

UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA (UNEB)
Pró-Reitoria de Pesquisa e Ensino de Pós-Graduação (PPG)
Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais (DTCS)
Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Horticultura Irrigada (PPGHI)

LUZIA MICAELE ALVES BARBOSA

**CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE E COMPOSIÇÃO FUNCIONAL DE
GENÓTIPOS DE ACEROLEIRA EM RESPOSTA A VARIAÇÃO SAZONAL E
MATURAÇÃO**

JUAZEIRO-BA

2026

UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA (UNEB)
Pró-Reitoria de Pesquisa e Ensino de Pós-Graduação (PPG)
Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais (DTCS)
Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Horticultura Irrigada (PPGHI)

LUZIA MICAEL ALVES BARBOSA

**CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE E COMPOSIÇÃO FUNCIONAL DE
GENÓTIPOS DE ACEROLA EM RESPOSTA A VARIAÇÃO SAZONAL E
MATURAÇÃO**

Dissertação apresentada junto ao Programa de Pós Graduação em Agronomia: Horticultura Irrigada da Universidade do Estado da Bahia (PPGHI - UNEB/DTCS), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Horticultura Irrigada

Orientador: Sérgio Tonetto de Freitas

Coorientador: Flávio de França Souza

JUAZEIRO-BA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
por Regivaldo José da Silva/CRB-5-1169

B238c Barbosa, Luzia Micaele Alves

Caracterização da qualidade e composição funcional de genótipos de aceroleira em resposta à variação sazonal e maturação / Luzia Micaele Alves Barbosa. Juazeiro-BA, 2026.
114 fls.: il.

Orientador(a): Prof. Dr. Sérgio Tonetto de Freitas.

Coorientador: Prof. Dr. Flávio de França Souza.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Universidade do Estado da Bahia. Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais – DTCS. Programa de Pós-Graduação em Horticultura Irrigada – PPGHI, Campus III. 2026.

Contém referências, anexos e apêndices.

1. Acerola – *Malpighia emarginata*. 2. Qualidade de frutos. 3. Compostos bioativos. 4. Maturação de frutos. 5. Melhoramento genético vegetal. I. Freitas, Sérgio Tonetto de. II. Souza, Flávio de França. III. Universidade do Estado da Bahia. Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais – DTCS. IV. Título.

CDD: 634.23

UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA (UNEB)
Pró-Reitoria de Pesquisa e Ensino de Pós-Graduação (PPG)
Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais (DTCS)
Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Horticultura Irrigada (PPGHI)

LUZIA MICAEL ALVES BARBOSA

**CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE E COMPOSIÇÃO FUNCIONAL DE
GENÓTIPOS DE ACEROLA EM RESPOSTA A VARIAÇÃO SAZONAL E
MATURAÇÃO**

Aprovada em: 30/ 03/ 2026

SÉRGIO TONETTO DE FREITAS
EMBRAPA SEMIÁRIDO /UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA - UNEB

KARLA DOS SANTOS MELO DE SOUSA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO - UNIVASF

ALESSANDRO CARLOS MESQUITA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA - UNEB

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, saúde e perseverança para chegar até aqui.

À minha mãe, por ser meu maior exemplo de dedicação e apoio. Sem ela, nada disso teria sido possível. Obrigada por estar sempre ao meu lado, por acreditar em mim e por me incentivar em todos os momentos da minha vida.

Ao meu avô, por sempre confiar no meu potencial e por me fazer sentir capaz de alcançar qualquer objetivo. Seu apoio e orgulho sempre foram uma grande motivação para mim.

À minha irmã, aos meus sobrinhos e a toda a minha família, pelo carinho, pela presença constante e por sempre torcerem por mim.

Ao meu namorado, pelo apoio, pela paciência e por caminhar ao meu lado durante todo esse processo. Obrigada por compreender os momentos difíceis, por incentivar quando eu precisava e por tornar essa jornada mais leve.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Tonetto de Freitas, e ao meu coorientador, Dr. Flávio de França Souza, pela orientação, paciência, disponibilidade e confiança ao longo deste trabalho. Agradeço pelos ensinamentos e pelo acompanhamento atento durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

À Profa. Dra. Karla e ao Prof. Dr. Alessandro, por gentilmente aceitarem o convite para participar da banca avaliadora, contribuindo com seu tempo, atenção e valiosas considerações para o aprimoramento deste trabalho.

Ao grupo de Pós-Colheita da Embrapa Semiárido, em especial a Bruna, Raquel, Will, Dirliane, Rebeca, João Cláudio, João Henrique, Jaciane, Sandy, Mikaele, Rebeca e Nilo, pela convivência, pelas trocas de conhecimento, ajuda e por tornarem os dias de trabalho mais leves e agradáveis. Aos meus amigos, pelo apoio e incentivo ao longo dessa trajetória. Em especial ao Enzo, que está comigo desde a graduação e sempre esteve presente, acreditando que tudo daria certo mesmo nos momentos mais difíceis.

