnésio (Mg) é crucial para a fotossíntese e a assimilação de fotoassimilados, sendo um componente central da molécula de clorofila (Tränkner *et al.*, 2018). O enxofre (S) é necessário para a formação da clorofila, vital para a fotossíntese (Singh e Reddy, 2014). Micronutrientes como o ferro (Fe), manganês (Mn) e cobre (Cu) são cofatores vitais em várias reações bioquímicas e processos redox dentro da planta (Puig, 2014; Fischer *et al.*, 2016).

A deficiência desses nutrientes pode afetar de maneira variável a capacidade fotossintética e outras funções fisiológicas das plantas. Essa carência é frequentemente detectada por meio de sintomas visuais específicos, que variam de acordo com o órgão e a espécie, refletindo respostas fisiológicas e estruturais distintas. O estudo desses sintomas, especialmente em condições controladas, é crucial para aprimorar a compreensão do papel desses nutrientes e implementar medidas corretivas mais eficazes, como a fertilização, que é desafiada pela complexidade das propriedades únicas de cada elemento (Wang *et al.*, 2020).

Os sintomas visuais específicos de deficiência de macronutrientes e micronutrientes no manjeriço ainda não foram amplamente documentados (Paparozzi *et al.*, 2021). Portanto, é altamente recomendável a observação de sintomas visuais, como clorose, necrose e deformações foliares, além do monitoramento do crescimento da planta e da avaliação da fotossíntese. A análise do estado nutricional do tecido vegetal, por meio de testes laboratoriais, é fundamental para diagnosticar distúrbios nutricionais e otimizar estratégias de fertilização em cultivos de manjeriço (Song *et al.*, 2024). Técnicas de manejo, como a aplicação balanceada de fertilizantes e a correção do pH do solo, são essenciais para garantir o desenvolvimento saudável das plantas e maximizar a produtividade (Krasilnikov *et al.*, 2022).

A deficiência nutricional em plantas ocorre quando um ou mais nutrientes essenciais estão ausentes ou presentes em quantidades inadequadas, afetando o crescimento e desenvolvimento da planta. Os nutrientes são definidos como aqueles necessários para que as plantas completem seu ciclo de vida e realizem funções vitais, como a fotossíntese e a respiração, cuja ausência provoca anomalias graves no crescimento, desenvolvimento ou

reprodução da planta (Buchanan *et al.*, 2015; Taiz *et al.*, 2017; Datnoff *et al.*, 2023). Os nutrientes são classificados em macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre) e micronutrientes (ferro, zinco, cobre, manganês, molibdênio, boro, cloro e níquel), de acordo com suas concentrações relativas nos tecidos das plantas (Malavolta, 2006; Taiz *et al.*, 2017; Datnoff *et al.*, 2023).

Os macronutrientes são requeridos em grandes quantidades e desempenham funções estruturais e metabólicas. O nitrogênio, por exemplo, é um constituinte de muitos componentes celulares vegetais, incluindo aminoácidos, ácidos nucleicos e proteínas, enquanto o fósforo é crucial para a transferência de energia nas células. O potássio está envolvido na regulação do potencial osmótico das células vegetais (Taiz *et al.*, 2017). Os micronutrientes, embora necessários em menores quantidades, são igualmente importantes, participando de reações enzimáticas e processos fisiológicos (Taiz *et al.*, 2017).

A ausência dos elementos essenciais resulta em sintomas de deficiência distintos, de acordo com o nutriente envolvido, conforme Taiz *et al.* (2017):

Nitrogênio (N): Clorose nas folhas mais velhas e inibição do crescimento vegetal.

Fósforo (P): Crescimento atrofiado da planta inteira e coloração verde-escura ou purpúrea das folhas.

Potássio (K): Clorose que começa nas bordas das folhas (clorose marginal) e pode se espalhar em manchas entre as nervuras. Os sintomas aparecem mais comumente nas folhas mais velhas, iniciando nas margens e ápices.

Cálcio (Ca): Necrose em regiões meristemáticas jovens e distorção do crescimento.

Magnésio (Mg): Clorose entre as nervuras foliares nas folhas mais velhas.

Enxofre (S): Clorose generalizada nas folhas jovens.

Ferro (Fe): Clorose entre as nervuras foliares nas folhas mais novas.

Zinco (Zn): Redução do crescimento dos entrenós e folhas pequenas e retorcidas, com margens de aparência enrugada.

Cobre (Cu): Folhas verde-escuras nos ápices de folhas jovens, que se estendem em direção à base, e folhas retorcidas ou malformadas.

Manganês (Mn): Clorose entre as nervuras, associada ao desenvolvimento de pequenas manchas necróticas.

Molibdênio (Mo): Clorose generalizada entre as nervuras e necrose de folhas mais velhas.

Boro (B): Necrose na base das folhas jovens e gemas terminais.

Cloro (Cl): Murcha nos ápices foliares, seguida por clorose e necrose generalizada.

Níquel (Ni): Necrose nos ápices foliares.

Estudos específicos sobre *O. basilicum* mostram que a deficiência de nutrientes pode levar a reduções significativas na produção de biomassa (Borges *et al.*, 2016; Paparozzi *et al.*, 2021; Attia *et al.*, 2022; Barreto *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2024).

A produção de óleos essenciais (OEs) pelas plantas é frequentemente uma resposta ao estresse ambiental, incluindo deficiências nutricionais. No entanto, a qualidade desses OEs pode diminuir dependendo do nutriente faltante na síntese dos compostos. O aumento do teor de OE em condições de desnutrição pode ser devido ao efeito de diluição, com menor produção de biomassa (Kothari *et al.*, 1987; Subrahmanyam *et al.*, 1992; Praszna; Bernáth, 1993).

A família Lamiaceae, que inclui o manjeriço, é amplamente estudada em relação às deficiências nutricionais. Plantas desta família, como *Mentha arvensis* e *Melissa officinalis*, também demonstram sintomas visuais de deficiência similares e têm sua produção de biomassa e compostos essenciais comprometida. Dentro do gênero *Ocimum*, espécies como *O. sanctum*, *O. gratissimum* e *O. basilicum* apresentam respostas específicas a deficiências nutricionais, afetando tanto a produção de biomassa quanto a composição de óleos essenciais (Sifola; Barbieri, 2006; Kanwal *et al.*, 2016; Chandel *et al.*, 2024).

O metabolismo primário das plantas gera macromoléculas, enquanto o metabolismo secundário depende dessas macromoléculas para produzir OE e dentro desse processo, os

aminoácidos são essenciais, gerando proteínas e enzimas para a síntese de OE. As principais classes de metabólitos do OE são terpenos e compostos fenólicos (Herms; Mattson, 1992).

Nitrogênio é vital para a produção de aminoácidos e proteínas, e sua deficiência afeta o desenvolvimento das plantas (Kováčik; Bačkor, 2007). A deficiência de fósforo reduz a fosforilação necessária para a produção de metabólitos do OE. Por exemplo, baixos níveis de fósforo reduzem o teor de monoterpenos em *Olearia phlogopappa* (Dragar; Menary, 1995).

O potássio é crucial para funções fisiológicas como fotossíntese e fluxo de nutrientes. Sua deficiência afeta negativamente processos metabólicos e o crescimento das plantas, embora não faça parte da estrutura celular (Marschner, 1995; Amtmann *et al.*, 2008; Wang; Wu, 2013; Hafsi *et al.*, 2014).

Na tabela 1 é possível observar os efeitos dos níveis de fornecimento de macronutrientes e micronutrientes na produção de óleos essenciais (OEs) em diversas espécies aromáticas.

Tabela 1. Literatura reunida sobre efeitos dos níveis de fornecimento de macronutrientes e micronutrientes na produção de óleos essenciais (OEs) vegetais.

Nutriente essencial	Tipo de intervenção	Espécie vegetal	Efeito sobre o OE	Constituinte do OE	Referências
N	Determinação (56 a 60 Kg.ha ⁻¹)	<i>Ocimum basilicum</i>	Aumento no rendimento	Aumento no rendimento de Linalol, eugenol, acetato de bornila e eucaliptol	Zheljazkov <i>et al.</i> , 2008.
	Determinação (75 Kg.ha ⁻¹)	<i>Ocimum basilicum</i>	Aumento no rendimento		Singh <i>et al.</i> , 2004.
	Determinação (300 Kg.ha ⁻¹)	<i>Ocimum basilicum</i>	Aumento no rendimento		Sifola e Barbieri, 2006.
P	Diminuição no nível do nutriente	<i>Olearia phlogopappa</i>	Redução % de constituintes	Redução no teor de monoterpenos	Dragar e Menary, 1995.
	Omissão do nutriente	<i>Mentha arvensis</i>		Aumento no % de mentol	Carvalho <i>et al.</i> , 2016.
K	Omissão do nutriente	<i>Mentha arvensis</i>		Redução de Isso-mentona e aumento de mentona	Carvalho <i>et al.</i> , 2016.
	Aumento no nível do nutriente	<i>Ocimum basilicum</i>		Aumento nos teores de fenilpropanos.	Garlet, 2007.
	Aumento no nível do nutriente	<i>Mentha arvensis</i>	Aumento no % de OE	Redução de linalol e acetato de linalila	Garlet, 2007.
Mg	Omissão do nutriente	<i>Melissa officinalis</i>	Aumento no % de OE	Aumento nos teores de neral, geranial.	Silva <i>et al.</i> , 2021.
	Omissão do nutriente	<i>Mentha arvensis</i>		Aumento no % de mentol e d-limoneno	Carvalho <i>et al.</i> , 2016.
Ca	Omissão do nutriente	<i>Melissa officinalis</i>	Menor n° de constituintes	Redução de neral e geranial em 28 %. Redução de óxido de cariofileno.	Silva <i>et al.</i> , 2021.
	Omissão do nutriente	<i>Mentha arvensis</i>		Aumento no % de mentol	Carvalho <i>et al.</i> , 2016.
	Aumento no nível do nutriente	<i>Ocimum basilicum</i>		Aumento % de sesquiterpeno, diminuição % de monoterpenos	Suh e Park, 2000.
S	Determinação (80 Kg.ha ⁻¹)	<i>Ocimum basilicum</i>	Aumento no rendimento	Aumento no rendimento de eucaliptol	Zheljazkov <i>et al.</i> , 2008.
	Omissão do nutriente	<i>Melissa officinalis</i>	Menor n° de constituintes	Redução de citral em 52 %. Redução de citronelal.	Silva <i>et al.</i> , 2021.
B	Omissão do nutriente	<i>Achillea millefolium</i>	Aumento de 14% de OE	Diminuição dos % de Mirceno, γ -terpineno e β -Cariofileno.	Alvarenga <i>et al.</i> , 2015.
	Omissão do nutriente	<i>Mentha arvensis</i>		Aumento no % de mentol	Carvalho <i>et al.</i> , 2016.
Fe	Omissão do nutriente	<i>Achillea millefolium</i>	Diminuição % de OE	Diminuição dos % de mirceno e γ -terpineno	Alvarenga <i>et al.</i> , 2015.
	Omissão do nutriente	<i>Mentha arvensis</i>		Aumento de mentona e d-limoneno	Carvalho <i>et al.</i> , 2016.
Cu	Omissão do nutriente	<i>Mentha arvensis</i>		Aumento de d-limoneno, redução de Iso-mentona e aumento de mentona	Carvalho <i>et al.</i> , 2016.
Zn	Omissão do nutriente	<i>Mentha arvensis</i>		Redução de Iso-mentona e aumento de mentona e d-limoneno	Carvalho <i>et al.</i> , 2016.

2.5 Variabilidade genética

A variabilidade genética refere-se às diferenças genéticas existentes dentro e entre populações de uma espécie. Esse conhecimento é fundamental para os programas de melhoramento de plantas, pois permite identificar o controle genético de características específicas e estabelecer estratégias eficazes de seleção (Salgotra; Chauhan, 2023). Essa variabilidade é essencial para aumento da resiliência, pois espécies com maior diversidade

genética têm uma maior capacidade de se adaptar a mudanças ambientais e resistir a pragas e doenças (Thorogood *et al.*, 2023). Além disso, identificar variabilidade genética ajuda a selecionar plantas com características desejáveis, como maior produtividade, resistência a doenças e melhor qualidade nutricional (Salgotra; Chauhan, 2023). A manutenção da biodiversidade também é beneficiada, pois a identificação de diversidade nos genótipos pode aprimorar a conservação de recursos genéticos e contribuir para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Thorogood *et al.*, 2023).

A avaliação da variabilidade genética é feita com auxílio de ferramentas e técnicas estatísticas, entre elas pode-se utilizar a análise de variância (ANOVA): utilizada para separar a variação fenotípica em componentes genéticos e ambientais, ajudando a entender a herança de caracteres específicos; modelos mistos: que permitem a estimativa de efeitos genéticos fixos e aleatórios, fornecendo uma visão detalhada sobre a variabilidade genética; técnicas multivariadas: que incluem abordagens como a análise de componentes principais (PCA) e a Análise de Agrupamento (Cluster), que permitem a avaliação simultânea de múltiplos caracteres e a visualização de padrões de variação genética (Cruz *et al.*, 2004; Arriel *et al.*, 2006; Bernardo, 2020).

2.6 Estimativa de parâmetros genéticos

Os parâmetros genéticos são medidas quantitativas que descrevem a variabilidade genética e são essenciais para entender como essa variabilidade pode ser utilizada em programas de melhoramento (Ramalho; Pinto, 2008). Eles incluem:

- Herdabilidade (h_a^2): mede a proporção da variação fenotípica atribuída à variação genética;
- Variância genética: que quantifica a variabilidade genética presente em uma população;
- Variância ambiental: que quantifica a variabilidade atribuída a fatores ambientais não genéticos;
- Variância fenotípica: que quantifica a variação total observada em um conjunto de organismos, resultante da interação entre variações genéticas e ambientais;
- Ganho genético: que estima o progresso esperado na característica alvo através da seleção;
- Diferencial de seleção: que indica a magnitude do avanço genético acima da média esperada;
- Correlação genética: que avalia a associação entre diferentes características com base na sua base genética comum;
- Coeficientes de variação genética (CV_g): que avalia a extensão da variabilidade genética relativa ao valor médio de uma característica;
- Coeficientes de variação fenotípica (CV_f): que mede a variabilidade fenotípica em relação à média da população.

Esses parâmetros são fundamentais para compreender a dinâmica genética e para implementar estratégias eficazes de melhoramento genético (Ramalho; Pinto, 2008). Conhecendo a herdabilidade, por exemplo, os melhoristas podem prever o potencial de ganho genético por seleção. A estimativa dos parâmetros genéticos permite conhecer a estrutura genética das populações, o que é essencial para selecionar genótipos superiores e escolher o método de melhoramento mais adequado para cada situação (Silva *et al.*, 2020).

Estudos genéticos podem ser realizados em populações segregantes em gerações iniciais até as gerações mais avançadas (Hamawaki *et al.*, 2012). Em um programa de melhoramento que visa o lançamento de cultivares convencionais, há um processo longo para a geração de novas cultivares, uma vez que é necessário o avanço de várias gerações e isso se torna um trabalho oneroso e exige muita mão de obra. Diante disso, estimar os parâmetros genéticos permite que os melhoristas tenham uma eficiente estratégia para a escolha dos melhores métodos de melhoramento e seleção dos genótipos promissores ao longo das gerações com base no conhecimento da herança dos caracteres de interesse (Zorzetto *et al.*, 2008).

Diversas estratégias de seleção de populações segregantes têm sido utilizadas em programas de melhoramento com o objetivo de se obter linhagens com características superiores às cultivares disponíveis no mercado, com isso a estimativa de parâmetros genéticos

é de extrema importância para fornecer orientações aos melhoristas, a fim de se selecionar os melhores genótipos (Ramalho; Pinto, 2008).

2.6.1 Herdabilidade

A herdabilidade é um dos parâmetros genéticos mais relevantes para os melhoristas, pois indica a proporção da variância fenotípica total atribuída a causas genéticas (Ramalho; Pinto, 2008). Em outras palavras, mede o quanto o valor fenotípico reflete de forma confiável o valor genotípico, influenciando diretamente diversas decisões práticas em métodos de melhoramento (Bernardo, 2020). Jacquard delineou três princípios para definir a herdabilidade: como medida de semelhança entre pais e filhos, como porção genética em sentido amplo e como porção genética em sentido restrito (Jacquard, 1983). No entanto, a herdabilidade não é uma característica fixa, ela varia conforme a população e o traço estudado (Clóvis *et al.*, 2021).

Existem dois tipos principais de herdabilidade: a de sentido amplo (h_a) e a de sentido restrito (h_r). A primeira é definida como a razão entre a variância genotípica e a variância fenotípica, enquanto a segunda é a razão entre a variância genética aditiva e a variância fenotípica (Allard, 1971; Falconer; Mackay, 1996; Ramalho; Pinto, 2008). A diferença crucial entre eles está no tipo de variação considerada no numerador dessas frações.

O coeficiente de herdabilidade (h^2) varia de 0 a 1. Quando $h^2 = 1$, significa que o fenótipo é totalmente determinado pelo genótipo, sem influência ambiental. Se $h^2 = 0$, a variabilidade do traço não tem origem genética (Allard, 1971). A estimativa da herdabilidade pode variar consideravelmente dependendo da característica estudada, do método de estimativa, da variabilidade da população, do nível de endogamia, do tamanho da amostra, dos ambientes considerados, dos tipos de parcela experimental e da precisão dos dados coletados (Borém *et al.*, 2021; Bernardo, 2020).

Características com alta herdabilidade são mais facilmente selecionadas com sucesso, pois há maior correspondência entre o fenótipo observado e o genótipo desejado. Por outro lado, para características com baixa herdabilidade, os melhoristas frequentemente recorrem à seleção indireta através de características correlacionadas para obter ganhos significativos (Orton, 2020).

2.6.2 Ganho genético

A estimativa do ganho genético através da seleção é um parâmetro crucial para os melhoristas, pois indica como a população irá melhorar em relação ao seu desempenho inicial antes da seleção ser aplicada (Seck *et al.*, 2023). Além da herdabilidade, o ganho estimado é fundamental para as análises genéticas. Um aspecto essencial nos programas de melhoramento genético é a seleção dentro de uma população-base, composta por indivíduos geneticamente diversos, e o uso dos materiais selecionados para formar novas populações, com comparações necessárias entre a nova e a população-base (Perek *et al.*, 2022). Para isso, é essencial determinar o progresso alcançado com a seleção, que depende da variabilidade genética da população-base e da magnitude dos efeitos que podem mascará-la, como componentes ambientais e interações (Seck *et al.*, 2023).

Quando os dados da população-base não estão disponíveis, o ganho esperado é estimado com base na seleção, isto é, naquilo que provavelmente ocorrerá na próxima geração, utilizando os componentes de variância disponíveis. Segundo Vencovsky e Barriga (1992), os fatores mais relevantes que influenciam diretamente ou indiretamente o ganho com a seleção são: a intensidade da seleção, as propriedades genéticas da população e as condições ambientais. O ganho está diretamente relacionado com o diferencial de seleção, que depende da diferença entre a média do grupo selecionado e a média da população original. Assim, caracteres quantitativos como rendimento de grãos, que apresentam distribuição normal, obtêm um diferencial de seleção maior quando menos unidades superiores são selecionadas (progênies ou indivíduos). Portanto, maior pressão seletiva implica em maior diferencial, porém também

aumenta o risco de redução drástica da variabilidade genética, o que pode comprometer ganhos futuros em ciclos sucessivos.

A heterogeneidade de uma população está diretamente ligada às chances de ganho com a seleção, pois a seleção se baseia em diferenças genéticas (Alemu *et al.*, 2024). A capacidade de prever os resultados de uma estratégia de seleção é uma das principais contribuições da genética quantitativa para o melhoramento genético. Essas informações permitem orientar de maneira mais eficaz os programas de melhoramento, antecipando o sucesso das estratégias de seleção adotadas e determinando cientificamente quais técnicas podem ser mais eficazes (Cruz *et al.*, 2004).

2.6.3 Correlação entre características

A correlação entre características é fundamental no contexto do melhoramento de plantas, pois fornece informações sobre o quanto uma variável está associada linearmente a outra, podendo ser positiva ou negativa. Isso é fundamental para os melhoristas, pois permite entender como a seleção de uma característica pode afetar outra correlacionada, especialmente quando a seleção direta é difícil devido à baixa herdabilidade ou desafios na mensuração (Cruz *et al.*, 2004).

Existem três tipos principais de correlação: fenotípica, genética e ambiental. A correlação fenotípica é estimada diretamente a partir dos dados observados e reflete tanto influências genéticas quanto ambientais. A correlação genética, por sua vez, é causada principalmente pelo pleiotropismo e pelo desequilíbrio de ligação, sendo mais persistente em populações originárias de cruzamentos divergentes (Falconer, 1987). Já a correlação ambiental decorre de variações compartilhadas no ambiente, podendo ser positiva, quando ambas as características se beneficiam das mesmas condições, ou negativa, indicando uma troca onde uma característica é favorecida em detrimento da outra (Cruz *et al.*, 2004).

Os coeficientes de correlação variam de -1 a +1 e são adimensionais. Valores próximos a zero indicam pouca ou nenhuma relação linear entre as variáveis, enquanto valores mais próximos de -1 ou +1 indicam uma associação linear forte. Além disso, características com maior herdabilidade geralmente apresentam correlações mais estáveis, o que facilita a seleção de progênie superiores (Falconer, 1987).

Apesar de essenciais, as correlações podem levar a estratégias de seleção inadequadas se mal interpretadas, pois não indicam causalidade direta entre as características. A análise de trilha, uma técnica estatística que desagrega os efeitos diretos e indiretos das variáveis independentes sobre uma variável dependente, é fundamental para entender melhor essas relações (Arevalo *et al.*, 2020). No entanto, problemas como multicolinearidade podem distorcer as estimativas, exigindo métodos como a eliminação de variáveis ou a análise de cristas para mitigar esses efeitos (Cruz *et al.*, 2004).

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística multivariada que transforma um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesmas dimensões chamadas de componentes principais. A ideia é reduzir a massa de dados, com menor perda possível da informação, buscando redistribuir a variação observada nos eixos originais para se obter um conjunto de eixos ortogonais não correlacionados (Hongyu *et al.*, 2016). Dessa forma, a análise auxilia na identificação da retenção das variáveis em genótipos, servindo como forma de seleção de características de interesse (Arevalo *et al.*, 2020).

2.6.4 Estimativas de parâmetros genéticos com melhor predição linear não enviesada - REML/BLUP

No melhoramento de plantas, técnicas avançadas de avaliação genética, como a predição dos valores genéticos aditivos e genotípicos usando REML/BLUP, são essenciais para obter uma seleção mais precisa. Essas técnicas permitem a predição eficaz dos valores genéticos e a estimação dos componentes de variância (Resende, 2000). A predição com BLUP (Melhor Predição Linear Não Viciada) pressupõe que os componentes de variância são conhecidos.

Contudo, na prática, esses valores precisam ser estimados, o que é feito utilizando o método da Máxima Verossimilhança Restrita (REML), desenvolvido por Patterson e Thompson (1971).

O método REML, quando associado à metodologia de modelos mistos (BLUP), oferece uma ferramenta flexível para a estimação de parâmetros genéticos em manjeriço. Esse método é particularmente vantajoso, pois pode lidar com dados desbalanceados e integrar informações de diferentes gerações, locais e condições experimentais variadas (Assunção, 2014). Além disso, REML/BLUP permite a estimação da acurácia seletiva e do intervalo de confiança do valor genético predito para cada planta, facilitando a escolha do modelo que melhor se adequa aos dados com menor número de parâmetros (Assunção, 2014).

Em programas de melhoramento de manjeriço, o uso de REML/BLUP tem se mostrado eficaz. Estudos indicam que, ao aplicar essa metodologia, é possível obter ganhos significativos na seleção de genótipos superiores, refletindo a precisão e a eficácia da seleção em diferentes contextos experimentais. Pesquisas com a metodologia REML/BLUP para estimativas de parâmetros genéticos em plantas medicinais demonstraram eficiência no uso do método (Sá *et al.*, 2021). Por exemplo, em pesquisas com cártamo, a metodologia REML/BLUP demonstrou resultados satisfatórios na seleção de características importantes, como rendimento e qualidade do óleo essencial (Oliveira Neto *et al.*, 2021).

Embora REML/BLUP seja frequentemente associado a plantas perenes e culturas de ciclo longo, como frutíferas e florestais (Resende, 2000; Garcia; Nogueira, 2005), seu uso tem sido adaptado com sucesso para plantas de ciclo mais curto, como o manjeriço. Isso demonstra a versatilidade e a utilidade da metodologia também em culturas de interesse econômico e comercial.

2.7 Melhoramento genético de manjeriço

No contexto das plantas medicinais, o melhoramento genético tem como objetivo aumentar a massa fresca ou seca e o teor de princípios ativos nos órgãos vegetais, assegurando a perpetuação dessas características nas gerações seguintes. Além disso, busca-se elevar o valor econômico das espécies, aumentando a produtividade e melhorando características qualitativas (Blank *et al.*, 2007; Mariot; Barbier, 2007).

No manjeriço, o melhoramento genético tem sido essencial para criar cultivares que atendam às demandas culinárias, ornamentais e medicinais. Variedades como 'Italian Large Leaf' e 'Genovese' são apreciadas por suas características culinárias, enquanto 'Purple Ruffles' se destaca pela estética ornamental (Vieira; Simon, 2006). Avanços na biotecnologia têm ajudado a superar desafios relacionados à uniformidade e resistência a doenças (Toscano, 2022).

Apesar desses avanços, muitas novas cultivares de manjeriço ainda apresentam desafios relacionados à uniformidade e podem requerer novas seleções para melhorar características como precocidade, resistência a insetos e doenças (Toscano, 2022).

Um exemplo de inovação é o uso da tecnologia CRISPR para aumentar a resistência ao míldio, uma doença que afeta severamente a produção global. A edição do gene homoserina quinase (HSK) resultou em cultivares mais resistentes ao patógeno *Peronospora belbahrii* (Zhang *et al.*, 2021), representando um avanço significativo para mitigar as perdas causadas por essa doença.

Além disso, o desenvolvimento de cultivares adaptadas a condições ambientais específicas e resistentes a pragas, como cepas de *Fusarium*, continua a ser uma prioridade (Blank *et al.*, 2004; Gonda *et al.*, 2022). A variabilidade genética e a resposta das plantas a diferentes condições ambientais são fundamentais para aprimorar técnicas de cultivo e otimizar o desempenho agrônomo (Pravuschi *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2015).

O melhoramento genético também tem focado na padronização da composição de óleos essenciais, com cultivares como Cinnamon, Mrs. Burns e Anise se destacando por suas características únicas (Pravuschi *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2015).

A cultivar Cinnamon é valorizada pelo sabor adocicado e aroma de canela, sendo utilizada em infusões e pratos especiais em substituição à “Planta de Canela”. Seu óleo essencial tem aplicações na indústria de perfumaria e cosméticos, devido ao seu potencial aromático e antioxidante (Majdi *et al.*, 2020).

A cultivar Mrs. Burns é conhecida por seu aroma cítrico intenso e é popular em preparações culinárias como saladas e pratos mediterrâneos. Sua folhagem vibrante também a torna uma escolha ornamental atrativa (Pegplant, 2015).

Por fim, Anise é apreciada tanto na culinária quanto na medicina tradicional, com seu sabor doce e apimentado e propriedades digestivas. Utilizada em pratos mediterrâneos e bebidas como no “Raki”, substituindo as sementes de anis. Essa cultivar também é utilizada nas indústrias alimentícia e farmacêutica (Spence, 2024).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUHASHEM, Y.S.; KHALIL, H. B.; EL-TAHAWAY, M. A. F. A.; SOLIMAN, K. A. Exploring the morphological and genetic diversity of Egyptian basil landraces (*Ocimum* sp.) for future breeding strategies. **Beni-Suef University Journal Of Basic And Applied Sciences**, v. 12, n. 1, p. 1-5, 2023.
- AGATONOVIC-KUSTRIN, S.; KUSTRIN, E.; GEGECHKORI, V.; MORTON, D. W. Anxiolytic Terpenoids and Aromatherapy for Anxiety and Depression. **Advances In Experimental Medicine And Biology**, p. 283-296, 2020.
- AMTMANN, A.; TROUFFLARD, S.; ARMENGAUD, P. The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. **Physiologia Plantarum**, v.133, n.4, p.682-691, 2008.
- ALEMU, A.; ÅSTRAND, J.; MONTESINOS-LÓPEZ, O. A.; SÁNCHEZ, J. I.; FERNÁNDEZ-GÓNZALEZ, J.; TADESSE, W.; VETUKURI, R. R.; CARLSSON, A. S.; CEPLITIS, A.; CROSSA, J. Genomic selection in plant breeding: key factors shaping two decades of progress. **Molecular Plant**, v.17, n.4, p.552-578, 2024.
- ALLARD, R. W. **Princípios do melhoramento genético de plantas**. Rio de Janeiro: Usaid, 1971. 381 p.
- ALVARENGA, I. C. A.; BOLDRIN, P. F.; PACHECO, F. V.; SILVA, S. T.; BERTOLUCCI, S. K. V.; PINTO, J. E. B. P. Effects on growth, essential oil content and composition of the volatile fraction of *Achillea millefolium* L. cultivated in hydroponic systems deficient in macro- and microelements. **Scientia Horticulturae**, v.197, p.329-338, 2015.
- ALVES, R. P.; SILVA, A. V. C; ALMEIDA-PEREIRA, C. S.; COSTA, T. S.; ALVARES-CARVALHO, S. V.; ARRIGONI-BLANK, M. F.; BLANK, A. F. Genetic divergence in basil cultivars and hybrids. **Horticultura Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 180-187, 2019.
- ALVES, T. N.; CARVALHO, B. L.; GUEDES, P. T. P.; NORDI, N. T.; AIRES, E. S.; OLIVEIRA, M. M. V.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Produção de mudas de manjerição (*Ocimum basilicum* L.) sob efeito de diferentes substratos. **Research, Society And Development**, v. 10, n. 2, p. 58210212867-2, 2021.
- ANTAR, G. M. **Ocimum in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB117019>. Acesso em: 10 jul. 2024.

AREVALO, A. C. M.; CARDOSO, D. L.; KRAESKI, M. J.; SANTANA, D. C.; ARGUELHO, S. B. D Parâmetros genéticos, correlações e principais componentes para caracteres agrônômicos em genótipos de feijão comum do grupo carioca. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v.9, n.11, p.3179119831, 2020.

ARRIEL, N. H. C.; DI MAURO, A. O.; DI MAURO, M. Z.; BAKKE, O. A.; TREVISOLI, S. H. U.; COSTA, M. M.; CAPELOTO, A.; CORRADO, A. R. Técnicas multivariadas na determinação da diversidade genética em gergelim usando marcadores RAPD. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 801-809, 2006.

ASSUNÇÃO, M. P. **Estimativas de parâmetros genéticos e estratégias de seleção no maracujazeiro azedo**. 2014. 54 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Tangará da Serra-MT, 2014.

ATTIA, H.; REBAH, F.; OUHIBI, C; SALEH, M. A.; ALTHOBAITI, A. T.; ALAMER, K. H.; NASRI, M. B.; LACHAËL, M. Efeito da deficiência de potássio nas respostas fisiológicas e estrutura anatômica do manjeriço, *Ocimum basilicum* L. **Biology**, v.11, p. 1557, 2022.

BARRETO, R. F.; MAIER, B. R.; MELLO PRADO, R.; MORAIS, T. C. B.; FELISBERTO, G. Silicon attenuates potassium and sulfur deficiency by increasing nutrient use efficiency in basil plants. **Scientia Horticulturae**, v. 291, p. 110616, 2022.

BERNARDO, R. Reinventing quantitative genetics for plant breeding: something old, something new, something borrowed, something blue. **Heredity**, v.125, n. 6, p.375-385, 2020.

BISTGANI, Z. E.; BARKER, A. V.; HASHEMI, M. Physiology of medicinal and aromatic plants under drought stress. **The Crop Journal**, v.12, n. 2, p.330-339, 2024.

BLANK, A. F.; CARVALHO FILHO, J. L. S.; SANTOS NETO, A. L.; ARRIGONI-BLANK, M. F.; SILVA-MANN, R.; MENDONÇA, M. C. Caracterização morfológica e agrônômica de acessos de manjeriço e alfavaca. **Horticultura Brasileira**, v.22, p.113-116, 2004.

BLANK A. F.; COSTA, A. G.; ARRIGONI-BLANK M. F.; CAVALCANTE S. C. H.; ALVES, P. B.; INNECCO, R.; EHLERT, P. A. D; SOUZA, I. A. Influence of season, harvest time and drying on Java citronella (*Cymbopogon winterianus* Jowitt) volatile oil. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v.17, p.557-564, 2007.

BLANK, A. F.; SOUZA, E. M.; PAULA, J. W. A.; ALVES, P. B. Comportamento fenotípico e genotípico de populações de manjeriço. **Horticultura Brasileira**, v.28, p.305-310, 2010.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V.; FRITSCHÉ-NETO, R. **Melhoramento de plantas**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2021. 334p.

BORGES, B. M. M. N.; FLORES, R. A.; ALMEIDA, H. J.; MODA, L. R.; PRADO, R. D. M. Macronutrient omission and the development and nutritional status of basil in nutritive solution. **Journal of Plant Nutrition**, v.39, p.1627-1633, 2016.

BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. **Biochemistry and molecular biology of plants**. 2. ed. Wiley Blackwell, 2015. 1280p.

CARVALHO, A. A.; BERTOLUCCI, S. K. V.; FIGUEIREDO, F. C.; PINTO, J. E. B. P. Crescimento e composição da fração volátil de *Mentha arvensis* L. cultivada em solução nutritiva com omissão de nutrientes. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, São Paulo, v.18, n. 3, p. 677-684, 2016.

ÇELİK, G.; KİLİÇ, G.; KANBOLAT, Ş.; ŞENER, S. Ö.; KARAKÖSE, M.; YAYLI, N.; KARAOĞLU, Ş. A. Biological activity, and volatile and phenolic compounds from five Lamiaceae species. **Flavour And Fragrance Journal**, v. 36, n. 2, p. 223-232, 2020.

CHANDEL, S.; DESAI, B. S.; JHA, S. K.; SINHA, S. K.; PATEL, D. P.; KUMAR, N. Role of organic and inorganic fertilizers in enhancing biomass yield and eugenol content of ornamental basil (*Ocimum gratissimum* L.). **Heliyon**, v.10, n.10, p.30928, 2024.

CHENNI, M.; ABED, D. E.; RAKOTOMANOMANA, N.; FERNANDEZ, X.; CHEMAT, F. Comparative Study of Essential Oils Extracted from Egyptian Basil Leaves (*Ocimum basilicum* L.) Using Hydro-Distillation and Solvent-Free Microwave Extraction. **Molecules**, v. 21, n. 1, p. 113, 2016.

CHOWDHURY, T.; MANDAL, A.; ROY, S. C.; SARKER, D. Diversity of the genus *Ocimum* (Lamiaceae) through morpho-molecular (RAPD) and chemical (GC–MS) analysis. **Journal Of Genetic Engineering And Biotechnology**, v. 15, n. 1, p. 275-286, 2017.

CLÓVIS, L. R.; PINTO, R. J. B.; UHDRE, R. S.; ROSA, J. C.; ZENI NETO, H.; VIVAS, M.; AMARAL JÚNIOR, A. T. do. Overall heritability in popcorn estimated by meta-analysis. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, p. 53721, 2021.

COCAN, I.; ALEXA, E.; DANCIU, C.; RADULOV, I.; GALUSCAN, A.; OBISTIOIU, D.; MORVAY, A.; SUMALAN, R.; POIANA, M. A.; POP, G. Phytochemical screening and biological activity of Lamiaceae family plant extracts. **Experimental And Therapeutic Medicine**, p. 1-2, 2017.

COSTA, A. S.; ARRIGONI-BLANK, M. F.; SILVA, M. A. A. P.; ALVES, M. F.; SANTOS, D. A.; ALVES, P. B.; BLANK, A. F. The Impact of Hybridization on the Volatile and Sensorial Profile of *Ocimum basilicum* L. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 1-8, 2014.

COUTO, H. G. S. A.; BLANK, A. F.; SILVA, A. M. O.; NOGUEIRA, P. C. L.; ARRIGONI-BLANK, M. F.; NIZIO, D. A. C.; PINTO, J. A. O. Essential oils of basil chemotypes: major compounds, binary mixtures, and antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 293, p. 446-454, 2019.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3.ed. Viçosa: Ed. da UFV, 2004. 480p.

DATNOFF, L. E.; ELMER, W. H.; RODRIGUES, F. A. **Mineral Nutrition and Plant Disease**. American Phytopathological Society (APS Press), 2023. 435 p.

DRAGAR, V. A.; MENARY, R. C. Mineral nutrition of *Olearia phlogopappa*: effect on growth, essential oil yield, and composition. **Commun. Soil Sci. Plant Anal**, v.26, n.7e8, p.1299-1313, 1995.

DUAN, S.; ZHANG, C.; SONG, S.; MA, C.; ZHANG, C.; XU, W.; BONDADA, B.; WANG, L.; WANG, S. Understanding calcium functionality by examining growth characteristics and structural aspects in calcium-deficient grapevine. **Scientific Reports**, v.12, n.1, 2022.

FALCONER, D. S. **Introdução à genética quantitativa**. Viçosa: UFV, 1987. 279 p.

FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. **Introduction to quantitative genetics**. Essex: Longman, 1996. 464 p.

FAVORITO, P. A.; ECHER, M. M.; OFFEMANN, L. C.; SCHLINDWEIN, M. D.; COLOMBARE, L. F.; SCHINEIDER, R. P.; HACHMANN, T. L. Características produtivas do manjerição (*Ocimum basilicum* L.) em função do espaçamento entre plantas e entre linhas. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais, Botucatu**, v. 13, p. 582-586, 2011.

FERREIRA, S. D.; ECHER, M. M.; BULEGON, L. G.; PASTÓRIO, M. A.; EGEWARTH, V.A.; YASSUE, R.M.; ACHRE, D. Influencia de la fertilización nitrogenada y la época de cultivo sobre el rendimiento de hojas de albahaca (*Ocimum basilicum* var. verde Toscana) con fines medicinales. **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, v.20, n.4, p.389-396, 2015.

FISCHER, W. W.; HEMP, J.; JOHNSON, J. E. Evolution of Oxygenic Photosynthesis. **Annual Review Of Earth And Planetary Sciences**, v. 44, n. 1, p. 647-683, 2016.

FRANÇA, M. F. M. S.; VILELA, M. S.; COSTA, A. P.; NOGUEIRA, I.; PIRES, M. C.; SOUZA, N. O. S. Germination test and ornamental potential of different basil cultivars (*Ocimum* spp.). **Ornamental Horticulture**, v. 23, n. 4, p. 385-391, 2017.

