

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

JOSÉ ROMERO NETO JÚNIOR

ÍNDICE MGIDI PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS E HÍBRIDOS SIMPLES DE
ALFACES TROPICALIZADAS

Monte Carmelo
2026

JOSÉ ROMERO NETO JÚNIOR

ÍNDICE MGIDI PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS E HÍBRIDOS SIMPLES DE
ALFACES TROPICALIZADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Agronomia da Universidade
Federal de Uberlândia, *Campus* Monte
Carmelo, como requisito necessário para a
obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Carolina Silva
Siquieroli

Monte Carmelo
2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

JOSÉ ROMERO NETO JÚNIOR

ÍNDICE MGIDI PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS E HÍBRIDOS SIMPLES DE
ALFACES TROPICALIZADAS

Monte Carmelo, 17 de julho de 2026

Banca Examinadora

Profa. Dra. Ana Carolina Silva Siquieroli
Orientadora

Eng. Agr. e Mestrando Uelson Sabino Da Silva Filho
Membro da Banca

Eng. Agr e Me. Marco Iony Dos Santos

Monte Carmelo
2026

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser a minha fortaleza, guia e fonte de sabedoria em cada etapa desta jornada. Por me dar a fé, a saúde e a perseverança necessárias para superar todos os desafios e alcançar esta grande conquista.

Aos meus pais, Romero e Simone, o meu amor e a minha eterna gratidão. Vocês são a minha base, o meu exemplo e a razão de cada vitória. Agradeço por todo o amor incondicional, pelos sacrifícios feitos ao longo do caminho e por sempre acreditarem nos meus sonhos.

À minha namorada, Luana, pelo companheirismo, paciência, amor e compreensão. Obrigado por estar ao meu lado nos dias mais intensos, por me incentivar nos momentos de cansaço e por vibrar com cada pequena conquista minha.

Aos meus familiares, pela torcida sincera, pelo carinho e pelas palavras de encorajamento que sempre me impulsionaram a seguir em frente.

Aos meus grandes amigos, Vitor Augusto, Juarez, Torugo e Aninha, pela parceria leal ao longo de toda a jornada acadêmica. As horas de estudo compartilhadas, o apoio mútuo, as risadas e a convivência tornaram esses anos infinitamente mais leves e inesquecíveis.

À minha orientadora, Ana Carolina Silva Siquieroli, a minha mais profunda gratidão. Agradeço por toda a paciência, sabedoria, apoio incondicional e incentivo prestado do início ao fim deste trabalho. Sua condução foi fundamental para o meu crescimento e para a realização deste projeto.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado por cada ensinamento, pelo conhecimento compartilhado e pela dedicação ao ensino.

À Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, que possibilitou a minha formação.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho e torceram por mim, a minha sincera gratidão.

RESUMO

A alface (*Lactuca sativa* L.) é a folhosa mais consumida no Brasil, porém seu cultivo tropical é limitado por altas temperaturas, que causam pendoamento precoce e perdas comerciais. Este trabalho objetivou selecionar linhagens e híbridos simples adaptados às condições tropicais utilizando o índice de distância genótipo-ideótipo multicaracterístico (MGIDI). O experimento foi conduzido na Estação Experimental de Hortaliças da UFU (campus Monte Carmelo), em delineamento de blocos casualizados, avaliando-se caracteres agronômicos. Por meio de análises univariadas, multivariadas e do índice MGIDI, foi possível identificar genótipos promissores reunindo elevada produtividade, adaptação climática e qualidade nutricional. O estudo confirmou variabilidade genética no germoplasma de alface, viabilizando a seleção para caracteres agronômicos e fisiológicos. O índice multivariado MGIDI (intensidade de 30%) mostrou-se eficiente na seleção simultânea, destacando os híbridos UFU197, UFU MC BIOFORT2 e UFU189 como superiores à testemunha comercial 'Grand Rapids'. O ganho genético obtido para redução do comprimento do caule atenua o pendoamento precoce em ambiente tropical, ratificando o elevado potencial desses genótipos para o programa de melhoramento.

PALAVRAS-CHAVE: *Lactuca sativa* L., Melhoramento genético, Métodos de seleção, Linhagens, Tropicalização.

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
1. INTRODUÇÃO	7
2. justificativa	8
3. OBJETIVO	9
4. REVISÃO DA LITERATURA	9
4.1. Alface.....	9
4.2. Valor nutricional da alface	10
4.3. Tropicalização da alface	11
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
6. resultado e discussão	13
6.1. Análise de Variância (ANOVA) e Pressupostos Estatísticos.....	13
6.2. Validação dos Pressupostos Estatísticos e Análise Univariada.....	15
6.3. Seleção Multivariada pelo Índice MGIDI	18
6.4. Identificação dos Genótipos Seleccionados e Diferencial de Seleção	19
6.5. Decomposição da Contribuição Relativa dos Fatores	21
7. Conclusão	23
REFERÊNCIAS	24

1. INTRODUÇÃO

A cultura da alface possui grande importância em nível mundial, por se tratar de um alimento amplamente associado a hábitos de vida mais saudáveis. No Brasil, destaca-se como a hortaliça herbácea folhosa de maior consumo, sendo também uma das mais cultivadas em hortas domésticas, em razão de sua elevada adaptabilidade às condições climáticas do país. Em um cenário de aumento da demanda por alimentos seguros e saudáveis, a biofortificação por meio do melhoramento genético vem ganhando espaço (KATHI et al., 2024; MORAES et al., 2020).