À Embrapa Semiárido, pela infraestrutura e pelo apoio à realização desta pesquisa.

À Universidade do Estado da Bahia (UNEB), pela formação acadêmica.

E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou a realização deste trabalho.

CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE E COMPOSIÇÃO FUNCIONAL DE GENÓTIPOS DE ACEROLEIRA EM RESPOSTA À VARIAÇÃO SAZONAL E À MATURAÇÃO

RESUMO GERAL

A acerola (*Malpighia emarginata* Sessé & Moc. ex DC.) é uma fruta tropical de grande importância nutricional e econômica, destacando-se pelos elevados teores de vitamina C e de compostos bioativos com atividade antioxidante. Entretanto, a qualidade dos frutos pode variar entre genótipos, safras e estádios de maturação, o que torna necessária a avaliação integrada desses fatores para orientar a seleção de materiais com diferentes aptidões de uso. Assim, esta dissertação teve como objetivo avaliar a variabilidade de genótipos de acerola quanto à qualidade físico-química, composição de pigmentos e desempenho produtivo dos frutos nas condições no vale do Submédio do São Francisco. Neste estudo, avaliou-se a associação entre coloração, concentração de pigmentos e atributos físico-químicos em frutos de seis genótipos com diferentes padrões de coloração, colhidos em dois estádios de maturação (verde e maduro) e produzidos em três safras. Posteriormente, realizou-se a caracterização físico-química e produtiva de dezoito genótipos de acerola, visando identificar materiais com potencial para consumo *in natura* e uso industrial. Os resultados evidenciaram ampla variabilidade entre genótipos, safras e estádios de maturação. A coloração dos frutos apresentou associação com o perfil de pigmentos e compostos bioativos, sendo os parâmetros colorimétricos eficientes para discriminar genótipos com diferentes perfis funcionais. Na seleção de genótipos para o segmento industrial, o genótipo PROG 195 destacou-se pelo elevado teor de ácido ascórbico, alta relação AA/SS e bom desempenho produtivo. Para o consumo *in natura*, Rubra mostrou-se o material mais promissor por combinar elevado teor de sólidos solúveis, equilíbrio entre açúcares e acidez, e boa produtividade ao longo do ano. Esses resultados confirmam o potencial do germoplasma avaliado para a seleção de novos clones adaptados às condições do Vale do Submédio do São Francisco.

Palavras-chave: *Malpighia emarginata*; qualidade de frutos; compostos bioativos; maturação; seleção de genótipos.

QUALITY AND FUNCTIONAL COMPOSITION CHARACTERIZATION OF ACEROLA GENOTYPES IN RESPONSE TO SEASONAL VARIATION AND FRUIT MATURATION

GENERAL ABSTRACT

Acerola (*Malpighia emarginata* Sessé & Moc. ex DC.) is a tropical fruit of great nutritional and economic importance, distinguished by its high vitamin C content and bioactive compounds with antioxidant activity. However, fruit quality may vary among genotypes, harvest seasons, and maturity stages, making an integrated evaluation of these factors necessary to guide the selection of materials with different end-use purposes. Therefore, this dissertation aimed to evaluate the variability of acerola genotypes in terms of physicochemical quality, pigment composition, and fruit yield performance under the conditions of the Sub-middle São Francisco Valley. In this study, the association between fruit color, pigment concentration, and physicochemical attributes was evaluated in fruits from six genotypes with different color patterns, harvested at two maturity stages (green and ripe) and produced over three harvest seasons. Subsequently, the physicochemical and productive characterization of eighteen acerola genotypes was conducted to identify materials with potential for fresh consumption and industrial use. The results revealed wide variability among genotypes, harvest seasons, and maturity stages. Fruit color was associated with pigment and bioactive compound profiles, and colorimetric parameters were effective in discriminating genotypes with distinct functional profiles. For industrial use, the genotype PROG 195 stood out due to its high ascorbic acid content, high AA/SS ratio, and good yield performance. For fresh consumption, Rubra proved to be the most promising genotype by combining high soluble solids content, a favorable balance between sugars and acidity, and good productivity throughout the year. These results confirm the potential of the evaluated germplasm for the selection of new clones adapted to the conditions of the Sub-middle São Francisco Valley.