GARCIA, C. H.; NOGUEIRA, M. C. S. Utilização da metodologia REML/BLUP na seleção de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 68, p. 107-112, 2005.

GARLET, T. M. B. **Produtividade, teor e composição do óleo essencial de espécies de *Mentha* L. (Lamiaceae) cultivadas em hidroponia com variação de potássio**. 2007. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Produção Vegetal, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, UFSM, Santa Maria-RS, 2007.

GONDA, I.; MILAVSKI, R.; ADLER, C.; ABU-ABIED, M.; TAL, O.; FAIGENBOIM, A.; CHAIMOVITSH, D.; DUDAI, N. Genome-based high-resolution mapping of fusarium wilt resistance in sweet basil. **Plant Science**, v.321, p.111316, 2022.

GONG, H.; YANG, M.; WANG, C.; TIAN, C. Leaf phenotypic variation and its response to environmental factors in natural populations of *Eucommia ulmoides*. **Bmc Plant Biology**, v. 23, n. 1, p. 1-1, 2023.

GUAN, Y.; CHEN, S.; CHEN, F.; CHEN, F.; JIANG, Y. Exploring the Relationship between Trichome and Terpene Chemistry in *Chrysanthemum*. **Plants**, v. 11, n. 11, p. 1410, 2022.

HAFSI, C.; DEBEZ, A.; ABDELLY, C. Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.36, p. 1055–1070, 2014.

HAMAWAKI, O. T.; SOUSA, L. B.; ROMANATO, F. N.; NOGUEIRA, A. P. O.; SANTOS JÚNIOR, C. D.; POLIZEL, A. C. Genetic parameters and variability in soybean genotypes. **Comunicata Scientiae**, v. 3, p. 76-83, 2012.

HAZZOUMI, Z.; MOUSTAKIME, Y.; JOUTEI, K. A. Essential Oil and Glandular Hairs: diversity and roles. **Essential Oils - Oils Of Nature**, p. 1-2, 2020.

HERMS, D. A.; MATTSON, W. J. The Dilemma of Plants: to grow or defend. **The Quarterly Review of Biology**, v.67, n.3, p.283-335, 1992.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S Engineering and Science**, v.5, n.1, p.83-90, 2016.

JACQUARD, A. Heritability: one word, three concepts. **Biometrics**, v. 39, p. 465-477, 1983.

KALAMARTZIS, I.; DORDAS, C.; GEORGIU, P.; MENEXES, G. The Use of Appropriate Cultivar of Basil (*Ocimum basilicum*) Can Increase Water Use Efficiency under Water Stress. **Agronomy**, v. 10, n. 1, p. 70, 2020.

KAMELNIA, E.; MOHEBBATI, R.; KAMELNIA, R.; ELSEEDI, H.; BOSKABADY, M. H. Anti-inflammatory immunomodulatory and anti-oxidant effects of *Ocimum basilicum* L. and its main constituents: a review. **Iranian Journal of Basic Medical Sciences**, v. 26, n. 6, p. 1-2, 2023.

KANWAL, N.; HANIF, M. A.; KHAN, M. M.; ANSARI, T. M.; KHALIL-UR-REHMAN. Efeito de micronutrientes no crescimento vegetativo e no conteúdo de óleo essencial de *Ocimum sanctum*. **Journal of Essential Oil Bearing Plants**, v. 19, p. 980-988, 2016.

KHAN, F.; SIDDIQUE, A. B.; SHABALA, S.; ZHOU, M.; ZHAO, C. Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. **Plants**, v. 12, n. 15, p. 2861, 2023.

KOTHARI, S.K.; SINGH, V.; SINGH, K. Effect of rates and method of P application on herb and oil yields and nutrient concentrations in Japanese mint (*Mentha arvensis* L.). **Journal of Agricultural Science**, v.108, n.3, p.691-693, 1987.

KOVÁČIK, J.; BAČKOR, M. Phenylalanine Ammonia-Lyase and Phenolic Compounds in Chamomile Tolerance to Cadmium and Copper Excess. **Water, Air, And Soil Pollution**, v.185, n.1-4, p.185-193, 2007.

KRASILNIKOV, P.; TABOADA, M. A.; AMANULLAH. Fertilizer Use, Soil Health and Agricultural Sustainability. **Agriculture**, v. 12, n. 4, p. 462, 2022.

LAL, R. K.; GUPTA, P.; CHANOTIYA, C. S.; SARKAR, S. Traditional Plant Breeding in *Ocimum*. **The Ocimum Genome**, p. 89-98, 2018.

LAWRENCE, B. M.; HARLEY, R. M.; REYNOLDS, T. **Advances in labiate science**. The Royal Botanic Gardens Kew, 1992. 406-408 p.

MACARI, A.; STURZA, R.; LUNG, I.; SORAN, M. L.; OPRIȘ, O.; BALAN, G.; GHENDOV-MOSANU, A.; VODNAR, D. C.; COJOCARI, D. Antimicrobial Effects of Basil, Summer Savory and Tarragon Lyophilized Extracts in Cold Storage Sausages. **Molecules**, v. 26, n. 21, p. 6678, 2021.

MAJDI, C.; PEREIRA, C.; DIAS, M. I.; CALHELHA, R. C.; ALVES, M. J.; RHOURLI-FRIH, B.; CHARROUF, Z.; BARROS, L.; AMARAL, J. S.; FERREIRA, I. C. F. R. Phytochemical Characterization and Bioactive Properties of Cinnamon Basil (*Ocimum basilicum* cv. 'Cinnamon') and Lemon Basil (*Ocimum × citriodorum*). **Antioxidants**, v.9, n.5, p.369, 2020.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 637 p.

MAO, X.; ZHENG, Y.; XIAO, K.; WEI, Y.; ZHU, Y.; CAI, Q.; CHEN, L.; XIE, H.; ZHANG, J. OsPRX2 contributes to stomatal closure and improves potassium deficiency tolerance in rice. **Biochemical And Biophysical Research Communications**, v. 495, n. 1, p. 461-467, 2018.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **CultivarWeb**, 2021. Disponível em: http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php. Acesso em: 10 jul. 2024.

MARIOT, M. P.; BARBIERI, R. L. Metabólitos secundários e propriedades medicinais da espinheira-santa (*Maytenus ilicifolia* Mart, ex Reiss, e *M. aquifolium* Mart,). **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v.9, n.3, p.89-99, 2007.

MAROTTI, M.; PICCAGLIA, R.; GIOVANELLI, E. Differences in Essential Oil Composition of Basil (*Ocimum basilicum* L.) Italian Cultivars Related to Morphological Characteristics. **Journal Of Agricultural And Food Chemistry**, v.44, n.12, p.3926-3929, 1996.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. San Diego: Academic Press, 1995. 889p.

MESQUITA, L. S. S.; LUZ, T. R. S. A.; MESQUITA, J. W. C.; COUTINHO, D. F.; AMARAL, F. M. M.; RIBEIRO, M. N. S.; MALIK, S. Exploring the anticancer properties of essential oils from family Lamiaceae. **Food Reviews International**, v. 35, n. 2, p. 105-131, 2018.

MOUSAVI, L.; SALLEH, R. M.; MURUGAIYAH, V. Phytochemical and bioactive compounds identification of *Ocimum tenuiflorum* leaves of methanol extract and its fraction with an anti-diabetic potential. **International Journal of Food Properties**, v. 21, n. 1, p. 2390-2399, 2018.

MULUGETA, S. M.; PLUHÁR, Z.; RADÁCSI, P. Phenotypic Variations and Bioactive Constituents among Selected *Ocimum* Species. **Plants**, v. 13, n. 1, p. 64-69, 2023.

MURÁRIKOVÁ, A.; ěAŽKÝ, A.; NEUGEBAUEROVÁ, J.; PLANKOVÁ, A.; JAMPÍLEK, J.; MUČAJI, P.; MIKUŁ, P. Characterization of Essential Oil Composition in Different Basil Species and Pot Cultures by a GC-MS Method. **Molecules**, v. 22, n. 7, p. 1221, 2017.

NASCIMENTO, G. C. C.; BATISTA, J. B.; BARBOZA, M. L. B. M.; ALBUQUERQUE, H. N. O MANJERICÃO (*Ocimum* spp.) E SUAS DIVERSAS UTILIDADES EDUCACIONAIS E ECOLÓGICAS. **Open Minds International Journal**, v. 3, n. 3, p. 4-14, 2022.

- OLIVEIRA NETO, S. S.; ZEFFA, D. M.; EBERTZ, O. F.; ZOZ, T.; ZANOTTO, M. D. Genetic variability, adaptability and, stability of safflower genotypes developed for the Brazilian conditions by REML/BLUP. **Agronomy Journal**, v.113, n. 4, p. 3100-3109, 2021.
- OLIVEIRA, R. S. V.; SALOMÃO, L. C.; MORGADO, H. S.; SOUSA, C. M.; OLIVEIRA, H. F. Growth and production of basil under different luminosity and water replacement levels. **Horticultura Brasileira**, v. 38, n. 3, p. 324-328, 2020.
- ORTON, T. J. Review of Genetics (From The Perspective of A Plant Breeder). **Horticultural Plant Breeding**, p. 39-71, 2020.
- PAPAROZZI, E.T.; LI, Z.; BLANKENSHIP, E. E.; CONLEY, M. E. Purple leaf basil plants express micronutrient deficiencies symptoms differently than green leaf basil plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 10, p. 1466-1479, 2021.
- PATON, A.; PUTIEVSKY, E. Taxonomic Problems and Cytotaxonomic Relationships between and within Varieties of *Ocimum basilicum* and Related Species (Labiatae). **Kew Bulletin**, v. 51, n. 3, p. 509, 1996.
- PATTERSON, H. D.; THOMPSON, R. Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. **Biometrika**, v.58, p.545-54, 1971.
- PEGPLANT. **You Can Grow That! Mrs. Burns' Lemon Basil**. Disponível em: <https://pegplant.com/2015/10/04/you-can-grow-that-mrs-burns-lemon-basil/>. Acesso em: 22 set. 2024.
- PEREK, M.; HODGE, G.; TAMBARUSSI, E. V.; BIERNASKI, F. A.; ACOSTA, J. Predicted genetic gains for growth traits and wood resistance in *Pinus maximinoi* and *Pinus tecunumanii*. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 22, n. 2, p. 1, 2022.
- PINTO, J. A. O. **Influência da época de plantio na produção de cultivares e híbridos de manjerição**. 2017. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Biodiversidade) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão-SE, 2017.
- PRAJAPATI, P.; SINGH, A.; JADHAV, P. B. Value addition in floriculture through essential oils. **International Journal of Information Research and Review**, v.3, n.9, p.2795-2799, 2016.
- PRASZNA, L.; BERNÁTH, J. Correlations between the limited level of nutrition and essential oil production of peppermint. **Acta Horticulture**, n.344, p.278-289, 1993.
- PRAVUSCHI, P. R.; MARQUES, P. A. A.; RIGOLIN, B. H. M.; SANTOS, A. C. P. Efeito de diferentes lâminas de irrigação na produção de óleo essencial do manjerição (*Ocimum basilicum* L.). **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.32, n.4, p.687-693, 2010.
- PUIG, S. Function and Regulation of the Plant COPT Family of High-Affinity Copper Transport Proteins. **Advances In Botany**, v. 2014, p. 1-9, 2014.
- RAMALHO, M. A. P.; PINTO, C. A. B. **Genética na agropecuária**. Lavras: UFLA, 2008. 464 p.

RESENDE, M.D.V. **Análise estatística de modelos mistos via REML/BLUP na experimentação em melhoramento de plantas perenes**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 101p.

RIBEIRO, J. E. D. S.; NÓBREGA, J. S.; COÊLHO, E. D. S.; DIAS, T. J.; MELO, M. F. Estimating leaf area of basil cultivars through linear dimensions of leaves. **Revista Ceres**, v. 69, n. 2, 139-147, 2022.

ROMANO, R.; LUCA, L.; AIELLO, A.; PAGANO, R.; PIERRO, P.; PIZZOLONGO, F.; MASI, P. Basil (*Ocimum basilicum* L.) Leaves as a Source of Bioactive Compounds. **Foods**, v. 11, n. 20, p. 3212, 2022.

SALGOTRA, R. K.; CHAUHAN, B. S. Genetic Diversity, Conservation, and Utilization of Plant Genetic Resources. **Genes**, v. 14, n. 1, p. 174, 2023.

SÁ, S. F.; SANTOS, L. C. A.; CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S.; BRAGA, M. F.; LAVIOLA, B. G.; CARDOSO, A. N.; SAYD, R. M.; JUNQUEIRA, N. T. V. Genetic diversity via REML-BLUP of ex situ conserved macauba [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.] ecotypes. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v.68, n.8, p.3193-3204, 2021.

SECK, F.; COVARRUBIAS-PAZARAN, G.; GUEYE, T.; BARTHOLOMÉ, J. Realized Genetic Gain in Rice: achievements from breeding programs. **Rice**, v. 16, n. 1, p. 1, 2023.

SHAHRAJABIAN, M. H.; SUN, W.; CHENG, Q. Chemical components and pharmacological benefits of Basil (*Ocimum basilicum*): a review. **International Journal Of Food Properties**, v. 23, n. 1, p. 1961-1970, 2020.

SIDDIQUI, T.; KHAN, M. U.; SHARMA, V.; GUPTA, K. Terpenoids in essential oils: chemistry, classification, and potential impact on human health and industry. **Phytomedicine Plus**, v. 4, n. 2, p. 100549, 2024.

SIFOLA, M. I.; BARBIERI, G. Growth, yield and essential oil content of three cultivars of basil grown under different levels of nitrogen in the field. **Scientia Horticulturae**, v. 108, p. 408-413, 2006.

SILVA, J. O. C.; BRUCKNER, C. H.; CARNEIRO, P. C. S.; RESENDE, M. D. V.; ALVES, R. S.; SILVA, D. F. P. Estimates of genetic parameters, genetic variability, and selection in the S1 generation of peach. **Ciência Rural**, v. 50, n. 10, p. 1, 2020.

SILVA, T. C.; BERTOLUCCI, S. K.V.; CARVALHO, A. A.; TOSTES, W. N.; ALVARENGA, I. C. A.; PACHECO, F. V.; ASSIS, R. M.A.; HONORATO, A. C.; PINTO, J. E. B. P. Macroelement omission in hydroponic systems changes plant growth and chemical composition of *Melissa officinalis* L. essential oil. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v.24, p.100297, 2021.

SINGH, K.; SINGH, P.P.; BEG, S. U.; KUMAR, D.; PATRA, D. D. Effect of harvesting time and nitrogen application on essential oil yield and quality of a methyl chavicol rich cultivar of Indian basil (*Ocimum basilicum* L.) **J. Medic. Arom. Plant Sci.**, v.26, p.293-296, 2004.

SINGH, S. K.; REDDY, V. R. Combined effects of phosphorus nutrition and elevated carbon dioxide concentration on chlorophyll fluorescence, photosynthesis, and nutrient efficiency of cotton. **Journal Of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 6, p. 892-902, 2014.

SINGH, S.; LAL, R. K.; SINGH, B. Genetic Variability in *Ocimum* L. Germplasm: medicinal and economic potential for value addition and product development. **Botanical Leads for Drug Discovery**, p. 243-253, 2020.

SONG, J.; YANG, J.; JEONG, B. R. Characterization of Physiology, Photosynthesis, and Nutrition Based on Induced Deficiencies of Macro- and Micronutrients in Basil (*Ocimum basilicum* L.). **Agronomy**, v. 14, n. 1, p. 208, 2024.

SOUITY, Z. Essential Oil Extraction Process. **Essential Oils - Recent Advances, New Perspectives And Applications**, p. 1-2, 14 fev. 2024. IntechOpen.
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.113311>.

SPENCE, C. Sweet basil: an increasingly popular culinary herb. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, v. 36, p. 100927, 2024.

SUBRAHMANYAM, K.; NAIR, A.K.; CHATTOPADHYAY, A.; SINGH, D.V. Evaluation of ammonium polyphosphate as phosphorus source in japanese mint (*Mentha arvensis* subsp haplocalyx var piperascens). **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.62, n.8, p.554-6, 1992.

SUH, E.; PARK, K. Effect of calcium ion in nutrient solution on the content and composition of essential oil of sweet basil in hydroponics. **Korean Society for Horticultural Science**, v.41, n.6, p.598-601, 2000.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Artmed Editora, 2017. 888 p.

THOROGOOD, R.; MUSTONEN, V.; ALEIXO, A.; APHALO, P. J.; ASIEGBU, F. O.; CABEZA, M.; CAIRNS, J.; CANDOLIN, U.; CARDOSO, P.; ERONEN, J. T. Understanding and applying biological resilience, from genes to ecosystems. **Npj Biodiversity**, v. 2, n. 1, 2023.

TOSCANO, M. A. F. **Avaliação agronômica, físico-química e ornamental de 13 genótipos de manjerição cultivados em campo no Distrito Federal**. 2022. 121p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 2022.

TRÄNKNER, M.; TAVAKOL, E.; JÁKLI, B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. **Physiologia Plantarum**, v. 163, n. 3, p. 414-431, 2018.

TRANSPARENCY MARKET RESEARCH. **Basil Leaves Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Trends, Growth, and Forecasts, 2019 - 2027**. Disponível em: <https://www.transparencymarketresearch.com/basil-leaves-market.html>. Acesso em: 10 jul. 2024.

TÜRKAY, İ.; ÖZTÜRK, L. The form, dose, and method of application of vermicompost differentiate the phenylpropene biosynthesis in the peltate glandular trichomes of methylchavicol chemotype of *Ocimum basilicum* L. **Industrial Crops And Products**, v. 198, p. 116688, 2023.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 486 p.

VIEIRA, R. F.; SIMON, J. E. Chemical characterization of basil (*Ocimum* spp.) based on volatile oils. **Flavour and Fragrance**, v.21, p.214–221, 2006.

WANG, Y.; MARTINS, L. B.; SERMONS, S.; BALINT-KURTI, P. Genetic and Physiological Characterization of a Calcium Deficiency Phenotype in Maize. **G3 Genes|Genomes|Genetics**, v.10, n.6, p.1963-1970, 2020.

WANG, Y.; WU, W. Potassium transport and signaling in higher plants. **Annual Review of Plant Biology**, v.64, p.451–476, 2013.

WATTS, S.; KAUR, S.; KARIYAT, R. Revisiting plant defense-fitness trade-off hypotheses using *Solanum* as a model genus. **Frontiers In Ecology and Evolution**, v. 10, 2023.

YU, T.; MAHE, L.; LI, Y.; WEI, X.; DENG, X.; ZHANG, D. Benefits of Crop Rotation on Climate Resilience and Its Prospects in China. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 436, 2022.

ZHANG, X.; LOW, Y. C.; LAWTON, M. A.; SIMON, J. E.; DI, R. CRISPR-Editing of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) Homoserine Kinase Gene for Improved Downy Mildew Disease Resistance. **Frontiers In Genome Editing**, v.3, 2021.

ZHELJAZKOV, V. D.; CANTRELL, C. L.; EBELHAR, M. W.; ROWE, D. E.; COKER, C. Productivity, Oil Content, and Oil Composition of Sweet Basil as a Function of Nitrogen and Sulfur Fertilization. **Hortscience**, v.43, n.5, p.1415-1422, 2008.

ZORZETTO, M. M.; MOTTA, F. C.; MORAIS, L. K.; KIIHL, T. A. M. Análise dialéctica da capacidade combinatória em soja. **Revista Biociências**, v. 14, n. 2, 2008.

4. ARTIGO 1

NUTRITIONAL DEFICIENCIES OF MACRO AND MICRONUTRIENTS IN PLANTS OF BASIL CULTIVAR ITALIAN LARGE LEAF

Artigo formatado de acordo com as normas do periódico Journal of Science Soil and Plant Nutrition

ABSTRACT

Basil (*Ocimum basilicum* L.) is a popular culinary and aromatic herb. Its cultivation is considered easy, being a source of income for many growers. The cultivar Italian Large Leaf is a basil plant with green and large leaves, widely used in natura. Several factors interfere with the growth and visual quality of vegetables. After water, mineral nutrition is the factor that most restricts production quality. The aim of this study was to evaluate the effects of the absence of macro and micronutrients on the growth of basil cultivar Italian Large Leaf. The missing element technique was used, with one control treatment and ten treatments with nutrient omission. Plant height, root length, leaf length and width, leaf area, leaf dry weight, root dry weight and nutrient content in the aerial part of the plants were measured. The results indicated that nutrient omission significantly affected the growth and production of basil, with emphasis on nitrogen omission, which reduced leaf dry weight by 96.1%, root dry weight by 93.7%, plant height by 71.7% and leaf area by 77.9%, as well as phosphorus omission, which reduced leaf dry weight by 99.5%, root dry weight by 96.4%, plant height by 93.3% and leaf area by 96.6%. Nutritional deficiencies caused typical visual symptoms, such as chlorosis, necrosis, reduction in leaf size and deformities. It is concluded that Italian Large Leaf basil is sensitive to nutritional deficiency and needs an adequate nutritional balance for favorable growth in production systems.

Keywords: *Ocimum basilicum*, Italian Large Leaf, mineral nutrition, Nutrient deficiency.

4.1. Introduction

Basil (*Ocimum basilicum* L.) is a popular culinary and aromatic herb worldwide, used to flavor a variety of dishes. In addition to its use in gastronomy, this plant is valued in traditional medicine for its antiviral, anti-inflammatory, antidiabetic, antimicrobial, and antioxidant properties (Tabbert et al. 2022).

Basil cultivation is an attractive activity for growers, as its management is considered easy, it has a high biomass yield, and it can be grown in soil or hydroponic systems (Polyakova et al. 2015). It is estimated that the global market for basil leaves will grow from \$57 million to \$62 million between 2021 and 2026 (Sipos et al. 2021). Fresh basil leaves are particularly valued (Baczek et al. 2019), being preferred by consumers when they are large and have a dark green color (Jnanesha et al. 2019). The cultivar 'Italian Large Leaf' is a culinary type basil that is widely used because its green and wide leaves are rich in linalool (Majdi et al. 2020).

To produce basil with good quality and visual appearance, it is important to understand the factors that influence plant growth and appearance. Among these factors, mineral nutrients are particularly relevant, as their deficiency can significantly affect production (Lambers and Oliveira 2019). Thus, the missing element technique, which consists of evaluating the growth of plants subjected to treatments without one nutrient at a time, is an important tool for identifying the nutritional requirements of plant species (Sousa et al. 2018).

In this context, the objective of this study was to evaluate the effects of the absence of macro and micronutrients on the growth of the 'Italian Large Leaf' cultivar of basil, quantifying the production and identifying the visual symptoms caused by nutritional deficiencies.

4.2. Material and Methods

A greenhouse experiment was conducted with basil (*Ocimum basilicum* L.), cultivar Italian Large Leaf, at the Department of Agronomic Engineering of the Federal University of Sergipe, in the municipality of São Cristóvão, state of Sergipe, Brazil. The tested treatments were the omission of: nitrogen (-N), phosphorus (-P), potassium (-K), calcium (-Ca), magnesium (-Mg), sulfur (-S), copper (-Cu), boron (-B), iron (-Fe), and zinc (-Zn) in basil plants, totaling 11 treatments, with 10 nutrient omissions and one complete solution (Control). The nutrient solution proposed by Furlani (1998) for leafy vegetables was used for the study. The complete nutrient solution (CS) contained: 250 mg of N, 39 mg of P, 294 mg of K, 190 mg of Ca, 24 mg of Mg, 33 mg of S, 0.18 mg of B, 0.025 mg of Cu, 2.5 mg of Fe and 0.10 mg of Zn per liter of reverse osmosis water. The sources of the reagents used were pure salts for analysis of: KH_2PO_4 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NaNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, NH_4NO_3 , KCl , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, H_3BO_3 , $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ZnCl_2 , $(\text{NH}_4)\text{HPO}_4$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, and EDTA (Ethylene diamine tetraacetic acid). In the solutions with nutrient omission, the nutrient corresponding to the omission was excluded and the levels of the others were maintained. For the analysis of analysed variables, a randomized block design was used, with 11 treatments and seven replications, with one plant per pot (totaling 77 experimental units).

Before transplanting to the pots, the seedlings were grown individually in 180 ml disposable plastic cups filled with inert substrate (vermiculite) and irrigated with their nutrient solution at 10% of the ionic strength until the 7th day of germination, at 20% of the ionic strength from the 8th to the 14th day, at 40% of the ionic strength from the 15th to the 27th day of germination, at 80% of the ionic strength from the 28th to the 35th day of germination, when most of the seedlings had the third pair of expanded definitive leaves.

At 35 days after germination, the basil seedlings were transplanted to plastic pots with a capacity of 3L filled with washed and sterilized sand (at 105 °C). The pots were perforated near the base and covered at the top with black and white mulching plastic, with the aim of minimizing the incidence of sunlight, to minimize the increase of the nutrient solution temperature, and preventing the proliferation of algae inside these containers. Plastic containers of 500 mL painted with aluminum paint were connected to the pots, through flexible hoses, to collect and quantify the drained nutrient solution. Drainage, nutrient solution replacement (aeration), and eventual topping up with reverse osmosis water were done daily, in the early morning and late afternoon, manually. The nutrient solution was renewed when the drained solution had an electrical conductivity below 25% of its respective stock solution. The pH of the stock solutions was adjusted to the range between 5.5 and 6.5.

At 46 days after transplanting, the plants were harvested and the following variables were evaluated: plant height (PH - cm), root length (RL - cm), leaf length (LL - cm), leaf width (LW - cm), leaf area (LA - cm), leaf dry weight (LDM - g. pot⁻¹), root dry weight (RDM - g. pot⁻¹). The dry weight of the plants was obtained by drying in an oven with forced air circulation at a temperature of 65°C until constant weight.

The contents of macro and micronutrients in the dry matter of the leaves were analyzed chemically as follows: Nitrogen (N) was determined by the Kjeldahl method, phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), sulfur (S), iron (Fe), and zinc (Zn) were determined by nitric-perchloric digestion with determination in the extract as follows: P was determined colorimetrically, K was determined by flame photometry, S was determined turbidimetrically,

Ca, Fe, and Zn were determined by atomic absorption spectrophotometry, Boron (B) was determined by incineration and determination colorimetrically by the curcumin method (Malavolta et al. 1989).

For color analysis, at the time of harvest, six leaves were removed from the middle region of the branches of each plant and scanned using an HP MFP 1005 scanner, according to the practical methodology proposed by Nascimento et al. (2020) to obtain RED-GREEN-BLUE (RGB) values and their hexadecimal codes. Through these codes, the attributes of the CIELAB

system for L, a^* , and b^* were obtained, while C^* was obtained by $C=[(a)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$ and H^* by $H=\text{Tang}^{-1} (a^*/b^*)$. The colors of the leaf edge and the leaf blade (between veins) were analyzed, resulting in a two-factor design that included the 11 nutrient solutions and the 2 leaf regions as factors.

The data obtained were subjected to analysis of variance (ANOVA) and a comparison test between groups of treatment means and control (Skott-Knott and Dunnett: $p<0.05$) using the statistical packages ExpDes (Azevedo 2022) and Tratamentos.ad (Ferreira et al. 2021) in the R® Software.

4.3. Results

4.3.1 Effect of missing elements on growth of basil plants

Among the treatments, there were differences for all growth variables (F-test, $p<0.05$). Starting from the greatest to the least limitations in plant growth, the orders of limitation were as follows: for LDM, $N = P > K = Ca = Mg = Fe = Zn > S = B = Cu$; for RDM, $N = P > Ca = S = B > K = Mg = Cu = Fe = Zn$; for PH, $P > N > K = Ca > Mg = S = B = Cu = Fe = Zn$; for RL, $P > N = Ca > K = Mg = S = Cu = Fe > B = Zn$; for LL and LW, $P > N > K = Ca = Mg = S = B = Cu = Fe = Zn$; and for LA, $P > N > Ca = S = B = Fe = Zn > K = Mg = Cu$ (Table 1).

Table 1. Average pH values: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass in *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf.

Nutritional Solution	PH cm	RL cm	LL cm	LW cm	LA cm ²	LDM g. pot ⁻¹	RDM g. pot ⁻¹
-N	13.6 c	15.5 c	4.5 b	2.7 b	9.2 c	0.4 c	0.3 c
-P	3.2 d	5.8 d	1.1 c	0.8 c	1.4 d	0.1 c	0.2 c
-K	33.9 b	22.1 b	7.2 a	4.6 a	26.4 a	4.2 b	2.5 a
-Ca	34.6 b	17.1 c	6.2 a	3.5 a	21.1 b	3.8 b	1.3 b
-Mg	45.0 a	24.0 b	7.0 a	4.7 a	24.1 a	4.2 b	2.3 a
-S	43.3 a	20.7 b	6.6 a	4.2 a	22.8 b	5.5 a	1.4 b
-B	45.9 a	27.7 a	6.2 a	4.3 a	20.2 b	5.5 a	1.8 b
-Cu	44.4 a	23.4 b	7.0 a	4.3 a	24.6 a	5.4 a	2.4 a
-Fe	43.0 a	23.5 b	6.5 a	4.2 a	21.5 b	4.0 b	2.0 a
-Zn	46.5 a	29.3 a	6.6 a	4.3 a	21.6 b	4.6 b	2.3 a
CV (%):	13.0	19.4	15.0	15.9	15.6	13.9	22.5

Means followed by the same letter in the column do not differ from each other (Skott-Knott, $p<0.05$). CV: coefficient of variation.

All growth variables were negatively affected by the missing elements. Significant reductions ($p<0.05$) were recorded under: omission of N in LDM (96.1%), RDM (93.7%), PH (71.7%), RL (48.3%), LL (49.5%), LW (52.6%) and LA (77.9%) (Figure 1); omission of P in LDM (99.5%), RDM (96.4%), PH (93.3%), RL (80.7%), LL (88.0%), LW (85.4%) and LA (96.6%) (Figure 2); omission of K in LDM (57.9%), RDM (47.9%), PH (29.5%), RL (26.2%), LL (19.5%), LW (19.7%) and LA (36.4%) (Figure 3); omission of Ca in LDM (61.3%), RDM (73.4%), PH (28.0%), RL (42.9%), LL (30.7%), LW (37.9%) and LA (49.2%) (Figure 4); omission of Mg in LDM (58.0%), RDM (51.7%), LL (21.9%), LW (17.8%) and LA (42.0%) (Figure 5); omission of S in LDM (44.4%), RDM (30.2%), RL (31.0%), LL (26.9%), LW (25.5%) and LA (45.1%) (Figure 6); omission of B in LDM (44.5%), RDM (62.7%), LL (30.9%), LW (24.5%) and LA (51.5%) (Figure 7); omission of Cu in LDM (45.2%), RDM (49.4%), RL (22.1%) LL (22.7%), LW (23.6%) and LA (40.8%) (Figure 8); omission of Fe in LDM (59.9%), RDM (57.6%), RL (21.7%), LL (28.0%), LW (26.6%) and LA (48.3%) (Figure 9); and omission of Zn in LDM (53.9%), RDM (52.1%), LL (26.7%), LW (24.3%) and LA (48.1%) (Figure 10). There was no significant effect, in relation to the control for PH when the

plants were subjected to the omission of Mg, S, B, Cu, Fe or Zn. The omission of Mg, B or Zn did not affect RL.

Visually, we observed that plants subjected to omission of N (Figure 1) and P (Figure 2) showed little growth from transplanting into pots until harvest, culminating in stunted plants with no inflorescences. Plants with calcium deficiency showed atrophy and subsequent necrosis of the apical regions, with these symptoms becoming more evident after 40 days of pot culture (Figure 4). In addition to the smaller root development, for the treatments with omission of Ca (Figure 4), Mg (Figure 5), B (Figure 7) and Zn (Figure 10) showed visibly darker roots compared to the control treatment.

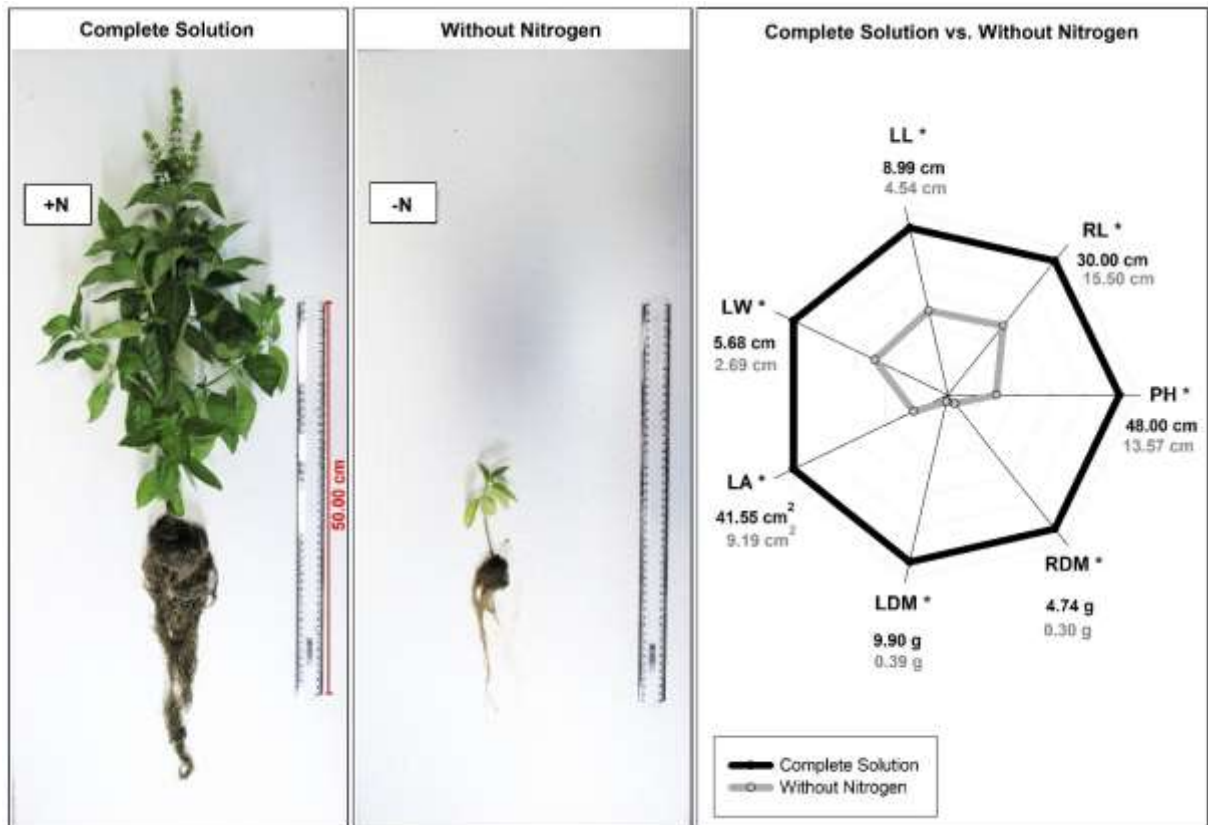


Figure 1. Comparison of growth parameters of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutrient solution with nitrogen omission. PH: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass. * indicates that the treatment does not differ from the control (complete) (Dunnett, $p < 0.05$). For illustration, the plant from the repetition that most represented the treatment mean was chosen.

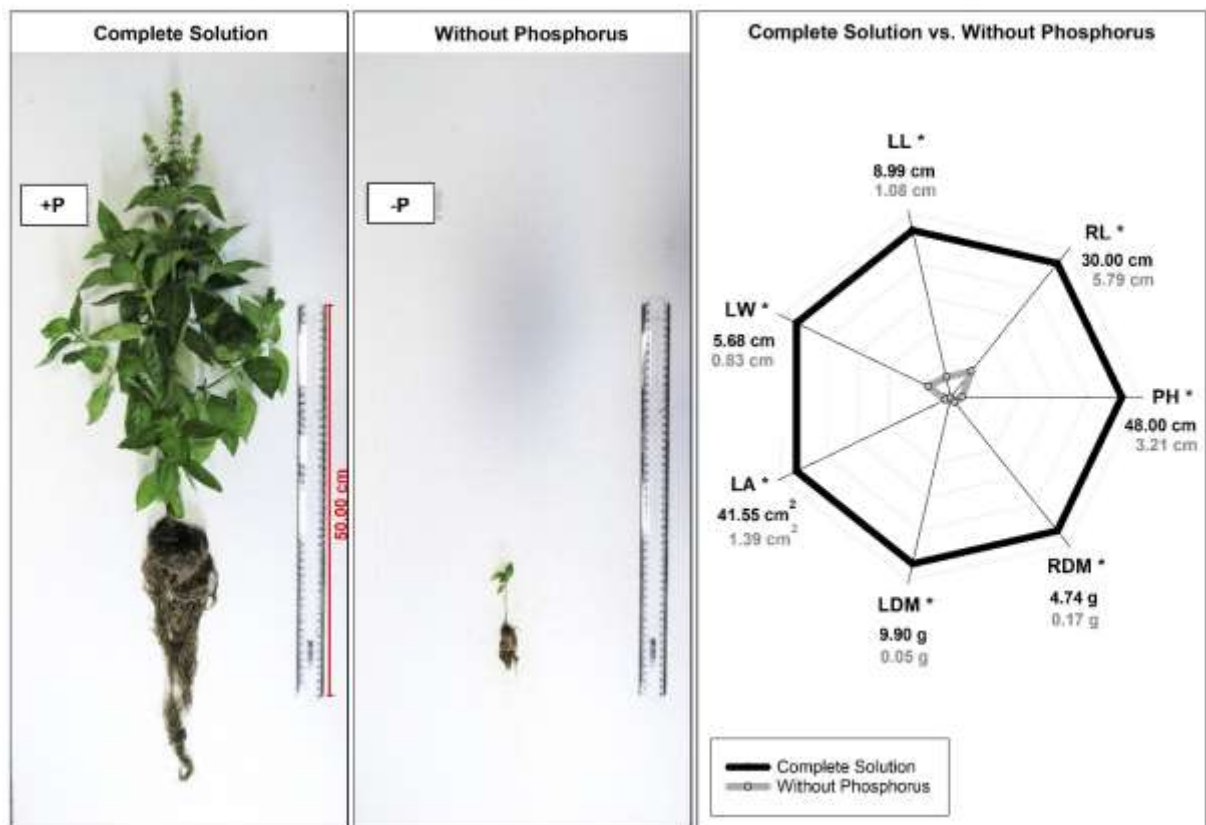


Figure 2. Comparison of growth parameters of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutrient solution with phosphorus omission. PH: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass. * indicates that the treatment does not differ from the control (complete) (Dunnett, $p < 0.05$). For illustration, the plant from the repetition that most represented the treatment mean was chosen.