O melhoramento genético da alface tem papel fundamental na obtenção de características como produtividade, uniformidade, resistência a doenças e adaptação ambiental. Nesse contexto, o uso de híbridos simples destaca-se por possibilitar a exploração da heterose, resultando assim em plantas mais homogêneas e com maior desempenho agrônomo, atendendo às exigências do mercado produtor e consumidor (SILVA et al., 2019).

Estudos demonstram possíveis incrementos nos teores de carotenoide, antocianinas e minerais essenciais, como selênio e iodo, sem comprometer o desempenho produtivo das plantas (WHITE; BROADLEY, 2009; SMOLENÍ et al., 2019).

Apesar de sua ampla difusão, o cultivo de alface enfrenta limitações relacionadas às altas temperaturas e ao fotoperíodo, fatores que favorecem o pendoamento precoce e reduzem a qualidade comercial das plantas. Dessa forma, o desenvolvimento de cultivares tropicalizadas tem sido uma estratégia essencial para garantir estabilidade produtiva, maior adaptação climática e resistência a estresses bióticos e abióticos (SALA et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2020).

A integração entre genótipos biofortificados e adaptados às condições tropicais representa uma abordagem promissora para o desenvolvimento de cultivares mais eficientes e sustentáveis. A seleção de híbridos simples que agreguem elevado valor nutricional, estabilidade produtiva e adaptação climática pode contribuir para o fortalecimento da cadeia produtiva da alface e para a promoção da segurança alimentar e nutricional (SANCHES et al., 2025).

Neste contexto, torna-se necessária a utilização de técnicas de seleção de genótipos de destaque. Um desses métodos é o Índice de Distância de Genótipo-Ideótipo de Traço Múltiplo (MGIDI) que incorpora diferentes características em um único valor e classifica os genótipos com base em sua distância de um genótipo ideal (OLIVOTO; NARDINO, 2021).

2. JUSTIFICATIVA

A alface é uma das hortaliças folhosas de maior relevância no contexto alimentar mundial, estando fortemente associada à adoção de hábitos alimentares saudáveis. No Brasil, destaca-se como a hortaliça de maior consumo, amplamente cultivada em diversas regiões do país. Diante do crescimento da demanda por alimentos seguros, nutritivos e funcionais, estratégias voltadas ao aumento do valor nutricional dos alimentos, como a biofortificação por melhoramento genético, tornam-se cada vez mais importantes.

O melhoramento genético da alface tem evoluído para atender simultaneamente às exigências produtivas e nutricionais, buscando genótipos que combinem alto desempenho agrônomo com maior concentração de compostos bioativos. Nesse cenário, o uso de híbridos simples apresenta-se como alternativa eficiente.

O uso de híbridos simples no melhoramento da alface permite a exploração da heterose, favorecendo maior uniformidade, produtividade e qualidade comercial das plantas. No entanto, o cultivo em regiões tropicais é frequentemente limitado por fatores climáticos, especialmente altas temperaturas que induzem o pendoamento precoce e perda de produtividade. Assim, o desenvolvimento de genótipos tropicalizados constitui um dos principais desafios da alfacecultura brasileira.

Nesse contexto, a seleção de híbridos simples que aliem elevado valor nutricional, estabilidade produtiva e adaptação às condições tropicais representa uma abordagem estratégica para o avanço do melhoramento genético da cultura.

3. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a seleção de linhagens e híbridos simples de alfaces tropicalizadas utilizando o índice de distância genótipo-ideótipo multicaracterístico (MGIDI).

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1. Alface

A alface (*Lactuca sativa* L.) é considerada uma das hortaliças folhosas mais cultivadas e consumidas no mundo, sendo amplamente utilizada na alimentação, principalmente na forma de saladas frescas (EMBRAPA, 2018). De acordo com a Food and Agriculture Organization (2022), a produção global de alface e chicória ultrapassa 27 milhões de toneladas por ano, sendo a China o principal produtor mundial.

No Brasil, a alface é uma das hortaliças mais comercializadas, sendo cultivada em praticamente todas as regiões do país (EMBRAPA, 2018). Apresenta grande relevância econômica, sendo cultivada principalmente por pequenos e médios produtores, que abastecem mercados locais e centrais de abastecimento.

A espécie pertence à família Asteraceae, gênero *Lactuca*, sendo originária das regiões do Mediterrâneo e do Oriente Médio. É considerada planta herbácea anual, de caule curto e folhas dispostas em forma de roseta. Dependendo da cultivar, as folhas podem apresentar diferentes colorações formato e texturas, originando grupos comerciais como alface crespa, lisa, americana e romana, amplamente cultivados em sistemas olerícolas (FILGUEIRA, 2013).

No mercado brasileiro, a preferência dos consumidores é dominada pela alface crespa, que representa aproximadamente 65% do mercado, seguida pela alface americana, responsável por cerca de 20% das vendas, enquanto os demais tipos, como a lisa, romana e mimosa correspondem a menores parcelas no mercado (EMBRAPA, 2018).