Keywords: *Malpighia emarginata*; fruit quality; bioactive compounds; fruit maturation; genotype selection.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I:	15
REVISÃO DE LITERATURA	15
INTRODUÇÃO GERAL	15
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
Origem e Disseminação da Aceroleira no Brasil.	17
Botânica e Morfologia	18
Exigências Edafoclimáticas	19
Importância econômica	20
Melhoramento genético	21
Perfil fitoquímico e potencial funcional da acerola	23
Ácido Ascórbico	23
Flavonóides	24
Antocianinas	25
Carotenóides	27
Fisiologia pós-colheita e estabilidade dos compostos bioativos	29
Características Físico-Químicas e Qualidade	31
REFERÊNCIAS	32
CAPÍTULO II	39
RELAÇÃO ENTRE COLORAÇÃO, COMPOSIÇÃO DE PIGMENTOS E ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS EM GENÓTIPOS DE ACEROLA COLHIDOS EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO E PRODUZIDOS EM DIFERENTES SAFRAS	39
RESUMO	39
ABSTRACT	40
INTRODUÇÃO	41
MATERIAIS E MÉTODOS	42
Área experimental e cultivo	42
Colheita e processamento	43
Análises físico-químicas	44
Massa e diâmetro e comprimento	44
Sólidos solúveis e acidez titulável	44
Compostos bioativos	44
Ácido ascórbico	44
Carotenóides	44
Antocianinas e Flavonoides	45
Análise colorimétrica (sistema CIELAB)	46
Delineamento experimental e Análises estatísticas	46
Análise de componentes principais (ACP)	47
Análise de Agrupamento Hierárquico	47

RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
Caracterização físico-química dos frutos verdes	49
Caracterização de compostos bioativos frutos verdes	51
Caracterização colorimétrica (CIELAB) de frutos verdes de acerola	53
Análise multivariada dos parâmetros colorimétricos e atributos físicos e físico-químicos do frutos verdes	55
Caracterização físico-química dos frutos maduros	59
Caracterização de compostos bioativos dos frutos maduros nas três safras	62
Caracterização colorimétrica (CIELAB) de frutos maduros de acerola	66
Análise multivariada dos parâmetros colorimétricos e atributos físicos e físico-químicos do frutos maduros	68
CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS	74
CAPÍTULO III:	79
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, SELEÇÃO MULTIVARIADA E DESEMPENHO PRODUTIVO DE GENÓTIPOS DE ACEROLA PARA CONSUMO IN NATURA E USO INDUSTRIAL	79
RESUMO	79
ABSTRACT	80
INTRODUÇÃO	81
MATERIAIS E MÉTODOS	82
Área experimental e cultivo	82
Colheita e processamento	83
Análises físico-químicas	84
Coloração	84
Massa e diâmetro e comprimento	84
Sólidos solúveis e acidez titulável	84
Ácido ascórbico	85
Delineamento experimental e análises estatísticas	85
Análises multivariadas e índice de seleção multicaracterístico	85
Análise de componentes principais (ACP)	85
Análise de Agrupamento Hierárquico	86
Mapa de calor	87
Índice MGIDI (Multi-trait Genotype–Ideotype Distance Index)	87
Estimativa do coeficiente de repetibilidade	88
RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
Variabilidade dos atributos físico-químicos dos frutos destinados ao uso industrial	90
Repetibilidade dos caracteres de qualidade dos frutos	94
Análise multivariada dos atributos de qualidade dos frutos	96
Seleção multicaracterística de genótipos industriais pelo índice MGIDI	99
Dinâmica produtiva mensal e desempenho agrônomo dos genótipos para uso industrial	100
Qualidade de frutos destinados ao consumo in natura	102

Repetibilidade dos caracteres de qualidade dos frutos	105
Análise multivariada dos atributos de qualidade dos frutos	106
Seleção multicaracterística de genótipos in natura pelo índice MGIDI	109
Dinâmica produtiva mensal e desempenho agrônômico dos genótipos para consumo in natura	110
CONCLUSÃO	113
REFERÊNCIAS	113
APÊNDICE	117

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 - Caracterização morfológica de *Malpighia emarginata* (acerola). (A) fruto inteiro e cortado longitudinalmente ao meio; (B) flor; (C) aspecto geral da folha adulta. Fonte: Autora, 2026. 19

Figura 2 – Estrutura básica dos flavonoides (C6–C3–C6) e principais subclasses estruturais, incluindo flavonóis, flavonas, isoflavonas, flavanonas, antocianidinas e proantocianidinas. Fonte: Adaptado de Panche et al. (2016) e Crozier et al. (2009). 25

Figura 3 - Transformações estruturais reversíveis das antocianinas em função do pH. Fonte: Mazza; Brouillard, 1987. 27

CAPÍTULO II

Figura 1 - Variáveis climáticas mensais no Campo Experimental de Bebedouro, Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, em 2025. Fonte: EMBRAPA, 2026 43

Figura 2- Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos físicos, físico-químicos e colorimétricos de frutos verdes de seis genótipos de acerola. O PC1 e o PC2 explicaram 45,9% e 23,6% da variância total, respectivamente. As setas indicam a contribuição e a direção das variáveis na discriminação dos genótipos. Fonte: Autora, 2026. 56