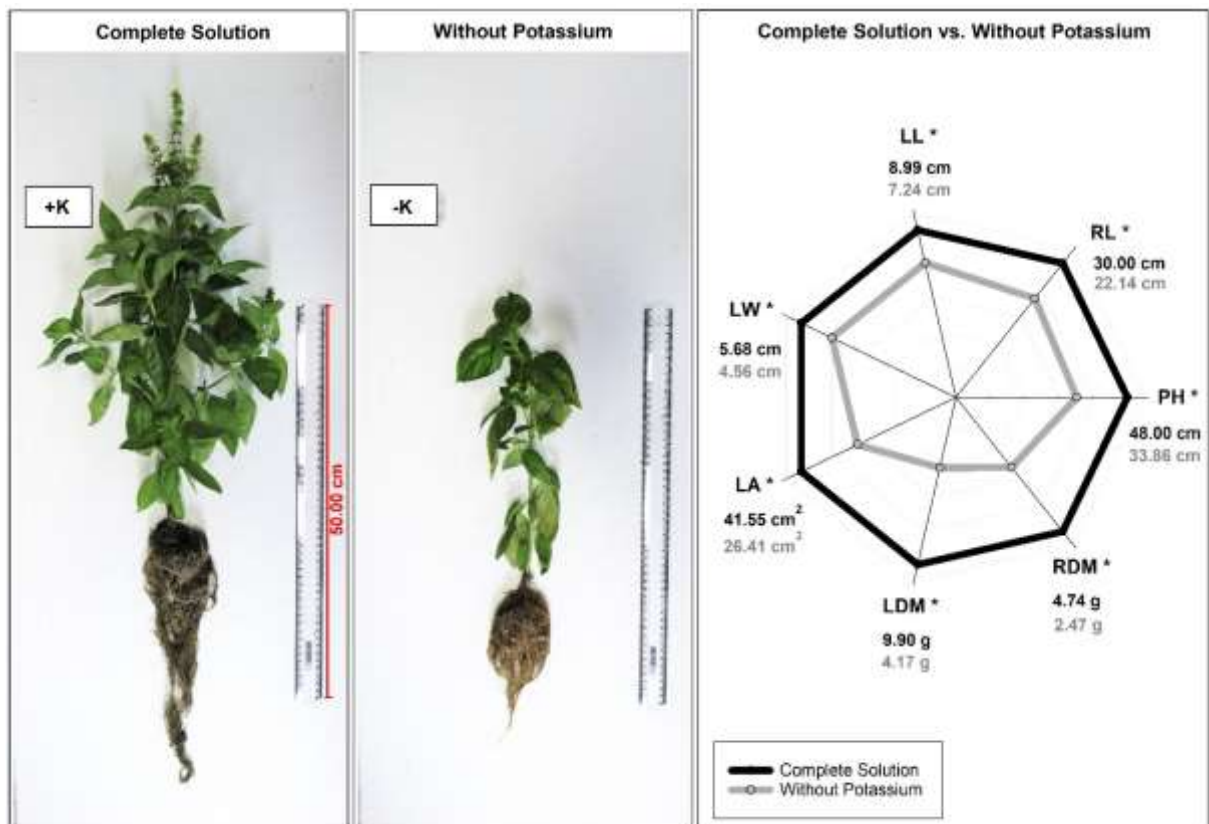


Figure 3. Comparison of growth parameters of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutrient solution with potassium omission. PH: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass. * indicates that the treatment does not differ from the control (complete) (Dunnett, $p < 0.05$). For illustration, the plant from the repetition that most represented the treatment mean was chosen.

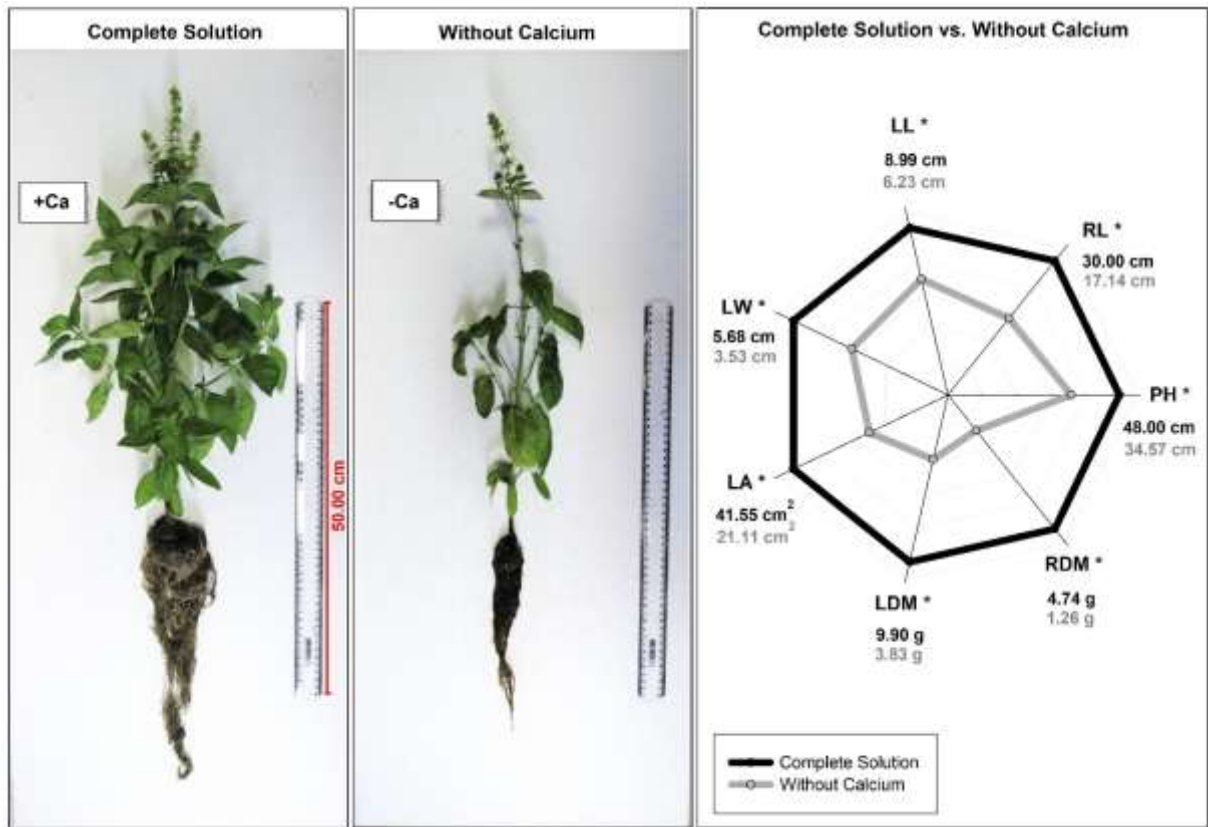


Figure 4. Comparison of growth parameters of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutrient solution with calcium omission. PH: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass. * indicates that the treatment does not differ from the control (complete) (Dunnett, $p < 0.05$). For illustration, the plant from the repetition that most represented the treatment mean was chosen.

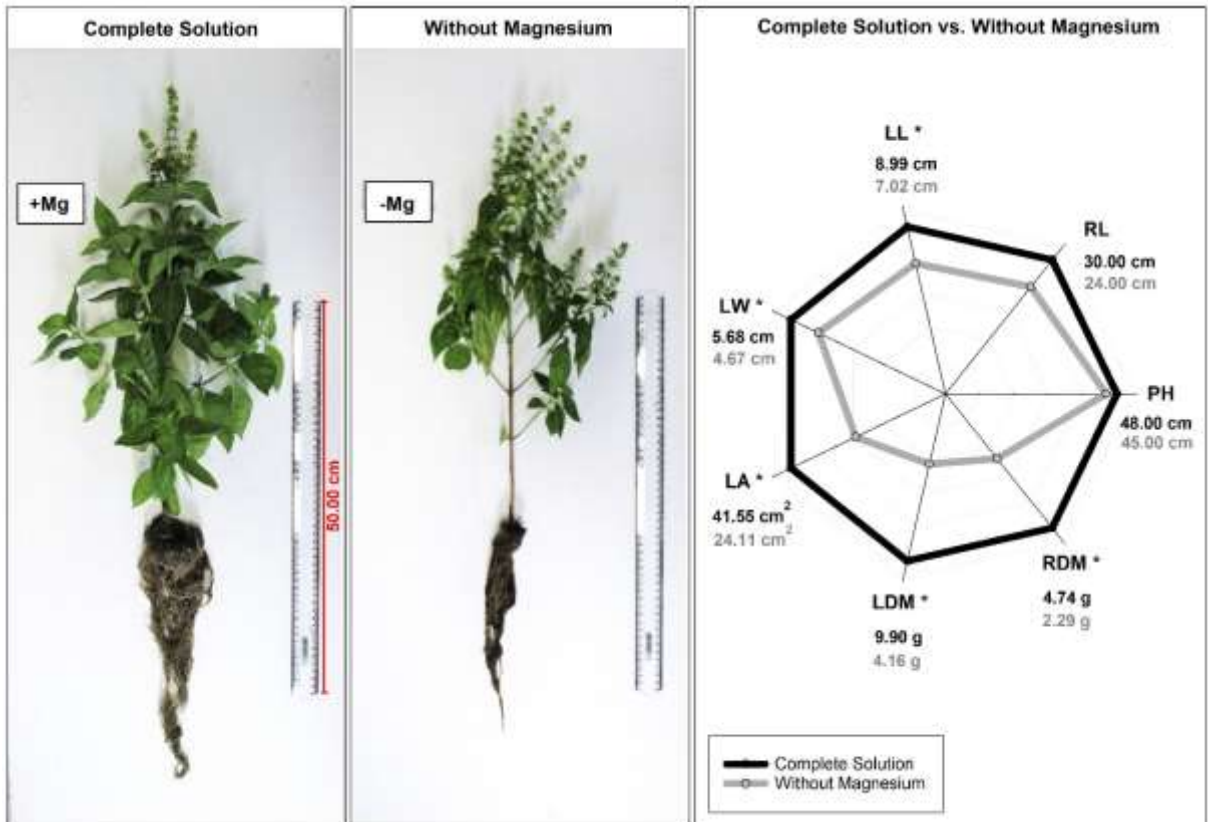


Figure 5. Comparison of growth parameters of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutrient solution with magnesium omission. PH: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass. * indicates that the treatment does not differ from the control (complete) (Dunnett, $p < 0.05$). For illustration, the plant from the repetition that most represented the treatment mean was chosen.

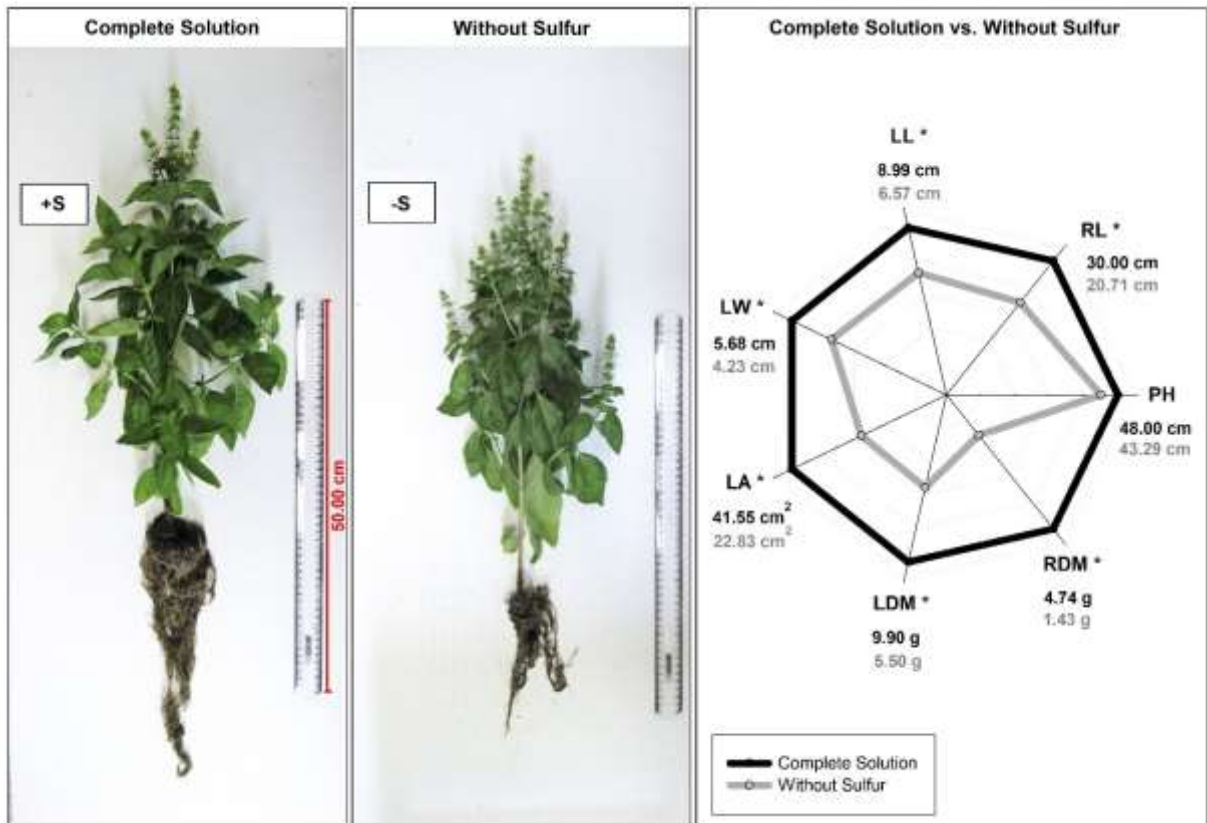


Figure 6. Comparison of growth parameters of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutrient solution with sulfur omission. PH: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass. * indicates that the treatment does not differ from the control (complete) (Dunnett, $p < 0.05$). For illustration, the plant from the repetition that most represented the treatment mean was chosen.

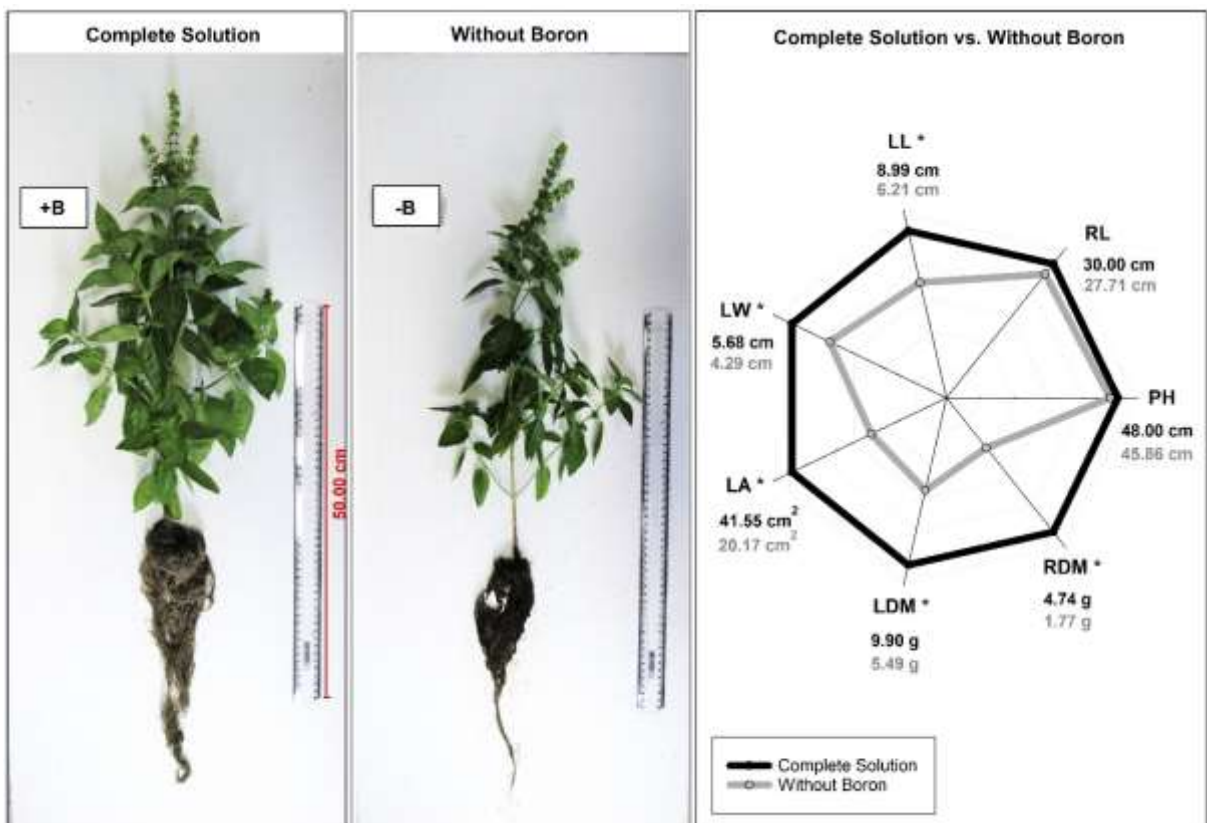


Figure 7. Comparison of growth parameters of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutrient solution with boron omission. PH: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass. * indicates that the treatment does not differ from the control (complete) (Dunnett, $p < 0.05$). For illustration, the plant from the repetition that most represented the treatment mean was chosen.

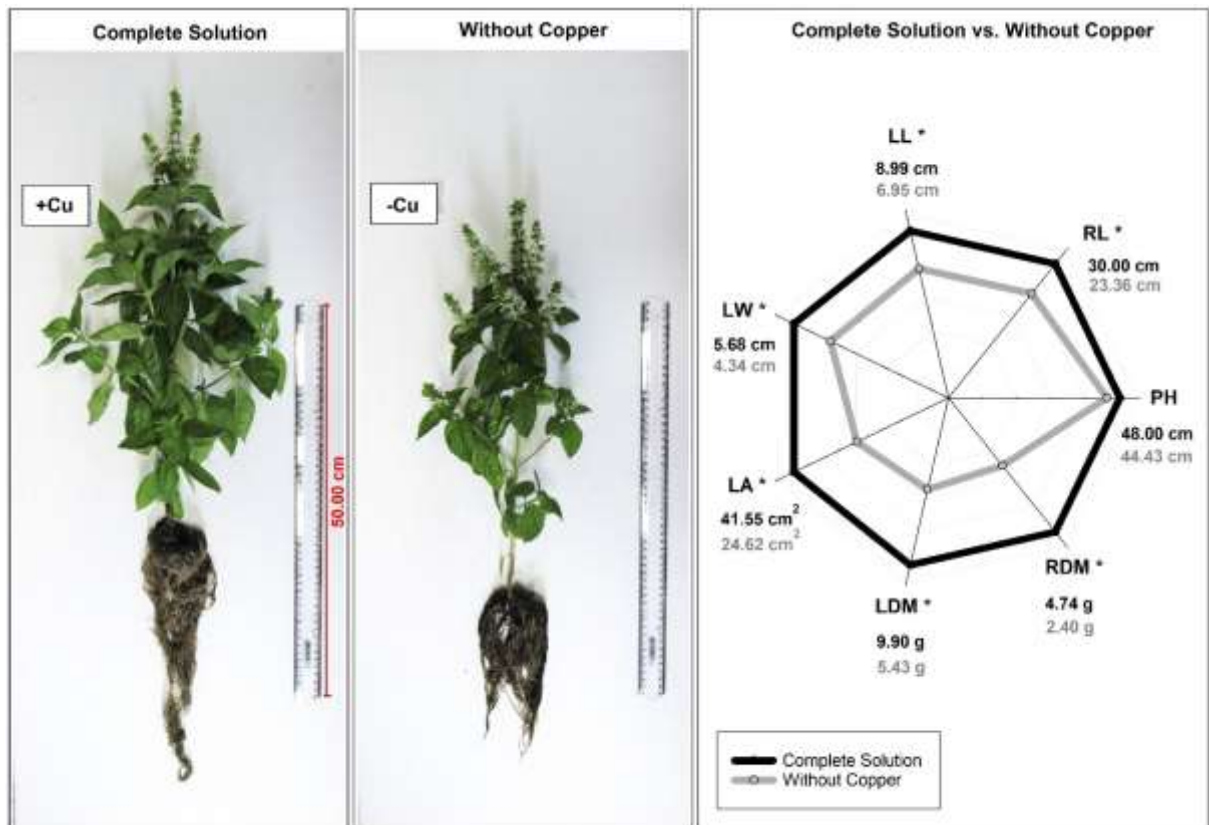


Figure 8. Comparison of growth parameters of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutrient solution with copper omission. PH: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass. * indicates that the treatment does not differ from the control (complete) (Dunnett, $p < 0.05$). For illustration, the plant from the repetition that most represented the treatment mean was chosen.

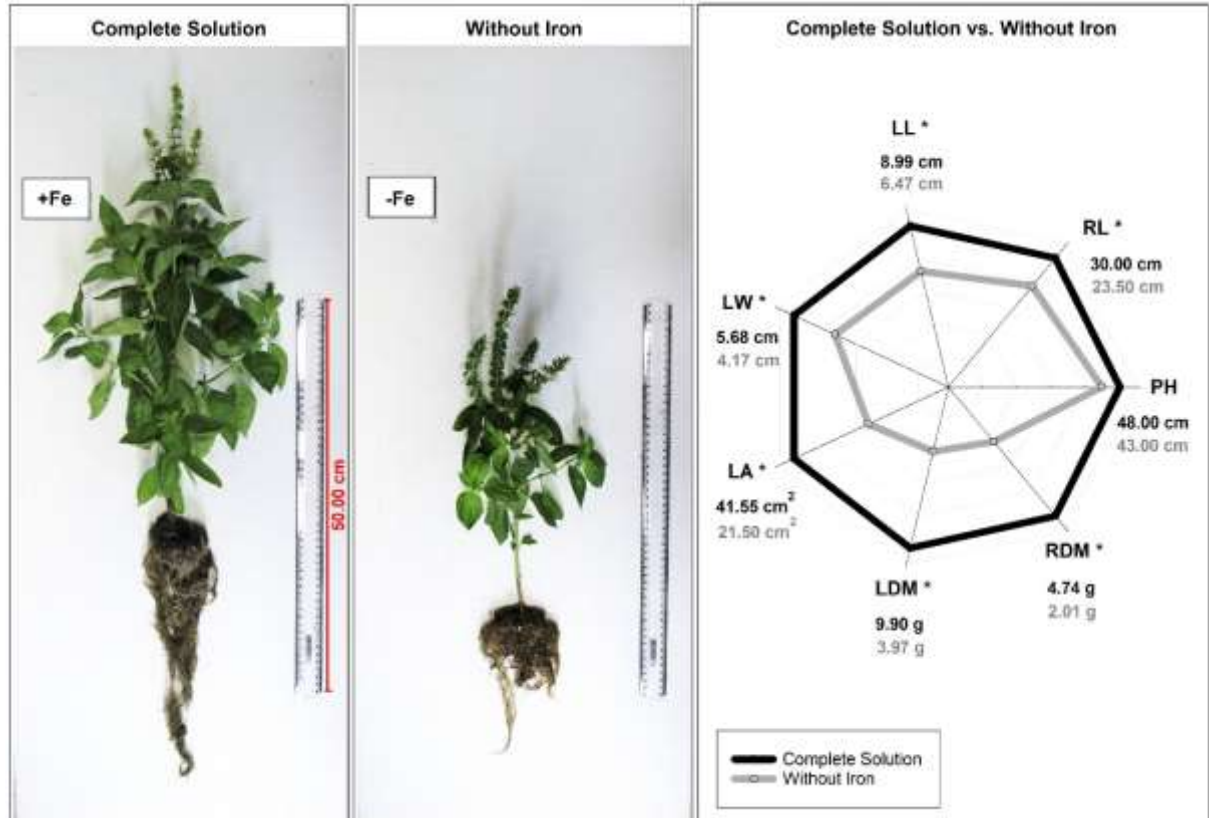


Figure 9. Comparison of growth parameters of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutrient solution with iron omission. PH: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass. * indicates that the treatment does not differ from the control (complete) (Dunnett, $p < 0.05$). For illustration, the plant from the repetition that most represented the treatment mean was chosen.

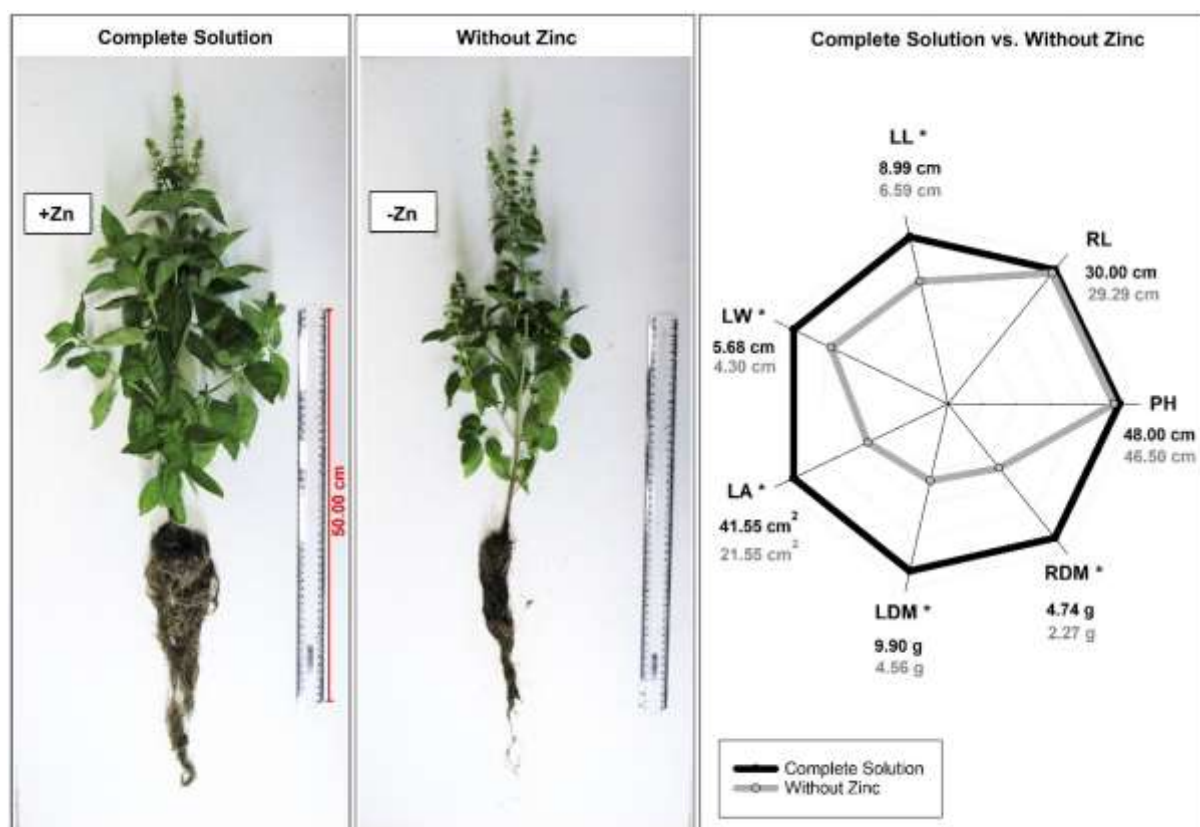


Figure 10. Comparison of growth parameters of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf, subjected to complete nutrient solution and a nutritive solution with zinc omission. PH: plant height, RL: root depth, LL: leaf length, LW: leaf width, LA: leaf area, LDM: leaf dry mass, and RDM: root dry mass. * indicates that the treatment does not differ from the control (complete) (Dunnett, $p < 0.05$). For illustration, the plant from the repetition that most represented the treatment mean was chosen.

4.3.2 Nutrient content in basil leaves grown in nutrient solutions with missing elements

Plants treated with P omission did not produce enough dry matter for nutrient content analysis. There was a significant difference between treatments (F-test, $p < 0.05$) for all nutrients (Table 2).

Table 1. Contents of essential elements in Italian Large Leaf basil under omission of essential nutrients.

Nutritional Solution	N	P	K g.kg ⁻¹	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe mg.kg ⁻¹	Zn
Complete	27.8	3.5	37.4	11.3	3.1	3.5	38.0	7.8	266.0	55.6
-N	*8.4 e	5.3 e	*26.5 d	11.5 b	*4.4 b	*2.7 c	36.3 d	*1.4 c	*749.0 a	50.9 d
-K	27.2 c	3.5 f	*8.0 e	11.6 b	*7.2 a	*4.7 a	36.0 d	8.3 b	310.0 d	*82.3 b
-Ca	30.9 b	*31.2 a	38.1 a	*4.6 e	*3.7 c	3.9 b	*49.7 a	8.8 b	*537.0 b	62.9 c
-Mg	*21.7 d	*6.2 e	*31.5 c	10.1 c	*2.4 e	3.4 b	44.0 b	*11.8 a	322.7 d	*76.8 b
-S	25.3 c	5.2 e	34.4 b	*12.8 a	3.6 c	*1.8 d	41.7 c	8.00 b	297.7 d	*71.6 c
-B	24.5 c	*7.8 d	*28.6 d	11.1 b	*3.7 c	3.1 c	34.7 d	*11.4 a	208.7 e	62.0 c
-Cu	30.0 b	*12.1 c	36.3 b	*9.2 d	3.1 d	3.7 b	44.3 b	*1.1 c	*427.0 c	*94.8 a
-Fe	*35.7 a	*16.5 b	35.4 b	*13.4 a	*4.6 b	4.0 b	40.3 c	*12.4 a	*163.7 e	*98.7 a
-Zn	26.0 c	*8.1 d	34.8 b	10.5 c	*3.7 c	3.8 b	*52.7 a	*12.6 a	*689.7 a	61.7 c
CV:	7.2	9.1	4.3	5.1	5.9	6.9	7.4	13.3	9.9	8.7

Means followed by the same letter in the column do not differ from each other (Skott-Knott, $p < 0.05$). * Nutrient omission treatment differs from control treatment (Dunnett, $p < 0.05$). CV: coefficient of variation.

The highest N content was recorded in the Fe omission (35.7 g.kg⁻¹ of N), surpassing the control (27.8 g.kg⁻¹ of N). N and Mg omission caused negative effects (-69.8 and -21.9%,

respectively), and K, Ca, S, B, Cu, and Zn omission did not affect N content in the leaves (Table 2).

The highest P content was recorded in the Ca omission (31.2 g.kg^{-1} of P). P content was also higher than the control (3.5 g.kg^{-1}) in the Mg, B, Cu, Fe, and Zn omission (6.2, 7.8, 12.1, 16.5, and 8.1 g.kg^{-1} , respectively). N, K, and S omission did not affect P content in the leaves (Table 2).

There was no positive effect of nutrient omission on K content in leaves, when compared with the control (37.4 g.kg^{-1} of K). Negative effects occurred in the N, K, Mg, and B omission (-29.1, -78.6, -8.4, and -23.5%, respectively). Ca, S, Cu, Fe, and Zn omission did not affect K content (Table 2).

The highest Ca contents occurred in the S and Fe omission (12.8 and 13.4 g.kg^{-1} of Ca, respectively), surpassing the control (11.3 g.kg^{-1} of Ca). Ca and Cu omission caused negative effects (-59.3 and -18.6%, respectively), while N, K, Mg, B, and Zn omission did not affect Ca content in the leaves (Table 2).

The highest Mg content occurred in the K omission (7.2 g.kg^{-1} of Mg). Mg content was also higher than the control (3.1 g.kg^{-1} of Mg) in the N, K, Ca, B, Fe, or Zn omission (4.4, 3.7, 3.7, 4.6, and 3.7 g.kg^{-1} of Mg, respectively). Mg omission caused a negative effect (-22.6%), while S or Cu omission did not affect Mg content in the leaves (Table 2).

The highest S content occurred in the K omission (4.7 g.kg^{-1} of Mg), surpassing the control (3.5 g.kg^{-1} of S). Negative effects occurred in the N and S omission (-22.9 and -48.6%, respectively), while K, Ca, Mg, B, Fe, and Zn omission did not differ from the control (3.5 g.kg^{-1} of S) for S content in the leaves (Table 2).

The highest B contents occurred in the Ca and Zn omission (49.7 and 52.7 mg.kg^{-1} of B, respectively), surpassing the control (38.0 mg.kg^{-1} of B). There were no negative effects caused by nutrient omission, and N, K, Mg, S, B, Cu, and Fe omission did not affect B content in the leaves (Table 2).

The highest Cu contents in the leaves occurred in the Mg, B, Fe, and Zn omission (11.8 , 11.4 , 12.4 , and 12.6 mg.kg^{-1} of Cu, respectively), surpassing the control (7.8 mg.kg^{-1} of Cu). While N and Cu omission caused negative effects (-82.0 and -85.9%, respectively), K, Ca, and S omission did not affect Cu content in the leaves (Table 2).

The highest Fe contents occurred in the N and Zn omission (749.0 and 689.7 mg.kg^{-1} of Fe, respectively). Fe content was also higher than the control (266.0 mg.kg^{-1} of Fe) in the Ca and Cu omission (537.0 and 427.0 mg.kg^{-1} , respectively). While Fe omission caused a negative effect (-38.6%), K, Mg, S, and B omission did not affect Fe content in the leaves (Table 2).

4.3.3 Color attributes and visual observation of nutritional deficiency symptoms

The evaluation of each attribute of the CIELAB space showed that there was a significant interaction between the factors "nutrient solution" and "foliar region" for L^* and b^* (F-test, $p < 0.05$) (Table 3).

L^* values range from 0 to 100, being darker the closer they are to 0 and white the closer they are to 100. For this attribute, a significant difference between the foliar regions was observed only in the omission of P and K. In these treatments, the edge region showed higher L^* values than the leaf blade, i.e., lighter edges and darker blades. The highest L^* values were found in the N omission, while the lowest L^* values were found in the control (Table 3).

Negative a^* values reflect the green color of the leaf, turning red when they become positive. For a^* , there was no difference in the values of the foliar regions between the treatments. In the data presented in Table 3, it is possible to observe that the omission of P and Ca obtained the lowest negative values (lower green tone), while the other treatments did not differ from the control.

Table 2. Color attributes of the regions of the lamina and leaf edge of *Ocimum basilicum* cultivar Italian Large Leaf in the metrics of the CIELAB system. L*: luminosity, a*: (+) red and (–) green, b: (+) yellow and (–) blue, C*: chromaticity, H*: Hue angle.

Nutrition Solution	L*		a*	b*		C*	H*
	Blade	Edge		Blade	Edge		
Complete	38.6 d A	39.4 e A	-21.6 b	28.0 c A	29.2 d A	35.8 c	127.1 a
-N	73.3 a A	73.4 a A	-21.6 b	58.2 a A	50.2 a B	58.7 a	111.4 b
-P	50.0 b B	58.9 b A	-15.5 a	36.3 b A	35.3 c A	39.3 c	113.1 b
-K	45.9 c B	55.2 b A	-21.1 b	34.4 c B	43.1 b A	44.4 b	118.7 a
-Ca	47.3 c A	49.0 c A	-15.0 a	28.9 b A	33.1 d A	35.5 c	111.3 b
-Mg	51.5 b A	52.7 c A	-24.1 b	38.8 b A	38.1 c A	45.5 b	122.1 a
-S	49.8 b A	52.6 c A	-23.6 b	36.8 b A	37.5 c A	44.1 b	122.1 a
-B	45.0 c A	46.1 d A	-23.8 b	34.5 b A	33.7 d A	42.6 b	124.4 a
-Cu	46.7 c A	51.2 c A	-24.2 b	36.3 b A	36.6 c A	43.9 b	123.5 a
-Fe	53.5 b A	54.1 b A	-25.9 b	42.3 b A	39.5 c A	48.7 b	122.1 a
-Zn	50.5 b A	51.4 c A	-24.2 b	39.3 b A	40.3 c A	46.8 b	121.3 a
CV (%)	8.46		30.04	13.71		14.90	6.18

Means followed by the same lowercase letter in the column do not differ from each other. For leaf regions, means followed by the same uppercase letter in the row do not differ from each other (Skott-Knott, $p < 0.05$). For a*, C*, and H*, there was no significant difference between leaf regions (F test, $p < 0.05$). CV: coefficient of variation.

Negative b* values reflect the blue color, turning yellow when they become positive. The values found were all positive, differing between the foliar regions only in the omission of N (higher yellow tone in the blade) and the omission of K (higher yellow tone in the edge). The b* values ranged from 27.96 to 58.22 in the blade and from 29.25 to 50.24 in the edge, with the control showing the lowest yellow tone and the N omission the highest yellow tone, in both leaf regions (Table 3).

The chroma index (C*) indicates intensity or purity in the shade. Higher values indicate that the color is more chromatic and has brightness, and lower values indicate that the color is achromatic and opaque. The lowest values were detected in the control (35.84), in the omission of P (39.29) and Ca (35.53), not differing between them. The highest C* value was found in the N omission (58.73), while the other treatments did not differ between them (Table 3).

All angle of hue (H*) values were found in the second quadrant (between yellow 90° and green 180°), with the lowest values, not differing between them, being observed in the N omission (111.35), P (113.10) and Ca (111.25). The other treatments ranged from 118.70 to 127.17, not differing between them (table 3).

Visually, it was observed that plants with N omission presented leaves with generalized yellowing from the time of transplanting to the pots, becoming more evident after 20 days after transplanting (Figure 1). The leaves of the K omission, after yellowing, presented necrotic spots of brown color on the edges of the leaves. This symptom was more evident after 30 days after transplanting to the pots and in older leaves (Figure 3). In the omission of Mg, the older leaves presented chlorotic spots in the space between the veins (leaf blade), with this symptom being more evident after 30 days after transplanting to the pots (Figure 5). There were no evidence of typical deficiency symptoms in the leaves of plants in the omission of S, B, Cu, Fe and Zn.

4.4. Discussion

The contents of N, Mg (Yang and Kim 2020), P (Zare et al. 2021) K, Ca, S (Yalddz et al. 2019), B (Paparozzi et al. 2021), Cu, Fe (Alibas et al. 2021) and Zn (Tolay 2021) in the dry leaves of the control plants were within the ranges reported in the literature for *O. basilicum*. The reductions in the observed growth parameters may have occurred due to the fact that

nutrients play an active role in the physiological and biosynthetic processes of plants. N is involved in the biosynthesis of amino acids, proteins, and enzymes found in the structure of nucleic acids and proteins (Silva et al. 2021; Taiz and Zeiger 2017). P, in addition to being a cofactor for enzymes involved in protein synthesis, is involved in energy transfer, as it is a constituent of ATP (adenosine triphosphate), which is a compound necessary for the processes of respiration and photosynthesis in plants, as well as for the formation of DNA and RNA (Taiz and Zeiger 2017). K, the most important cation in plant physiology, is the only nutrient that is not a constituent of biomolecules, but its presence is necessary for cell turgor and the maintenance of pH in many synthesis processes in the cytoplasm (Epron et al. 2016; Wang and Wu 2015). The consistent yellowing observed at the leaf margins under K omission is considered a universal response to the accumulation of putrescine, in a mechanism of K⁺ replacement, to maintain cytoplasmic pH (Chen et al. 2016).