A reprodução da alface ocorre predominantemente por sementes, caracterizando como plantas de reprodução sexuada. A propagação comercial é realizada por meio da produção de mudas em bandeja, que posteriormente são transplantadas para o local definitivo de cultivo. O ciclo da cultura é relativamente curto, tendo uma variação entre 65 a 80 dias, da semente a colheita, a depender da cultivar, das condições climáticas e das práticas de manejo adotadas (FILGUEIRA, 2013).

4.2. Valor nutricional da alface

Do ponto de vista nutricional, a alface apresenta baixo valor calórico e elevado teor de água, sendo considerado um alimento leve e saudável. A hortaliça também é fonte de vitaminas e minerais essenciais, destacando-se as vitaminas A, C e K, além de minerais como potássio, cálcio, ferro e magnésio, que desempenham importantes funções no metabolismo humano (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2023).

A alface também contém diversos compostos bioativos, incluindo pigmentos naturais como clorofila e carotenoides, que desempenham papel muito importante na saúde. A clorofila é o pigmento responsável pela coloração verde das folhas e atua na absorção da energia luminosa durante o processo de fotossíntese. No organismo humano, esse composto apresenta propriedades antioxidantes, podendo auxiliar na proteção celular contra danos causados por radicais livres (TAIZ et al., 2017).

Os carotenoides, por sua vez, constituem um grupo de pigmentos responsáveis por tonalidades que variam do amarelo ao alaranjado em tecidos vegetais. Na alface, destacam-se compostos como o β -caroteno e a luteína, que apresentam importante função antioxidante e estão associados à prevenção de doenças degenerativas e à manutenção da saúde ocular. Além disso, alguns carotenoides atuam como precursores da vitamina A, nutriente essencial para o sistema imunológico, crescimento celular e funcionamento adequado da visão (TAIZ et al., 2017; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2022).

4.3. Tropicalização da alface

A tropicalização consiste numa melhor adaptação genética e agrônômica das culturas às condições ambientais dos trópicos, envolvendo principalmente o melhoramento genético para a seleção de plantas mais tolerantes ao calor, à umidade e a patógenos presentes nestas regiões (FILGUEIRA, 2013).

Grande parte das hortaliças cultivadas no Brasil possui origem em regiões de clima temperado, principalmente na Europa e Ásia. Por esse motivo, muitas das espécies apresentaram inicialmente dificuldades de adaptação às condições climáticas tropicais, caracterizadas por temperatura mais elevadas, alta intensidade de radiação solar e maior ocorrência de chuvas. Nesse cenário, pesquisas conduzidas pelo grupo de Melhoramento Genético de Hortaliças da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), têm contribuído significativamente para o desenvolvimento de alfaces tropicalizadas e biofortificadas (SIQUIEROLI et al., 2025).

Estudos vêm avaliando linhagens de alfaces biofortificadas e tropicalizadas provenientes deste banco de germoplasma, analisando características agrônômicas e teores de pigmentos. Os resultados evidenciaram ampla diversidade genética entre os genótipos, permitindo a identificação de linhagens promissoras capazes de combinar adaptação ao clima tropical, produtividade e a qualidade nutricional, características essenciais para o desenvolvimento de novas cultivares destinadas ao cultivo nas regiões tropicais (MOROTTI et al., 2025).

No trabalho desenvolvido por Sanches et al. (2025), foram avaliados híbridos de alface com objetivo de gerar populações biofortificadas ricas em carotenoides e com elevado potencial agrônômico. Os resultados demonstraram a existência de variabilidade genética significativa entre os genótipos avaliados, permitindo a seleção de híbridos promissores para programas de melhoramento voltados à produtividade e ao enriquecimento nutricional das folhas.

Avanços do melhoramento genético da alface são de grande importância e tem papel estratégico na agricultura tropical, pois possibilita o desenvolvimento de cultivares tendo maior tolerância ao calor, melhor eficiência fisiológica e maior concentração de

compostos bioativos, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola e melhor qualidade nutricional dos alimentos.

5. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na Estação Experimental de Hortaliças da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), localizada no campus Monte Carmelo. As linhagens avaliadas foram obtidas após a hibridação entre as cultivares Pira 72 *versus* Uberlândia 10000, seguido de sete sucessivas autofecundações realizadas entre 2013 a 2019.

Na primeira etapa do experimento foi realizada a semeadura das linhagens em bandejas de poliestireno expandido com 200 células preenchidas com substrato comercial a base de fibra de coco. Trinta dias após a semeadura (DAS) foi realizado o transplantio das mudas para vasos de cinco litros, preenchidos com o mesmo substrato da semeadura, mantidos em casa de vegetação. Ao atingir o estágio fenológico de pleno florescimento foram iniciadas as hibridações, sendo planejado e obtido um híbrido experimental (Tabela 1).

Tabela 1 - Linhagens e híbrido experimental obtido a partir do cruzamento entre parentais tropicalizados.

ID	Genótipos
01	UFU206
02	UFU MC BIOFORT2
03	UFU MC BIOFORT1
04	UFU189
05	UFU66-7
06	UFU66-4
07	UFU75
08	UFU197
09	UFU215 x UFU MC BIOFORT2

Na segunda etapa, foi realizada a semeadura de oito linhagens e um híbrido simple de alface obtido do Programa de Melhoramento Genético de Alface Biofortificada e Tropicalizada da UFU, além da cultivar comercial Grand Rapids, utilizando bandejas preenchidas com substrato comercial. Após trinta dias da semeadura, as mudas foram transplantadas para o campo experimental.