Figura 3 - Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos da casca e da polpa e os atributos físicos e físico-químicos de frutos verdes de seis genótipos de acerola. Os coeficientes de correlação variaram de -1 a +1, sendo as cores quentes (vermelho) associadas a correlações positivas e as cores frias (Azul) a correlações negativas. Fonte: Autora, 2026. 57

Figura 4 - Análise de Componentes Principais (ACP) dos compostos bioativos e colorimétricos de frutos verdes de seis genótipos de acerola. O PC1 e o PC2 explicaram 33,5% e 26,5% da variância total, respectivamente. As setas indicam a contribuição e a direção das variáveis na discriminação dos genótipos. Fonte: Autora, 2026. 58

Figura 5 - Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos da casca e da polpa e composto bioativos de frutos verdes de seis genótipos de acerola. Os coeficientes de correlação variaram de -1 a +1, sendo as cores quentes (vermelho) associadas a correlações positivas e as cores frias (azul) a correlações negativas. Fonte: Autora, 2026. 59

Figura 6 - Aspecto visual dos extratos de polpa dos genótipos de acerola no estágio maduro. Diferenças na tonalidade refletem a predominância de carotenóides (amarelo-alaranjado: LAG 05, AC 32, AC 01) e antocianinas (vermelho intenso: BRS Sertaneja, Junko, Carp 01). Fonte: Autora, 2025. 64

Figura 7 - Caracterização visual dos genótipos de acerola nos estádios verde e maduro. Vista externa (frutos inteiros) e interna (corte longitudinal), evidenciando diferenças do padrão de coloração da casca e polpa. Fonte: Autora, 2026. 68

Figura 8 - Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos da casca e da polpa e os atributos físicos e físico-químicos de frutos maduros de seis genótipos de acerola. Os coeficientes de correlação variaram de -1 a +1, sendo as cores quentes (vermelho) associadas a correlações positivas e as cores frias (Azul) a correlações negativas. Fonte: 68

Figura 9 - Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos físicos, físico-químicos e colorimétricos de frutos maduros de seis genótipos de acerola. O PC1 e o PC2 explicaram 48,1% e 24,2% da variância total, respectivamente. As setas indicam a contribuição e a direção das variáveis na discriminação dos genótipos. Fonte: Autora, 2026. 70

Figura 10 - Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos da casca e da polpa e composto bioativos de frutos maduros de seis genótipos de acerola. Os coeficientes de correlação variaram de -1 a +1, sendo as cores quentes (vermelho) associadas a correlações positivas e as cores frias (azul) a correlações negativas. Fonte: Autora, 2026. 72

Figura 11 - Análise de Componentes Principais (ACP) dos compostos bioativos e colorimétricos de frutos maduros de seis genótipos de acerola. O PC1 e o PC2 explicaram 52,8% e 20,8% da variância total, respectivamente. As setas indicam a contribuição e a direção das variáveis na discriminação dos genótipos. Fonte: Autora, 2026. 73

CAPÍTULO III

Figura 1 - Variáveis climáticas mensais no Campo Experimental de Bebedouro (Embrapa Semiárido), Petrolina-PE, em 2025. Fonte: Autora, 2026. 83

Figura 3. Mapa de calor (Heatmap) do desempenho relativo dos genótipos para os atributos de qualidade dos frutos, com dados padronizados (0–1). As cores indicam menor (azul) e maior (vermelho) magnitude dos caracteres, e os dendrogramas representam o agrupamento hierárquico de genótipos e variáveis. Fonte: Autora 2026

Figura 2 - Biplot da análise de componentes principais (ACP) dos atributos de qualidade dos frutos de acerola. Setas vermelhas representam as variáveis, setas verdes as safras e pontos azuis as médias dos genótipos. Dim 1 e Dim 2 explicam 39,7% e 18,3% da variância total, respectivamente. Fonte: Autora, 2026. 97

Figura 4. Dendrograma de agrupamento hierárquico dos genótipos destinados ao uso industrial, baseado na distância euclidiana e método de Ward. A altura dos ramos indica o grau de dissimilaridade entre os grupos formados. Fonte: Autora 2026. 98

Figura 5 - Perfil multicaracterístico dos genótipos industriais segundo o índice MGIDI. O gráfico radar apresenta o desempenho relativo dos oito genótipos para os caracteres avaliados (massa, TSS, AT, AA e ratio AA/SS), considerando a direção desejada de seleção. Genótipos com menor MGIDI apresentam maior proximidade ao ideótipo. Fonte: Autora, 2026. 99

Figura 6 - Produção média mensal de frutos (kg planta⁻¹) dos genótipos Carp 01, Junko (JK), Okinawa (OKW), P102, P195, P244, BRS Sertaneja (SER) e Monami avaliados no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Vale do Submédio do São Francisco, de fevereiro de 2025 a janeiro de 2026. Fonte: Autora, 2026. 100