As for the symptoms of Ca deficiency being more evident in younger parts, this is probably due to the low mobility of this nutrient in the plant (Bonomelli 2021). This immobility is related to the fact that it is not loaded into the sieve tubes, as it is a secondary messenger in the plant's responses to environmental and hormonal signals through the Ca-calmodulin protein complex, and its concentration is prioritized inside the cells (Thor 2019). The lack of supply for the formation of the pectin structures of newly formed cell walls causes young, apical and lateral meristematic tissues to become chlorotic, necrotic, and deformed (Fernandes et al. 2013). The darkened and necrotic appearance of roots deficient in Ca is due to the fact that the absence of Ca²⁺ in a complete nutrient solution exposes the roots to a highly toxic environment of potassium, magnesium, and other micronutrient ions (Duan et al. 2022).

Regarding the symptoms of Ca deficiency being more evident in younger plant parts, this is likely due to the low mobility of this nutrient within the plant (Bonomelli 2021). This immobility is related to the fact that calcium is not transported through the sieve tubes; instead, it acts as a secondary messenger in the plant's responses to environmental and hormonal signals through the Ca-calmodulin protein complex, with its concentration prioritized within the cells (Thor 2019). The lack of calcium for the formation of pectin structures in newly formed cell walls causes young, apical, and lateral meristematic tissues to become chlorotic, necrotic, and deformed (Fernandes et al. 2013).

Furthermore, Ca is crucial for root growth, as it regulates hormonal signaling, particularly auxin, and responds to environmental signals. It influences the formation and development of the primary root by affecting protein activity and cellular signals. Changes in calcium levels and signatures significantly impact root growth (Zhang et al. 2020). The darkened and necrotic appearance of calcium-deficient roots is due to the fact that the absence of Ca²⁺ in a complete nutrient solution exposes the roots to a highly toxic environment due to potassium, magnesium, and other micronutrient ions (Duan et al. 2022).

Mg deficiency caused growth deficit in plants, probably due to impairment of its specific functions of activating enzymes involved in respiration, photosynthesis, and DNA and RNA synthesis (Taiz and Zeiger 2017). In addition, the symptom of interveinal chlorosis in the leaves was certainly promoted by chlorophyll deficiency, since Mg is a central constituent of the molecule of this photosynthetic pigment. This is justified because the chlorophyll in the veins remains unchanged for longer periods of time than the chlorophyll in the leaf blade (between the veins), but in case of severe deficiency, the entire plant becomes chlorotic (Taiz and Zeiger 2017). The fact that the symptoms are more noticeable in older leaves is probably due to their mobility in plant tissue. Nutrients with greater mobility express deficiency symptoms first in older leaves, while nutrients with low mobility, such as Ca, express them first in younger leaves (Chaudhry et al. 2021).

The lack of visual manifestation of symptoms of S deficiency and micronutrients B, Cu, Fe and Zn, in the leaves, may have occurred due to the supply of minimum requirements of these nutrients, either from residues from the seed, reverse osmosis water, or vermiculite used as a substrate in the seedling formation before the application of treatments. This behavior was

reported by Barreto et al. (2022) in a study with *O. basilicum* cultivars under S deficiency. The requirement for S is considered low compared to other macronutrients, but its essentiality is justified by its important function in the constitution of amino acids and several coenzymes and proteins (Chorianopoulou and Bouranis 2022). As for B, the interruption of growth and root darkening observed in its deficiency, results from the inhibition of DNA synthesis, due to deficits in pyrimidine bases. This nutrient is involved in cell division, growth and vegetative differentiation of tissues, translation and transcription (Brdar-Jokanović 2020). Cu is an active transition metal involved in many redox processes in plant cells, is a component of regulatory proteins, and participates in electron transport in the respiratory and photosynthetic chains (Abbasifar et al. 2020). Fe, in addition to being an active cofactor of many enzymes necessary for the synthesis of plant hormones (such as ethylene), participates in the biosynthesis and stabilization of chlorophyll, is an integral component of the respiratory and photosynthetic electron transport system, and also acts as a cofactor in the carriers of the electron transport chain (Rai et al. 2021). Zinc is the only metal found in all six classes of enzymes, the oxidoreductases, lyases, isomerases, transferases, hydrolases, and ligases. In addition, it can help to increase the biosynthesis of chlorophylls and carotenoids and improve the photosynthetic apparatus of the plant (Abbasifar et al. 2020). The deficiencies of these micronutrients certainly had a negative impact on these important metabolic functions, consequently reducing the development of plants under omission of these nutrients.

The lack of one nutrient can affect the accumulation of another nutrient in the plant. Among the cases in which the deficiency of one nutrient decreased the content of another in basil leaves, the following stand out: the decrease in N due to Mg omission, the decrease in K due to N omission, as well as in the omission of Mg and B, the decrease in Ca due to Cu omission, and the decrease in S and Cu due to N omission. Mg is required for the activity of many enzymes involved in nitrogen metabolism, such as glutamine synthetase, glutamate synthetase, and glutamate dehydrogenase (Guo et al. 2016). Magnesium deficiency can reduce the demand and accumulation of other nutrients, including potassium, in the leaves. Mg is necessary for the activation of various enzymes involved in the transport of K to plant cells, especially to leaves and fruits. In the absence of Mg, the activity of these enzymes is compromised, resulting in reduced K absorption and translocation (Xie et al. 2021). The interaction between NO_3^- and K is often reported as positive (Coskun et al. 2016).

The supply of K can promote nitrogen metabolism and increase the synthesis of amino acids and proteins. Hu et al. (2016) found that K deficiency could reduce the activities of nitrate reductase, glutamine synthetase, and glutamate synthetase and inhibit nitrate absorption in cotton. N is a nutrient for protein synthesis, while S is required for the formation of certain amino acids, such as cysteine and methionine, which explains the synergistic action of these two nutrients in the plant (Coletto et al. 2017). Cu is required for the activity of the enzyme nitrate reductase, which is responsible for the reduction of nitrate to nitrite during nitrogen assimilation, so Cu deficiency negatively affects N absorption by the plant (Cui et al. 2022). Other studies report that K deficiency can affect the absorption and translocation of B in plants, leading to a decrease in B levels in the leaves (Keller and Shrestha 2013; Pogorzelski et al. 2020). Ca is known to affect the absorption and distribution of other nutrients in plants grown in nutrient solution, including Cu and Fe. However, it is important to note that the precise mechanisms by which Ca deficiency affects Cu are not fully understood and may vary depending on the plant species and growing conditions (Wairich et al. 2022). It was also observed that, in some cases, when there was a deficiency of one nutrient, the content of another increased and vice versa. This occurred for: Fe and N, Ca and Fe, Mg and Zn, Fe and Cu, Zn and Cu, Fe and Zn, as well as Ca and P. The most reported interaction in the literature is the synergistic interaction between N and Fe, Borlotti et al. (2012) report that despite the reduction in nitrate assimilation, cucumber plants showed an increase in foliar N concentration in response to Fe deficiency. The authors suggest that this increase may have been caused by the decrease in chlorophyll synthesis in the leaves due to Fe deficiency, which may have led to a

relative accumulation of N in these structures, corroborating with the results obtained in the present study. As for the negative interaction between Mg and Zn, Mg ions exhibit a rapid ligand exchange kinetics, which means that they can be easily replaced by other divalent metal ions, including Zn^{2+} (Bang et al. 2020). The antagonistic interactions between Fe, Cu, Zn occur because there is high competition for absorption sites in the root. Fe deficiency can increase the absorption of Cu and Zn by plants, since Fe deficiency can affect the synthesis of enzymes that regulate the absorption and transport of Cu and Zn (Ghasemi-Fasaei and Ronaghi 2008). The interaction between Ca and P is complex, with both antagonistic and synergistic effects. When there is an excess of Ca, it can compete with P for root absorption sites and on the other hand, when there is an excess of P it can precipitate with Ca and form insoluble compounds that cannot be absorbed by plant roots. Gunes et al. (1988) reported that the increase in the availability of one of these nutrients led to a decrease in the absorption of the other nutrient, corroborating with the results obtained in the present study. The interaction between Ca and Fe is widely reported as synergistic, however, an increase in the Ca content was observed in plants subjected to Fe omission and an increase in the Fe content was observed in plants subjected to Ca omission. The deficiency of one of these nutrients may have affected the translocation of the other through the plant, promoting an increase in the leaf contents. Despite being constantly controlled in the stock nutrient solution, a more acidic pH of the substrate in the absence of Ca, may have contributed to making Fe more soluble and easily available to plants (Colombo et al. 2013).

It is important to note that nutrient interactions can be complex and depend on several factors, including the plant species or cultivar and the environment in which it is grown. Regarding color analysis, there are many factors that can contribute to the differences between nutrient-deficient plants and plants treated with a complete nutrient solution. However, many reports in the literature point to a strong relationship between the concentration of chlorophyll pigments and the $L^*a^*b^*C^*H^*$ indices of leaves. This is corroborated by the color parameters found in *Ocimum basilicum* leaves. Cillis et al. (2019) observed that higher chlorophyll contents in faba bean (*Vicia faba* L.) leaves resulted in higher H^* values. Simko (2020) reported that a higher content of chlorophylls a and b in lettuce (*Lactuca sativa* L.) leaves resulted in lower L^* , a^* , b^* , and C^* values. Regarding leaf coloration under N omission, Kanash and Yakushev (2016) found that wheat (*Triticum aestivum* L.) leaves fertilized with lower N doses resulted in higher L^* , b^* , and C^* indices.

Chlorophyll is the main pigment responsible for the green color of leaves. It is composed of two types of chlorophylls: chlorophyll a and chlorophyll b. Chlorophyll a is the primary photosynthetic pigment, while chlorophyll b is involved in the transfer of electrons from photosystem II to photosystem I. The $L^*a^*b^*C^*H^*$ indices are a set of six color space indices that can be used to describe the color of leaves. L^* is the lightness index, a^* is the red-green index, b^* is the yellow-blue index, C^* is the chroma index, H^* is the hue angle index, and h^* is the hue angle index. The results of this study suggest that the color parameters of *Ocimum basilicum* leaves are affected by nutrient deficiency. The decrease in chlorophyll content in plants subjected to nutrient deficiency is likely the main cause of the observed changes in color.

4.5. Conclusion

Italian Large Leaf basil cultivar is sensitive to nutrient deficiency, as manifested by reduced dry weight and visible symptoms of deficiency in several nutrients.

N and P deficiency was especially detrimental, leading to stunted plants with widespread leaf yellowing. In addition, the omission of one nutrient affected the absorption and levels of other nutrients in the leaves.

The analysis of leaf physical characteristics also indicated significant differences between treatments, including changes in color, lightness, and chroma index, which

demonstrates the impact of nutrient deficiency on the visual quality of the plant and, consequently, its acceptance by consumers.

In summary, the results highlight the importance of providing a balanced nutrition for basil, both for its proper growth and development and for ensuring the sensory quality of the plant.

4.6. Bibliographic References

- Abbasifar A, Shahrabadi F and Valizadehkaji B (2020) Effects of green synthesized zinc and copper nano-fertilizers on the morphological and biochemical attributes of basil plant. *J Plant Nutr* 43(8):1104-1118. <http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2020.1724305>
- Azevedo A (2022) *Tratamentos.ad*: Package for Analyzing Experiments With Additional Witnesses. R package version 0.2.4. Available via DIALOG. <https://CRAN.R-project.org/package=Tratamentos.ad>
- Alibas I, Yilmaz A, Asik BB and Erdoğan H (2021) Influence of drying methods on the nutrients, protein content and vitamin profile of basil leaves. *J Food Compos Anal* 96:103758. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103758>
- Baczek K, Kosakowska O, Gniewosz M, Gientka I and Weglarz Z (2019) Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) Productivity and Raw Material Quality from Organic Cultivation. *Agronomy* 9(6):279. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy9060279>
- Bang TC; Husted S; Laursen KH; Persson DP; Schjoerring JK (2020) The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. *New Phytologist* 229(5):2446-2469. <http://dx.doi.org/10.1111/nph.17074>
- Barreto RF, Maier BR, Prado RM, Morais TCB and Felisberto G (2022) Silicon attenuates potassium and sulfur deficiency by increasing nutrient use efficiency in basil plants. *Sci Hortic* 291:110616. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110616>
- Bonomelli C, Alcalde C, Aguilera C, Videla X, Rojas-Silva X, Nario A and Fernandez V (2021) Absorption and mobility of radio-labelled calcium in chili pepper plants and sweet cherry trees. *Sci Agric* 78(6). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2020-0092>
- Borlotti A, Vigani G and Zocchi G (2012) Iron deficiency affects nitrogen metabolism in cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants. *Bmc Plant Biology* 12(1). <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2229-12-189>
- Brdar-Jokanović M (2020) Boron Toxicity and Deficiency in Agricultural Plants. *International Journal of Molecular Sciences* 21(4):1424. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms21041424>
- Cillis F, Leoni B, Massaro M, Renna M and Santamaria P (2019) Yield and Quality of Faba Bean (*Vicia faba* L. var. major) Genotypes as a Vegetable for Fresh Consumption: a comparison between italian landraces and commercial varieties. *Agriculture* 9(12):253. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture9120253>
- Chaudhry AH, Nayab S, Hussain SB, Ali M and Pan Z (2021) Current Understandings on Magnesium Deficiency and Future Outlooks for Sustainable Agriculture. *Int J Mol Sci* 22(4):1819. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms22041819>
- Chen D, Cao B, Qi L, Yin L, Wang S and Deng X (2016) Silicon-moderated K-deficiency-induced leaf chlorosis by decreasing putrescine accumulation in sorghum. *Annals Of Botany* 118(2):305-315. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcw111>
- Chorianopoulou SN and Bouranis DL (2022) The Role of Sulfur in Agronomic Biofortification with Essential Micronutrients. *Plants* 11(15):1979. <http://dx.doi.org/10.3390/plants11151979>
- Coletto I, Lapeña M, Rodríguez-Escalante J, Bejarano I, Glauser G, Aparicio-Tejo PM, González-Moro MB and Marino D (2017) Leaves play a central role in the adaptation of nitrogen and sulfur metabolism to ammonium nutrition in oilseed rape (*Brassica napus*). *Bmc Plant Biology* 17(1). <http://dx.doi.org/10.1186/s12870-017-1100-9>

- Colombo C; Palumbo G; He JZ; Pinton R and Cesco S (2013) Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes. *Journal Of Soils And Sediments* 14(3):538-548.
- Coskun D, Britto DT and Kronzucker HJ (2016) The nitrogen–potassium intersection: membranes, metabolism, and mechanism. *Plant Cell Environ* 10:2029–2041. <http://dx.doi.org/10.1111/pce.12671>
- Cui X; He H; Hu S; Zhang B and Cai H (2022) Synergistic Interaction between Copper and Nitrogen-Uptake, Translocation, and Distribution in Rice Plant. *Plants* 11(19):2612. <http://dx.doi.org/10.3390/plants11192612>
- Duan S, Zhang C, Song S, Ma C, Zhang C, Xu W, Bondada B, Wang L and Wang S (2022) Understanding calcium functionality by examining growth characteristics and structural aspects in calcium-deficient grapevine. *Sci Rep* 12(1). <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-06867-4>
- Epron D, Cabral OMR, Laclau JP, Dannoura M, Packer AP, Plain C, Battie-Laclau P, Moreira MZ, Trivelin PCO and Bouillet JP (2016) In situ (CO₂)-C-13 pulse labelling of field-grown eucalypt trees revealed the effects of potassium nutrition and throughfall exclusion on phloem transport of photosynthetic carbon. *Tree Physiology* 36(1):6-21. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/tpv090>
- Fernandes AR, Matos GSB and Carvalho JG (2013) Nutritional deficiencies of macronutrients and sodium in peach palm seedlings. *Rev Bras Frutic* 35(4):1178-1189. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-29452013000400029>
- Ferreira EB, Cavalcanti PP, Nogueira DA (2021) ExpDes: Experimental Designs Package_. R package version 1.2.2. Available via DIALOG. <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes>
- Furlani, PR (1998) Instructions for leaf vegetable cultivation using the NFT hydroponic technique. Technical Bulletin Instituto Agronômico de Campinas 168: 1-30.
- Ghasemi-Fasaei R and Ronaghi A (2008) Interaction of Iron with Copper, Zinc, and Manganese in Wheat as Affected by Iron and Manganese in a Calcareous Soil. *Journal Of Plant Nutrition* 31(5):839-848. <http://dx.doi.org/10.1080/01904160802043148>
- Gunes A; Alpaslan M and Inal A (1988) Critical nutrient concentrations and antagonistic and synergistic relationships among the nutrients of NFT-grown young tomato plants. *Journal Of Plant Nutrition* 21(10):2035-2047. <http://dx.doi.org/10.1080/01904169809365542>
- Guo W, Nazim H, Liang Z and Yang D (2016) Magnesium deficiency in plants: an urgent problem. *The Crop Journal* 4(2):83-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cj.2015.11.003>
- Hu W, Zhao W, Yang J, Oosterhuis DM, Loka DA and Zhou Z (2016) Relationship between potassium fertilization and nitrogen metabolism in the leaf subtending the cotton (*Gossypium hirsutum* L.) boll during the boll development stage. *Plant Physiol and Biochem* 101:113–123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.01.019>
- Jnanesha AC, Kumar A and Nagaraju S (2019) Agrotechnology for Ocimum species in India. *Agrobios Newsletter Insect Morphology, Physiology and Systematics* 17:67-68. Available via DIALOG. https://www.researchgate.net/publication/352979817_decision_support_system
- Kanash E and Yakushev V (2016) Evaluation of wheat nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images. *Journal Of Agricultural Informatics* 7(1):1. *Journal of Agricultural Informatics*. <http://dx.doi.org/10.17700/jai.2016.7.1.268>
- Keller M and Shrestha PM (2013) Solute accumulation differs in the vacuoles and apoplast of ripening grape berries. *Planta* 239(3):633-642. <http://dx.doi.org/10.1007/s00425-013-2004-z>
- Lambers H, Oliveira RS (2019) Mineral Nutrition. In: *Plant Physiological Ecology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29639-1_9

- Majdi C, Pereira C, Dias MI, Calhelha RC, Alves MJ; Rhourri-Frih B; Charrouf Z, Barros L, Amaral JS, Ferreira ICFR (2020) Phytochemical Characterization and Bioactive Properties of *Cinnamon* Basil (*Ocimum basilicum* cv. 'Cinnamon') and Lemon Basil (*Ocimum × citriodorum*). *Antioxidants* 9(5): 369. <http://dx.doi.org/10.3390/antiox9050369>
- Malavolta, E (1989) Evaluation of plant nutritional status: principles and applications. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato 201.
- Nascimento LFA, Blank AF, Sá Filho JCF, Pereira KLG, Nizio DAC, Arrigoni-Blank MF, Oliveira AMS, Souza VT (2020) Morphoagronomic characterization of *Lantana camara* L. germplasm. *Bioscience Journal* 36(4). <http://dx.doi.org/10.14393/bj-v36n4a2020-48080>
- Paparozi ET, Li Z, Blankenship EE and Conley ME (2021) Purple leaf basil plants express micronutrient deficiencies symptoms differently than green leaf basil plants. *Journal Of Plant Nutrition* 45(10):1466-1479. <http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2021.2014885>
- Pogorzelski DQ, Pinheiro DT, Queiroz V, Alexandre JC, Faria AF and Prieto MHE (2020) The retranslocation of boron is influenced by the nutritional status of cherry tomato plants. *Bioscience Journal* 36(3):1. <http://dx.doi.org/10.14393/bj-v36n3a2020-47706>
- Polyakova MN, Martirosyan YT, Diloarova TA, Kosobryukhov AA (2015) Photosynthesis and productivity of basil plants (*Ocimum basilicum* L.) under different irradiation. *Sel'Skokhozyaistvennaya Biologiya* 50(1):124-130. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya*. <http://dx.doi.org/10.15389/agrobiology.2015.1.124eng>
- Rai S, Singh PK, Mankotia S, Swain J, Satbhai SB (2021) Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. *Plant Stress* 1:100008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.stress.2021.100008>.
- Silva TC, Bertolucci SKV, Carvalho AA, Tostes WN, Alvarenga ICA, Pacheco FV, Assis RMA, Honorato AC and Pinto JEBP (2021) Macroelement omission in hydroponic systems changes plant growth and chemical composition of *Melissa officinalis* L. essential oil. *Journal of Applied Research on Medicinal And Aromatic Plants* 24:100297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jarmap.2021.100297>
- Simko I (2020) Predictive Modeling of a Leaf Conceptual Midpoint Quasi-Color (CMQ) Using an Artificial Neural Network. *Sensors* 20(14):3938. <http://dx.doi.org/10.3390/s20143938>
- Sipos L, Balázs L, Székely G, Jung A, Sárosi S, Radácsi P, Csambalik L (2021) Optimization of basil (*Ocimum basilicum* L.) production in LED light environments – a review. *Scientia Horticulturae* 289:110486. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110486>
- Sousa FF, Braga RM, Venturin N, Macedo RLG, Carlos L, Venturin RP (2018) Nutritional requirements of *Dipteryx alata* seedlings under nutritional limitation. *Ciência Florestal* 28(1):102-114. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509831586>
- Tabbert JM, Schulz H, Krähmer A. (2022) Facing energy limitations - approaches to increase basil (*Ocimum basilicum* L.) growth and quality by different increasing light intensities emitted by a broadband LED light spectrum (400-780 nm). *Front Plant Sci.* 24(13):1055352. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2022.1055352>
- Taiz L and Zeiger E (2017) *Plant Physiology and Development*, 6 edn, Artmed, Porto Alegre
- Thor K (2019) Calcium - Nutrient and Messenger. *Front Plant Sci* 10. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2019.00440>
- Tolay I (2021) The impact of different Zinc (Zn) levels on growth and nutrient uptake of Basil (*Ocimum basilicum* L.) grown under salinity stress. *Plos One* 16(2):0246493. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0246493>
- Wairich A; Conti L; Lamb T I, Keil R, Neves LO, Brunetto G, Sperotto RA and Ricachenevsky FK (2022) Throwing Copper Around: how plants control uptake, distribution, and accumulation of copper. *Agronomy* 12(5):994. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy12050994>
- Wang Y, Wu Wh (2015) Genetic approaches for improvement of the crop potassium acquisition and utilization efficiency. *Current Opinion In Plant Biology* 25:46-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pbi.2015.04.007>

- Xie K, Cakmak I, Wang S, Zhang F and Guo S (2021) Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. *The Crop Journal* 9(2):249-256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cj.2020.10.005>
- Yalddz G, Camldca M, Ozen F and Eratalar SA (2019) Effect of Poultry Manure on Yield and Nutrient Composition of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Commun Soil Sci Plant Anal* 50(7):838-852. <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2019.1589488>
- Yang T and Kim HJ (2020) Characterizing Nutrient Composition and Concentration in tomato, basil, and Lettuce based Aquaponic and Hydroponic Systems. *Water* 12(5):1259. <http://dx.doi.org/10.3390/w12051259>
- Zare M, Ganjeali A and Lahouti M (2021) Rosmarinic and caffeic acids contents in Basil (*Ocimum basilicum* L.) are altered by different levels of phosphorus and mycorrhiza inoculation under drought stress. *Acta Physiol Plant* 43(26):2-10. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03191-0>
- Zhang XP, Ma CX, Sun LR, Hao FS (2020) Roles and mechanisms of Ca^{2+} in regulating primary root growth of plants. *Plant Signal Behav* 15(5):1748283. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1748283>

5. ARTIGO 2

ANÁLISE GENÉTICA EM UMA POPULAÇÃO SEGREGANTE DO HÍBRIDO TRIPLO DE MANJERICÃO (ANISE X CINNAMON) X ITALIAN LARGE LEAF

Artigo formatado de acordo com as normas do periódico Ciência e Agrotecnologia

RESUMO

O manjeriço (*Ocimum basilicum* L.), uma planta aromática originária das regiões tropicais da África Central e do Sudeste Asiático, apresenta vários quimiotipos, além de uma ampla diversidade de cores, tamanhos e formatos das folhas e flores. Seus óleos essenciais (OEs) são ricos em compostos bioativos com ação anti-inflamatória, antioxidante, entre outras. Para o desenvolvimento de novas cultivares de manjeriço com propriedades bioativas, é fundamental o conhecimento dos parâmetros genéticos para assegurar o sucesso no programa de melhoramento genético. Objetivou-se no presente trabalho, estimar os parâmetros genéticos em uma população segregante da autofecundação do híbrido triplo de manjeriço (Anise x Cinnamon) x Italian Large Leaf. A população F₂ apresentou variabilidade genética significativa, e a análise de dissimilaridade com base nas características fenotípicas revelou a formação de seis grupos de genótipos. De forma geral, os coeficientes de variação genética (CV_g) e fenotípica (CV_f) das características avaliadas foram altos (>20%). A exceção foi luminosidade da flor, cor da folha e luminosidade da folha. Herdabilidade (h_a^2) alta (>60%) foi observada para 1,8-cineol (h_a^2 : 88,4%), linalol (h_a^2 : 95,9%), metil chavicol (h_a^2 : 97,0%), eugenol (h_a^2 : 70,6%), E-metil cinamato (h_a^2 : 72,8%), β -elemeno (h_a^2 : 98,0%), metil eugenol (h_a^2 : 98,8%), E- α -bergamoteno (h_a^2 : 80,1%), δ -cadineno (h_a^2 : 96,6%) e epi- α -cadinol (h_a^2 : 67,8%), ângulo hue da flor (h_a^2 : 95,1%), luminosidade (h_a^2 : 80,2%), cor (h_a^2 : 89,9%) e ângulo hue (h_a^2 : 99,8%) do caule, altura (h_a^2 : 80,5%) e diâmetro da copa (h_a^2 : 84,3%) e massa seca (h_a^2 : 81,7%). Alto ganho genético (24,8 a 722,8%) foi registrado para 1,8-cineol, linalol, metil chavicol, eugenol, E-metil cinamato, β -elemeno, metil eugenol, E- α -bergamoteno, δ -cadineno e epi- α -cadinol, cor e ângulo hue da flor, luminosidade, cor e ângulo hue do caule, altura da planta, diâmetro da copa, comprimento da folha, largura da folha, área foliar, massa seca, teor e rendimento de óleo essencial. Luminosidade da flor e cor da folha apresentaram moderado ganho genético (10,42 e 19,28%, respectivamente), enquanto ângulo hue e luminosidade da folha apresentaram baixo ganho genético (2,28 e 4,02%, respectivamente). Esses resultados confirmam que a seleção fenotípica é eficaz no melhoramento genético da população F₂ de *Ocimum basilicum*.

Termos para indexação: *Ocimum basilicum*; variabilidade genética; Melhoramento Genético.

GENETIC ANALYSIS IN A SEGREGATING POPULATION OF THE TRIPLE HYBRID BASIL (ANISE x CINNAMON) x ITALIAN LARGE LEAF

ABSTRACT

Basil (*Ocimum basilicum* L.), an aromatic plant native to the tropical regions of Central Africa and Southeast Asia, exhibits several chemotypes, as well as a wide diversity of leaf and flower colors, sizes, and shapes. Its essential oils (EOs) are rich in bioactive compounds with anti-inflammatory, antioxidant, and other properties. For the development of new basil cultivars with bioactive properties, understanding the genetic parameters is essential to ensure success in cultivation programs. The objective of the present work was to estimate the genetic parameters in a segregating population derived from the self-pollination of a triple hybrid of basil (Anise x Cinnamon x Italian Large Leaf). The F₂ population showed significant genetic variability and the dissimilarity analysis based on phenotypic characteristics revealed the formation of six groups of genotypes. In general, the coefficients of genetic (CV_g) and phenotypic variation (CV_p) for the evaluated traits were high (>20%), with the exception of flower brightness, leaf chroma, and leaf brightness. High heritability ($h_a^2 > 60\%$) was observed for 1,8-cineole (h_a^2 : 88.4%), linalool (h_a^2 : 95.9%), methyl chavicol (h_a^2 : 97.0%), eugenol (h_a^2 : 70.6%), E-methyl cinnamate (h_a^2 : 72.8%), β -elemene (h_a^2 : 98.0%), methyl eugenol (h_a^2 : 98.8%), E- α -bergamotene (h_a^2 : 80.1%), δ -cadinene (h_a^2 : 96.6%), and epi- α -cadinol (h_a^2 : 67.8%), as well as for flower hue angle (h_a^2 : 95.1%), stem brightness (h_a^2 : 80.2%), stem chroma (h_a^2 : 89.9%), stem hue angle (h_a^2 : 99.8%), plant height (h_a^2 : 80.5%), crown diameter (h_a^2 : 84.3%), and dry mass (h_a^2 : 81.7%). High genetic gains (24.8% to 722.8%) were recorded for 1,8-cineole, linalool, methyl chavicol, eugenol, E-methyl cinnamate, β -elemene, methyl eugenol, E- α -bergamotene, δ -cadinene, and epi- α -cadinol, as well as for flower chroma and hue angle, stem brightness, chroma, hue angle, plant height, crown diameter, leaf length, leaf width, leaf area, dry mass, essential oil content, and yield. Flower brightness and leaf chroma showed moderate genetic gains (10.42 and 19.28%, respectively), while hue angle and leaf brightness showed low genetic gains (2.28 and 4.02%, respectively). These results confirm that phenotypic selection is effective in the genetic improvement of the F₂ population of *Ocimum basilicum*.

Indexing terms: *Ocimum basilicum*; genetic variability; Plant Breeding.

5.1. Introdução

Originário das regiões tropicais da África Central e do Sudeste Asiático e pertencente à família Lamiaceae, o manjeriço (*Ocimum basilicum*) é uma erva aromática amplamente cultivada e apreciada no mundo inteiro devido aos seus agradáveis aromas e sabores (Romano et al., 2022; Abubashem et al., 2023; Spence, 2024). Para além do seu uso culinário, o manjeriço também desfruta de uma significativa importância medicinal e ornamental (Majdi et al., 2020). Por séculos, tem sido usado na medicina tradicional como um remédio natural para uma ampla gama de condições de saúde, incluindo problemas digestivos, dores de cabeça, resfriados, dores musculares (Mueen et al., 2015) e até mesmo como um agente calmante para reduzir o estresse e a ansiedade (Gebrehiwot et al., 2015). No aspecto ornamental, o manjeriço é valorizado por sua beleza estética e versatilidade (França et al., 2017).

A diversidade de usos do manjeriço é reflexo de suas múltiplas atividades biológicas que vão desde sua ação antioxidante e antimicrobiana até suas propriedades anti-inflamatórias e antitumorais (Mueen et al., 2015). Estudos destacam a importância do eugenol, um composto encontrado no óleo essencial (OE) de algumas cultivares de manjeriço, como a Italian Large Leaf, devido à sua forte atividade antioxidante (Couto et al., 2019; Barbosa et al., 2021). Esse achado ressalta a relevância do aumento dos níveis desse composto através do melhoramento

genético, visando cultivares com ainda mais benefícios à saúde e ao bem-estar humano. Além disso, o desenvolvimento de genótipos com teores elevados de outros compostos no OE oferece perspectivas igualmente promissoras, por exemplo, cultivares com alto teor de E-metil cinamato que têm sido utilizadas em diversos pratos e bebidas em alternativa à canela (Wesolowska e Jadczyk, 2016). Cultivares com alto teor de metil chavicol apresentam odor semelhante ao de erva-doce (Lewinsohn et al., 2000), enquanto plantas com elevados teores de eugenol e metil eugenol, apresentam aroma semelhante ao cravo-da-índia. Assim, a diversidade de compostos presentes no manjerição pode proporcionar uma gama de sabores e benefícios nutracêuticos.

As características morfológicas e agrônômicas do manjerição desempenham um papel importante no contexto do melhoramento genético, influenciando diretamente seu valor e utilidade (Chesnokov et al., 2020). Por exemplo, a altura e o diâmetro da planta são atributos essenciais que possibilitam o aprimoramento da arquitetura da planta para adensamento de plantio e facilidade na colheita mecanizada (Bucksch et al., 2017). A coloração das folhas, flores e caules desempenha um papel importante na atratividade ornamental do manjerição (França et al., 2017).

Os parâmetros genéticos são imprescindíveis para programas de melhoramento, pois ajudam a quantificar e entender a variabilidade genética (Ramalho e Pinto, 2008). A herdabilidade mede a proporção da variação fenotípica atribuída à variação genética, essencial para a eficácia da seleção (Borém et al., 2021). A variância genética e a variância fenotípica ajudam a entender a extensão da variabilidade dentro da população e a interação com o ambiente. O ganho genético estima o progresso esperado com a seleção, enquanto os coeficientes de variação genética e fenotípica medem a variabilidade relativa e total, respectivamente (Borém et al., 2021; Ramalho e Pinto, 2008). Esses parâmetros são fundamentais para implementar estratégias eficazes de melhoramento genético (Bernardo, 2020).

Estudos com *O. basilicum* no nordeste brasileiro têm proporcionado informações valiosas sobre sua caracterização genotípica e fenotípica. Blank et al. (2012) analisaram a capacidade de combinação, destacando os efeitos genéticos aditivos e não aditivos para teor de óleo essencial. Alves et al. (2018) investigaram a herança de características agrônômicas e químicas, revelando a influência de genes aditivos na produção de constituintes de óleo essencial. Esses estudos oferecem uma base importante e metodológica para a compreensão dos parâmetros genéticos do manjerição.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo estimar os parâmetros genéticos em uma população segregante oriunda da autofecundação do híbrido triplo (Anise x Cinnamon) x Italian Large Leaf.

5.2. Material e Métodos

5.2.1 Obtenção dos híbridos e da geração segregante

Inicialmente, para obtenção do híbrido simples foi realizado um cruzamento entre duas cultivares de manjerição: Anise e Cinnamon. A cultivar Anise foi escolhida como genitora feminina, enquanto Cinnamon, conhecido por seu elevado teor de E-metil cinamato no OE, foi o genitor masculino.

Para produzir o híbrido triplo, utilizou-se o híbrido simples (Anise x Cinnamon) como genitor feminino e a cultivar Italian Large Leaf, conhecida por sua presença de eugenol no OE, como genitor masculino. Os cruzamentos foram realizados por meio de emasculação dos botões florais da genitora feminina antes da antese, para evitar a autopolinização. Em seguida, procedeu-se à polinização manual, realizada com pólen de flores totalmente abertas do genitor masculino, coletado no mesmo dia. O pólen foi transferido para o estigma das flores emasculadas. Para garantir a pureza do cruzamento e evitar contaminação por pólen indesejado, as flores receptoras da genitora feminina foram imediatamente cobertas com sacos de TNT

(tecido não tecido) após a polinização. Logo após os cruzamentos, os sacos de TNT foram identificados individualmente com etiquetas, contendo informações sobre o cruzamento, como o código dos genitores e a data da polinização.

Após o crescimento e floração das plantas híbridas, as flores foram protegidas para evitar polinização cruzada, e a população segregante foi obtida a partir da autofecundação. Todos os cruzamentos e a autofecundação foram conduzidos em casa de vegetação, no Departamento de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal de Sergipe (UFS), no município de São Cristóvão, Sergipe.

5.2.2 Local e adubação

As plantas F₂ foram semeadas em bandejas contendo um substrato composto por solo de horizonte "A", húmus de minhoca e pó-de-coco, na proporção de 2:1:1, respectivamente. As mudas foram mantidas em casa de vegetação e, após 42 dias, transplantadas para o campo, na Fazenda Experimental 'Campus Rural' da Universidade Federal de Sergipe (UFS), localizada em São Cristóvão, Sergipe (10°55'25"S, 37°11'54"W, altitude de 47 m). As características físico-químicas do solo foram determinadas previamente, apresentando uma textura de areia franca, pH de 4,98 em água, teor de matéria orgânica de 16,5 g.dm⁻³, Fósforo: 1,90 mg.dm⁻³, Potássio (K): 45,8 mg.dm⁻³, Cálcio (Ca): 1,22 cmol_c.dm⁻³, Magnésio (Mg): 0,55 cmol_c.dm⁻³, Hidrogênio + Alumínio: 2,03 cmol_c.dm⁻³, Soma de bases: 1,77 cmol_c.dm⁻³, Capacidade de troca de cátions (CTC): 3,80 cmol_c.dm⁻³, Saturação de bases: 46,6%. A correção de acidez e adubação foram realizadas conforme Pinto et al. (2018).

As condições climáticas do período do experimento, entre setembro e dezembro de 2022, estão na Tabela 1.

Tabela 1. Dados meteorológicos registrados na área experimental no período de cultivo (setembro-dezembro de 2022).

Mês	Tmin (°C)	Tmax (°C)	AmpT (°C)	Tmed (°C)	Chuvvas (mm)	UR (%)
Setembro	22,00	30,00	8,00	26,00	46,20	67,65
Outubro	20,00	31,00	11,00	27,00	85,00	71,43
Novembro	22,00	31,00	9,00	26,61	33,20	69,06
Dezembro	23,00	34,00	11,00	28,00	34,60	69,33

Tmin= temperatura mínima, Tmax= temperatura máxima, AmpT= amplitude térmica, Tmédia= temperatura média, Chuvvas = precipitações acumuladas de chuva.

5.2.3 Avaliação das características morfológicas e agronômicas

As avaliações foram realizadas após a abertura da primeira flor de cada planta F₂ e de 50% das plantas da parcela dos genótipos parentais. A altura da planta (AP) foi medida em centímetros (cm), desde a base da planta até o ápice das inflorescências. O diâmetro da copa da planta (DP) foi obtido pela média (cm) de duas larguras perpendiculares da copa da planta. Foram coletadas seis folhas da região média dos ramos, seis flores desabrochadas e a região do caule do terço apical de cada planta para análise de cor. Essas partes foram escaneadas em um aparelho HP MFP 1005, conforme a metodologia prática proposta por Nascimento et al. (2020), para obter os valores Red, Green e Blue (RGB). Os valores RGB foram convertidos para o espaço de cores L* (luminosidade), C* (croma) e H* (ângulo Hue), proposto pela Comissão Internacional de Iluminação, utilizando o pacote "colorscience" no software R (versão 4.2.2). Essas transformações possibilitam uma análise detalhada das propriedades de cor. Através das seis folhas escaneadas, também foram obtidas as médias de comprimento de folha e largura de folha (cm), e de área foliar (cm²), utilizando o software IMAGEJ (Rasband, 2004).

Para obtenção de massa seca de parte aérea (MS: g/planta), foi feita a colheita das folhas e inflorescências de cada planta, que foram então acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada de ar a 40 ± 1 °C por cinco dias. Os OEs foram extraídos por hidrodestilação em aparelho Clevenger modificado conectado a um balão de fundo redondo por 120 min. Para tanto, foram utilizadas amostras de 10 g de massa seca e 2,0 L de água destilada.