Cada unidade experimental foi composta por dezesseis plantas dispostas em quatro fileiras, com espaçamento de 0,25 m entre plantas e entre linhas, sendo consideradas para avaliação apenas as quatro plantas centrais de cada parcela. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com três repetições.

Aos 35 dias após o transplântio, foram mensuradas as seguintes características: massa fresca (MF), número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC), comprimento do caule (CC), diâmetro da planta (DP) e índice SPAD.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, com comparação de médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Análises multivariadas de dissimilaridade genética foram realizadas por meio da distância de Mahalanobis, com agrupamento pelo método UPGMA. A seleção dos genótipos foi baseada no ideótipo de biofortificação (alto teor de clorofila – mensurado pelo índice SPAD) e tropicalização, utilizando o índice de distância genótipo-ideótipo multicaracterístico (MGIDI), com apoio do software R (R CORE TEAM, 2025).

Os genótipos que apresentaram desempenho superior nos critérios agrônômicos e nutricionais permaneceram em campo para produção de sementes por autopolinização. As sementes obtidas foram coletadas, processadas e armazenadas a 18 °C, constituindo as populações F2, essenciais para a continuidade do programa de melhoramento.

6. RESULTADO E DISCUSSÃO

6.1. Análise de Variância (ANOVA) e Pressupostos Estatísticos

A análise de variância (ANOVA) revelou a existência de variabilidade genética significativa entre os dez genótipos avaliados ($p < 0,05$) para todas as características

mensuradas: massa fresca, número de folhas , diâmetro do caule , comprimento do caule , diâmetro da planta e índice SPAD. Esse cenário de significância estatística evidência que o banco de germoplasma da UFU detém expressiva diversidade genética, o que constitui premissa fundamental para o sucesso de programas de seleção e fixação de alelos de interesse comercial.

Dentre as características de interesse, o comprimento do caule obteve o maior valor sinalizando uma marcante diferenciação fenotípica entre as linhagens para esse caráter intrinsecamente ligado ao ciclo reprodutivo e ao pendoamento. Os coeficientes de variação para as seis características significativas mantiveram-se em uma faixa altamente satisfatória, situada entre 13,79% (índice SPAD) e 20,24% (diâmetro do caule). Esses índices atestam a boa precisão experimental e o controle adequado do erro estocástico no delineamento em blocos casualizados (DBC) adotado (Tabela 2).

Tabela 2 - Resumo da análise de variância (quadrado médio de genótipo, teste F, significância e coeficiente de variação) para as características avaliadas em dez genótipos de alface.

Características	QM genótipo	F	Valor-<i>p</i>	CV (%)
Massa fresca (kg)	$3,59 \times 10^{-3}$	8,80	$5,51 \times 10^{-5}$ **	19,20
Número de folhas	56,39	3,54	0,0108 *	19,71
Diâmetro do caule (cm)	0,3030	3,40	0,0131 *	20,24
Comprimento do caule (cm)	14,24	30,20	$4,56 \times 10^{-9}$ **	16,34
Diâmetro da planta (cm)	35,97	2,49	0,0478 *	16,58
Índice SPAD	143,26	6,60	0,000355 **	13,79

** Significativo a 1% ($p < 0,01$); * significativo a 5% ($p < 0,05$); ns = não significativo pelo teste F. QM = quadrado médio; CV = coeficiente de variação. Fonte: Autor (2026).

Fonte: Autor (2026).

6.2. Validação dos Pressupostos Estatísticos e Análise Univariada

Visando assegurar a integridade estatística das inferências, os resíduos do modelo linear foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade de variâncias) ao nível de 5% de significância. Para as variáveis massa fresca, número de folhas, comprimento do caule e diâmetro da planta, ambos os pressupostos foram plenamente atendidos ($p > 0,05$), legitimando de forma irrestrita o uso dos testes paramétricos tradicionais (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores de p dos testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos) e de Bartlett (homogeneidade de variâncias) para as seis características com efeito significativo de genótipo.

Características	p Shapiro-Wilk	p Bartlett	Normal.	Homog.
Massa fresca (kg)	0,6755	0,6329	Atende	Atende
Número de folhas	0,0652	0,0624	Atende	Atende
Diâmetro do caule (cm)	0,0388	0,0077	Violado	Violado
Comprimento do caule (cm)	0,2357	0,0708	Atende	Atende
Diâmetro da planta (cm)	0,1722	0,9812	Atende	Atende
Índice SPAD	0,0091	0,0987	Violado	Atende