Figura 7 - Biplot da análise de componentes principais (ACP) dos atributos de qualidade dos frutos de acerola. Setas vermelhas representam as variáveis, setas verdes as safras e pontos azuis as médias dos genótipos. Dim 1 e Dim 2 explicam 48.1% e 15.5% da variância total, respectivamente. Fonte: Autora, 2026. 107

Figura 8 – Dendrograma de agrupamento hierárquico dos genótipos destinados ao consumo

in natura, baseado na distância euclidiana e método de Ward. A altura dos ramos indica o grau de dissimilaridade entre os grupos formados. Fonte: Autora 2026. 108

Figura 9 - Heatmap do desempenho relativo dos genótipos para os atributos de qualidade dos frutos, com dados padronizados (0–1). As cores indicam menor (azul) e maior (vermelho) magnitude dos caracteres, e os dendrogramas representam o agrupamento hierárquico de genótipos e variáveis. Fonte: Autora 2025 109

Figura 10 - Perfil multicaracterístico dos genótipos destinados ao consumo in natura segundo o índice MGIDI. O gráfico radar apresenta o desempenho relativo para os caracteres avaliados, considerando a direção desejada de seleção. Genótipos com menor MGIDI apresentam maior proximidade ao ideótipo. Fonte: Autora, 2026 110

Figura 11 - Produção média mensal de frutos (kg planta^{-1}) dos genótipos AC 17 (AC17), BV, Costa Rica (CRIC), Florida Sweet (FSW), LAG 01, Morena (MOR), Mulata (MUL), PROG 216 (P216), PROG 52 (P52) E Rubra (RUB), avaliados no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Vale do Submédio do São Francisco, de fevereiro de 2025 a janeiro de 2026. Fonte: Autora, 2026. 112

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 - Atributos de qualidade durante o crescimento e desenvolvimento de acerola. 32

CAPÍTULO II

Tabela 1 - Médias dos atributos físico-químicos de frutos verdes de genótipos de acerola ao longo de três safras. Os frutos foram produzidos no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE - 2025. 50

Tabela 2. Compostos bioativos em frutos de genótipos de acerola verde ao longo de três safras. Frutos foram produzidos no BAG Embrapa Semiárido, Petrolina-PE, 2025. 52

Tabela 3 - Atributos de cor (L^* , a^* , b^* e H°) da casca e da polpa de frutos verdes de seis genótipos de acerola avaliados em três safras. Os frutos foram produzidos no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE - 2025. 54

Tabela 4 - Médias dos atributos físico-químicos de frutos maduros de genótipos de acerola ao longo de três safras. Os frutos foram produzidos no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE - 2025. 61

Tabela 5. Compostos bioativos em frutos de genótipos de acerola maduro avaliados ao longo de três safras. Frutos foram produzidos no BAG Embrapa Semiárido, Petrolina-PE, 2025. 65

Tabela 6 - Atributos de cor (L^* , a^* , b^* e H°) da casca e da polpa de frutos maduros de seis genótipos de acerola avaliados em três safras. Os frutos foram produzidos no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE - 2025. 67

112

CAPÍTULO III

Tabela 1- Médias dos atributos físico-químicos de frutos de genótipos de acerola produzidos em diferentes safras no Vale do Submédio do São Francisco, 2025. 92

Tabela 2- Componentes de variância e parâmetros de repetibilidade estimados para os caracteres de qualidade dos frutos de acerola obtidos pelo método REML/BLUP (Modelo 63 – Selegen). 96

Tabela 3 - Desempenho produtivo anual e dinâmica de produção mensal de genótipos de aceroleira avaliados no Vale do Submédio do São Francisco. 101

Tabela 4 - Médias dos atributos físico-químicos de frutos de acerola por genótipo e safra. 103

Tabela 5 - Componentes de variância e parâmetros de repetibilidade estimados para os caracteres de qualidade dos frutos de acerola obtidos pelo método REML/BLUP (Modelo 63 – Selegen). 106

Tabela 6 - Desempenho produtivo anual e dinâmica de produção mensal de genótipos de aceroleira avaliados no Vale do Submédio do São Francisco. 111

CAPÍTULO I:

REVISÃO DE LITERATURA

INTRODUÇÃO GERAL

A acerola (*Malpighia emarginata* Sessé & Moc. ex DC.) é uma fruta tropical originária da América Central e do norte da América do Sul, atualmente cultivada em diversas regiões tropicais e subtropicais. No Brasil, a cultura ganhou importância econômica, com destaque para a região Nordeste, onde as condições climáticas favorecem o cultivo e permitem produção praticamente contínua ao longo do ano (Ribeiro; Freitas, 2020). O interesse por essa espécie está diretamente relacionado ao valor nutricional de seus frutos, reconhecidos como uma das principais fontes naturais de vitamina C (ácido ascórbico), além de apresentarem compostos fenólicos, flavonoides e carotenoides com elevada atividade antioxidante (Vendramini; Trugo, 2000; Moura et al., 2018; Vilvert et al., 2024).