O teor de OE (TOE) foi calculado através da fórmula: $\text{TOE (\%)} = (\text{Volume extraído da amostra} / \text{Massa seca da amostra}) \times 100$. O rendimento de OE (ROE) foi calculado através da fórmula: $\text{ROE (mL/planta)} = (\text{Volume extraído da amostra} \times \text{Massa seca da planta}) / \text{Massa seca da amostra}$.

5.2.4 Análise química de óleos essenciais

As análises químicas das amostras de OE foram feitas em cromatógrafo gasoso (Agilent Modelo 7890B) conectado a um espectrômetro de massas (Agilent Modelo 5977 A MSD). O cromatógrafo gasoso foi equipado com uma coluna capilar de sílica fundida DB-5MS (30 m de comprimento x 0,25 mm de diâmetro interno x 0,25 µm de espessura, Agilent). Hélio foi utilizado como gás de arraste, com vazão de 1 mL/min. A energia de ionização foi de 70 eV e a faixa de detecção de massa foi de 40 a 500 Da. Um amostrador automático (Agilent G4513A) foi utilizado para injetar 1 µL de cada amostra (10 mg do óleo essencial/mL de solução) no modo splitless. A temperatura inicial do forno foi de 35 °C (mantida por dois minutos), seguida de aumento de 10 °C/min até 100 °C (mantida por um minuto). Em seguida, a temperatura foi elevada de 3 °C/min até 250 °C, e mantida por três minutos. Os dados foram processados utilizando o software Mass Hunter (versão B 7.0, Agilent Technologies). Os componentes foram identificados por comparação de seus espectros de massa com aqueles presentes na base de dados do NIST (National Institute of Standards & Technology). O índice de retenção (IR) de cada componente foi calculado de acordo com o tempo de retenção de uma sequência de n-alceno (C8-C24), seguido de comparação dos valores obtidos com os presentes na literatura (Adams, 2017) e outras bases de dados online (PubChem e Chemspider).

5.2.5 Delineamento experimental e análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados com três repetições. O espaçamento utilizado foi de 0,5 m entre plantas e 0,6 m entre linhas. Cada bloco consistiu em 20 plantas dos genitores Anise, Cinnamon e Italian Large Leaf, assim como 20 plantas do híbrido simples, 20 plantas do híbrido triplo e 60 plantas da geração F₂.

Para investigar o efeito do genótipo e do bloco sobre a variabilidade do fenótipo, ajustou-se um modelo misto linear com efeito aleatório do bloco e efeito aleatório do genótipo. A análise foi realizada utilizando a função lmer do pacote lme4 no software R (versão 4.2.2). A máxima verossimilhança restrita (REML) foi utilizada para estimar os parâmetros do modelo.

O modelo foi formulado da seguinte maneira: $Y_{ij} = \beta_0 + u_{0i} + v_{0j} + \varepsilon_{ij}$

Onde: Y_{ij} representa a variável resposta observada para a i-ésima unidade experimental no j-ésimo bloco; β_0 é o intercepto médio do modelo, que representa o efeito fixo da média global da variável resposta; u_{0i} é o efeito aleatório do genótipo i, assumindo distribuição normal com média zero e variância σ^2_u ; v_{0j} é o efeito aleatório do bloco j, assumindo distribuição normal com média zero e variância σ^2_v ; ε_{ij} é o erro aleatório associado à i-ésima unidade experimental no j-ésimo bloco, assumindo distribuição normal com média zero e variância σ^2_ε .

A análise de deviance (Anadev) para avaliar a significância dos efeitos fixos e aleatórios no modelo foi realizada conforme Resende (2007). Primeiro, determinou-se o logaritmo do ponto de máximo da função de verossimilhança residual (L) para modelos com e sem o efeito testado. Em seguida, calculou-se a deviance (D) como $D = -2 \log L$ para ambos os modelos. A diferença entre as deviances dos modelos sem e com o efeito testado forneceu a razão de verossimilhança (LR): $LR = -2(\log L_{\text{modelo nulo}} - \log L_{\text{modelo comparado}})$. Por fim, a significância dessa diferença foi avaliada usando o teste qui-quadrado (X^2) com 1 grau de liberdade.

Os coeficientes de variabilidade genotípico e fenotípico foram calculados de acordo com Burton; Devane (1953):

- Coeficiente genotípico de variabilidade (CV_g) = $[\sqrt{(\sigma_g^2)}] / \text{média geral da característica} \times 100$
- Coeficiente fenotípico de variabilidade (CV_f) = $[\sqrt{(\sigma_f^2)}] / \text{média geral da característica} \times 100$

Onde, σ_g^2 = variância genotípica, σ_f^2 = variância fenotípica e σ_e^2 = Variância ambiental.

A herdabilidade no sentido amplo foi estimada com base na razão entre a variância genotípica e a variância fenotípica e foi expressa em porcentagem:

$$h_a^2 \% = \sigma_g^2 / \sigma_f^2 \times 100$$

Onde $h_a^2 \%$ = herdabilidade no sentido amplo, σ_g^2 = variância genotípica, σ_f^2 variância fenotípica.

O ganho genético na intensidade de seleção (k) a 5% (2,06) foi derivado usando a seguinte fórmula (Johnson et al., 1955): Ganho genético (GG) = $k \cdot \sigma_f \cdot h_a^2$

Onde: k = intensidade de seleção a 5% (k = 2,06); σ_f = desvio padrão fenotípico; h_a^2 = herdabilidade em sentido amplo.

Ganho genético expresso como porcentagem sobre a média (GGM): GG / média geral da característica x 100.

A análise de agrupamento hierárquico foi realizada com base na distância euclidiana, utilizando o método de Ward e o pacote "MultivariateAnalysis" do software R (versão 4.2.2). A determinação do número de clusters foi realizada com base no método de Mojena.

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1 Análise dos parâmetros genéticos

O modelo linear misto, que incluiu os efeitos do genótipo e do bloco, foi significativamente superior em explicar a variação das características estudadas comparado a modelos mais simples (Tabela 2). O efeito do genótipo foi estatisticamente significativo ($p < 0,05$) para a maioria das características, exceto para a luminosidade da folha (L*FOL), teor de óleo essencial (TOE) e teor de α -trans-bergamoteno, indicando variação significativa entre os genótipos para a maioria das características avaliadas (Tabela 2).

Os coeficientes de variação genética (CV_g) e fenotípica (CV_f) da população segregante (F_2) de *O. basilicum* (Tabela 3) refletem uma variabilidade genotípica significativa (Rasheed, 2023), como observada nas análises de deviances. De acordo com a classificação de Terfa; Gurmu (2020), os valores de CV_g e CV_f são categorizados como altos (>20%), moderados (entre 10 e 20%) e baixos (< 10%).

As características de diâmetro da copa da planta (DP), área foliar (AF), croma da flor (C*FL), luminosidade do caule (L*CA), croma do caule (C*CA), ângulo hue do caule (H*CA), massa seca de parte aérea (MS), teor (TOE) e rendimento (ROE) de óleo essencial, como também todos os teores dos dez componentes do óleo essencial, apresentam valores superiores a 20% de CV_g e CV_f , considerados altos. Isso indica uma considerável variação genética subjacente e uma resposta fenotípica visível a essa variação, reforçando a ideia de uma população com grande potencial para melhoramento genético. Além disso, as características de altura de planta (AP), comprimento de folha (CF), largura de folha (LF), croma da folha (C*FO) e ângulo hue da flor (H*FL), com CV_g e CV_f entre 10 e 20%, considerados moderados, demonstram variabilidade genética suficiente para a seleção eficiente. Em contraste, características como o ângulo hue da folha (H*FO) e luminosidade da folha (L*FO) e luminosidade da flor (L*FL) apresentam valores baixos (<10%) de CV_g e CV_f , indicando menor variabilidade genética e fenotípica, em outras palavras, a uniformidade observada no ângulo hue da folha pode limitar o impacto das práticas de seleção genéticas nessa variável, tornando-a menos sensível às mudanças ou melhorias em comparação com as outras características avaliadas.

Estudos realizados com cultivares (Pinto et al., 2018; Pinto et al., 2019), híbridos (Santana et al., 2018) e população segregante F_2 (Alves et al., 2018) de *O. basilicum* em Sergipe-Brasil, revelaram alta CV_g para AP, MS, TOE, ROE e teores de 1,8-cineol, linalol, metil chavicol, eugenol e E-metil cinamato. Na Índia, Singh et al. (2015) encontraram alto CV_g para AF e MS e CV_g moderado para AP e CF em *O. basilicum*. Esses achados corroboram com a significativa variabilidade genética detectada nessas características, indicando um alto

potencial para melhoramento genético, pois pode promover uma resposta mais eficiente e rápida à seleção fenotípica.

Tabela 2. Estimativas de deviance e variâncias para características morfoagronômicas e químicas de genótipos segregantes e seus parentais de (Anise x Cinnamom) x Italian Large Leaf, *Ocimum basilicum* (São Cristóvão, Sergipe, Brasil, 2022).

Efeito	Altura de Planta			Diâmetro de Planta			Comprimento de folha		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	1158,6	15,21**	$\sigma_g^2 = 74,24$	1207,9	8,45**	$\sigma_g^2 = 111,21$	485,58	8,97**	$\sigma_g^2 = 0,45$
Bloco	1143,3	0,00 ^{ns}		1199,7	0,24 ^{ns}		501,21	24,59**	
Modelo completo	1143,3		$\sigma_f^2 = 92,25$	1199,5		$\sigma_f^2 = 131,91$	476,61		$\sigma_f^2 = 1,17$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 18,01$			$\sigma_e^2 = 20,71$			$\sigma_e^2 = 0,72$
Efeito	Largura de folha			Área foliar			L* folha		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	305,09	9,74**	$\sigma_g^2 = 0,13$	843,64	9,36**	$\sigma_g^2 = 7,10$	587,42	0,9489 ^{ns}	$\sigma_g^2 = 2,28$
Bloco	318,63	23,27**		836,65	2,36 ^{ns}		586,48	0,00 ^{ns}	
Modelo completo	295,35		$\sigma_f^2 = 0,37$	834,28		$\sigma_f^2 = 12,04$	586,48		$\sigma_f^2 = 8,23$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 0,24$			$\sigma_e^2 = 4,94$			$\sigma_e^2 = 5,95$
Efeito	C* folha			H* folha			L* flor		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	707,87	12,33**	$\sigma_g^2 = 15,29$	520,39	6,59*	$\sigma_g^2 = 2,91$	739,41	10,01**	$\sigma_g^2 = 17,44$
Bloco	695,69	0,15 ^{ns}		515,77	1,9734 ^{ns}		730,54	1,15 ^{ns}	
Modelo completo	695,54		$\sigma_f^2 = 21,49$	513,8		$\sigma_f^2 = 4,49$	729,4		$\sigma_f^2 = 27,68$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 6,19$			$\sigma_e^2 = 1,58$			$\sigma_e^2 = 10,24$
Efeito	C* flor			H* flor			L* caule		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	834,3	6,62*	$\sigma_g^2 = 26,58$	1286,86	42,96**	$\sigma_g^2 = 2397,6$	825,69	22,01**	$\sigma_g^2 = 43,27$
Bloco	827,68	0,00 ^{ns}		1243,89	0,00 ^{ns}		805,48	1,80 ^{ns}	
Modelo completo	827,68		$\sigma_f^2 = 63,19$	1243,91		$\sigma_f^2 = 2521,2$	803,68		$\sigma_f^2 = 53,96$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 36,61$			$\sigma_e^2 = 123,60$			$\sigma_e^2 = 10,69$
Efeito	C* caule			H* caule			Massa seca aérea		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	846,78	27,54**	$\sigma_g^2 = 60,22$	1498,6	56,68**	$\sigma_g^2 = 18181,5$	1055,09	6,49*	$\sigma_g^2 = 40,42$
Bloco	819,24	0,00 ^{ns}		1441,9	0,00 ^{ns}		1049,8	1,20 ^{ns}	
Modelo completo	819,24		$\sigma_f^2 = 66,98$	1441,9		$\sigma_f^2 = 18202,7$	1048,6		$\sigma_f^2 = 49,43$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 6,76$			$\sigma_e^2 = 21,19$			$\sigma_e^2 = 9,01$
Efeito	Teor de OE			Rendimento de OE			% 1,8 - cineol		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	160,65	0,89 ^{ns}	$\sigma_g^2 = 0,19$	-85,85	6,68**	$\sigma_g^2 = 0,01$	462,81	11,50**	$\sigma_g^2 = 16,39$
Bloco	161,28	1,52 ^{ns}		-90,51	2,02 ^{ns}		451,32	0,00 ^{ns}	
Modelo completo	159,76		$\sigma_f^2 = 0,40$	-92,53		$\sigma_f^2 = 0,02$	451,32		$\sigma_f^2 = 18,55$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 0,21$			$\sigma_e^2 = 0,01$			$\sigma_e^2 = 2,16$
Efeito	% linalol			% metil chavicol			% eugenol		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	654,35	19,35**	$\sigma_g^2 = 248,74$	785,71	21,12**	$\sigma_g^2 = 973,40$	243,49	5,75*	$\sigma_g^2 = 1,08$
Bloco	635,01	0,00 ^{ns}		770,46	5,87*		237,75	0,01 ^{ns}	
Modelo completo	635,01		$\sigma_f^2 = 259,32$	764,59		$\sigma_f^2 = 1000,7$	237,74		$\sigma_f^2 = 1,53$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 10,59$			$\sigma_e^2 = 30,24$			$\sigma_e^2 = 0,45$
Efeito	% E - metil cinamato			% β - elemeno			% metil eugenol		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	442,01	49,49**	$\sigma_g^2 = 9,80$	240,45	13,55**	$\sigma_g^2 = 1,33$	691,01	22,50**	$\sigma_g^2 = 441,48$
Bloco	392,52	0,00 ^{ns}		232,89	5,99*		668,61	0,10 ^{ns}	
Modelo completo	392,52		$\sigma_f^2 = 12,87$	226,9		$\sigma_f^2 = 1,36$	668,51		$\sigma_f^2 = 446,84$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 3,06$			$\sigma_e^2 = 0,03$			$\sigma_e^2 = 5,36$
Efeito	% (E) - α - bergamotene			% δ - cadinene			% epi - α - cadinol		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	252,69	1,21 ^{ns}	$\sigma_g^2 = 1,39$	442,01	49,49**	$\sigma_g^2 = 0,65$	240,45	13,55**	$\sigma_g^2 = 2,05$
Bloco	251,65	0,17 ^{ns}		392,52	0,00 ^{ns}		232,89	5,99*	
Modelo completo	251,48		$\sigma_f^2 = 1,58$	392,52		$\sigma_f^2 = 0,67$	226,9		$\sigma_f^2 = 3,02$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 0,19$			$\sigma_e^2 = 0,02$			$\sigma_e^2 = 0,97$

ns = não significativo *e ** = significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste Qui-quadrado. LRT (χ^2) = teste de razão de verossimilhança. σ_g^2 : variância genotípica, σ_f^2 : fenotípica; σ_e^2 : ambiental. OE: óleo essencial.

Tabela 3. Herdabilidade no sentido amplo (h_a^2), coeficientes de variação genética (CV_g), fenotípica (CV_f), ganho genético (GG) e GGM (ganho genético como % da média) de uma população segregante de (Anise x Cinnamom) x Italian Large Leaf, *Ocimum basilicum*.

Parâmetro genético	CV_g	CV_f	h_a^2	GG	GGM
Altura de planta	15,79	17,60	80,48	16,11	29,52
Diâmetro de planta	27,23	29,66	84,30	19,75	51,01
Comprimento de folha	17,57	28,21	38,79	1,01	26,39
Largura de folha	17,18	28,50	36,32	0,53	24,79
Área foliar	33,27	43,31	59,00	4,35	54,33
Luminosidade da folha	3,71	7,04	27,71	1,64	4,02
Croma da folha	10,80	12,80	71,17	6,98	19,28
Ângulo hue da folha	1,35	1,67	64,89	2,89	2,28
Luminosidade da flor	6,16	7,76	63,01	7,07	10,42
Croma da flor	24,49	37,76	42,06	7,01	33,30
Ângulo hue da flor	15,71	16,11	95,10	106,15	34,05
Luminosidade do caule	20,90	23,34	80,19	12,90	40,96
Croma do caule	50,53	53,29	89,91	15,80	102,82
Ângulo hue do caule	51,17	51,20	99,88	271,39	103,00
Massa seca	63,87	70,63	81,77	11,78	118,29
Teor de óleo essencial	20,74	30,00	47,79	0,63	29,97
Rendimento de óleo essencial	33,78	44,93	56,53	0,17	54,44
1,8-cineol	52,44	55,78	88,40	7,61	98,50
Linalol	156,88	160,18	95,92	31,56	313,89
Metil chavicol	61,11	62,05	96,99	62,14	121,71
Eugenol	198,14	235,88	70,56	1,81	344,84
E-metil cinamato	297,91	351,48	72,80	7,76	722,81
β -elemeno	79,35	80,14	98,04	2,17	149,16
metil eugenol	213,41	214,71	98,80	40,99	416,30
E- α -bergamoteno	98,14	104,59	88,05	2,37	197,41
δ -cadineno	41,94	42,67	96,59	1,50	78,33
Epi- α -cadinol	30,32	36,81	67,82	2,38	50,32

Os valores de herdabilidade no sentido amplo (h_a^2) são categorizados em baixo, moderado e alto (Robinson et al., 1949; Smita; Kishori, 2018; Hossain et al., 2021) da seguinte forma: 0-30%: baixo, 30-60%: moderado, e 60% e acima: alto. Observou-se h_a^2 acima de 60%, considerada alta, para altura de planta (AP), diâmetro da copa da planta (DP), massa seca (MS), luminosidade da flor (L*FL), luminosidade do caule (L*CA), croma da folha (C*FO), croma do caule (C*CA), ângulo hue da folha (H*FO), ângulo hue da flor (H*FL) e ângulo hue do caule (H*CA). Moderada h_a^2 (entre 36 e 59%) foi observada para comprimento de folha (CF), largura de folha (LF), área foliar (AF), croma da flor (C*FL), teor de óleo essencial (TOE) e rendimento de óleo essencial (ROE) (Tabela 3). Esses resultados estão de acordo com altas h_a^2 , relatadas para *O. basilicum* cultivado em Sergipe-Brasil, para AP, DP, MS e teores de 1,8-cineol, linalol, metil chavicol, eugenol e E-metil cinamato (Alves et al., 2018; Pinto et al., 2018; Santana et al., 2018; Pinto et al., 2019). Considerando que a biossíntese de compostos voláteis envolve múltiplos genes e interações metabólicas com controle por enzimas e cofatores específicos, as altas herdabilidades observadas sugerem que a seleção de genótipos com perfis desejáveis pode preservar e transferir essas características para os descendentes, possibilitando o desenvolvimento de variedades com perfis metabólicos consistentes e eficientes. Outros autores relatam h_a^2 moderada para CF, LF, AF, TOE e ROE em manjeriço cultivado na Índia (Singh et al., 2015; Smita; Kishori, 2018; Gowda et al., 2019).

Estudos de parâmetros genéticos de coloração utilizando os atributos de luminosidade, croma e ângulo hue propostos pela Comissão Internacional de Iluminação ainda são incipientes para o gênero *Ocimum*. Em estudo com *Sassafras tzumu*, Li et al. (2019) encontraram alta h_a^2 nas características de luminosidade e cromaticidade das folhas. Da mesma forma, outros pesquisadores verificaram alta h_a^2 para os valores de cor em linhaça, feijão e gergelim (Possobom et al., 2015; Cui et al., 2021; Sadohara et al., 2021; Abtahi et al., 2022). Assim como as demais características morfoagronômicas e químicas, que também apresentam estimativas de alta h_a^2 , a luminosidade de flor e caule, bem como o croma e o ângulo Hue de folha, flor e caule indicam que a maior parte da variação observada nessas características é atribuída à variação genética entre os indivíduos (Tuhina-Khatun et al., 2015). Em contrapartida, a única característica que registrou baixa h_a^2 foi a luminosidade da folha, indicando que a variação

nessa característica é mais influenciada por fatores ambientais do que genéticos (Holland, 2014).

O ganho genético como porcentagem da média (GGM) foi classificado como baixo, moderado e alto, com valores de 0-10%, 10-20% e >20%, respectivamente (Obala et al., 2018; Tessema et al., 2022). No presente estudo, os valores de GGM foram altos para todos os dez componentes químicos analisados dos óleos essenciais (50,32% a 416,32%), bem como para as variáveis morfológicas AP, DP, CF, LF e AF (24,79% a 54,33%). As variáveis MS, TOE e ROE também apresentaram GGM alto (29,97% a 118,29%), assim como os atributos de cor C*FL, H*FL, L*CA, C*CA e H*CA (33,30% a 103%). Croma da folha (C*FO) e luminosidade da flor (L*FL) apresentaram GGM moderado, com valores de 19,28% e 10,42%, respectivamente. Já a luminosidade da folha (L*FO) e ângulo hue da folha (H*FO) apresentaram GGM baixo, com valores de 4,02% e 2,28%, respectivamente.

A variação herdável pode ser estimada com maior precisão quando a herdabilidade é estudada junto com o ganho genético. Estimativas de alta herdabilidade associadas a um alto avanço genético são um critério eficaz para seleção (Eid, 2009). A herdabilidade juntamente com o avanço genético também é útil na avaliação da natureza da ação gênica (Hossain et al., 2021).

Em geral, considera-se que se um caráter for governado por ação genética não aditiva, ele terá alta herdabilidade, mas baixo avanço genético como foi observado para H*FO, enquanto se o caráter for governado por ação genética aditiva, tanto a herdabilidade quanto o avanço genético seriam altos (Eid, 2009; Hossain et al., 2021), como foi observado em AP, DP, H*FL, L*CA, C*CA, H*CA, MS e para os teores de 1,8-cineol, linalol, metil chavicol, eugenol, E-metil cinamato, β -elemeno, metil eugenol, E- α -bergamoteno, δ -cadineno e epi- α -cadinol.

5.3.2 Controle genético e a biossíntese dos constituintes dos óleos essenciais

A análise dos óleos essenciais revelou a ausência de E-metil cinamato e eugenol nos híbridos simples e triplos (Tabela 4). Essa ausência pode ser atribuída à complexidade do controle genético e dos processos de hibridação. A biossíntese desses compostos envolve enzimas específicas, como as O-metiltransferases (OMTs) e prenilttransferases, cuja atividade é regulada por genes específicos (Koeduka, 2014). A hibridação entre linhagens distintas pode ter causado recombinações genéticas que interromperam as vias metabólicas necessárias para a produção desses compostos (Louveau et al., 2011). Na população F₂, a segregação genética pode ter levado à perda de combinações genéticas essenciais, resultando na ausência de E-metil cinamato (Koeduka et al., 2009).

A biossíntese de E-metil cinamato e eugenol ocorre na via dos fenilpropanoides, que envolve a metilação do ácido cinâmico para formar E-metil cinamato e uma série de reações para derivar o eugenol. O metil cinamato é produzido pela atividade da enzima ácido p-cumárico/ácido cinâmico carboxil metiltransferase (CCMT), que tem uma preferência única por cinamato e p-cumarato (Kapteyn et al., 2007). As enzimas eugenol O-metiltransferase (EOMT) e chavicol O-metiltransferase (CVOMT) são responsáveis pela conversão de eugenol em metil eugenol e metil chavicol, respectivamente (Lewinsohn et al., 2000; Kapteyn et al., 2007; Reddy et al., 2021) (Figura 1). Alterações pontuais em genes codificadores e presença de co-fatores regulatórios podem alterar a especificidade do substrato e a expressão dos compostos desejados (Koeduka, 2014). A via dos fenilpropanoides é altamente regulada, e recombinações alélicas podem redirecionar a produção para metil chavicol e metil eugenol, suprimindo a formação de eugenol e E-metil cinamato nos híbridos.

Tabela 4. Teores (%) dos principais constituintes químicos do óleo essencial de 71 genótipos de manjeriço, compostos por 3 cultivares, 2 híbridos e 66 indivíduos segregantes da autofecundação de um híbrido triplo, cultivados no município de São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

Genótipo	Componentes (%)										
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	IRR _o IRR _i	1029 1032	1093 1099	1184 1196	1351 1356	1373 1376	1383 1389	1397 1401	1430 1436	1511 1513	1638 1640
OB-004		6,88	0,29	59,60	1,06	-	1,84	4,54	1,70	3,20	6,98
OB-005		2,4	-	78,11	-	-	0,84	1,22	0,60	2,24	6,57
OB-006		5,73	6,21	70,53	-	-	1,07	0,68	1,45	2,39	4,96
OB-007		10,37	13,66	1,05	1,06	-	1,22	51,94	1,57	2,83	6,44
OB-008		6,50	45,75	24,68	-	-	2,57	-	-	3,02	8,12
OB-017		10,52	2,40	76,13	-	-	-	0,81	3,24	0,98	2,99
OB-027		4,74	5,84	73,99	-	-	1,70	0,83	1,20	1,82	3,98
OB-031		11,77	27,02	29,19	-	-	2,30	0,35	-	2,99	8,37
OB-032		9,62	3,25	71,84	-	-	0,52	1,99	0,99	1,90	4,14
OB-034		4,31	-	76,1	-	-	0,76	6,44	1,33	2,20	4,50
OB-035		7,84	16,76	55,94	-	-	1,88	0,36	-	2,34	6,05
OB-036		4,18	-	80,85	-	-	1,35	0,74	1,41	1,74	3,87
OB-037		4,95	-	0,96	-	-	1,17	80,97	1,69	2,28	4,48
OB-039		10,63	3,31	74,52	-	-	1,06	0,61	-	0,89	3,21
OB-040		5,84	-	2,02	-	-	2,10	74,58	2,01	1,80	5,25
OB-043		8,06	10,33	42,55	-	-	4,33	0,37	-	3,52	10,22
OB-047		6,5	-	87,29	-	-	-	0,63	0,76	1,34	2,68
OB-048		12,93	8,59	0,91	1,02	-	1,93	49,53	1,88	2,81	7,75
OB-049		8,81	3,44	76,56	-	-	0,65	1,37	0,83	1,89	3,99
OB-050		9,87	-	73,53	-	-	0,7	0,63	0,77	2,08	4,58
OB-051		5,25	-	80,96	-	-	1,34	2,79	0,64	1,15	3,09
OB-059		4,11	12,34	73,53	1,27	-	0,82	0,62	-	1,79	-
OB-060		2,97	-	88,86	-	-	0,86	0,68	1,20	1,74	3,68
OB-069		3,28	3,47	-	3,42	-	4,74	62,82	1,32	2,68	6,10
OB-071		4,43	3,21	66,46	-	-	0,77	5,31	5,57	2,53	5,96
OB-072		12,44	57,2	0,39	-	-	1,02	-	2,73	1,58	5,55
OB-074		16,08	1,92	1,33	1,87	-	3,19	49,39	1,06	3,10	6,85
OB-076		12,29	0,97	1,30	0,96	-	3,42	62,59	1,08	1,55	5,17
OB-080		10,08	3,42	78,55	-	-	0,57	-	-	0,91	2,47
OB-081		1,73	4,92	71,59	-	-	2,61	3,62	0,90	1,88	4,64
OB-082		8,38	-	79,38	-	-	-	2,61	0,84	1,7	3,91
OB-085		5,02	-	76,27	-	-	1,33	2,71	1,63	2,11	4,70
OB-088		13,8	68,06	-	-	-	1,33	-	-	2,08	5,20
OB-089		5,62	4,03	75,09	-	-	0,72	0,83	5,54	0,60	3,32
OB-090		2,39	-	86,32	-	-	0,87	0,75	1,03	1,84	4,52
OB-091		0,62	0,59	83,29	-	-	1,43	3,45	-	2,14	4,68
OB-092		5,78	2,12	78,64	-	-	0,99	3,14	0,94	1,89	4,59
OB-094		6,73	1,59	76,41	-	-	1,63	2,58	1,01	1,09	2,86
OB-095		10,5	39,49	24,18	-	-	2,98	0,51	-	1,35	4,12
OB-096		11,37	-	74,34	-	-	0,63	0,71	0,62	1,67	3,71
OB-097		6,88	4,33	70,03	-	-	1,29	0,58	1,00	2,36	5,35
OB-107		1,36	3,93	84,88	-	-	0,77	0,68	-	1,48	3,32
OB-113		4,65	-	83,27	-	-	0,65	1,24	-	1,46	4,44
OB-119		3,26	-	80,01	-	-	1,78	5,51	1,01	1,93	4,27
OB-122		9,03	26,22	33,39	-	-	2,15	0,26	-	2,84	7,21
OB-123		6,10	-	64,73	-	-	0,99	1,23	3,08	1,93	5,44
OB-124		10,27	10,98	57,04	-	-	1,57	2,44	1,07	1,52	5,01
OB-125		23,55	17,43	0,63	3,67	-	4,50	0,48	-	4,02	0,79
OB-126		14,49	51,71	0,59	4,82	-	0,32	-	-	2,81	8,47
OB-128		7,05	2,00	3,39	-	-	4,87	62,11	-	3,26	5,73
OB-129		4,28	0,61	78,31	-	-	0,84	2,82	1,18	2,87	5,63
OB-134		9,21	0,81	80,33	-	-	0,73	4,19	-	0,72	2,17
OB-135		16,78	8,74	41,74	-	-	2,34	-	-	2,42	7,22
OB-142		9,96	6,71	75,20	-	-	-	1,04	0,90	0,64	4,01
OB-143		9,18	4,72	70,27	-	-	0,92	5,19	0,77	1,36	3,98
OB-144		16,6	0,99	1,23	1,47	-	1,91	60,56	1,65	1,84	4,22
OB-145		5,83	0,74	83,56	-	-	-	0,81	2,77	1,2	3,51
OB-147		5,39	-	58,91	-	-	0,62	16,7	2,31	-	3,3
OB-148		8,06	2,79	70,86	-	-	-	5,63	1,08	1,34	3,89
OB-149		4,49	6,57	71,08	-	-	0,90	3,09	0,74	1,76	4,63
OB-150		-	6,78	58,78	-	-	1,43	2,60	4,11	3,42	4,78
OB-153		12,85	6,96	-	7,39	-	2,41	52,71	-	1,60	4,28
OB-160		6,37	-	89,56	-	-	-	2,07	-	-	2,00
OB-162		8,58	3,46	78,32	-	-	0,85	-	0,30	1,06	2,91
OB-167		17,64	10,91	36,64	-	-	3,98	-	-	1,81	4,63
OB-177		6,20	69,94	-	0,56	-	1,70	0,52	0,42	1,95	5,98
Anise		6,69	-	63,22	0,09	0,09	1,63	0,72	1,33	2,02	4,87
Cinnamon		2,25	22,36	13,94	1,49	25,66	1,41	-	0,71	1,71	4,78
Italian Large Leaf		8,13	38,08	24,77	2,06	-	1,68	0,65	4,73	2,13	5,81
Híbrido simples		5,55	6,43	62,13	-	-	1,03	1,54	1,14	1,86	4,28
Híbrido triplo		8,82	5,40	32,50	-	-	1,27	24,20	1,22	1,62	3,97

Compostos: C1: 1,8 cineol; C2: linalol; C3: metil chavicol; C4: eugenol; C5: E - metil cinamato; C6: β - elemeno; C7: metil eugenol; C8: E- α -bergamoteno; C9: δ -cadineno; C10: epi- α -cadinol. IRRo: Índice de Retenção Relativa - observado; IRRI: Índice de Retenção Relativa - literatura (Adams, 2017).

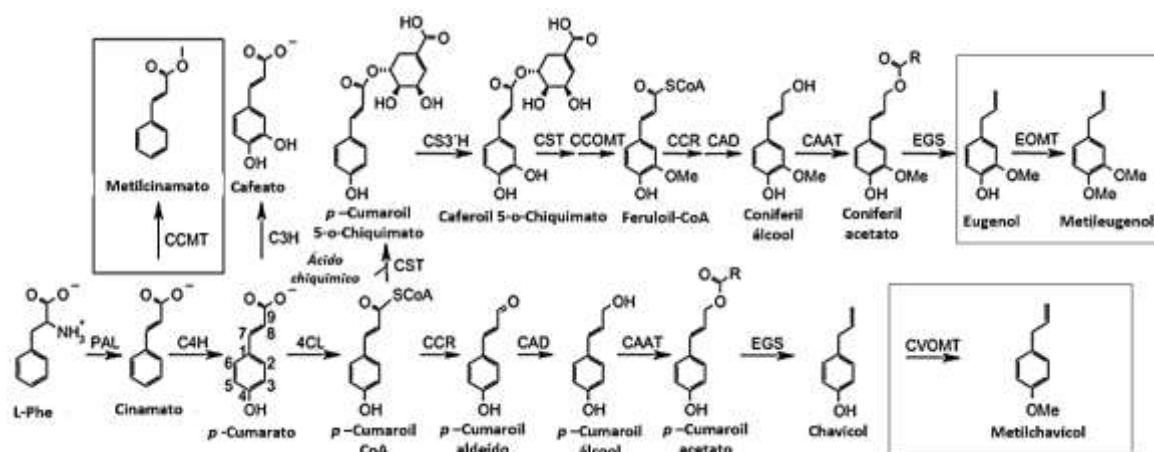


Figura 1. Via de biossíntese de E-metil cinamato, metilchavicol, eugenol e metileugenol em *Ocimum basilicum*. Adaptado de Kapteyn et al. (2007). Abreviações de enzimas: PAL, fenilalanina amônia liase; CCMT, p-cumarato/cinamato carboxil metiltransferase; C4H, cinamato 4-hidroxilase; 4CL, 4-cumarato:CoA ligase; C3H, p-cumarato 3-hidroxilase; CST, p-cumaril chiquimato transferase; CS3'H, p-cumaril 5-O-shiquimato 3'-hidroxilase; CCOMT, cafeoil-CoA O -metiltransferase; CCR, cinamoil-CoA redutase; CAD, álcool cinâmico desidrogenase; CAAT, álcool coniferílico acetil transferase; EGS, eugenol (e chavicol) sintase; EOMT, eugenol O -metiltransferase; CVOMT, chavicol O -metiltransferase.

5.3.3 Análises de dissimilaridade e de componentes principais

Para as análises de dissimilaridade e de componentes principais, utilizou-se os valores dos 60 genótipos com maior produção de MS e ROE, juntamente com a média de cada uma das cultivares e de cada híbrido. A Análise de Componentes Principais (ACP) revelou que as cinco primeiras componentes explicaram 51,27% da variância total nos dados (Tabela 5). A ACP é uma técnica estatística que reduz a dimensionalidade de conjuntos de dados complexos, transformando variáveis correlacionadas em componentes principais (CPs) não correlacionadas. As primeiras CPs capturam as maiores diferenças entre as amostras, destacando as características mais influentes (Jolliffe e Cadima, 2016).

Tabela 5. Autovalor, explicação dos componentes principais e correlações entre variáveis e componentes principais.

Autovalor	Explicação dos componentes principais									
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10
	% Explicação	% Explicação	% Explicação	% Explicação	% Explicação	% Explicação	% Explicação	% Explicação	% Explicação	% Explicação
% Explicação	16,87	13,62	10,92	9,86	7,48	6,63	5,09	4,66	3,92	3,84
% Acumulado	16,87	30,50	41,42	51,27	58,75	65,38	70,48	75,13	79,05	82,89
	Correlação entre as variáveis e os componentes principais									
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10
TO	0,11	0,23	0,22	0,10	0,08	0,85	-0,15	0,12	0,05	-0,04
RO	0,32	0,26	-0,52	0,03	-0,03	0,60	-0,21	0,11	0,09	0,12
LFO	-0,60	0,08	-0,24	0,55	0,38	0,03	0,09	-0,13	0,00	0,00
CFO	-0,65	0,07	-0,27	0,57	0,34	0,00	0,03	-0,04	0,00	-0,02
HFO	0,54	-0,03	0,35	-0,60	-0,24	-0,14	0,01	0,15	-0,03	-0,03
LFL	-0,75	0,02	-0,21	-0,20	-0,30	-0,12	0,06	-0,12	0,00	0,00
CFL	0,60	0,05	0,28	0,05	0,26	0,15	0,01	-0,29	-0,15	0,11
HFL	0,76	-0,05	-0,01	0,30	0,39	-0,17	0,11	0,06	0,11	-0,18
LCA	-0,81	0,16	-0,03	-0,27	-0,25	0,05	-0,05	0,18	-0,02	-0,04
CCA	-0,71	-0,06	0,04	-0,23	-0,30	0,22	-0,08	-0,25	-0,12	0,34
HCA	0,40	-0,22	0,03	0,20	-0,08	0,10	0,10	-0,60	-0,24	0,36
AP	0,24	0,17	-0,68	0,19	-0,12	-0,08	0,18	0,04	-0,09	0,16
DP	0,52	0,23	-0,61	-0,09	-0,35	0,08	-0,02	0,08	-0,03	0,20
CF	-0,15	0,32	-0,19	-0,58	0,64	0,07	-0,13	-0,08	-0,12	0,02
LF	-0,16	0,37	-0,18	-0,57	0,64	0,09	-0,09	-0,10	-0,02	0,02
AF	0,04	0,12	-0,48	-0,60	0,16	-0,24	0,24	-0,15	-0,20	-0,22
MS	0,28	0,12	-0,83	-0,09	-0,15	-0,07	-0,12	0,07	0,12	0,11
C01	0,14	-0,49	-0,31	-0,08	-0,12	0,27	0,33	-0,12	-0,34	-0,35
C02	-0,17	-0,44	0,10	-0,24	0,03	0,52	0,45	0,19	0,08	-0,04
C03	0,00	0,86	0,15	0,21	-0,02	-0,26	0,14	0,08	-0,11	0,20
C04	-0,09	-0,61	-0,28	0,02	-0,03	0,06	0,18	-0,33	0,10	-0,13
C05	0,08	-0,06	0,10	-0,34	0,06	-0,04	0,14	-0,39	0,75	0,20
C06	-0,16	-0,73	-0,19	-0,03	0,09	-0,13	-0,26	0,15	0,07	0,10
C07	0,09	-0,45	-0,25	0,05	-0,02	-0,07	-0,72	-0,16	0,08	-0,28
C08	0,03	0,14	0,29	-0,06	-0,14	0,01	-0,41	-0,29	-0,30	-0,06
C09	0,02	-0,67	-0,11	0,03	0,31	-0,11	-0,05	0,25	-0,11	0,38
C10	0,00	-0,60	0,15	-0,20	0,25	-0,07	-0,02	0,27	-0,20	0,37

AP: Altura de planta (cm), DP: diâmetro de planta (cm), CF: comprimento de folha (cm), LF: largura de folha (cm), AF: área foliar (cm²), L*FO: nível de luminosidade na folha, C*FO: nível de cromina na folha, H*FO: grau do ângulo hue na folha, L*FL: nível de luminosidade na flor, C*FL: nível de cromina na flor, H*FL: grau do ângulo hue na flor, L*CA: nível de luminosidade no caule, C*CA: nível de cromina no caule, H*CA: grau do ângulo hue no caule, MS: massa seca de parte aérea (g/planta), TO: teor de óleo essencial (%), RO: rendimento de óleo essencial (mL/planta), C1: % 1,8 - cineol, C02: % metil chavicol, C04: % eugenol, C05: % (E)-metil cinamato, C06: % β-elemeno, C07: % metil eugenol, C08: % (E)-α-bergamoteno, C09: % δ-cadineno, C10: % epi-α-cadinol.