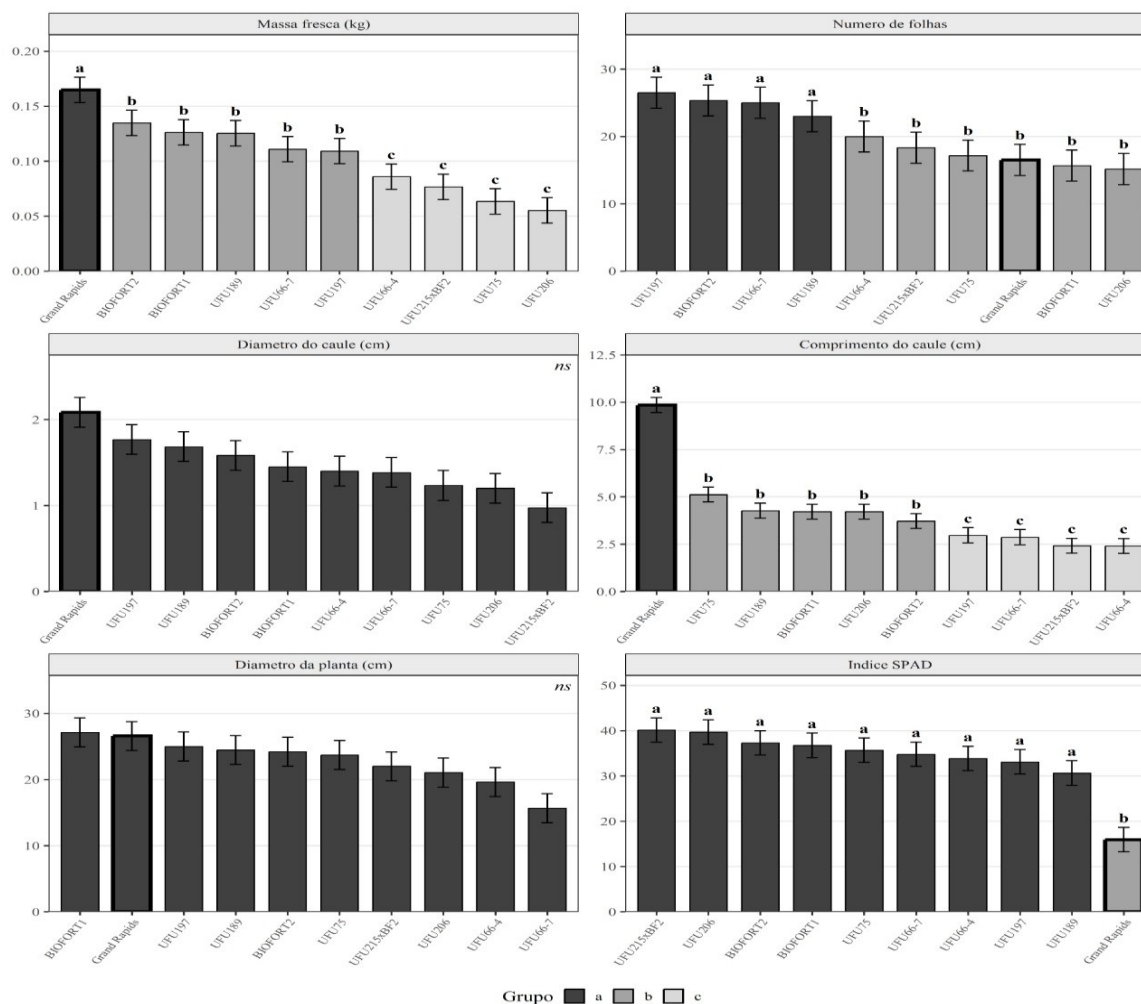
"Atende" indica $p > 0,05$ (pressuposto atendido); "violado", $p \leq 0,05$. Normal. = normalidade dos resíduos; Homog. = homogeneidade de variâncias. Fonte: Autor (2026).
Fonte: Autor (2026).

Contudo, observou-se rejeição da hipótese nula de normalidade e homogeneidade para o diâmetro do caule, bem como desvio de normalidade para o índice SPAD. Tais ocorrências não invalidam os resultados obtidos nem comprometem a confiabilidade biológica da pesquisa por três fundamentos metodológicos. Primeiramente, o tamanho da amostra (30 observações totais no DBC) confere aos testes de pressupostos uma rigidez matemática extrema, tornando-os sensíveis a desvios mínimos que carecem de relevância prática. Em segundo lugar, no caso específico do índice SPAD, o comportamento não-normal decorre diretamente do desempenho severamente discrepante da testemunha

comercial Grand Rapids, cujo valor situou-se em um patamar drasticamente inferior ao das linhagens UFU — constituindo, portanto, um padrão real de divergência biológica e não um erro de amostragem. Por fim, a literatura científica consagra a robustez da ANOVA frente a desvios moderados de normalidade em experimentos perfeitamente balanceados. Desse modo, manteve-se o processamento paramétrico integrado, preservando a harmonia estatística necessária para a posterior alimentação do índice multivariado MGIDI.

Os resultados obtidos pelo teste de média permitiram estratificar o comportamento dos dez genótipos de alface, evidenciando variabilidade genética promissora para o programa de melhoramento. O teste de agrupamento de Scott e Knott (1974) permitiu discriminar as médias de massa fresca, número de folhas, comprimento de caule e índice SPAD (Figura 1).

Figura 1 - Desempenho médio e agrupamento estatístico das características agronômicas e fisiológicas significativas obtidas pelo teste de Scott-Knott em genótipos de alface.



Medias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo (Scott-Knott, $p < 0,05$). ns – não significativo.

Fonte: Autor (2026).

Todas as linhagens e o híbrido experimental apresentaram um comprimento de caule significativamente menor, integrando os grupos *b* e *c*. Essa característica implica em maior estabilidade genotípica e tolerância ao pendoamento nas condições tropicais. Em destaque o híbrido experimental UFU215 x UFU MC BIOFORT2 que apresentou tolerância ao pendoamento, confirmando a eficiência do programa de melhoramento voltado para a tropicalização.