Além do alto teor de ácido ascórbico, a acerola apresenta diversos compostos bioativos associados a efeitos antioxidantes e potenciais benefícios à saúde, o que amplia sua importância tanto para o consumo direto quanto para aplicações na indústria de alimentos (Mezadri et al., 2006; Miskinis; Nascimento; Colussi, 2023). Por esse motivo, os frutos são amplamente utilizados na elaboração de polpas, sucos e extratos naturais, constituindo uma matéria-prima relevante para a indústria alimentícia e para a produção de ingredientes funcionais (Mohammed, 2011).

A qualidade dos frutos de aceroleira depende de um conjunto de atributos físicos, químicos e sensoriais que resultam da interação entre fatores genéticos e ambientais. Entre os parâmetros mais utilizados na caracterização da qualidade destacam-se a massa do fruto, os teores de sólidos solúveis, a acidez titulável, a relação sólidos solúveis/acidez titulável, o teor de ácido ascórbico, bem como as características de cor (Cavalcante et al., 2007; Moura et al., 2018). Esses atributos também influenciam o destino comercial da produção. Frutos destinados ao consumo *in natura*, por exemplo, devem apresentar maior tamanho, coloração atrativa e melhor equilíbrio entre açúcares e ácidos orgânicos, enquanto aqueles destinados ao processamento industrial são selecionados principalmente pelo elevado teor e rendimento de vitamina C, maior acidez e bom rendimento de polpa.

A coloração é o principal indicador visível do estágio de maturação do fruto. A maioria dos genótipos apresenta frutos de coloração verde, quando imaturos, embora existam

mutantes que produzem frutos amarronzados ou totalmente brancos. Quando maduros, a maioria dos genótipos produz frutos de coloração vermelha, mas a variabilidade natural da espécie contempla também indivíduos de frutos amarelos, alaranjados e violetas. Essa variação está diretamente relacionada à composição de pigmentos na casca e polpa, especialmente carotenoides e antocianinas. Durante o amadurecimento, ocorrem mudanças fisiológicas e metabólicas que alteram a composição físico-química e o perfil de compostos bioativos dos frutos, podendo resultar em diferenças importantes entre genótipos e entre estádios de maturação (França et al., 2021; Vilvert et al., 2024).

Além do genótipo e estágio de maturação, fatores ambientais também exercem influência significativa sobre a qualidade e a produtividade dos frutos. Temperatura, radiação solar e disponibilidade hídrica podem modificar processos fisiológicos envolvidos no crescimento e no metabolismo dos frutos. Em regiões tropicais, onde o cultivo é irrigado, como ocorre Vale do Submédio São Francisco, a aceroleira pode apresentar vários ciclos de floração e frutificação ao longo do ano, resultando em diferentes picos produtivos e variações sazonais na qualidade dos frutos (Mezadri et al., 2006; Mohammed, 2011). Por essa razão, avaliações conduzidas em diferentes safras são importantes para compreender a estabilidade fenotípica dos genótipos e a influência da interação genótipo $\times$ ambiente sobre os atributos de qualidade.

A espécie também apresenta ampla variabilidade genética para características relacionadas à qualidade e produtividade dos frutos. Estudos de caracterização de germoplasma demonstram grande diversidade entre genótipos quanto a atributos físicos, químicos e nutricionais, evidenciando o potencial da aceroleira para a seleção de materiais com diferentes aptidões de uso e para programas de melhoramento (Farinelli et al., 2021).

Apesar da relevância econômica e nutricional da cultura, ainda são limitados os estudos que avaliam de forma integrada os atributos físico-químicos, o perfil de compostos bioativos e o desempenho produtivo de diferentes genótipos cultivados sob condições irrigadas no Vale do Submédio São Francisco. Além disso, trabalhos que considerem simultaneamente diferentes safras, estádios de maturação e uso comercial dos frutos ainda são relativamente escassos. A compreensão dessas variações é fundamental para orientar a seleção de genótipos superiores e ampliar a disponibilidade de clones comerciais utilizados nos sistemas produtivos.