A primeira componente principal (CP1) capturou a maior parte da variância total, com 16,87%. As maiores correlações observadas em L^*CA ($r = -0,81$), H^*FL ($r = 0,76$), L^*FL ($r = -0,75$) e C^*CA ($r = -0,71$) indicam que a luminosidade e as características cromáticas das flores e caules são fatores importantes na estruturação da CP1. Isso sugere que o espaço de cor proposto pela Comissão Internacional de Iluminação facilita a avaliação precisa da coloração, permitindo a seleção de genótipos com características de coloração consistentes e desejáveis (Yaldiz; Camlica, 2024). Na CP2, que capturou 13,62% da variância total, as variáveis mais correlacionadas foram os constituintes do óleo essencial (OE): metil chavicol ($r = 0,86$), β -elemeno ($r = -0,73$), δ -cadineno ($r = -0,67$) e eugenol ($r = -0,61$). Isso indica que a composição química do OE é um fator preponderante nesta componente, destacando a importância da seleção de genótipos com perfis de OEs específicos. Na CP3, responsável por 10,92% da variância, as maiores contribuições foram das variáveis morfológicas altura da planta (AP, $r = -0,68$) e largura da planta (LP, $r = -0,61$), e das variáveis agrônomicas massa seca (MS, $r = -0,83$) e rendimento de óleo (RO, $r = -0,52$). Isso sugere que características de crescimento e rendimento são importantes nesta componente. A CP4 capturou 9,86% da variância total, com correlações significativas com características foliares como croma da folha (H^*FO , $r = -0,60$), área foliar (AF, $r = -0,60$), comprimento foliar (CF, $r = -0,58$) e largura foliar (LF, $r = -0,57$).

Observou-se a formação de seis grupos no dendrograma (Figura 2), onde o grupo 1 conteve quatorze genótipos F_2 (OB-039, OB-047, OB-049, OB-050, OB-059, OB-060, OB-081, OB-091, OB-094, OB-096, OB-107, OB-113, OB-142 e OB-149), o grupo 2 conteve dez genótipos F_2 (OB-017, OB-71, OB-085, OB-092, OB-123, OB-124, OB-129, OB-134, OB-145 e OB-150) e a cultivar Anise, o grupo 3 conteve dezesseis genótipos F_2 (OB-004, OB-005, OB-006, OB-027, OB-032, OB-034, OB-036, OB-072, OB-080, OB-082, OB-089, OB-090, OB-097, OB-135, OB-147 e OB-148) e o híbrido simples, o grupo 4 conteve três genótipos F_2 (OB-051, OB-095 e OB-119) e a cultivar Italian Large Leaf, o grupo 5 conteve oito genótipos F_2 (OB-037, OB-069, OB-074, OB-076, OB-125, OB-126, OB-128 e OB-144) e o grupo 6 conteve nove genótipos F_2 (OB-008, OB-031, OB-035, OB-040, OB-043, OB-048, OB-088, OB-122 e OB-177), a cultivar Cinnamon e o híbrido triplo.

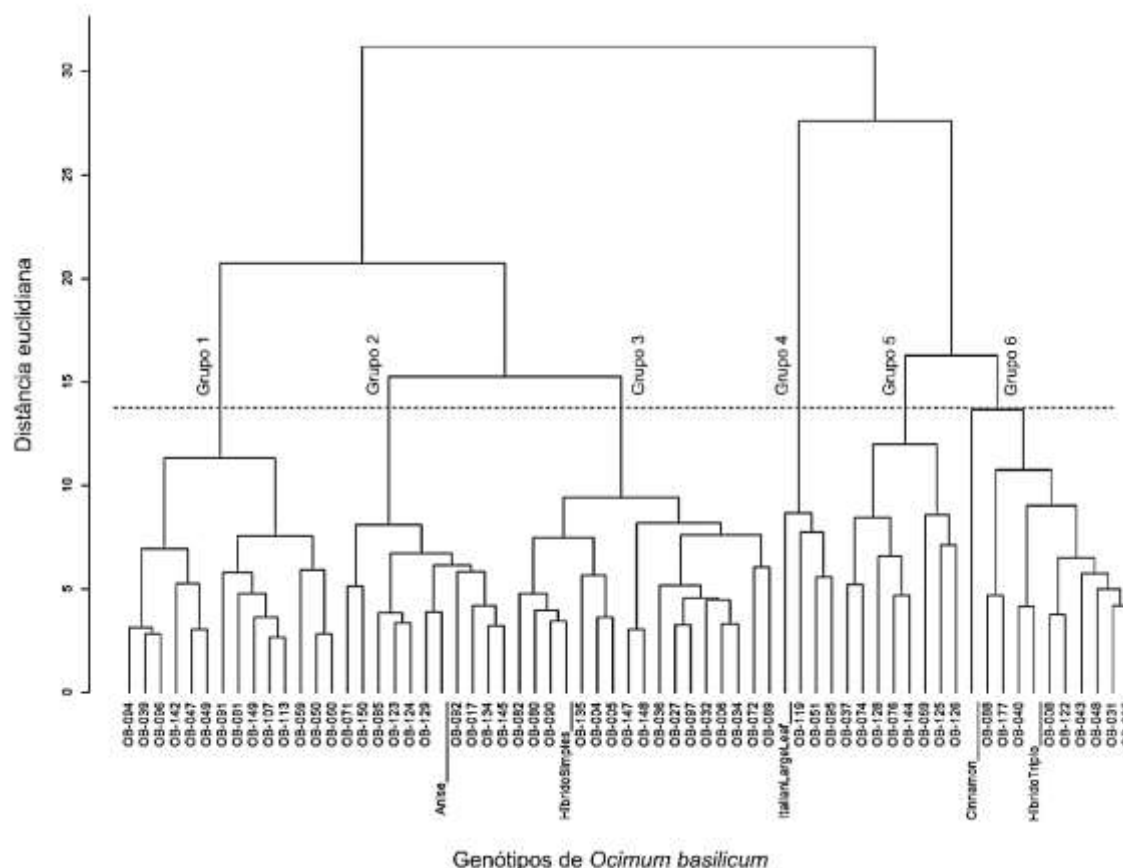


Figura 2. Dendrograma bidimensional representando a similaridade entre 60 genótipos segregantes de *Ocimum basilicum* e seus parentais, para características morfológicas, agrônômicas e composição química dos óleos essenciais.

O Grupo 1 caracterizou-se pela predominância de genótipos com folhas verdes (médias: $L^*FO = 43,31$; $C^*FO = 40,95$ e $H^*FO = 125,12$), flores rosadas (médias: $L^*FL = 68,86$; $C^*FL = 20,20$ e $H^*FL = 328$) e caules roxos (médias: $L^*CA = 32,93$; $C^*CA = 12,25$ e $H^*CA = 202,37$). A composição do óleo essencial foi dominada por metil chavicol (78,70%), seguido por 1,8-cineol (5,65%) e epi- α -cadinol (3,50%) (Tabela 6). Este grupo destaca-se pela alta concentração de metil chavicol, conferindo-lhe um perfil aromático específico e desejável. Além disso, observou-se que as variáveis morfológicas relacionadas ao comprimento (4,70 cm) e largura (2,65 cm) das folhas são maiores neste grupo, o que pode indicar um potencial de lâminas foliares mais compridas e largas.

O Grupo 2 é composto predominantemente por genótipos com folhas verdes (médias: $L^*FO = 42,92$; $C^*FO = 40,31$ e $H^*FO = 125,24$), flores rosadas (médias: $L^*FL = 69,30$; $C^*FL = 19,08$ e $H^*FL = 312,84$) e caules roxos (médias: $L^*CA = 34,18$; $C^*CA = 13,61$ e $H^*CA = 186,25$), características da cultivar Anise. A análise do óleo essencial mostrou que metil chavicol foi o principal constituinte (71,22%), com 1,8-cineol (6,19%) e epi- α -cadinol (4,51%) como constituintes secundários (Tabela 6). As características fenotípicas e a composição química sugerem que este grupo possui um perfil aromático particular, o que é relevante para aplicações que valorizam a especificidade do aroma.

Tabela 6. Valores médios $\pm$ erro padrão da média (EPM) das características fenotípicas da população F₂ de *O. basilicum*. AP: Altura de planta (cm), DP: diâmetro de planta (cm), CF: comprimento de folha (cm), LF: largura de folha (cm), AF: área foliar (cm²), MS: massa seca de parte aérea (g.planta⁻¹), TO: teor (%) e RO: rendimento de óleo essencial, C1: % 1,8 - cineol, C02: % linalol, C03: % metil chavicol, C04: % eugenol, C05: % E-metil cinamato, C06: % β -elemeno, C07: % metil eugenol, C08: % E- α -bergamoteno, C09: % δ -cadineno, C10: % epi- α -cadinol.

Característica fenotípica	Grupos de genótipos					
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
TOE $\pm$ EPM	2,14 $\pm$ 0,12	2,11 $\pm$ 0,23	2,22 $\pm$ 0,04	2,13 $\pm$ 0,05	1,94 $\pm$ 0,02	2,09 $\pm$ 0,03
ROE $\pm$ EPM	0,33 $\pm$ 0,06	0,25 $\pm$ 0,05	0,41 $\pm$ 0,07	0,27 $\pm$ 0,03	0,42 $\pm$ 0,02	0,28 $\pm$ 0,02
AP $\pm$ EPM	62,29 $\pm$ 2,23	57,89 $\pm$ 4,11	61,53 $\pm$ 0,93	52,09 $\pm$ 4,61	66 $\pm$ 3,12	51,82 $\pm$ 3,20
DP $\pm$ EPM	45,00 $\pm$ 2,40	45,47 $\pm$ 2,21	54,44 $\pm$ 2,76	40,18 $\pm$ 6,12	54,25 $\pm$ 2,95	39,82 $\pm$ 3,44
CF $\pm$ EPM	4,76 $\pm$ 0,10	3,00 $\pm$ 0,20	4,46 $\pm$ 0,04	4,59 $\pm$ 0,13	3,58 $\pm$ 0,04	4,29 $\pm$ 0,03
LF $\pm$ EPM	2,68 $\pm$ 0,04	1,64 $\pm$ 0,02	2,48 $\pm$ 0,06	2,58 $\pm$ 0,12	1,90 $\pm$ 0,06	2,37 $\pm$ 0,05
AF $\pm$ EPM	10,19 $\pm$ 0,70	6,84 $\pm$ 0,12	10,2 $\pm$ 0,10	9,40 $\pm$ 2,52	10,13 $\pm$ 1,20	8,24 $\pm$ 0,08
MS $\pm$ EPM	15,36 $\pm$ 1,18	10,69 $\pm$ 0,23	18,94 $\pm$ 1,80	12,68 $\pm$ 4,14	22,30 $\pm$ 2,20	12,96 $\pm$ 1,40
C1 $\pm$ EPM	5,99 $\pm$ 1,10	6,19 $\pm$ 0,21	7,03 $\pm$ 0,90	6,79 $\pm$ 1,86	12,29 $\pm$ 1,63	8,46 $\pm$ 1,36
C2 $\pm$ EPM	3,10 $\pm$ 0,65	2,51 $\pm$ 0,27	6,03 $\pm$ 3,40	19,39 $\pm$ 10,55	9,81 $\pm$ 6,37	27,31 $\pm$ 8,43
C3 $\pm$ EPM	78,17 $\pm$ 2,33	71,22 $\pm$ 4,12	66,73 $\pm$ 5,33	52,48 $\pm$ 15,22	1,18 $\pm$ 0,04	21,37 $\pm$ 6,42
C4 $\pm$ EPM	0,09 $\pm$ 0,02	0,00 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00	0,56 $\pm$ 0,08	2,03 $\pm$ 0,03	0,30 $\pm$ 0,02
C5 $\pm$ EPM	0,00 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00	2,33 $\pm$ 2,07
C6 $\pm$ EPM	0,91 $\pm$ 0,10	0,93 $\pm$ 0,13	0,97 $\pm$ 0,13	1,95 $\pm$ 0,05	3,02 $\pm$ 0,04	2,09 $\pm$ 0,03
C7 $\pm$ EPM	1,50 $\pm$ 0,00	2,43 $\pm$ 0,18	2,65 $\pm$ 0,75	2,36 $\pm$ 0,12	47,37 $\pm$ 11,93	13,65 $\pm$ 7,43
C8 $\pm$ EPM	0,55 $\pm$ 0,05	2,27 $\pm$ 0,15	1,43 $\pm$ 0,27	1,60 $\pm$ 0,08	0,85 $\pm$ 0,05	0,57 $\pm$ 0,03
C9 $\pm$ EPM	1,56 $\pm$ 0,02	1,93 $\pm$ 0,05	1,77 $\pm$ 0,33	1,64 $\pm$ 0,04	2,69 $\pm$ 0,03	2,42 $\pm$ 0,06
C10 $\pm$ EPM	3,60 $\pm$ 0,10	4,51 $\pm$ 0,03	4,64 $\pm$ 0,20	4,32 $\pm$ 0,06	5,23 $\pm$ 0,07	6,63 $\pm$ 0,05

No Grupo 3, os genótipos apresentam folhas verdes (médias: L*FO = 38,95, C*FO = 33,81 e H*FO = 128,08), flores rosadas (médias: L*FL = 67,67; C*FL = 19,01 e H*FL = 325,76) e caules roxos (médias: L*CA = 31,07, C*CA = 12,11 e H*CA = 263,67). A composição do óleo essencial foi marcada por metil chavicol (66,73%), 1,8-cineol (7,02%) e linalol (6,03%) (Tabela 6). Este grupo se destacou por maior diâmetro da copa (54,44 cm) e área foliar (10,2 cm²), além de um maior teor de óleo essencial (2,22%). Isso indica que, atrelado às características morfológicas destacadas, este grupo tem notável potencial para a produção eficiente de óleo essencial.

O Grupo 4 foi caracterizado por genótipos com folhas verdes (médias: L*FO = 42,23; C*FO = 39,71 e H*FO = 125,45), flores brancas (médias: L*FL = 80,92; C*FL = 6,61 e H*FL = 111,61) e caules verdes (médias: L*CA = 34,18; C*CA = 13,61 e H*CA = 186,25), refletindo as características da cultivar Italian Large Leaf. O óleo essencial neste grupo foi composto predominantemente por metil chavicol (52,48%), linalol (19,39%) e 1,8-cineol (6,78%) (Tabela 6). A presença marcante de metil chavicol e linalol sugere um perfil aromático distinto, em plantas com caráter visual que remetem à Italian Large Leaf, uma cultivar amplamente aceita e valorizada no mercado.

O Grupo 5 incluiu genótipos com folhas verdes (médias: L*FO = 40,27, C*FO = 36,33 e H*FO = 126,45), flores rosadas (médias: L*FL = 68,34, C*FL = 19,02 e H*FL = 327,20) e caule roxo (médias: L*CA = 26,63, C*CA = 14,17 e H*CA = 293,43). Observam-se altos valores para altura da planta (66 cm), massa seca (22,3 g/planta) e rendimento de óleo (0,42 mL/planta). A composição do óleo essencial foi dominada por metil eugenol (47,36%), juntamente com 1,8-cineol (12,28%) e linalol (9,81%) (Tabela 6). Esse grupo se destacou por seu potencial de produção e a quantidade significativa de metil eugenol, o que pode ser atraente para mercados que buscam um aroma intenso e características de produção elevada.

O Grupo 6 inclui genótipos com folhas verdes (médias: L*FO = 41,07, C*FO = 36,88 e H*FO = 127,09), flores rosadas (médias: L*FL = 68,29, C*FL = 19,50 e H*FL = 326,84) e caule roxo (médias: L*CA = 29,72, C*CA = 14,80 e H*CA = 311,32), refletindo características semelhantes à cultivar Cinnamon. O óleo essencial é caracterizado por linalol (27,31%), metil

chavicol (21,37%) e metil eugenol (13,65%) (Tabela 6). Esse perfil indica um aroma distintivo, com uma combinação de linalol e outros compostos importantes, sugerindo um potencial para aplicações específicas que valorizem aromas variados.

5.4. Conclusão

De forma geral, os indivíduos da geração F₂ apresentaram forte presença dos compostos do óleo essencial das cultivares genitoras. No entanto, a exceção foi o eugenol, que foi detectado em apenas 12 dos 66 indivíduos, enquanto o E-metil cinamato esteve ausente em todos os indivíduos da geração F₂.

A geração F₂ demonstrou variabilidade genética significativa para a maioria das características avaliadas, evidenciada por altos coeficientes de variação genética e fenotípica, exceto para luminosidade da flor, cor e luminosidade da folha. Alta herdabilidade e ganho genético foram observados para as seguintes características: ângulo hue da flor, luminosidade, cor e ângulo hue do caule, altura da planta, diâmetro da copa, massa seca, e teores dos compostos 1,8-cineol, linalol, metil chavicol, eugenol, E-metil cinamato, β -elemeno, metil eugenol, E- α -bergamoteno, δ -cadineno e epi- α -cadinol.

Esses resultados confirmam que a seleção fenotípica é eficaz no melhoramento genético da população F₂ de *Ocimum basilicum*.

5.5. Referências Bibliográficas

- Abtahi, M. et al. (2022). Revealing seed color variation and their possible association with yield and quality traits in a diversity panel of flax (*Linum usitatissimum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 13: 1038079. doi:10.3389/fpls.2022.1038079.
- Abuhashem, Y.S. et al. (2023). Exploring the morphological and genetic diversity of Egyptian basil landraces (*Ocimum* spp.) for future breeding strategies. *Beni-Suef University Journal Of Basic And Applied Sciences*, 12(1):70. doi:10.1186/s43088-023-00408-2.
- Adams, R. P. (2017). *Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography, Mass Spectrometry*. Allured Publishing Corporation; Carol Stream, ilinois, USA, 4(1):8. 804.
- Alves, M. F. et al. (2018). Inheritance study of yield components and essential oil constituents in linool type basil. *Bioscience Journal*, 34(2):296-301. doi: 10.14393/bj-v34n2a2018-38777.
- Barbosa, C. O. et al. (2021). Chemical composition and antioxidant potential of essential oils from different *Ocimum* species (Basil) / Composição química e atividade antioxidante de óleos essenciais de diferentes espécies de *Ocimum* (Manjeriçao). *Brazilian Journal of Development*, 7(3):24422–24442. doi:10.34117/bjdv7n3-241.
- Bernardo, R. (2020). Reinventing quantitative genetics for plant breeding: something old, something new, something borrowed, something BLUE. *Heredity*, 125:375–385. doi:10.1038/s41437-020-0312-1
- Blank, A. F. et al. (2012). A diallel study of yield components and essential oil constituents in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops And Products*, 38:93-98. doi:10.1016/j.indcrop.2012.01.015.
- Borém, A. et al. G. V. (2021). *Melhoramento de plantas* 8ª ed. Viçosa: UFV, 334 p.
- Bucksch, A. et al. (2017). Morphological Plant Modeling: unleashing geometric and topological potential within the plant sciences. *Frontiers In Plant Science*, 8:1-16. doi: 10.3389/fpls.2017.00900.
- Burton, G. W. & Devane, E. H. (1953). Estimating Heritability in Tall Fescue (*Festuca arundinacea*) from Replicated Clonal Material. *Agronomy Journal*, 45(10):478-481. doi: 10.2134/agronj1953.00021962004500100005x.

- Chesnokov, Y. V., Kosolapov, V. M. & Savchenko, I. V. (2020). Morphological Genetic Markers in Plants. *Russian Journal Of Genetics*, 56(12):1406-1415. doi: 10.1134/s1022795420120042.
- Couto, H. G. S. A. et al. (2019). Essential oils of basil chemotypes: major compounds, binary mixtures, and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 293:446-454. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.04.078.
- Cui, C. et al. (2021). Genome-wide association study of seed coat color in sesame (*Sesamum indicum* L.). *PloS One*, 16:e0251526. doi: 10.1371/journal.pone.0251526.
- Eid, M.H. (2009). Estimation of Heritability and Genetic Advance of Yield Traits in Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Drought Condition. *International Journal of Genetics and Molecular Biology*, 1:115-120.
- França, M. F. M. S. et al. (2017). Germination test and ornamental potential of different basil cultivars (*Ocimum* spp.). *Ornamental Horticulture*, 23(4):385-391. doi: 10.14295/oh.v23i4.1080.
- Gebrehiwot, H. et al. (2015). Chemical composition and antimicrobial activities of leaves of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) herb. *International Journal Of Basic And Clinical Pharmacology*, 869-875. doi: 10.18203/2319-2003.ijbcp20150858.
- Gowda, M. P. et al. (2019). A Study on Genetic Variability for Yield and its Attributes in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). *International Journal Of Current Microbiology And Applied Sciences*, 8(6):2995-3003. doi: 10.20546/ijcmas.2019.806.357.
- Holland, J.B. (2014). *Breeding: plants, modern*. Encyclopedia Of Agriculture And Food Systems, 187-200. doi: 10.1016/b978-0-444-52512-3.00226-6.
- Hossain, M. D. et al. (2021). Estimation of Variability, Heritability and Genetic Advance for Phenological, Physiological and Yield Contributing Attributes in Wheat Genotypes under Heat Stress Condition. *American Journal Of Plant Sciences*, 12(4):586-602. doi:10.4236/ajps.2021.124039.
- Johnson, H. W., Robinson, H. F. & Comstock, R. E. (1955). Estimates of Genetic and Environmental Variability in Soybeans. *Agronomy Journal*, 47(7):314-318. doi: 10.2134/agronj1955.00021962004700070009x.
- Jolliffe, I. T. & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065):20150202. doi:10.1098/rsta.2015.0202.
- Kapteyn, J. et al. (2007). Evolution of Cinnamate/p-Coumarate Carboxyl Methyltransferases and Their Role in the Biosynthesis of Methylcinnamate. *The Plant Cell*, 19(10):3212-3229. doi: 10.1105/tpc.107.054155.
- Koeduka, T. (2014). The phenylpropene synthase pathway and its applications in the engineering of volatile phenylpropanoids in plants. *Plant Biotechnology*, 31(5), 401–407. doi:10.5511/plantbiotechnology.14.0801.
- Koeduka, T. et al. (2009). Biosynthesis of t-Anethole in Anise: Characterization of t-Anol/Isoeugenol Synthase and an O-Methyltransferase Specific for a C7-C8 Propenyl Side Chain. *Plant Physiology*, 149:384-394. doi:10.1104/pp.108.128066.
- Lewinsohn, E. et al. (2000). Biosynthesis of estragole and methyl-eugenol in sweet basil (*Ocimum basilicum* L). Developmental and chemotypic association of allylphenol-O-methyltransferase activities. *Plant Science*, 160(1):27-35. doi:10.1016/s0168-9452(00)00357-5.
- Li, Y. et al. (2019). Spectroscopic determination of leaf chlorophyll content and color for genetic selection on *Sassafras tzumu*. *Plant Methods*, 15(1). doi:10.1186/s13007-019-0458-0.
- Louveau, T. et al. (2011). Predicting the substrate specificity of a glycosyltransferase implicated in the production of phenolic volatiles in tomato fruit. *FEBS Journal*, 278(2), 390-400. doi:10.1111/j.1742-4658.2010.07962.x.

- Mueen, C. H. et al. (2015). Biological and Pharmacological Properties of the Sweet Basil (*Ocimum basilicum*). *British Journal Of Pharmaceutical Research*, 7(5):330-339. doi: 10.9734/bjpr/2015/16505.
- Majdi, C. et al. (2020). Phytochemical Characterization and Bioactive Properties of Cinnamon Basil (*Ocimum basilicum* cv. 'Cinnamon') and Lemon Basil (*Ocimum × citriodorum*). *Antioxidants*, 9(5):369. doi: 10.3390/antiox9050369.
- Nascimento, L.F. A. et al. (2020). Morphoagronomic characterization of *Lantana camara* L. germplasm. *Bioscience Journal*, 36(4):1211–1222. Doi: 10.14393/BJ-v36n4a2020-48080.
- Obala, J. et al. (2018). Genetic variation and relationships of total seed protein content with some agronomic traits in pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.). *Australian Journal of Crop Science*, 12:1859-1865. doi:10.21475/ajcs.18.12.12.p1138.
- Pinto, J. A. O. et al. (2019). Chemical characterization of the essential oil from leaves of basil genotypes cultivated in different seasons. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 18:58-70.
- Pinto, J. A. O. et al. (2018). Cropping season affect the performance of basil cultivars and hybrids. *Bioscience Journal*, 34(3):640-647. doi:10.14393/bj-v34n3a2018-39377.
- Possobom, M. T. D. F. et al. (2015). Genetic control of the seed coat colour of middle American and Andean bean seeds. *Genetica*, 143:45-54. doi: 10.1007/s10709-014-9811-4.
- Ramvalho, M. A. P. & Pinto, C. A. B. (2008). *Genética na agropecuária*. Lavras: UFLA, 2008. 464 p.
- Rasband, W.S. (2004). ImageJ, National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.
- Rasheed, A. et al. (2023). Study of genetic variability, heritability, and genetic advance for yield-related traits in tomato (*Solanum lycopersicon* MILL.). *Frontiers In Genetics*, 13. doi: 10.3389/fgene.2022.1030309.
- Reddy, V. A. et al. (2021). Sweet Basil Has Distinct Synthases for Eugenol Biosynthesis in Glandular Trichomes and Roots with Different Regulatory Mechanisms. *International Journal Of Molecular Sciences*, 22(2):681. doi: 10.3390/ijms22020681.
- Resende, M.D.V. (2007). *Matemática e Estatística na Análise de Experimentos e no Melhoramento Genético* (1ª ed.). Colombo, Curitiba.
- Robinson, H. F. et al. (1949). Estimates of heritability and degree of dominance in corn. *Agronomy Journal*, 41:353-359.
- Romano, R. et al. (2022). Basil (*Ocimum basilicum* L.) Leaves as a Source of Bioactive Compounds. *Foods*, 11(20):3212. doi: 10.3390/foods11203212.
- Santana, A. D. D. et al. (2018). Phenotypic and genotypic characterization of basil hybrids and cultivars. *Bioscience Journal*, 1167-1177. doi: 10.14393/bj-v34n5a2018-39445.
- Sadohara, R. et al. (2021). Seed coat color genetics and genotype × environment effects in yellow beans via machine-learning and genome-wide association. *Plant Genome*, 15:e20173. doi: 10.1002/tpg2.20173.
- Singh, Y. P. et al. (2015). Genetic variability and character association for oil content and its component traits in indigenous and exotic accessions of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Ecology, Environment And Conservation*, 1(1):325-330. doi: 10.13140/RG.2.2.25498.57286.
- Smita, S. & Kishore R. L. (2018). Estimation of Genetic Variability, Heritability and Genetic Advance for Essential Oil Yield and Related Traits in Genus *Ocimum*. *Advances In Crop Science And Technology*, 6(02):1-6. doi: 10.4172/2329-8863.1000350.
- Spence, C. (2024). Sweet basil: an increasingly popular culinary herb. *International Journal Of Gastronomy And Food Science*, 36:100927. doi: 10.1016/j.ijgfs.2024.100927.
- Terfa, G. N. & Gurmu, G. N. (2020). Genetic variability, heritability and genetic advance in linseed (*Linum usitatissimum* L) genotypes for seed yield and other agronomic traits. *Oil Crop Science*, 5(3):156-160. doi: 10.1016/j.ocsci.2020.08.002.

- Tessema, G. L., Mohammed, A. W. & Abebe, D. T. (2022). Genetic variability studies for tuber yield and yield attributes in Ethiopian released potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties. *PeerJ*, 10:12860. doi: 10.7717/peerj.12860.
- Tuhina-Khatun, M. et al. (2015). Genetic Variation, Heritability, and Diversity Analysis of Upland Rice (*Oryza sativa* L.) Genotypes Based on Quantitative Traits. *Biomed Research International*, 2015:1-7. doi: 10.1155/2015/290861.
- Wesolowska, A. & Jadczyk, D. (2016). Composition of the Essential Oils from Inflorescences, Leaves and Stems of *Ocimum basilicum* 'Cinnamon' Cultivated in North-western Poland. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 19(4):1037-1042. doi:10.1080/0972060x.2016.1197801.
- Yaldiz, G. & Camlica, M. (2024). Genetic diversity of selected basil (*Ocimum basilicum* L.) genotypes based on morphological, yield, and leaf color parameters. *Journal Of Crop Improvement*, 1-17. Doi: 10.1080/15427528.2024.2336262.

6. ARTIGO 3

PARÂMETROS GENÉTICOS EM UMA POPULAÇÃO SEGREGANTE DO HÍBRIDO TRIPLO DE MANJERICÃO (MRS. BURNS x CINNAMON) x ITALIAN LARGE LEAF: UMA COMBINAÇÃO DOS AROMAS LIMÃO, CANELA E PESTO

Artigo formatado de acordo com as normas do periódico Crop Breeding and Applied Biotechnology

RESUMO

Estimaram-se os parâmetros genéticos em uma população segregante da autofecundação do híbrido (Mrs. Burns x Cinnamon) x Italian Large Leaf, onde foram combinados os sabores limão, canela e pesto. A população F₂ mostrou variabilidade genética significativa. Foram identificados cinco grupos distintos de genótipos de manjeriço com base na similaridade fenotípica e na composição dos óleos essenciais. Coloração de folhas, flores e caule (luminosidade: L*, croma: C* e ângulo hue: H*), massa seca, rendimento de óleo essencial, diâmetro da copa da planta, largura da folha, área foliar e os constituintes dos óleos essenciais neral, geranial, Z-metil cinamato e E-metil cinamato, foram os principais contribuintes da variação genética na população segregante. De forma geral, os coeficientes de variação genética e fenotípica das características avaliadas foram altos (>20%). A exceção foi luminosidade da flor, luminosidade, croma, ângulo hue, comprimento e largura da folha. Herdabilidade (h_a^2) alta (>60%) foi observada para 1,8-cineol (h_a^2 : 62,0%), linalol (h_a^2 : 94,9%), metil chavicol (h_a^2 : 83,1%), neral (h_a^2 : 90,4%), geranial (h_a^2 : 86,6%), Z-metil cinamato (h_a^2 : 95,6%), eugenol (h_a^2 : 85,4%), E-metil cinamato (h_a^2 : 94,3%), E- α -bergamoteno (h_a^2 : 97,2%) e epi- α -cadinol (h_a^2 : 98,9%), ângulo hue da flor (h_a^2 : 95,1%), luminosidade (h_a^2 : 80,2%), croma (h_a^2 : 89,9%) e ângulo hue (h_a^2 : 99,8%) do caule, altura (h_a^2 : 72,6%) e diâmetro da copa (h_a^2 : 66,0%) e massa seca (h_a^2 : 88,9%). Alto ganho genético (24,2 a 601,8%) foi registrado para 1,8-cineol, linalol, metil chavicol, neral, geranial, Z-metil cinamato, eugenol, E-metil cinamato, E- α -bergamoteno, epi- α -cadinol, croma da folha, luminosidade da flor, croma da flor, ângulo hue da flor, luminosidade do caule, croma do caule, ângulo hue do caule, altura da planta, diâmetro da copa, comprimento da folha, largura da folha, área foliar, massa seca, teor e rendimento de óleo essencial. Luminosidade da folha apresentou moderado ganho genético (19,0%), enquanto ângulo hue da folha apresentou baixo ganho genético (4,6%). Esses resultados confirmam que a seleção fenotípica é eficaz no melhoramento genético da população F₂ de *Ocimum basilicum*.

Palavras-chave: *Ocimum basilicum*; variabilidade genética; Melhoramento Genético.

GENETIC PARAMETERS IN A SEGREGATING POPULATION OF THE TRIPLE HYBRID BASIL (MRS. BURNS X CINNAMON) X ITALIAN LARGE LEAF: A COMBINATION OF LEMON, CINNAMON, AND PESTO AROMAS

ABSTRACT

In this work, genetic parameters were estimated in a segregating population derived from the self-pollination of the basil hybrid (Mrs. Burns x Cinnamon) x Italian Large Leaf, combining lemon, cinnamon, and pesto flavors. The F₂ population exhibited significant genetic variability. Five distinct groups of basil genotypes were identified based on phenotypic similarity and essential oil composition. Leaf, flower, and stem coloration (brightness: L*, chroma: C*, and hue angle: H*), dry mass, essential oil yield, plant canopy diameter, leaf width, leaf area, and the essential oil constituents neral, geranial, Z-methyl cinnamate, and E-methyl cinnamate were the main contributors to the genetic variation in the segregating population. In general, the genetic and phenotypic variation coefficients for the evaluated traits were high (>20%), with the exception of flower brightness, leaf brightness, chroma, hue angle, leaf length, and leaf width. High heritability ($h_a^2 > 60\%$) was observed for 1,8-cineole (h_a^2 : 62.0%), linalool (h_a^2 : 94.9%), methyl chavicol (h_a^2 : 83.1%), neral (h_a^2 : 90.4%), geranial (h_a^2 : 86.6%), Z-methyl cinnamate (h_a^2 : 95.6%), eugenol (h_a^2 : 85.4%), E-methyl cinnamate (h_a^2 : 94.3%), E- α -bergamotene (h_a^2 : 97.2%), and epi- α -cadinol (h_a^2 : 98.9%), as well as for flower hue angle (h_a^2 : 95.1%), stem brightness (h_a^2 : 80.2%), chroma (h_a^2 : 89.9%), stem hue angle (h_a^2 : 99.8%), plant height (h_a^2 : 72.6%), canopy diameter (h_a^2 : 66.0%), and dry mass (h_a^2 : 88.9%). High genetic gain (24.2% to 601.8%) was recorded for 1,8-cineole, linalool, methyl chavicol, neral, geranial, Z-methyl cinnamate, eugenol, E-methyl cinnamate, E- α -bergamotene, epi- α -cadinol, leaf chroma, flower brightness, flower chroma, flower hue angle, stem brightness, stem chroma, stem hue angle, plant height, canopy diameter, leaf length, leaf width, leaf area, dry mass, essential oil content, and yield. Leaf brightness showed moderate genetic gain (19.0%), while leaf hue angle showed low genetic gain (4.6%). These results confirm that phenotypic selection is effective in the genetic improvement of the F₂ population of *Ocimum basilicum*.

Keywords: *Ocimum basilicum*; genetic variability; Plant Breeding.

6.1. Introdução

O estudo da variabilidade genética e fenotípica em plantas é fundamental para o melhoramento vegetal, permitindo a seleção de genótipos superiores para características de interesse agrônomo (Terfa e Gurmu 2020). As plantas medicinais e aromáticas, como o manjeriço (*Ocimum basilicum* L.), têm sido amplamente estudadas devido ao valor econômico e terapêutico dos seus óleos essenciais (OEs) (Couto et al. 2019). Esses OEs contêm compostos bioativos, como os terpenos 1,8-cineol, linalol, neral e geranial, biossintetizados na via do mevalonato, e os fenilpropanos eugenol, metil chavicol e cinamato de metila, biossintetizados na rota do ácido chiquímico (Kapteyn et al. 2007). Eles apresentam diversas aplicações industriais, desde a produção de alimentos e fragrâncias até a utilização em fitoterápicos e pesticidas naturais (Mueen et al. 2015).

A diversidade de usos do manjeriço é amplamente reconhecida, abrangendo desde aplicações culinárias até medicinais, devido às suas atividades biológicas, como ação antioxidante e anti-inflamatória (Couto et al. 2019). Essas propriedades destacam a relevância do aumento dos níveis de compostos benéficos através do melhoramento genético, visando cultivares com ainda mais benefícios à saúde e ao bem-estar humano. O desenvolvimento de genótipos com teores elevados de compostos específicos nos OEs oferece perspectivas promissoras. É conhecido que cultivares com alto teor de eugenol são valorizadas por suas propriedades antissépticas, anestésicas e antioxidantes (Couto et al. 2019, Joshi et al. 2021).

Cultivares com alto teor de metil cinamato têm sido estudadas por suas propriedades aromáticas e possíveis aplicações na indústria de fragrâncias e de alimentos (Wesolowska e Jadczyk 2016), e materiais genéticos ricos em metil chavicol são explorados por suas propriedades antimicrobianas e antiespasmódicas (Lewinsohn et al. 2000). Plantas com elevados teores de neral e geranial são conhecidas por suas propriedades calmantes e repelentes de insetos (Aprotosoaie et al. 2019). A presença de compostos como alfa-bergamoteno e epi-cadinol em algumas variedades de manjeriço amplia suas aplicações, conferindo fragrância, atraindo polinizadores e oferecendo benefícios à saúde e à indústria. Os efeitos do 1,8-cineol são bem documentados; ele é usado no tratamento de doenças respiratórias devido às suas propriedades antimicrobianas, mucolíticas, broncolíticas e anti-inflamatórias (Aprotosoaie et al. 2019). O linalol, um álcool monoterpeneo, possui atividades antibacterianas, antifúngicas, antioxidantes, anti-inflamatórias e anticâncer (Parasuraman et al. 2022).

As características morfológicas e agronômicas do manjeriço são de grande importância no contexto do melhoramento genético, agregando valor e utilidade às plantas cultivadas (Chesnokov et al. 2020). A altura da planta e o diâmetro da copa são parâmetros fundamentais que influenciam a estrutura e o desenvolvimento geral da planta, implicando no seu manejo cultural e densidade de plantio (Bucksch et al. 2017). Da mesma forma, o comprimento, a largura e a área das folhas impactam diretamente a capacidade fotossintética e a eficiência na produção de biomassa (Zhang et al. 2021). A coloração das folhas, flores e caules têm um papel importante, especialmente no aspecto ornamental do manjeriço, tornando-o atraente tanto para jardinagem quanto para paisagismo (França et al. 2017). Além disso, características agronômicas, como o rendimento de massa seca e de óleo essencial, são cruciais para a exploração econômica do manjeriço (Pimentel et al. 2023). O desenvolvimento de genótipos que maximizem essas características pode resultar em cultivares mais produtivas, com maiores teores de compostos bioativos e com novos sabores.