6.3. Seleção Multivariada pelo Índice MGIDI

A condução do melhoramento vegetal moderno pressupõe a seleção baseada em múltiplos caracteres concomitantes, evitando que ganhos expressivos em uma variável acarretem perdas indesejáveis em outras. Para tanto, o índice de distância genótipo-ideótipo multicaracterístico (MGIDI) foi adotado para integrar as seis variáveis significativas. Conforme preconizado por Olivoto e Nardino (2021), o índice MGIDI baseia-se na distância genótipo-ideótipo livre de multicolinearidade, permitindo identificar de forma matematicamente precisa os genótipos que reúnem o melhor balanço e conformação fenotípica ideal para múltiplas características de interesse simultâneo. A análise fatorial exploratória efetuada pelo algoritmo computacional reteve dois fatores principais com autovalores superiores a 1,0, os quais, combinados, explicaram 83,3% da variância fenotípica total explicada, assegurando alta confiabilidade bidimensional para a triagem.

A interpretação das cargas fatoriais após a rotação ortogonal varimax permitiu a caracterização biológica de cada fator. O primeiro fator (FA1) concentrou fortes cargas para massa fresca (-0,904), diâmetro do caule (-0,966), comprimento do caule (0,747), diâmetro da planta (-0,566) e índice SPAD (0,896), sendo adequadamente denominado de Fator Porte e Vigor. O segundo fator (FA2) foi fortemente dominado pela carga associada ao número de folhas (0,963), caracterizando o Fator Folhagem. A correta discriminação dessas cargas fatoriais norteou a parametrização do ideótipo matemático, programado para maximizar a biomassa, a folhagem e o vigor, e minimizar estritamente o alongamento do caule (Tabela 4).

Tabela 4 - Cargas fatoriais após rotação varimax, comunalidades e unicidades das seis características obtidas na análise fatorial que subsidiou o índice MGIDI. Em negrito destaca-se a maior carga em valor absoluto para cada caractere.

Características	FA1 (Porte e Vigor)	FA2 (Folhagem)	Comunalidade	Unicidade
-----------------	------------------------	-------------------	--------------	-----------

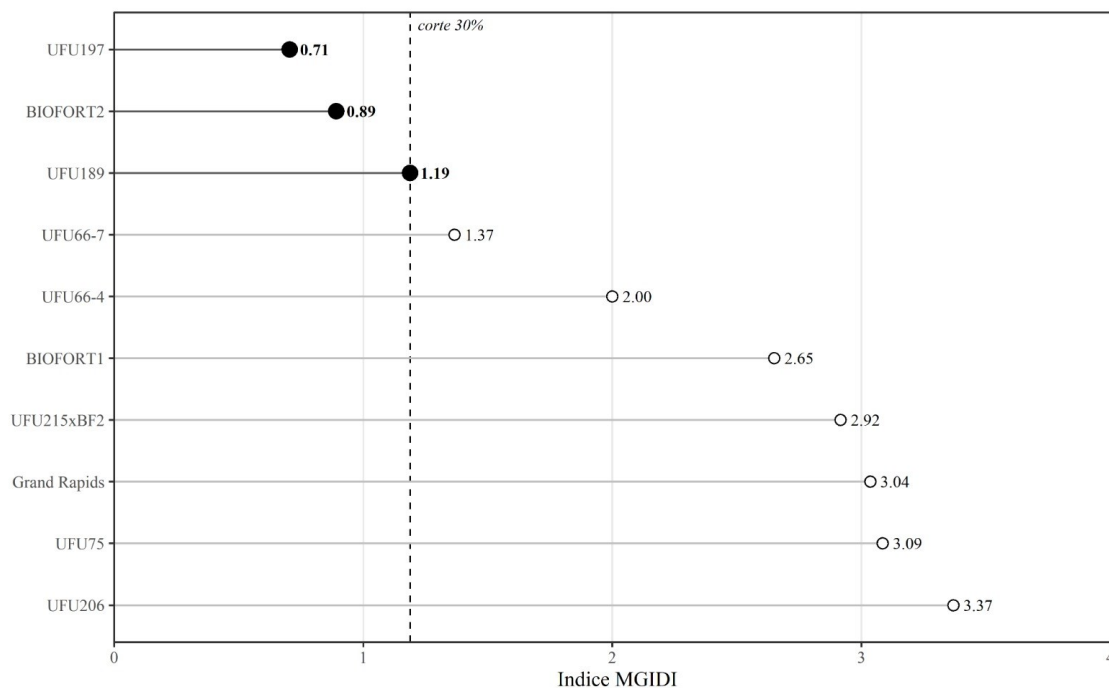
Características	FA1 (Porte e Vigor)	FA2 (Folhagem)	Comunalidade	Unicidade
Massa fresca (kg)	-0,904	0,188	0,852	0,148
Número de folhas	-0,160	0,963	0,953	0,047
Diâmetro do caule (cm)	-0,966	0,129	0,949	0,051
Comprimento do caule (cm)	0,747	0,583	0,898	0,102
Diâmetro da planta (cm)	-0,566	-0,438	0,512	0,488
Índice SPAD	0,896	0,183	0,835	0,165

Fonte: Autor (2026).