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade de genótipos de acerola quanto aos atributos físico-químicos, à composição de pigmentos e ao desempenho produtivo dos frutos em diferentes safras e estádios de maturação, buscando identificar genótipos com potencial para atender ao mercado de frutos para consumo *in natura* e para uso industrial, nas condições do Vale do Submédio do São Francisco. Esta dissertação foi estruturada em três capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma revisão da literatura sobre qualidade de frutos de acerola, destacando os principais atributos físico-químicos, os compostos bioativos e os fatores que influenciam a variabilidade entre genótipos. No Capítulo 2, investiga-se a associação entre coloração, composição de pigmentos e atributos físico-químicos em genótipos de acerola avaliados em diferentes safras e estádios de maturação. Por fim, no Capítulo 3, avalia-se o desempenho produtivo e a composição físico-química dos frutos de clones de aceroleira selecionados em experimentos anteriores, visando à sua indicação como potenciais genótipos para atenderem aos mercados de frutos para consumo *in natura* e para uso industrial.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Origem e Disseminação da Aceroleira no Brasil.

A acerola, também conhecida como cereja-das-Antilhas ou cereja-de-Barbados, é um fruto nativo da América Central e do Norte da América do Sul. Seu nome científico é *Malpighia emarginata* e pertence à família das Malpighiaceae (Lorenzi, 2009). Esta família botânica possui distribuição pantropical, que inclui 75 gêneros e cerca de 1.300 espécies (Alves E Sebastiani, 2015). Estima-se que os responsáveis por disseminar o fruto pelo arquipélago das Antilhas foram indígenas caribenhos que transportavam sementes e mudas durante suas migrações entre as ilhas e o continente (Rufini et al., 2015).

No Brasil, a introdução oficial ocorreu em 1955, pela engenheira agrônoma e professora da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Maria Celene de Freitas Almeida, que trouxe sementes de Porto Rico. O plantio pioneiro foi realizado no campus da UFRPE, onde as sementes germinaram e deram origem às primeiras matrizes em solo brasileiro (Shinohara, 2015). A partir desse núcleo inicial na UFRPE, a cultura expandiu-se rapidamente para outras regiões do Nordeste e do Brasil. A distribuição de sementes e mudas oriundas desses primeiros acessos permitiu a diversificação dos pomares e o estabelecimento da acerola como uma cultura de valor econômico, especialmente impulsionada pela descoberta de seu altíssimo teor de vitamina C. A rusticidade da planta e sua adaptação ao

clima semiárido, associado ao uso de irrigação, facilitaram sua disseminação, tornando a região Nordeste o principal polo de produção do país (Ritzinger; Ritzinger, 2011; Shinohara, 2015).

Botânica e Morfologia

A aceroleira é uma planta arbustiva de hábito de crescimento variável, podendo apresentar porte prostrado ou ereto. Na fase adulta, sua altura oscila geralmente entre 2,5 e 3,0 metros, característica que facilita os tratos culturais e a colheita manual (Manica, 2003; Ritzinger; Ritzinger, 2011). O ápice foliar é predominantemente obtuso e emarginado, característica que dá origem ao epíteto específico *emarginata*, indicando uma pequena reentrância na extremidade da lâmina, sendo raramente agudo, enquanto a base varia de aguda a acuneada (Cordeiro, 2020)

As flores são hermafroditas, estruturadas com cinco sépalas e pétalas, dez estames, três estiletes e três carpelos unidos (Figura 1.1) . A polinização é realizada principalmente por abelhas do gênero *Centris* spp. (Moura et al., 2018). Os elaióforos, glândulas de óleo presentes nas sépalas, atuam na atração de abelhas especializadas, como *Centris* e *Epicharis*, caracterizando uma adaptação funcional que favorece a eficiência da polinização (Aliscioni, 2021).

O fruto, uma drupa tricarpelada, possui casca fina e polpa succulenta, abrigando três caroços triangulares, no interior dos quais, se localizam as sementes. A baixa produção de sementes viáveis é um desafio que dificulta a propagação sexuada uniforme.; Ritzinger; Ritzinger, 2011).