A estimativa de parâmetros genéticos é essencial para o melhoramento de plantas (You et al. 2016). Parâmetros como herdabilidade, coeficientes de variabilidade genotípica e fenotípica e avanço genético são cruciais para compreender como os fatores genéticos e ambientais influenciam a variação fenotípica (Dabalo et al. 2020). Ao avaliar a variabilidade genética de características específicas, é possível identificar os principais determinantes que direcionam programas de melhoramento genético. A estimativa desses parâmetros permite aumentar a eficiência da seleção e prever o ganho genético esperado em gerações futuras (Tessem et al. 2022).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo estimar os parâmetros genéticos em uma população segregante do híbrido triplo de manjeriço (Mrs. Burns x Cinnamon) x Italian Large Leaf, onde foram combinados os sabores limão, canela e pesto.

6.2. Material e métodos

6.2.1 Obtenção dos híbridos e da geração segregante

Para produzir o híbrido triplo, utilizou-se o híbrido simples (Mrs. Burns x Cinnamon) como genitor feminino e a cultivar Italian Large Leaf, conhecida por sua presença de eugenol no OE, como genitor masculino. Os cruzamentos foram realizados por meio de emasculação dos botões florais da genitora feminina antes da antese, para evitar a autopolinização. Em seguida, procedeu-se à polinização manual, realizada com pólen de flores totalmente abertas do genitor masculino, coletado no mesmo dia. O pólen foi transferido para o estigma das flores emasculadas. Para garantir a pureza do cruzamento e evitar contaminação por pólen indesejado, as flores receptoras da genitora feminina foram imediatamente cobertas com sacos de TNT (tecido não tecido) após a polinização. Logo após os cruzamentos, os sacos de TNT foram identificados individualmente com etiquetas, contendo informações sobre o cruzamento, como o código dos genitores e a data da polinização.

Após o crescimento e floração das plantas híbridas, as flores foram protegidas para evitar polinização cruzada, e a população segregante foi obtida a partir da autofecundação. Todos os cruzamentos e a autofecundação foram conduzidos em casa de vegetação, no Departamento de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal de Sergipe (UFS), no município de São Cristóvão, Sergipe.

6.2.2 Local e adubação

As plantas foram semeadas em casa de vegetação e após 42 dias, transplantadas para condições de campo na Fazenda Experimental "Campus Rural" da Universidade Federal de Sergipe (UFS), localizada em São Cristóvão, Sergipe (10°55'25"S, 37°11'54"W, altitude de 47 m). As características físico-químicas do solo foram determinadas previamente, apresentando uma textura de areia franca, pH de 5,35 em água, teor de matéria orgânica de 14,11 g.dm⁻³, Fósforo: 6,09 mg.dm⁻³, Potássio (K): 76,05 mg.dm⁻³, Cálcio (Ca): 2,09 cmolc.dm⁻³, Magnésio (Mg): 0,51 cmolc.dm⁻³, Hidrogênio + Alumínio: 0,3 cmolc.dm⁻³, CTC potencial: 3,09 cmolc.dm⁻³. A correção de acidez e adubação foram realizadas conforme Pinto et al. (2018).

As condições climáticas do período do experimento, entre setembro e dezembro de 2023, são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Dados meteorológicos registrados na área experimental no período de cultivo (setembro-dezembro de 2023).

Mês	Tmin (°C)	Tmax (°C)	AmpT (°C)	Tmed (°C)	Chuvas (mm)	UR (%)
Setembro	25,18	26,15	0,97	25,67	46,20	67,63
Outubro	26,25	28,32	2,07	27,28	7,40	76,80
Novembro	26,36	27,14	0,88	26,75	10,60	68,85
Dezembro	26,95	27,64	0,69	27,30	0,00	66,95

Tmin= temperatura mínima, Tmax= temperatura máxima, AmpT= amplitude térmica, Tmédia= temperatura média, Chuvas = precipitações acumuladas de chuva.

6.2.3 Avaliação das características morfológicas e agrônômicas

As avaliações foram realizadas após a abertura da primeira flor de cada planta F₂ e de 50% das plantas da parcela dos genótipos parentais. A altura da planta (AP) foi medida em centímetros (cm), desde a base da planta até o ápice das inflorescências. O diâmetro da copa da planta (DP) foi obtido pela média, também em centímetros, de duas larguras perpendiculares da copa da planta. Foram coletadas seis folhas da região média dos ramos, seis flores desabrochadas e a região do caule do terço apical de cada planta para análise de cor. Essas partes foram escaneadas em um aparelho HP MFP 1005, conforme a metodologia prática proposta por Nascimento et al. (2020), para obter os valores Red, Green e Blue (RGB). Os valores RGB foram convertidos para o espaço de cores L* (luminosidade), C* (croma) e H* (ângulo Hue), proposto pela Comissão Internacional de Iluminação, utilizando o pacote "colorscience" no software R (versão 4.2.2). Essas transformações possibilitam uma análise detalhada das propriedades de cor. Através das seis folhas escaneadas, também foram obtidas as médias de comprimento de folha e largura de folha, em centímetros, e de área foliar, em cm², utilizando o software IMAGEJ (Rasband 2004).

Para obtenção de massa seca de parte aérea (MS: g/planta), foi feita a colheita das folhas e inflorescências de cada planta, que foram então condicionadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a 40 ± 1 °C por cinco dias. Os OEs foram extraídos por hidrodestilação em aparelho Clevenger modificado conectado a um balão de fundo redondo por 120 min. Para tanto, foram utilizadas amostras de 10 g de massa seca e 2,0 L de água destilada. O teor de OE (TOE) foi calculado através da fórmula: TOE (%) = (Volume extraído da amostra/Massa seca da amostra) x 100. O rendimento de OE (ROE) foi calculado através da fórmula: ROE (mL/planta) = (Volume extraído da amostra x Massa seca da planta) / Massa seca da amostra.

6.2.4 Análise química de óleos essenciais

As análises químicas das amostras de OE foram feitas em cromatógrafo gasoso (Agilent Modelo 7890B) conectado a um espectrômetro de massas (Agilent Modelo 5977 A MSD). O cromatógrafo gasoso foi equipado com uma coluna capilar de sílica fundida DB-5MS (30 m de comprimento x 0,25 mm de diâmetro interno x 0,25 µm de espessura, Agilent). Hélio foi utilizado como gás de arraste, com vazão de 1 mL/min. A energia de ionização foi de 70 eV e a faixa de detecção de massa foi de 40 a 500 Da. Um amostrador automático (Agilent G4513A) foi utilizado para injetar 1 µL de cada amostra (10 mg do óleo essencial/mL de solução) no modo splitless. A temperatura inicial do forno foi de 35 °C (mantida por dois minutos), seguida de aumento de 10 °C/min até 100 °C (mantida por um minuto). Em seguida, a temperatura foi elevada de 3 °C/min até 250 °C, e mantida por três minutos. Os dados foram processados utilizando o software Mass Hunter (versão B 7.0, Agilent Technologies). Os componentes foram identificados por comparação de seus espectros de massa com aqueles presentes na base de dados do NIST (National Institute of Standards & Technology). O índice de retenção (IR) de cada componente foi calculado de acordo com o tempo de retenção de uma sequência de n-alceno (C8-C24), seguido de comparação dos valores obtidos com os presentes na literatura (Adams 2017) e outras bases de dados online (PubChem e Chemspider).

6.2.5 Delineamento experimental e análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados com três repetições. O espaçamento utilizado foi de 0,5 m entre plantas e 0,6 m entre linhas. Cada bloco consistiu em 20 plantas dos genitores Mrs. Burns, Cinnamon e Italian Large Leaf, assim como 20 plantas do híbrido simples, 20 plantas do híbrido triplo e 60 plantas da geração F₂.

Para investigar o efeito do genótipo e do bloco sobre a variabilidade do fenótipo, ajustou-se um modelo misto linear com efeito aleatório do bloco e efeito aleatório do genótipo. A análise foi realizada utilizando a função lmer do pacote lme4 no software R (versão 4.2.2). A máxima verossimilhança restrita (REML) foi utilizada para estimar os parâmetros do modelo.

O modelo foi formulado da seguinte maneira: $Y_{ij} = \beta_0 + u_{0i} + v_{0j} + \varepsilon_{ij}$

Onde: Y_{ij} representa a variável resposta observada para a i-ésima unidade experimental no j-ésimo bloco; β_0 é o intercepto médio do modelo, que representa o efeito fixo da média global da variável resposta; u_{0i} é o efeito aleatório do genótipo i, assumindo distribuição normal com média zero e variância $\sigma^2 u$; v_{0j} é o efeito aleatório do bloco j, assumindo distribuição normal com média zero e variância $\sigma^2 v$; ε_{ij} é o erro aleatório associado à i-ésima unidade experimental no j-ésimo bloco, assumindo distribuição normal com média zero e variância $\sigma^2 \varepsilon$.

A análise de deviance (Anadev) para avaliar a significância dos efeitos fixos e aleatórios no modelo foi realizada conforme Resende (2007). Primeiro, determinou-se o logaritmo do ponto de máximo da função de verossimilhança residual (L) para modelos com e sem o efeito testado. Em seguida, calculou-se a deviance (D) como $D = -2 \log L$ para ambos os modelos. A diferença entre as deviances dos modelos sem e com o efeito testado forneceu a razão de verossimilhança (LR): $LR = -2(\log L_{\text{modelo nulo}} - \log L_{\text{modelo comparado}})$. Por fim, a significância dessa diferença foi avaliada usando o teste qui-quadrado (X^2) com 1 grau de liberdade.

Os coeficientes de variabilidade genotípico e fenotípico foram calculados de acordo com Burton e Devane (1953):

- Coeficiente genotípico de variabilidade (CV_g) = $[\sqrt{(\sigma_g^2)}] / \text{média geral da característica} \times 100$
- Coeficiente fenotípico de variabilidade (CV_f) = $[\sqrt{(\sigma_f^2)}] / \text{média geral da característica} \times 100$

Onde, σ_g^2 = variância genotípica, σ_f^2 = variância fenotípica e σ_e^2 = Variância ambiental.

A herdabilidade no sentido amplo foi estimada com base na razão entre a variância genotípica e a variância fenotípica e foi expressa em porcentagem: $h_a^2 \% = \sigma_g^2 / \sigma_f^2 \times 100$

Onde $h_a^2 \%$ = herdabilidade no sentido amplo, σ_g^2 = variância genotípica, σ_f^2 = variância fenotípica.

O ganho genético na intensidade de seleção (k) a 5% (2,06) foi derivado usando a seguinte fórmula (Johnson et al. 1955):

$$\text{Ganho genético (GG)} = k \cdot \sigma_f \cdot h_a^2$$

Onde: k = intensidade de seleção a 5% ($k = 2,06$); σ_f = desvio padrão fenotípico; h_a^2 = herdabilidade em sentido amplo.

Ganho genético expresso como porcentagem sobre a média (GGM):

$$\text{GGM} = \text{GG} / \text{média geral da característica} \times 100.$$

A análise de agrupamento hierárquico foi realizada com base na distância euclidiana, utilizando o método de Ward e o pacote "MultivariateAnalysis" do software R (versão 4.2.2). A determinação do número de clusters foi realizada com base no método de Mojena.

6.3. Resultados e discussão

6.3.1 Análise dos parâmetros genéticos

O modelo linear misto, que incluiu os efeitos do genótipo e do bloco, foi significativamente superior em explicar a variação das características estudadas comparado a modelos mais simples (Tabela 2). O efeito do genótipo foi estatisticamente significativo ($p < 0,05$) para todas as características avaliadas (Tabela 2).

Os coeficientes de variação genética (CV_g) e fenotípica (CV_f) da população segregante (F_2) de *O. basilicum* (Tabela 3) refletem uma variabilidade genotípica significativa (Rasheed et al. 2023), como observada nas análises de deviances. De acordo com a classificação de Terfa e Gurm (2020), os valores de CV_g e CV_f são categorizados como altos ($>20\%$), moderados (entre 10 e 20%) e baixos ($< 10\%$).

Tabela 2. Estimativas de deviance e variâncias para características morfoagronômicas e químicas de genótipos segregantes e seus parentais de (Mrs. Burns x Cinnamom) x Italian Large Leaf, *Ocimum basilicum* (São Cristóvão, Sergipe, Brasil, 2023).

Efeito	Altura de Planta			Diâmetro de Planta			Comprimento de folha		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	1430,20	14,06**	$\sigma_g^2 = 60,34$	1477,20	19,97**	$\sigma_g^2 = 66,36$	659,34	12,65**	$\sigma_g^2 = 0,90$
Bloco	1462,90	46,80**		1549,80	92,49**		651,74	5,04*	
Modelo completo	1416,10		$\sigma_f^2 = 83,15$	1457,20		$\sigma_f^2 = 100,52$	646,70		$\sigma_f^2 = 1,61$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 22,81$			$\sigma_e^2 = 34,16$			$\sigma_e^2 = 0,71$
Efeito	Largura de folha			Área foliar			L* folha		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	387,43	13,07**	$\sigma_g^2 = 0,24$	1127,70	18,78**	$\sigma_g^2 = 9,99$	1238,20	15,02**	$\sigma_g^2 = 20,21$
Bloco	375,47	1,11 ^{ns}		1115,10	6,21*		1238,40	15,18**	
Modelo completo	374,35		$\sigma_f^2 = 0,40$	1108,90		$\sigma_f^2 = 17,29$	1223,20		$\sigma_f^2 = 30,85$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 0,17$			$\sigma_e^2 = 7,30$			$\sigma_e^2 = 10,63$
Efeito	C* folha			H* folha			*L flor		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	1359,80	27,47**	$\sigma_g^2 = 47,28$	1059,20	13,57**	$\sigma_g^2 = 8,74$	1426,50	27,22**	$\sigma_g^2 = 77,37$
Bloco	1338,60	6,36*		1068,50	22,84**		1399,30	0,00 ^{ns}	
Modelo completo	1332,30		$\sigma_f^2 = 56,63$	1045,60		$\sigma_f^2 = 12,50$	1399,30		$\sigma_f^2 = 84,87$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 9,35$			$\sigma_e^2 = 3,76$			$\sigma_e^2 = 7,50$
Efeito	C* flor			H* flor			L* caule		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	1363,40	13,87**	$\sigma_g^2 = 54,94$	2387,70	36,47**	$\sigma_g^2 = 12287,5$	1621,80	28,18**	$\sigma_g^2 = 224,99$
Bloco	1349,50	0,00 ^{ns}		2351,30	0,09 ^{ns}		1596,80	0,24 ^{ns}	
Modelo completo	1349,50		$\sigma_f^2 = 63,96$	2351,20		$\sigma_f^2 = 12415,3$	1596,60		$\sigma_f^2 = 237,44$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 9,03$			$\sigma_e^2 = 127,84$			$\sigma_e^2 = 12,44$
Efeito	C* caule			H* caule			Massa seca aérea		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	1647,30	20,66**	$\sigma_g^2 = 255,69$	2381,80	72,29**	$\sigma_g^2 = 17063,3$	1303,90	45,78**	$\sigma_g^2 = 35,65$
Bloco	1626,70	0,00 ^{ns}		2379,60	2,18 ^{ns}		1259,20	1,08 ^{ns}	
Modelo completo	1626,70		$\sigma_f^2 = 275,29$	2379,60		$\sigma_f^2 = 17068,2$	1258,10		$\sigma_f^2 = 40,10$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 19,60$			$\sigma_e^2 = 4,94$			$\sigma_e^2 = 4,45$
Efeito	Teor de OE			Rendimento de OE			% 1,8 - cineol		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	110,38	4,28**	$\sigma_g^2 = 0,21$	10,92	5,07*	$\sigma_g^2 = 0,04$	254,57	4,21*	$\sigma_g^2 = 3,06$
Bloco	106,09	0,00 ^{ns}		5,85	0,00 ^{ns}		253,86	3,51 ^{ns}	
Modelo completo	106,09		$\sigma_f^2 = 0,41$	5,85		$\sigma_f^2 = 0,07$	250,35		$\sigma_f^2 = 4,92$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 0,20$			$\sigma_e^2 = 0,03$			$\sigma_e^2 = 1,87$
Efeito	% linalol			% metil chavicol			% neral		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	491,77	17,11**	$\sigma_g^2 = 358,82$	394,17	49,75**	$\sigma_g^2 = 26,10$	288,28	57,14**	$\sigma_g^2 = 4,11$
Bloco	474,66	0,00 ^{ns}		344,41	0,00 ^{ns}		231,84	0,70 ^{ns}	
Modelo completo	474,66		$\sigma_f^2 = 378,17$	344,41		$\sigma_f^2 = 31,43$	231,14		$\sigma_f^2 = 4,55$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 19,35$			$\sigma_e^2 = 5,33$			$\sigma_e^2 = 0,44$
Efeito	% geranial			% E - metil cinamato			% eugenol		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	302,78	54,24**	$\sigma_g^2 = 5,26$	248,52	26,85**	$\sigma_g^2 = 4,39$	366,03	8,09**	$\sigma_g^2 = 34,84$
Bloco	248,54	0,00 ^{ns}		221,67	0,00 ^{ns}		357,94	0,00 ^{ns}	
Modelo completo	248,54		$\sigma_f^2 = 6,07$	221,67		$\sigma_f^2 = 4,59$	357,94		$\sigma_f^2 = 40,82$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 0,82$			$\sigma_e^2 = 0,20$			$\sigma_e^2 = 5,98$
Efeito	% Z - metil cinamato			% E - α - bergamotene			% epi - α - cadinol		
	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância	Deviance	LRT(X ²)	Variância
Genótipo	466,73	20,98**	$\sigma_g^2 = 210,68$	337,35	22,74**	$\sigma_g^2 = 24,55$	420,84	30,99**	$\sigma_g^2 = 107,49$
Bloco	445,75	0,00 ^{ns}		314,61	0,00 ^{ns}		391,27	1,43 ^{ns}	
Modelo completo	445,75		$\sigma_f^2 = 223,46$	314,61		$\sigma_f^2 = 25,27$	389,84		$\sigma_f^2 = 108,58$
Resíduo			$\sigma_e^2 = 12,77$			$\sigma_e^2 = 0,72$			$\sigma_e^2 = 1,09$

ns = não significativo *e ** = significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste Qui-quadrado. LRT (χ^2) = teste de razão de verossimilhança. σ_g^2 : variância genotípica, σ_f^2 : fenotípica; σ_e^2 : ambiental. OE: óleo essencial.

Tabela 3. Herdabilidade no sentido amplo (h^2), coeficientes de variação genética (CV_g), fenotípica (CV_f), ganho genético (GG) e GGM (ganho genético como % da média) de uma população segregante de (Mrs. Burns x Cinnamom) x Italian, *Ocimum basilicum*.

Parâmetro genético	CV_g	CV_f	h_a^2	GG	GGM
Altura de planta	20,66	24,26	72,56	15,88	42,24
Diâmetro de planta	28,84	35,49	66,02	18,43	65,23
Comprimento de folha	18,61	24,95	55,63	1,54	30,18
Largura de folha	17,57	23,00	58,12	0,79	28,53
Área foliar	31,50	41,44	57,78	5,31	52,88
Luminosidade da folha	10,07	12,45	65,52	8,48	19,02
Croma da folha	15,59	17,06	83,49	14,08	31,93
Ângulo hue da folha	2,41	2,89	69,90	5,64	4,61
Luminosidade da flor	12,08	12,65	91,17	17,67	24,25
Croma da flor	47,86	51,65	85,88	14,20	91,72
Ângulo hue da flor	45,37	45,61	98,97	225,47	92,29
Luminosidade do caule	34,10	35,03	94,76	30,29	68,86
Croma do caule	56,02	58,13	92,87	31,70	111,07
Ângulo hue do caule	63,91	63,92	99,97	268,54	131,38
Massa seca	100,22	106,29	88,90	12,60	211,44
Teor de óleo essencial	23,52	32,70	51,72	0,68	35,01
Rendimento de óleo essencial	72,75	93,95	59,96	0,33	115,90
1,8-cineol	50,17	63,68	62,02	3,01	86,29
Linalol	48,08	49,33	94,88	35,66	90,45
Metil chavicol	202,57	222,28	83,05	13,26	525,64
Neral	214,08	225,14	90,42	5,70	601,78
Geranial	207,36	222,87	86,56	6,20	560,46
Z-metil cinamato	257,21	263,03	95,62	4,25	522,26
Eugenol	139,83	151,36	85,35	10,64	252,16
E-metil cinamato	245,13	252,45	94,28	28,44	480,33
E- α -bergamoteno	89,33	90,63	97,16	9,42	169,87
Epi- α -cadinol	99,50	100,01	98,99	19,97	191,64

As características de altura de planta (AP), diâmetro da copa da planta (DP), área foliar (AF), croma da flor (C*FL), ângulo hue da flor (H*FL), luminosidade do caule (L*CA), croma do caule (C*CA), ângulo hue do caule (H*CA), massa seca de parte aérea (MS), teor (TOE) e rendimento (ROE) de óleo essencial, como também todos os teores dos dez componentes do óleo essencial, apresentam valores superiores a 20% de CV_g e CV_f , considerados altos. Isso indica uma considerável variação genética subjacente e uma resposta fenotípica visível a essa variação, reforçando a ideia de uma população com grande potencial para melhoramento genético. Além disso, as características de comprimento de folha (CF), largura de folha (LF), luminosidade da folha (L*FO), croma da folha (C*FO) e luminosidade da flor (L*FL) com CV_g entre 10 e 20%, considerados moderados, demonstram variabilidade genética suficiente para a seleção eficiente. Em contraste, o ângulo hue da folha (H*FO) apresentou baixo valor (<10%) de CV_g e CV_f , indicando baixa variabilidade genética e fenotípica.

Estudos realizados com cultivares (Pinto et al. 2018, Pinto et al. 2019) híbridos (Santana et al. 2018) e população segregante F_2 (Alves et al. 2018) de *O. basilicum* em Sergipe-Brasil, revelaram alta CV_g para AP, MS, TOE, ROE e teores de 1,8-cineol, linalol, neral, geranial, metil chavicol, eugenol e E-metil cinamato. Na Índia, Singh et al. (2015) encontraram alto CV_g para AF e MS e CV_g moderado para CF em *O. basilicum*. Esses achados corroboram com a significativa variabilidade genética detectada nessas características, indicando um alto potencial para melhoramento genético, pois pode promover uma resposta mais eficiente e rápida à seleção fenotípica.

Observou-se alta herdabilidade (variando entre 62,02% e 99,97%) para AP, DP, MS, L*FO, C*FO, H*FO, L*FL, C*FL, H*FL, L*CA, C*CA, H*CA e todos os dez constituintes analisados dos óleos essenciais, enquanto características como CF, LF, AF, TO e RO apresentaram herdabilidade moderada (variando entre 51,72% e 59,96%) (Tabela 3). Esses resultados estão de acordo com altas h_a^2 , relatadas para *O. basilicum* cultivado em Sergipe-Brasil, para AP, DP, MS e teores de 1,8-cineol, linalol, metil chavicol, neral, geranial, eugenol e E-metil cinamato (Alves et al. 2018, Pinto et al. 2018, Santana et al. 2018, Pinto et al. 2019). Considerando que a biossíntese de compostos voláteis envolve múltiplos genes e interações metabólicas com controle por enzimas e cofatores específicos, as altas herdabilidades observadas sugerem que a seleção de genótipos com perfis desejáveis pode preservar e

transferir essas características para os descendentes, possibilitando o desenvolvimento de variedades com perfis metabólicos consistentes e eficientes. Outros autores relatam h_a^2 moderada para CF, LF, AF, TOE e ROE em manjerição cultivado na Índia (Singh et al. 2015, Smita e Kishori 2018, Gowda et al. 2019).

Estudos de parâmetros genéticos de coloração utilizando os atributos de luminosidade, croma e ângulo hue propostos pela Comissão Internacional de Iluminação ainda são incipientes para o gênero *Ocimum*. Em estudo com *Sassafras tzumu*, Li et al. (2019) encontraram alta h_a^2 nas características de luminosidade e cromaticidade das folhas. Da mesma forma, outros pesquisadores verificaram alta h_a^2 para os valores de cor em linhaça, feijão e gergelim (Possobom et al. 2015, Cui et al. 2022 Sadohara et al. 2021, Abtahi et al. 2022). Assim como as demais características morfoagronômicas e químicas, que também apresentam estimativas de alta h_a^2 , a luminosidade, croma e ângulo hue de folha, flor e caule indicam que a maior parte da variação observada nessas características é atribuída à variação genética entre os indivíduos (Tuhina-Khatun et al. 2015).

O ganho genético como porcentagem da média (GGM) foi classificado como baixo, moderado e alto, com valores de 0-10%, 10-20% e >20%, respectivamente (Obala et al. 2018, Tessema et al. 2022). Foram registrados altos percentuais de ganho genético (GGM) (acima de 20%) para a maioria das características, exceto para L*FO que apresentou GGM de 19,02%, considerado moderado e H*FO que apresentou GGM de 4,61%, considerado baixo (Tabela 3). Quanto maior o GGM, maior a evidência de que a seleção artificial é eficiente e que há um forte potencial para a melhoria da característica (Rasheed 2023). Em contrapartida, um GGM baixo sugere que a seleção tem pouco impacto.

A variação herdável pode ser estimada com maior precisão quando a herdabilidade é estudada junto com o ganho genético. Estimativas de alta herdabilidade associadas a um alto ganho genético são um critério eficaz para seleção (Eid 2009). A herdabilidade juntamente com o avanço genético também é útil na avaliação da natureza da ação gênica (Hossain et al. 2021).

Em geral, considera-se que se um caráter for governado por ação genética não aditiva, ele terá alta herdabilidade, mas baixo ganho genético como foi observado para H*FO, enquanto se o caráter for governado por ação genética aditiva, tanto a herdabilidade quanto o avanço genético seriam altos (Hossain et al. 2021; Eid 2009), como foi observado em AP, DP, MS, C*FO, L*FL, C*FL, H*FL, L*CA, C*CA, H*CA, MS e para os teores de 1,8-cineol, linalol, metil chavicol, neral, geranial, Z-metil cinamato, eugenol, E-metil cinamato, metil eugenol, E- α -bergamoteno e epi- α -cadinol.

6.3.2 Características dos genótipos parentais

Os valores médios dos genótipos parentais indicam que o híbrido triplo combina várias características desejáveis, demonstrando um vigor híbrido evidente em termos de maior AP, maior DP, maior MS e RO (Tabela 4). Esses atributos proporcionam uma base genética robusta para a geração segregante a partir da autofecundação. Além disso, os maiores valores de LF e AF do híbrido simples também demonstram vigor híbrido, resultante do cruzamento entre Cinnamon e Mrs. Burns (Tabela 4).

Quanto aos atributos de coloração, a cultivar Italian Large Leaf se destaca com os maiores valores de L*FO, CF*O, L*FL, C*FL, L*CA e C*CA, indicando maior luminosidade e intensidade de croma nas folhas, flores e caule dessa cultivar. Nos genótipos parentais, todos os valores de H*FO do círculo cromático (119,24 a 127,99°) indicam variações de verde-amarelado na folha, sendo a folha de Italian Large Leaf mais amarelada em comparação com os outros genótipos. Os ângulos H*CA de 330° a 320° das cultivares Mrs Burns, Cinnamon e híbridos simples e triplo correspondem a flores com tons entre rosa e lilás, enquanto o ângulo em torno de 110° da cultivar Italian Large Leaf corresponde a um tom flor acizentada. Os caules das cultivares Mrs Burns e Italian Large Leaf com H*CA (111,90 e 114,77°) têm uma coloração verde-amarelada, enquanto Cinnamon e Híbrido Simples (334,68 e 346,95°) têm caules com

tons vermelho-arroxeados. O híbrido triplo, com um ângulo Hue em torno de 46°, sugere uma coloração mais amarela.

Tabela 4. Valores médios e erro padrão da média (EPM) e variação de valores das características morfoagronômicas e químicas na população segregante de *Ocimum basilicum*.

Genótipos	AP	DP	CF	LF	AF
	Limite	Limite	Limite	Limite	Limite
	Inferior - Superior	Inferior - Superior	Inferior - Superior	Inferior - Superior	Inferior - Superior
Segregantes	6,00 - 30,00	3,00 - 62,00	1,96 - 8,68	0,79 - 5,65	1,44 - 22,79
	Média ± EPM	Média ± EPM	Média ± EPM	Média ± EPM	Média ± EPM
Mrs Burns	49,500 ± 4,765	37,783 ± 3,571	5,710 ± 0,044	2,357 ± 0,312	8,460 ± 0,324
Cinnamon	26,747 ± 2,108	21,080 ± 3,533	5,343 ± 0,188	2,760 ± 0,102	9,840 ± 0,120
Italian Large Leaf	34,667 ± 0,882	19,343 ± 2,064	7,667 ± 0,901	3,320 ± 0,017	17,653 ± 0,057
Híbrido Simples	44,227 ± 2,513	37,610 ± 3,119	5,710 ± 0,867	4,477 ± 0,237	21,93 ± 0,435
Híbrido Triplo	56,003 ± 4,631	61,057 ± 3,435	8,087 ± 0,638	3,517 ± 0,428	17,437 ± 3,680
Genótipos	MS	TO	RO	L*FO	C*FO
	Limite	Limite	Limite	Limite	Limite
	Inferior - Superior	Inferior - Superior	Inferior - Superior	Inferior - Superior	Inferior - Superior
Segregantes	0,40 - 48,40	1,00 - 4,00	0,06 - 1,17	34,22 - 61,08	28,73 - 61,23
	Média ± EPM	Média ± EPM	Média ± EPM	Média ± EPM	Média ± EPM
Mrs Burns	11,920 ± 0,917	1,500 ± 0,289	0,277 ± 0,123	37,490 ± 1,412	31,356 ± 1,752
Cinnamon	2,847 ± 0,195	1,500 ± 0,289	0,050 ± 0,015	36,423 ± 0,692	29,314 ± 0,459
Italian Large Leaf	2,117 ± 0,217	1,167 ± 0,167	0,050 ± 0,010	52,095 ± 0,023	55,898 ± 0,136
Híbrido Simples	12,577 ± 1,242	1,500 ± 0,289	0,303 ± 0,070	36,720 ± 0,174	32,277 ± 2,004
Híbrido Triplo	33,400 ± 2,525	1,500 ± 0,289	0,670 ± 0,165	35,685 ± 0,948	34,253 ± 1,249
Genótipos	H*FO	L*FL	C*FL	H*FL	L*CA
	Limite	Limite	Limite	Limite	Limite
	Inferior - Superior	Inferior - Superior	Inferior - Superior	Inferior - Superior	Inferior - Superior
Segregantes	110,17 - 129,21	50,18 - 87,26	2,40 - 32,19	74,98 - 356,38	19,33 - 70,30
	Média ± EPM	Média ± EPM	Média ± EPM	Média ± EPM	Média ± EPM
Mrs Burns	127,798 ± 0,870	65,446 ± 1,167	11,481 ± 1,036	330,833 ± 12,361	37,097 ± 4,134
Cinnamon	127,987 ± 0,349	50,829 ± 0,587	27,721 ± 2,788	319,547 ± 2,061	20,059 ± 0,447
Italian Large Leaf	119,239 ± 0,123	80,675 ± 1,127	22,690 ± 1,807	110,367 ± 2,382	61,955 ± 1,029
Híbrido Simples	126,163 ± 1,687	61,988 ± 2,658	10,042 ± 0,940	328,539 ± 8,199	25,045 ± 0,806
Híbrido Triplo	126,669 ± 0,959	66,525 ± 1,684	9,510 ± 0,877	319,700 ± 2,814	32,692 ± 2,429
Genótipos	C*CA	H*CA			
	Limite	Limite			
	Inferior - Superior	Inferior - Superior			
Segregantes	6,89 - 56,28	0,16 - 356,43			
	Média ± EPM	Média ± EPM			
Mrs Burns	18,780 ± 4,815	111,901 ± 1,030			
Cinnamon	18,142 ± 0,548	334,679 ± 2,306			
Italian Large Leaf	48,750 ± 1,898	114,769 ± 0,104			
Híbrido Simples	12,222 ± 1,558	346,952 ± 1,667			
Híbrido Triplo	9,910 ± 1,766	46,536 ± 2,138			

AP: altura de planta, DP: diâmetro de planta, CF: comprimento de folha, LF: largura de folha, AF: área foliar, MS: massa seca, TO: teor de óleo essencial, RO: rendimento de óleo essencial, L*FO= luminosidade de Folha, C*FO= croma de folha, H*FO= ângulo Hue de folha (Comissão Internacional de Iluminação).

6.3.3 Composição química dos genótipos parentais e segregantes

Observou-se que as cultivares Cinnamon, Mrs Burns e Italian Large Leaf apresentam teores de linalol entre 24,94% e 32,97%. O cruzamento do híbrido simples com Italian Large Leaf resultou em incrementos significativos nos teores de linalol, alcançando até 52,17% nos híbridos triplos (Tabela 5). Isso indica que a combinação genética dos parentais influencia diretamente a produção desse composto. Nos genótipos segregantes, os teores variaram consideravelmente, destacando-se genótipos como OB-027 (95,84%) e OB-001(78,91%) com altos teores de linalol, sugerindo potencial para seleção de genótipos com perfis químicos desejáveis.

No caso do eugenol, a cultivar Cinnamon apresentou o maior teor (2,52%), aumentando para 8,67% nos híbridos triplos. Esse aumento indica a contribuição positiva da Italian Large Leaf para a síntese de eugenol. Nos segregantes, observou-se uma ampla variação nos teores de eugenol, com genótipos como OB-131 e OB-151 alcançando os maiores teores (24,80%) (Tabela 5).

A cultivar Cinnamon foi identificada como a principal fonte de E-cinamato de metila (32,69%), com redução nos híbridos simples (7,8%) e triplos (0,74%). Essa redução sugere uma influência recessiva ou supressão pelos alelos de outras cultivares nos híbridos subsequentes. Na população segregante, os teores variam de 0,25% a 63,08%, destacando-se OB-078 (63%)

e OB-001 (79%). A ausência de Z-cinamato de metila nas cultivares parentais e sua presença nos segregantes indicam a segregação genética desse composto, com genótipos como OB-064 (13,2%) e OB-048 (4,75%) apresentando os maiores teores (Tabela 5).

Tabela 5. Teores (%) dos principais constituintes químicos do óleo essencial de 47 genótipos de manjerição, compostos por 3 cultivares, 2 híbridos e 42 indivíduos segregantes da autofecundação de um híbrido triplo, cultivados no município de São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

Genótipo	Componentes (%)									
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
IRRo	1029	1093	1184	1243	1274	1306	1356	1374	1434	1638
IRRI	1032	1099	1196	1240	1276	1292	1357	1379	1435	1640
OB-001	-	78,91	-	-	-	-	-	-	2,99	8,47
OB-004	2,48	71,89	-	-	-	-	2,34	-	0,47	9,48
OB-005	-	8,28	-	-	-	-	0,93	-	20,18	20,74
OB-006	3,11	74,74	-	-	-	-	-	-	-	10,64
OB-008	5,47	61,39	-	-	-	-	2,44	-	9,51	-
OB-012	-	10,31	-	-	-	-	0,81	-	1,34	56,23
OB-015	1,76	41,60	-	-	-	-	0,83	-	5,10	21,80
OB-023	1,16	34,03	-	-	-	-	4,64	0,49	9,52	2,79
OB-027	-	95,84	-	-	-	-	-	-	-	1,14
OB-033	-	45,09	-	-	-	-	-	-	12,67	20,08
OB-038	5,47	59,39	-	-	-	-	2,44	-	10,51	-
OB-045	-	8,28	-	-	-	-	0,93	-	20,18	20,74
OB-048	0,51	34,95	-	-	-	4,15	-	40,94	4,89	6,85
OB-053	3,07	52,99	-	-	-	-	19,06	-	1,33	7,77
OB-064	5,87	32,62	0,40	-	-	-	13,22	0,40	3,56	7,97
OB-066	2,69	40,75	-	-	-	-	1,65	-	7,07	15,92
OB-067	8,35	37,74	0,56	-	-	-	11,88	-	0,79	1,05
OB-068	0,51	35,35	-	-	-	4,75	-	39,94	5,89	5,85
OB-070	0,17	26,32	0,16	-	-	-	0,64	0,42	6,59	19,43
OB-071	4,31	36,34	0,45	-	-	-	4,38	0,67	5,19	13,58
OB-073	4,28	24,90	-	-	-	-	3,55	0,34	9,53	17,16
OB-074	4,63	39,77	0,15	-	-	-	11,80	0,53	2,17	15,69
OB-076	7,61	52,43	0,15	-	-	-	0,97	-	4,68	0,73
OB-078	2,26	4,81	-	-	-	9,14	-	63,08	-	4,37
OB-079	3,21	43,00	-	-	-	-	2,67	2,15	9,26	5,81
OB-081	5,69	14,57	-	-	-	-	0,78	0,35	7,33	22,10
OB-084	5,09	54,15	-	-	-	-	0,73	0,31	3,71	5,17
OB-089	3,11	43,10	-	-	-	-	2,67	2,15	9,26	5,81
OB-121	5,56	16,15	2,48	-	-	8,63	0,23	57,49	0,82	1,94
OB-122	5,90	36,52	-	-	-	-	2,21	-	5,16	14,28
OB-123	7,49	52,51	-	-	-	-	8,61	-	7,18	0,67
OB-124	4,25	44,65	0,30	-	-	-	3,48	-	10,11	11,12
OB-125	5,44	21,76	0,39	-	-	-	4,45	0,25	1,08	18,75
OB-128	5,31	73,29	-	-	-	-	-	-	5,32	-
OB-129	0,27	12,04	-	-	-	-	-	-	20,90	36,92
OB-131	3,84	33,79	-	-	-	-	24,80	1,20	5,83	10,27
OB-132	7,86	43,63	-	-	-	-	3,40	-	7,53	10,99
OB-133	3,07	52,99	-	-	-	-	19,06	-	1,33	7,77
OB-137	2,03	44,73	0,45	-	-	-	4,76	-	1,90	8,22
OB-145	0,77	41,86	-	-	-	-	-	-	8,60	25,85
OB-148	2,11	34,30	0,14	-	-	-	0,19	-	8,35	12,23
OB-151	3,74	33,89	-	-	-	-	24,80	1,20	5,83	10,27
Cinnamon	4,96	24,94	5,15	-	-	-	2,52	32,69	1,04	7,44
Mrs Burns	1,14	32,97	2,62	13,24	14,88	-	0,45	0,61	4,25	-
Italian Large Leaf	5,49	30,22	34,23	-	-	-	0,61	0,36	4,69	11,86
Híbrido simples	3,98	40,00	2,61	3,57	4,61	0,86	6,17	7,80	3,93	4,82
Híbrido triplo	4,48	52,17	1,43	1,19	1,52	-	8,67	0,74	3,27	8,62

Compostos: C1: 1,8 cineol; C2: linalol; C3: metil chavicol; C4: neral; C5: geranial; C6: (Z)-cinamato de metila; C7: eugenol; C8: (E)-cinamato de metila; C9: α -(E)-bergamoteno; C10: epi- α -cadinol. IRRo: Índice de Retenção Relativa - observado; IRRI: Índice de Retenção Relativa – literatura (Adams, 2017).