6.4. Identificação dos Genótipos Seleccionados e Diferencial de Seleção

Sob uma intensidade de seleção pré-fixada em 30% (critério de corte padrão do índice), o MGIDI selecionou com precisão três genótipos de mérito genético superior: UFU197 (MGIDI = 0,71), UFU MC BIOFORT2 (MGIDI = 0,89) e UFU189 (MGIDI = 1,19). Esses genótipos posicionaram-se abaixo do ponto de corte matemático estabelecido e superaram de forma contundente a cultivar comercial Grand Rapids, que ficou com a oitava colocação no ranqueamento global com um escore desfavorável de 3,04 devido ao seu acentuado distanciamento do ideótipo (Figura 2).

Figura 2 - Ranqueamento dos genótipos de alface avaliados pelo índice MGIDI e indicação do limite de corte baseado na intensidade de seleção de 30%.



Fonte: Autor (2026).

O cálculo do diferencial de seleção (SD) e suas estimativas percentuais (SD%) confirmaram ganhos altamente vantajosos e harmônicos para o bloco selecionado. Verificou-se incrementos expressivos para número de folhas (+23,1%), massa fresca (+17,0%), diâmetro do caule (+13,7%) e diâmetro da planta (+7,0%). Crucialmente, para o comprimento do caule, o diferencial de seleção foi negativo (-13,2%), o que atende perfeitamente à meta biológica do ideótipo voltado à supressão do pendoamento precoce em climas tropicais. O índice SPAD manteve-se virtualmente estável (-0,3%), comportamento justificado pela homogeneidade de altos valores já manifestados por quase todas as linhagens UFU, o que restringe a margem para ganhos adicionais em curto prazo nesta população (Tabela 5).

Tabela 5 - Diferencial de seleção (SD) e ganho relativo para as seis características significativas considerando os três materiais eleitos pelo índice MGIDI. Genótipos selecionados: UFU197#1#1, UFU MC BIOFORT 2 e UFU189#2#2#1.

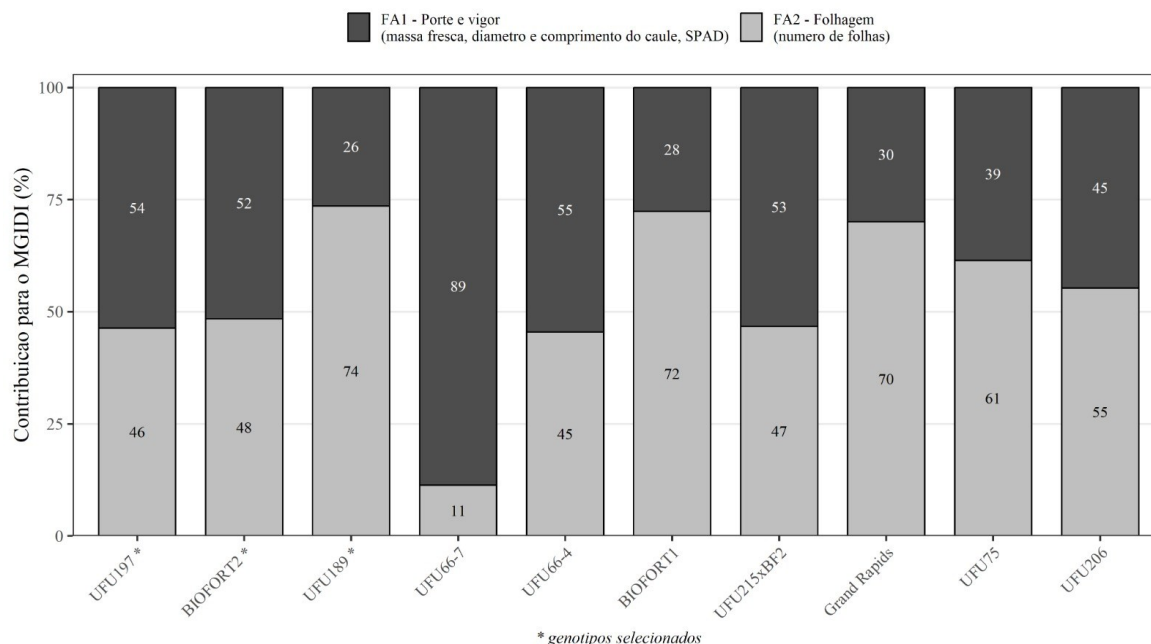
Características	Média Original (X_o)	Média Selecionados (X_s)	SD	SD (%)	Herdabilidade (h²)	Sentido Esperado
Massa fresca (kg)	0,105	0,123	0,018	17,0	0,886	Aumentar
Número de folhas	20,3	24,9	4,68	23,1	0,717	Aumentar
Diâmetro do caule (cm)	1,48	1,68	0,202	13,7	0,706	Aumentar
Comprimento do caule (cm)	4,20	3,65	-0,553	-13,2	0,967	Diminuir
Diâmetro da planta (cm)	22,9	24,6	1,61	7,0	0,598	Aumentar
Índice SPAD	33,8	33,7	-0,098	-0,3	0,849	Aumentar

Fonte: Autor (2026).