Compostos como 1,8-cineol (5,49%) e metil chavicol (34,2%) foram mais pronunciados na cultivar Italian Large Leaf, indicando uma contribuição específica dessa cultivar para esses compostos. A ampla variação nos segregantes para compostos como E- α -bergamoteno, com destaque para OB-129 (20,9%) e epi- α -cadinol, com destaque para OB-012 (56,2%), sugere uma expressão poligênica complexa, com múltiplos genes regulando esses compostos, o que é consistente com a diversidade fenotípica observada.

O linalol, por outro lado, esteve presente em todas as progênes em altos níveis. Isso indica que os genes responsáveis pela síntese de linalol estão ativos e expressos em todas as plantas, independentemente do cruzamento ou segregação genética.

A produção de neral, geranial e linalol compartilha um precursor comum, o difosfato de geranila (GPP) (Figura1). A via de biossíntese é complexa e envolve várias etapas enzimáticas:

Formação de GPP: a união de difosfato de isopentenila (IPP) e difosfato de dimetilalila (DMAPP) é catalisada pela enzima preniltransferase, GPP (Croteau et al. 2000, Dewick 2009, Niculau 2011).

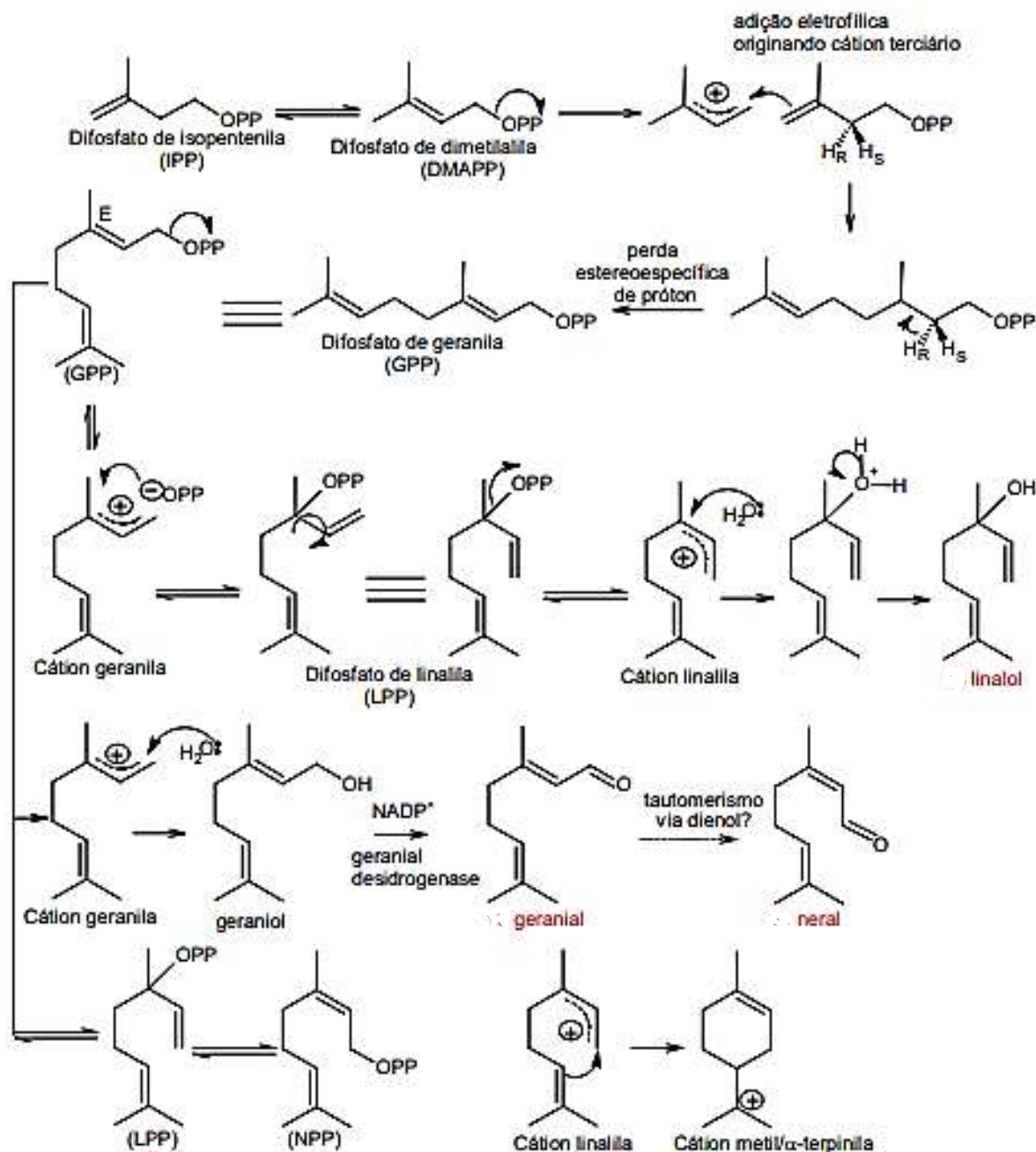


Figura1. Proposta biogénica para formação de linalol, geranial e neral (Niculau, 2011).

Formação de difosfato de linalila LPP e Linalol: o GPP é ionizado para formar o cátion geranila e, com a adição de um grupo difosfato (OPP), produz LPP. O LPP é então ionizado para formar o cátion linalila, que é convertido em linalol pela adição de água assistida pela enzima linalolsintase (Niculau 2011).

Formação de Geraniol e Geranial: o geraniol é formado a partir do cátion geranila pela adição de água, catalisada pela enzima geraniolsintase. O geraniol é então oxidado pela enzima geranioldeidrogenase para formar geranial.

Formação de Neral: o geranial pode ser convertido em neral, possivelmente através de um mecanismo de tautomerismo via dienol, embora essa via ainda não seja completamente compreendida.

Os resultados sugerem que a expressão dos compostos neral e geranial pode estar sendo regulada por genes que são suprimidos ou não expressos em híbridos simples e triplos, bem como nas plantas da geração segregante. Isso pode indicar uma herança recessiva ou a necessidade de fatores regulatórios adicionais presentes apenas na cultivar original Mrs. Burns. Em contraste, a presença consistente de linalol sugere que os genes envolvidos em sua produção são dominantes ou não sujeitos à mesma regulação repressiva.

Esses resultados destacam a complexidade da regulação genética na biossíntese de compostos voláteis e abrem caminho para futuras pesquisas focadas em desvendar os mecanismos específicos de controle genético e enzimático nessa via metabólica.

6.3.4 Análise de componentes principais e agrupamento

A análise de componentes principais (ACP) revelou que os quatro primeiros componentes principais (CP1, CP2, CP3 e CP4) explicam 60% da variância total dos dados (Tabela 6), indicando que uma quantidade significativa da variância pode ser representada por esses componentes.

Tabela 6. Autovalor, explicação dos componentes principais e correlações entre variáveis e componentes principais.

	Explicação dos componentes principais									
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10
Autovalor	7,06	3,86	3,01	2,29	1,93	1,82	1,21	1,17	0,90	0,78
% Explicação	26,16	14,29	11,15	8,48	7,14	6,74	4,49	4,32	3,33	2,90
% Acumulado	26,16	40,45	51,60	60,09	67,24	73,98	78,46	82,78	86,11	89,01
	Correlação entre as variáveis e os componentes principais									
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10
TO	-0,23	0,19	0,35	0,41	0,05	-0,37	-0,28	0,01	0,32	-0,26
RO	0,26	0,73	0,17	0,08	0,05	0,08	-0,08	0,33	-0,02	-0,16
LFO	-0,83	0,16	-0,29	0,09	0,05	0,00	-0,26	-0,19	0,12	-0,15
CFO	-0,83	0,21	-0,27	0,13	0,09	0,05	-0,30	-0,14	0,06	-0,02
HFO	0,73	-0,07	0,30	-0,11	-0,02	-0,02	0,44	0,28	0,00	-0,03
LFL	-0,71	0,38	0,33	-0,04	0,10	0,24	-0,14	0,03	0,01	0,12
CFL	0,26	-0,30	-0,62	0,21	0,01	-0,11	0,12	0,13	0,38	-0,19
HFL	0,77	-0,39	-0,11	0,05	-0,16	-0,10	-0,31	-0,16	0,02	0,14
LCA	-0,85	0,39	0,17	-0,08	0,16	0,06	0,16	0,04	0,01	0,01
CCA	-0,76	0,32	0,06	-0,01	0,20	0,08	0,36	0,18	0,12	-0,21
HCA	0,59	-0,19	-0,15	0,32	-0,26	0,09	0,09	0,04	0,20	-0,39
AP	0,57	0,39	0,48	0,05	-0,01	0,04	-0,24	-0,21	0,23	0,12
DP	0,55	0,50	0,54	0,02	-0,10	0,12	0,02	-0,11	0,03	0,09
CF	0,50	0,41	-0,53	-0,12	0,19	0,37	-0,10	0,13	-0,12	-0,04
LF	0,49	0,57	-0,47	0,02	-0,01	0,23	-0,10	-0,06	-0,01	-0,06
AF	0,46	0,51	-0,59	-0,06	0,11	0,31	-0,11	0,03	-0,11	-0,08
MS	0,46	0,70	0,37	0,09	-0,10	0,07	-0,08	0,14	0,02	-0,03
C01	0,30	0,40	0,09	0,37	0,22	-0,15	0,39	-0,33	0,24	0,10
C02	0,03	0,30	-0,41	0,11	0,28	-0,60	-0,05	0,38	-0,10	0,24
C03	-0,02	0,05	-0,31	-0,14	0,34	0,41	0,36	-0,43	0,20	0,16
C04	0,28	-0,05	0,15	-0,83	0,30	-0,18	-0,12	-0,09	0,12	-0,20
C05	0,29	-0,05	0,14	-0,83	0,30	-0,18	-0,12	-0,09	0,11	-0,20
C06	0,21	-0,53	0,32	0,33	0,49	0,42	-0,13	0,07	-0,07	-0,07
C07	0,28	0,28	0,00	0,21	-0,17	-0,30	0,07	-0,53	-0,41	-0,24
C08	0,19	-0,52	0,32	0,33	0,49	0,42	-0,18	0,07	-0,06	-0,07
C09	-0,09	-0,03	-0,06	-0,24	-0,67	0,34	-0,12	0,11	0,38	0,21
C10	-0,51	-0,06	0,16	-0,18	-0,54	0,32	0,12	0,00	-0,22	-0,29

AP: Altura de planta (cm), DP: diâmetro de planta (cm), CF: comprimento de folha (cm), LF: largura de folha (cm), AF: área foliar (cm²), L*FO: nível de luminosidade na folha, C*FO: nível de croma na folha, H*FO: grau do ângulo hue na folha, L*FL: nível de luminosidade na flor, C*FL: nível de croma na flor, H*FL: grau do ângulo hue na flor, L*CA: nível de luminosidade no caule, C*CA: nível de croma no caule, H*CA: grau do ângulo hue no caule, MS: massa seca de parte aérea (g/planta), TO: teor de óleo essencial (%), RO: rendimento de óleo essencial (mL/planta), C1: % 1,8 - cineol, C02: % linalol, C03: % metil chavicol, C04: % neral, C05: % geranial, C06: % (Z)-metil cinamato, C07: % eugenol, C08: % (E)-metil cinamato, C09: (E)- α -bergamoteno, C10: % epi- α -cadinol.

Características de coloração da planta, MS, RO, DP, LF e AF e compostos específicos como Z-metil cinamato, E-metil cinamato, neral e geranial se revelaram como os principais contribuintes da variação genética na população.

A componente principal primária (CP1) capturou 26,16% da variância total e está fortemente relacionada às características de luminosidade (L^*FO : $r = -0,83$ e L^*CA : $r = -0,85$) e croma (C^*FO : $r = -0,83$ e C^*CA : $r = -0,76$) das folhas e caule, bem como ao ângulo hue na flor (H^*FL : $r = 0,77$) e no caule (H^*FO : $r = -0,73$). Esses resultados sugerem que variações na pigmentação e brilho das estruturas vegetativas e reprodutivas são aspectos importantes da diversidade fenotípica observada. Isso indica que o espaço de cor proposto pela Comissão Internacional de Iluminação facilita a avaliação precisa da coloração, permitindo a seleção de genótipos com características de coloração consistentes e desejáveis (Yaldiz e Camlica 2024).

A CP2 capturou 14,29% da variância total e é mais fortemente influenciada positivamente pelas variáveis de produção massa seca (MS: $r = 0,70$) e rendimento de óleo (RO: $r = 0,73$), além das variáveis morfológicas largura da folha (LF: $r = 0,57$) e área foliar (AF: $r = 0,51$). Por outro lado, apresenta correlações negativas significativas com os compostos Z-metil cinamato ($r = -0,53$) e E-metil cinamato ($r = -0,52$), sugerindo que genótipos com maior produção de biomassa e óleo essencial podem ter perfis químicos diferenciados. Isso indica que a seleção de genótipos com alta produtividade deve considerar também os perfis químicos específicos para maximizar o valor econômico.

A CP3 capturou 11,15% da variância total e é mais correlacionada negativamente com as características croma da flor (C^*FL : $r = -0,62$) e área foliar (AF: $r = -0,59$), e positivamente com diâmetro da planta (DP: $r = 0,54$). Isso sugere que genótipos com maiores diâmetros de planta podem exibir diferenças significativas na largura da folha e na pigmentação floral. A correlação negativa com a área foliar indica que plantas com diâmetros maiores podem ter folhas menos extensas e menos pigmentadas.

A CP4 capturou 8,48% da variância total e é fortemente influenciada negativamente pelos compostos neral ($r = -0,83$) e geranial ($r = -0,83$). Isso sugere que genótipos com baixas concentrações desses compostos tendem a se agrupar distintamente nesta componente. A presença reduzida de neral e geranial pode indicar uma direção específica no melhoramento genético para outros compostos de interesse ou características morfológicas desejáveis.

Esses resultados destacam e confirmam a significativa variabilidade genética detectada entre os grupos, refletindo a diversidade genética e fenotípica dos genótipos estudados. A variabilidade observada nas componentes principais indica um alto potencial para melhoramento genético, permitindo a seleção de genótipos com características específicas e desejáveis.

A observação do dendrograma (Figura 2) revelou a formação de cinco grupos distintos. O grupo 1 incluiu treze genótipos F₂ (OB-066, OB-067, OB-073, OB-074, OB-081, OB-122, OB-125, OB-129, OB-131, OB-132, OB-133, OB-145 e OB-148), o grupo 2 reuniu quinze genótipos F₂ (OB-001, OB-004, OB-005, OB-006, OB-008, OB-012, OB-015, OB-023, OB-027, OB-045, OB-048, OB-068, OB-070, OB-084 e OB-128) e a cultivar Italian Large Leaf. O grupo 3 consistiu em dois genótipos F₂ (OB-078 e OB-121), assemelhando-se à cultivar Mrs Burns. O grupo 4 conteve quatro genótipos F₂ (OB-038, OB-124, OB-137 e OB-151) e o híbrido triplo. O grupo 5 compreendeu oito genótipos F₂ (OB-033, OB-053, OB-064, OB-071, OB-076, OB-079, OB-089 e OB-123) semelhantes à cultivar Cinnamon e ao híbrido simples.

Os diferentes grupos apresentaram características químicas e morfológicas distintas, refletindo a variabilidade significativa entre eles. O Grupo 1 apresentou folhas verdes ($L^*FO = 45,42$; $C^*FO = 29,34$; $H^*FO = 120,41$), flores acinzentadas ($L^*FL = 80,45$; $C^*FL = 5,26$; $H^*FL = 99,02$) e caules verdes ($L^*CA = 61,61$; $C^*CA = 29,86$; $H^*CA = 113,64$). Destacou-se pelos maiores valores de teor de óleo essencial (TO) com 2,23%, E- α -bergamoteno com 6,59% e epi- α -cadinol com 16,08% (Tabela 7). Esses componentes são conhecidos por suas propriedades aromáticas e terapêuticas, indicando que este grupo pode ser de particular interesse para aplicações em perfumaria e aromaterapia.

O Grupo 2 caracterizou-se por folhas verdes ($L^*FO = 49,91$; $C^*FO = 33,16$; $H^*FO = 115,58$), flores rosadas ($L^*FL = 78,52$; $C^*FL = 5,60$; $H^*FL = 79,82$) e caules esverdeados ($L^*CA = 53,41$; $C^*CA = 19,54$; $H^*CA = 102,25$). Apresentou a maior média de metil chavicol,

alcançando 2,15% (Tabela 7). O metil chavicol é um composto importante na indústria de alimentos e cosméticos devido ao seu aroma doce e picante. A alta concentração deste composto neste grupo sugere seu potencial uso nesses setores.

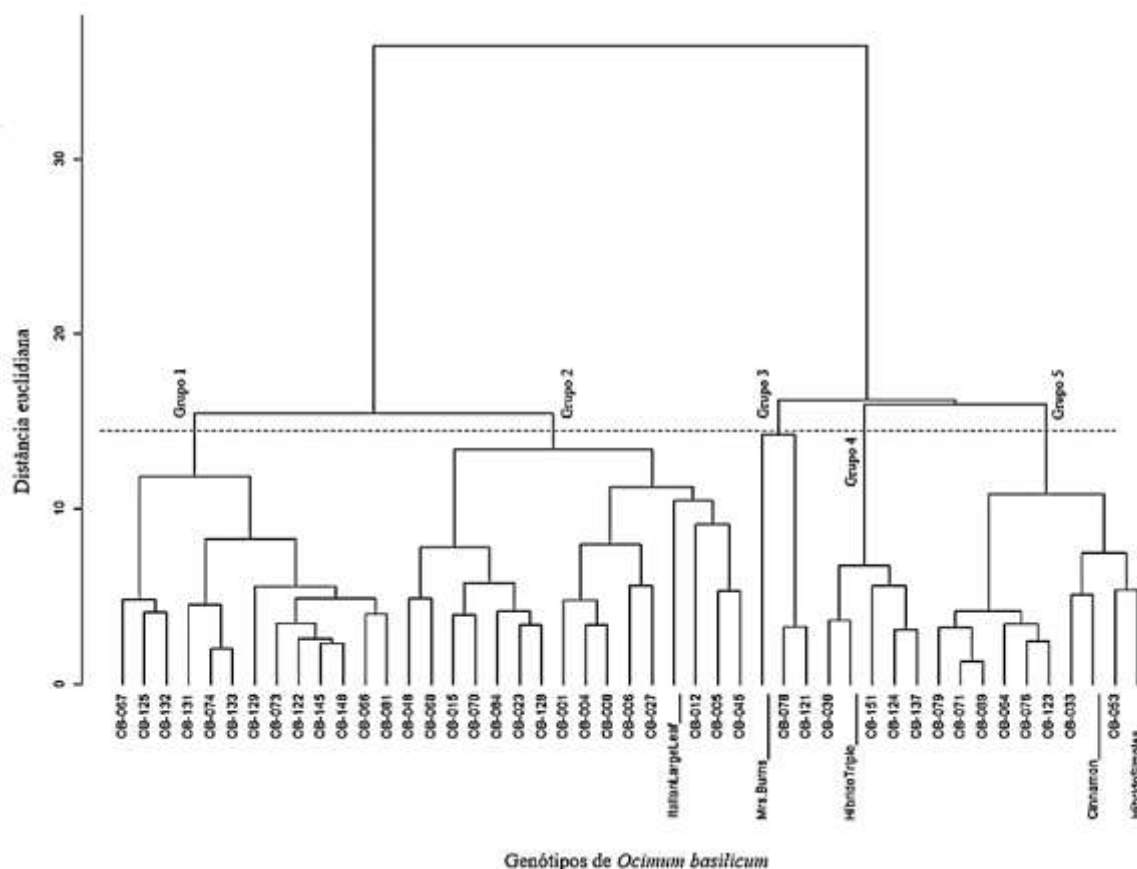


Figura 2. Dendrograma bidimensional representando a similaridade entre 42 genótipos segregantes de *Ocimum basilicum* e seus parentais, para características morfológicas, agrônômicas e composição química dos óleos essenciais.

O Grupo 3 apresentou folhas verdes ($L^*FO = 37,26$; $C^*FO = 20,68$; $H^*FO = 124,26$), flores lilás ($L^*FL = 67,83$; $C^*FL = 7,11$; $H^*FL = 327,10$) e caules amarronzados ($L^*CA = 34,16$; $C^*CA = 5,84$; $H^*CA = 64,08$). Teve as maiores médias para neral (4,41%), geranial (4,96%), Z-metil cinamato (5,92%) e E-metil cinamato (40,39%) (Tabela 7). Esses compostos são conhecidos por suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas, indicando que este grupo pode ter um alto potencial para aplicações medicinais e conservantes naturais.

O Grupo 4 apresentou folhas verdes ($LFO = 37,85$; $CFO = 23,67$; $HFO = 122,43$), flores lilás ($LFL = 68,53$; $CFL = 9,06$; $HFL = 320,81$) e caules amarronzados ($LCA = 32,05$; $CCA = 7,65$; $H^*CA = 353,01$). Sobressaiu-se nas médias de altura de planta (AP) com 55,53 cm, diâmetro da copa da planta (DP) com 53,36 cm, comprimento de folha (CF) com 6,90 cm, largura de folha (LF) com 3,50 cm, área foliar (AF) com 15,54 cm², massa seca (MS) com 31,93 g/planta, rendimento de óleo essencial (RO) com 0,69 mL/planta, linalol com 46,97% e eugenol com 8,83% (Tabela 7). Este grupo combina alta biomassa com elevados teores de linalol e eugenol, dois compostos de grande valor na indústria de perfumaria, cosméticos e produtos farmacêuticos. A alta produtividade e o rendimento de óleo essencial tornam este grupo especialmente valioso para cultivo comercial.

O Grupo 5 caracterizou-se por folhas verdes ($L^*FO = 40,45$; $C^*FO = 23,38$; $H^*FO = 121,15$), flores lilás ($L^*FL = 57,93$; $C^*FL = 14,52$; $H^*FL = 322,30$) e caules vermelho-arroxeados ($L^*CA = 26,38$; $C^*CA = 12,49$; $H^*CA = 341,49$). Foi caracterizado pelo maior teor de 1,8-cineol (4,36%) (Tabela 7). O 1,8-cineol é conhecido por suas propriedades anti-

inflamatórias, descongestionantes e expectorantes, tornando este grupo de particular interesse para a indústria farmacêutica e de produtos para saúde.

Esses resultados destacam e confirmam a significativa variabilidade genética detectada entre os grupos, refletindo a diversidade genética e fenotípica dos genótipos estudados. Essa variabilidade não apenas demonstra o potencial para melhoramento genético, mas também sugere diferentes aplicações comerciais e industriais para cada grupo baseado em suas características químicas e morfológicas específicas.

Tabela 7. Valores médios $\pm$ erro padrão da média (EPM) das características fenotípicas da população F₂ de *O. basilicum*. AP: Altura de planta (cm), DP: diâmetro de planta (cm), CF: comprimento de folha (cm), LF: largura de folha (cm), AF: área foliar (cm²), MS: massa seca de parte aérea (g.planta⁻¹), TO: teor (%) e RO: rendimento de óleo essencial, C1: % 1,8 - cineol, C02: % linalol, C03: % metil chavicol, C04: % neral, C05: % geranial, C06: % (Z)-metil cinamato, C07: % eugenol, C08: % (E)-metil cinamato, C09: % (E)- α -bergamoteno, C10: % epi- α -cadinol.

Característica fenotípica	Grupos de genótipos				
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
TOE $\pm$ EPM	2,23 $\pm$ 0,13	2,07 $\pm$ 0,15	1,83 $\pm$ 0,04	2,10 $\pm$ 0,05	1,90 $\pm$ 0,03
ROE $\pm$ EPM	0,35 $\pm$ 0,17	0,21 $\pm$ 0,11	0,24 $\pm$ 0,02	0,69 $\pm$ 0,03	0,16 $\pm$ 0,01
AP $\pm$ EPM	39,08 $\pm$ 2,50	34,67 $\pm$ 2,13	48,17 $\pm$ 0,93	55,53 $\pm$ 3,57	36,16 $\pm$ 2,90
DP $\pm$ EPM	35,08 $\pm$ 2,42	20,24 $\pm$ 2,30	38,59 $\pm$ 3,97	53,36 $\pm$ 5,68	25,83 $\pm$ 2,40
CF $\pm$ EPM	4,58 $\pm$ 0,10	5,36 $\pm$ 0,12	5,57 $\pm$ 0,03	6,90 $\pm$ 0,70	5,65 $\pm$ 0,25
LF $\pm$ EPM	2,67 $\pm$ 0,03	2,73 $\pm$ 0,05	2,38 $\pm$ 0,02	3,50 $\pm$ 0,03	3,05 $\pm$ 0,20
AF $\pm$ EPM	8,40 $\pm$ 0,20	10,59 $\pm$ 0,91	8,37 $\pm$ 0,43	15,54 $\pm$ 0,90	11,97 $\pm$ 1,23
MS $\pm$ EPM	14,70 $\pm$ 1,10	6,10 $\pm$ 0,20	11,34 $\pm$ 0,42	31,93 $\pm$ 5,67	7,63 $\pm$ 0,90
C1 $\pm$ EPM	4,22 $\pm$ 0,34	1,94 $\pm$ 0,22	2,99 $\pm$ 0,95	3,99 $\pm$ 0,50	4,36 $\pm$ 0,42
C2 $\pm$ EPM	33,43 $\pm$ 2,67	46,25 $\pm$ 6,45	17,98 $\pm$ 8,32	46,97 $\pm$ 5,65	42,30 $\pm$ 3,90
C3 $\pm$ EPM	0,10 $\pm$ 0,00	2,15 $\pm$ 2,05	1,70 $\pm$ 0,45	0,44 $\pm$ 0,04	0,88 $\pm$ 0,22
C4 $\pm$ EPM	0,00 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00	4,41 $\pm$ 0,61	0,24 $\pm$ 0,02	0,36 $\pm$ 0,02
C5 $\pm$ EPM	0,00 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00	4,95 $\pm$ 0,67	0,30 $\pm$ 0,01	0,46 $\pm$ 0,04
C6 $\pm$ EPM	0,00 $\pm$ 0,00	0,59 $\pm$ 0,05	5,92 $\pm$ 0,32	0,00 $\pm$ 0,00	0,64 $\pm$ 0,12
C7 $\pm$ EPM	6,44 $\pm$ 1,92	0,93 $\pm$ 0,03	0,23 $\pm$ 0,05	8,83 $\pm$ 5,69	6,03 $\pm$ 2,53
C8 $\pm$ EPM	0,21 $\pm$ 0,03	5,09 $\pm$ 4,13	40,39 $\pm$ 18,67	0,39 $\pm$ 0,03	4,59 $\pm$ 3,70
C9 $\pm$ EPM	6,59 $\pm$ 0,44	6,34 $\pm$ 1,90	1,69 $\pm$ 0,97	6,32 $\pm$ 1,30	5,81 $\pm$ 0,87
C10 $\pm$ EPM	16,08 $\pm$ 2,04	2,51 $\pm$ 3,73	2,10 $\pm$ 1,10	7,65 $\pm$ 1,20	7,47 $\pm$ 2,55

6.4. Conclusões

Houve uma forte presença dos compostos de óleo essencial provenientes das cultivares genitoras nos indivíduos da geração F₂. Porém, neral e geranial não foram detectados em nenhum dos indivíduos dessa geração.

Na geração F₂ houve variabilidade genética significativa para a maioria das características avaliadas, evidenciada por altos coeficientes de variação genética e fenotípica. Foram identificados cinco grupos distintos de genótipos de manjerição com base na similaridade fenotípica.

Alta herdabilidade e ganho genético foram observados para ângulo hue da flor, luminosidade, croma e ângulo hue do caule, altura da planta, diâmetro da copa, massa seca e teores dos compostos 1,8-cineol, linalol, metil chavicol, neral, geranial, Z-metil cinamato, eugenol, E-metil cinamato, E- α -bergamoteno e epi- α -cadinol.

Esses resultados confirmam que a seleção fenotípica é eficaz no melhoramento genético da população F₂ de *Ocimum basilicum*.

6.5. Referências Bibliográficas

Abtahi M et al. (2022) Revealing seed color variation and their possible association with yield and quality traits in a diversity panel of flax (*Linum usitatissimum* L.). **Frontiers in Plant Science** 13:1-14. doi: 10.3389/fpls.2022.1038079.

- Adams RP (2017) **Identification of Essential Oil Components By Gas Chromatography/Mass Spectrometry**. Allured, Illinois, 4(1):8.
- Alves MF et al. (2018) Inheritance study of yield components and essential oil constituents in linool type basil. **Bioscience Journal** 34(2):296-301. doi: 10.14393/bj-v34n2a2018-38777.
- Aprotosoia AC et al. (2019) Antigenotoxic Potential of Some Dietary Non-phenolic Phytochemicals. **Studies In Natural Products Chemistry** 223-297. doi: 10.1016/b978-0-444-64181-6.00007-3.
- Bucksch A et al. (2017) Morphological Plant Modeling: unleashing geometric and topological potential within the plant sciences. **Frontiers In Plant Science** 8:1-16. doi: 10.3389/fpls.2017.00900.
- Burton GW, Devane EH (1953) Estimating Heritability in Tall Fescue (*Festuca arundinacea*) from Replicated Clonal Material. **Agronomy Journal** 45(10):478-481. doi: 10.2134/agronj1953.00021962004500100005x.
- Couto HGSA et al. (2019) Essential oils of basil chemotypes: major compounds, binary mixtures, and antioxidant activity. **Food Chemistry** 293:446-454. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.04.078.
- Chesnokov YV, Kosolapov VM & Savchenko IV (2020) Morphological Genetic Markers in Plants. **Russian Journal Of Genetics** 56(12):1406-1415. doi: 10.1134/s1022795420120042.
- Croteau R, Kutchan M & Lewis NG (2000) Natural products (secondary metabolites). In: Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (Eds.), *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. **American Society of Plant Physiologists**, Rockville, MD, USA. pp. 1250-1318.
- Cui X, He H, Hu S, Zhang B and Cai H (2022) Synergistic Interaction between Copper and Nitrogen-Uptake, Translocation, and Distribution in Rice Plant. **Plants** 11(19):2612. <http://dx.doi.org/10.3390/plants11192612>
- Dewick PM (2009) **Medicinal Natural Products: A Biosynthetic Approach**. 3rd ed. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, England. 550 pp
- Dabalo DY, Singh BCS, Weyessa B (2020) Genetic variability and association of characters in linseed (*Linum usitatissimum* L.) plant grown in central Ethiopia region. **Saudi Journal Of Biological Sciences** 27(8):2192-2206. doi: 10.1016/j.sjbs.2020.06.043.
- Eid MH (2009) Estimation of Heritability and Genetic Advance of Yield Traits in Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Drought Condition. **International Journal of Genetics and Molecular Biology** 1:115-120.
- França MFMS et al. (2017) Germination test and ornamental potential of different basil cultivars (*Ocimum* spp.). **Ornamental Horticulture** 23(4):385-391. doi: 10.14295/oh.v23i4.1080.
- Gowda MP et al. (2019) A Study on Genetic Variability for Yield and its Attributes in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). **International Journal Of Current Microbiology And Applied Sciences** 8(6):2995-3003. doi: 10.20546/ijcmas.2019.806.357.
- Hossain MD et al. (2021) Estimation of Variability, Heritability and Genetic Advance for Phenological, Physiological and Yield Contributing Attributes in Wheat Genotypes under Heat Stress Condition. **American Journal Of Plant Sciences** 12(4):586-602. doi:10.4236/ajps.2021.124039.
- Johnson HW, Robinson HF, Comstock RE (1955) Estimates of Genetic and Environmental Variability in Soybeans. **Agronomy Journal** 47(7):314-318. doi: 10.2134/agronj1955.00021962004700070009x.
- Joshi A et al. (2021) Methyl Eugenol, 1,8-Cineole and Nerolidol Rich Essential Oils with their Biological Activities from three Melaleuca Species Growing in Tarai Region of North India. **Brazilian Archives Of Biology And Technology** 64:1-15. doi: 10.1590/1678-4324-2021210186.

- Kapteyn J et al. (2007) Evolution of Cinnamate/p-Coumarate Carboxyl Methyltransferases and Their Role in the Biosynthesis of Methylcinnamate. **The Plant Cell** 19(10):3212-3229. doi: 10.1105/tpc.107.054155.
- Lewinsohn E et al. (2000) Biosynthesis of estragole and methyl-eugenol in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). Developmental and chemotypic association of allylphenol O-methyltransferase activities. **Plant Science** 160(1):27-35. doi: 10.1016/s0168-9452(00)00357-5.
- Li Y et al. (2019) Spectroscopic determination of leaf chlorophyll content and color for genetic selection on *Sassafras tzumu*. **Plant Methods** 15(1). doi:10.1186/s13007-019-0458-0.
- Niculau ES. **Contribuição à química dos compostos voláteis de *Lippia alba* (Mill) N. E. Brown e *Pelargonium graveolens* L'Herit e atividade inseticida frente à *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)**. 2011. 130f. Dissertação (Mestrado em Química) - Núcleo de Pós-Graduação em Química, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/6152>. Acesso em: 20 out. 2022.
- Mueen CH et al. (2015) Biological and Pharmacological Properties of the Sweet Basil (*Ocimum basilicum*). **British Journal Of Pharmaceutical Research** 7(5):330-339. doi: 10.9734/bjpr/2015/16505.
- Nascimento LFA et al. (2020) Morphoagronomic characterization of *Lantana camara* L. germplasm. **Bioscience Journal** 36(4):1211–1222. doi: 10.14393/BJ-v36n4a2020-48080.
- Parasuraman V et al. (2022) Fabrication and bacterial inhibitory activity of essential oil linalool loaded biocapsules against *Escherichia coli*. **Journal Of Drug Delivery Science And Technology** 74:103495. doi: 10.1016/j.jddst.2022.103495.
- Pimentel FAG et al. (2023) Agronomic, Sensory and Essential Oil Characterization of Basil (*Ocimum basilicum* L.) Accessions. **Horticulturae** 9(7):831. doi: 10.3390/horticulturae9070831.
- Obala J et al. (2018) Genetic variation and relationships of total seed protein content with some agronomic traits in pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.). **Australian Journal of Crop Science** 12:1859-1865. doi:10.21475/ajcs.18.12.12. p1138.
- Pinto JAO et al. (2019) Chemical characterization of the essential oil from leaves of basil genotypes cultivated in different seasons. **Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas** 18:58-70.
- Pinto JAO et al. (2018) Cropping season affect the performance of basil cultivars and hybrids. **Bioscience Journal** 34(3):640-647. doi: 10.14393/bj-v34n3a2018-39377.
- Possobom MTD et al. (2015). Genetic control of the seed coat colour of middle American and Andean bean seeds. **Genetica** 143:45-54. doi: 10.1007/s10709-014-9811-4.
- Rasband WS (2004) ImageJ, National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.
- Rasheed A et al. (2023) Study of genetic variability, heritability, and genetic advance for yield-related traits in tomato (*Solanum lycopersicon* MILL.). **Frontiers In Genetics** 13. doi: 10.3389/fgene.2022.1030309.
- Santana ADD et al. (2018) Phenotypic and genotypic characterization of basil hybrids and cultivars. **Bioscience Journal** 1167-1177. doi: 10.14393/bj-v34n5a2018-39445.
- Sadohara R et al. (2021) Seed coat color genetics and genotype × environment effects in yellow beans via machine-learning and genome-wide association. **Plant Genome**, 15:e20173. doi: 10.1002/tpg2.20173.
- Smita S, Kishore RL (2018) Estimation of Genetic Variability, Heritability and Genetic Advance for Essential Oil Yield and Related Traits in Genus *Ocimum*. **Advances In Crop Science And Technology** 6(02):1-6. doi: 10.4172/2329-8863.1000350.
- Singh YP et al. (2015) Genetic variability and character association for oil content and its component traits in indigenous and exotic accessions of basil (*Ocimum basilicum* L.).

- Ecology, Environment And Conservation** 1(1):325-330. doi: 10.13140/RG.2.2.25498.57286.
- Terfa GN, Gurmu GN (2020) Genetic variability, heritability and genetic advance in linseed (*Linum usitatissimum* L.) genotypes for seed yield and other agronomic traits. **Oil Crop Science** 5(3):156-160. doi: 10.1016/j.ocsci.2020.08.002.
- Tessema GL, Mohammed AW, Abebe DT (2022) Genetic variability studies for tuber yield and yield attributes in Ethiopian released potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties. **PeerJ** 10:12860. doi: 10.7717/peerj.12860.
- Tuhina-Khatun M et al. (2015) Genetic Variation, Heritability, and Diversity Analysis of Upland Rice (*Oryza sativa* L.) Genotypes Based on Quantitative Traits. **Biomed Research International** 2015:1-7. doi: 10.1155/2015/290861.
- Wesolowska A, Jadczyk D (2016) Composition of the Essential Oils from Inflorescences, Leaves and Stems of *Ocimum basilicum* 'Cinnamon' Cultivated in North-western Poland. **Journal of Essential Oil Bearing Plants** 19(4):1037-1042. doi: 10.1080/0972060x.2016.1197801.
- Yaldiz G & Camlica M (2024) Genetic diversity of selected basil (*Ocimum basilicum* L.) genotypes based on morphological, yield, and leaf color parameters. **Journal of Crop Improvement** 38(3), 240-256. doi: 10.1080/15427528.2024.2336262.
- You FM et al. (2016) Estimation of genetic parameters and their sampling variances for quantitative traits in the type 2 modified augmented design. **The Crop Journal** 4(2):107-118. doi: 10.1016/j.cj.2016.01.003.
- Zhang L et al. (2021) Leaf Size Development Differences and Comparative Transcriptome Analyses of Two Poplar Genotypes. **Genes** 12(11):1775. doi: 10.3390/genes12111775.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos mostraram que deficiências em nutrientes têm um impacto significativo no desenvolvimento das plantas de manjeriço Italian Large Leaf. As populações estudadas exibiram variabilidade genética, sugerindo potencial para exploração em programas de melhoramento do manjeriço.

Neste estudo, a técnica dos elementos faltantes foi aplicada para macronutrientes e micronutrientes, demonstrando a importância abrangente de ambos na nutrição do manjeriço. O uso de um grande número de características para analisar os parâmetros genéticos, incluindo variáveis morfológicas, agrônomicas e químicas, proporcionou uma compreensão mais completa das relações genéticas e das características da planta.

Além disso, foi evidenciada a regulação genética complexa na biossíntese dos óleos essenciais, indicando a necessidade de estudos mais aprofundados para compreender plenamente esses mecanismos. A abordagem inovadora utilizada para analisar a coloração revelou-se eficiente, oferecendo novas perspectivas para a avaliação de características visuais em manjeriço.

Essas metodologias podem contribuir significativamente para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes no cultivo e melhoramento genético do manjeriço.