6.5. Decomposição da Contribuição Relativa dos Fatores

A análise gráfica da contribuição dos fatores para o índice MGIDI fornece um diagnóstico anatômico das virtudes e das fragilidades remanescentes de cada tratamento genético. Nos três genótipos de elite selecionados (UFU197, UFU MC BIOFORT2 e UFU189), a partição da distância em relação ao ideótipo ocorreu de maneira altamente equilibrada entre o Fator 1 (Porte e Vigor) e o Fator 2 (Folhagem). Essa proporcionalidade indica que a seleção multivariada foi eficiente em eleger híbridos harmônicos, isentos de gargalos fisiológicos ou desbalanços morfométricos acentuados (Figura 3).

Figura 3 - Contribuição relativa dos fatores biológicos e morfofisiológicos na composição do índice de distância genótipo-ideótipo (MGIDI) para cada genótipo de alface avaliado.



Fonte: Autor (2026).

Em contrapartida, o estudo detalhado das linhagens não selecionadas ilustra o poder diagnóstico do modelo. O genótipo UFU66-7 teve 89% de sua distância ao ideótipo determinada unicamente pelo Fator 1 (Porte e Vigor), expondo que sua rejeição pelo índice deu-se exclusivamente devido a limitações severas de biomassa fresca e diâmetro de planta, a despeito de o material ter integrado o grupo de elite para número de folhas no teste univariado. Da mesma forma, a testemunha comercial Grand Rapids exibiu mais de 70% de sua penalização atrelada ao Fator 2, refletindo estatisticamente sua baixa emissão foliar e seu baixo índice SPAD em face das linhagens biofortificadas. Essa decomposição fatorial consolida o índice MGIDI como uma ferramenta indispensável e de alta precisão biológica para o delineamento de estratégias nos ciclos subsequentes do programa de melhoramento genético conduzido pela Universidade Federal de Uberlândia.

7. CONCLUSÃO

O estudo evidenciou a presença de variabilidade genética significativa entre os genótipos de alface para a maioria das variáveis agronômicas e fisiológicas avaliadas (massa fresca, número de folhas, diâmetro do caule, comprimento do caule, diâmetro da planta e índice SPAD), demonstrando a viabilidade de seleção no germoplasma estudado.

A aplicação do índice multivariado MGIDI provou ser uma estratégia robusta e eficiente para a seleção simultânea de caracteres. Considerando uma intensidade de seleção de 30%, os híbridos simples UFU197, UFU MC BIOFORT2 e UFU189 foram identificados como superiores, apresentando o maior alinhamento com o ideótipo proposto e superando o desempenho da testemunha comercial Grand Rapids.

O híbrido experimental promoveu ganhos genéticos expressivos para redução do comprimento do caule, atributo fundamental para a atenuação do pendoamento precoce em ambientes tropicais. Esse genótipodemonstra elevado potencial para o avanço no programa de melhoramento genético de alface.

REFERÊNCIAS

- CRUZ, C. D. GENES: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 35, n. 3, p. 271–276, 2013.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Hortalças em números*. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalicas/hortalicas-em-numeros>.
- FILGUEIRA, F. A. R. *Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortalças*. 3. ed. Viçosa: UFV, 2013.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *Crops and livestock products: Lettuce and chicory production*. Roma: FAOSTAT, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/>.
- FRANCIS, F. J. Analysis of anthocyanins. In: MARKAKIS, P. (ed.). *Anthocyanins as food colors*. New York: Academic Press, 1982. p. 181–207.
- KATHI, S. et al. Biofortification of Plant- and Animal-Based Foods in Limiting the Problem of Microelement Deficiencies: A Narrative Review. *Nutrients*, [s. l.], v. 16, n. 11, p. 1-25, 2024.
- LICHTENTHALER, H.; WELLBURN, A. Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, v. 11, p. 591–592, 1983.
- MORAES, C. C. et al. Lettuce breeding for biofortification: a review. *Ornamental Horticulture*, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 550-565, 2020.
- MOROTTI, C. F. *Caracterização de alfaces verdes biofortificadas e tropicalizadas do germoplasma da UFU*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2025.
- OLIVOTO, T.; NARDINO, M. MGIDI: toward an effective multivariate selection in biological experiments. *Bioinformatics*, v. 37, n. 10, p. 1383–1389, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>.
- OLIVEIRA, M. A. et al. Caracterização agronômica de genótipos de alface em condições de clima tropical. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 51, n. 3, p. 1–9, 2020.
- R CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SALA, F. C. et al. ‘Gloriosa’: cultivar de alface americana tropicalizada. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 36, n. 1, p. 134–137, 2018.

SANCHES, A. A. et al. Selection of lettuce hybrids to generate productive carotenoid-biofortified populations. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 29, n. 4, e278163, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n4e278163>.

SILVA, O. M.; LEITE, W. S.; NASCIMENTO, I. R. Parâmetros genéticos e índices de seleção para alface roxa biofortificada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 54, e02697, 2019.

SMOLEŃ, S. et al. Biofortification of six varieties of lettuce with iodine and selenium. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, p. 1–13, 2019.

TAIZ, L. et al. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). *Agricultural Research Service*: FoodData Central. Washington, DC: USDA, 2023. Disponível em: <https://fdc.nal.usg.gov/>.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets. *New Phytologist*, Oxford, v. 182, n. 1, p. 49–84, 2009.

WITHAM, F. H.; BLAYDES, D. F.; DEVLIN, R. M. *Experiments in plant physiology*. New York: Van Nostrand, 1971.