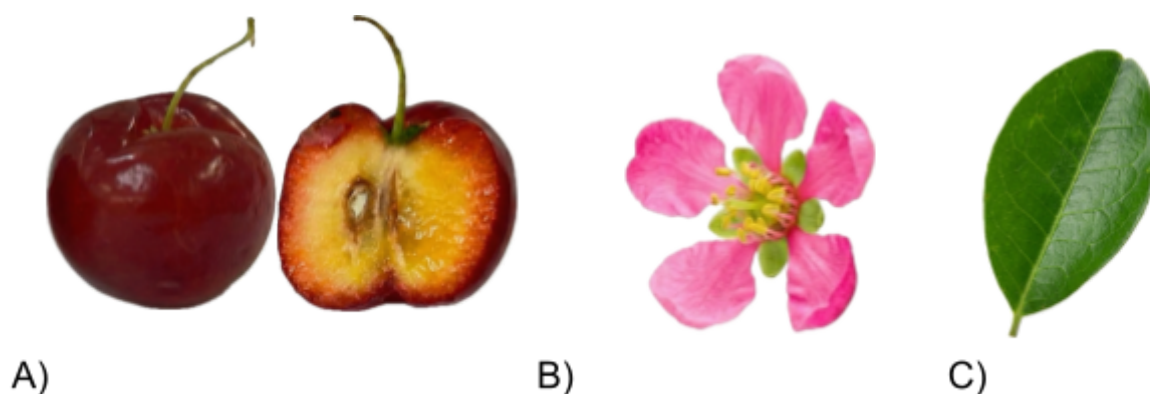


Figura 1 - Caracterização morfológica de *Malpighia emarginata* (acerola). (A) fruto inteiro e cortado longitudinalmente ao meio; (B) flor; (C) aspecto geral da folha adulta. **Fonte: Autora, 2026.**

Exigências Edafoclimáticas

A aceroleira pode produzir de quatro a oito safras ao ano, em condições irrigadas, a depender da variedade. Entretanto, além da influência genética, fatores ambientais, relacionados ao manejo e ao clima, como precipitação, temperatura, altitude, adubação, irrigação e ocorrência de pragas e doenças, influenciam diretamente na produção, bem com na qualidade dos frutos, sobretudo em termos dos teores de vitamina C e outros atributos, como coloração, massa, tamanho e sólidos solúveis (Felippe, 2005; Nogueira et al., 2002).

O desenvolvimento satisfatório da cultura pode ocorrer, sem irrigação, em locais com precipitação média anual entre 1.200 e 2.000 mm. Valores inferiores a 1.000 mm tendem a reduzir a produtividade em sistemas de sequeiro (Couceiro et al., 1981; Teixeira; Azevedo, 1995). Devido à sua rusticidade, a aceroleira apresenta ampla adaptação climática, desenvolvendo-se bem tanto em regiões tropicais quanto subtropicais. A temperatura ideal de cultivo é aproximadamente 26 °C, embora a espécie apresente bom desempenho em uma faixa térmica mais ampla, entre 15 °C e 32 °C (Borges, 2022).

A altitude também exerce papel crucial, ao modificar a temperatura, a umidade relativa e a incidência de ventos. Em regiões mais secas, como o Submédio do Vale do Submédio do São Francisco, a irrigação é essencial para garantir produtividade e qualidade dos frutos, devendo ser associada a um manejo nutricional equilibrado e ao controle fitossanitário, a fim de evitar perdas por pragas e doenças (Lima et. al., 2020; Gomes et. al., 2025).

Importância econômica

O cultivo da acerola desempenha um papel de destaque na economia agrícola brasileira. Devido às suas qualidades nutricionais, facilidade de manejo e excelente adaptação às condições edafoclimáticas locais, o Brasil consolidou-se como o maior produtor, consumidor e exportador mundial do fruto, visto que poucos países realizam seu cultivo em escala comercial (Santos; Lima, 2020). Essa cadeia produtiva possui grande potencial de geração de empregos e renda em diversas etapas, desde a produção no campo até o processamento industrial e comercialização (Silveira et al., 2020).

Segundo a EMATER-CE (2023), pesquisas apontam Pernambuco como o maior produtor de acerola no Brasil, respondendo por 23,11 % da produção nacional. Em seguida vêm Ceará, com 14,32 %, e Bahia, com 10,48 %. Historicamente, houve um aumento significativo nas áreas de cultivo entre 1988 e 1992, impulsionado pela divulgação da elevada concentração de vitamina C no fruto e sua relevância para a alimentação e saúde humana (Paiva et al., 2003).

Observa-se uma demanda crescente no mercado internacional, com expansão das exportações para a Europa, Estados Unidos e Japão, mercados que priorizam a polpa e produtos naturais (Borges et al., 2022). O cultivo voltado para a exportação surge como uma alternativa agrícola promissora para os próximos anos. Contudo, para garantir a sustentabilidade da cultura a longo prazo, ainda é necessário superar desafios fitossanitários, como pragas e doenças, além de mitigar os efeitos de condições climáticas adversas (Gonzaga; Soares, 1994).

Em condições de sequeiro a aceroleira produz safras limitadas, enquanto sob o manejo irrigado no Submédio do vale São Francisco é possível obter até oito ciclos produtivos anuais (PIO, 2003). Essa maior frequência de produção não apenas garante matéria prima para otimizar a operação das indústrias, ela promove, sobretudo, um fluxo de caixa regular aos produtores, estimula a economia regional através da absorção intensiva de mão de obra durante todo o ano, fixando o homem no campo e gerando emprego e renda nos arredores dos perímetros irrigados (Gonzaga; Soares, 1994).

Apesar do sucesso, a cadeia produtiva enfrenta desafios, principalmente relacionados com a escassez e o alto custo da mão de obra. Outro aspecto crítico é a flutuação de preços pagos pelo produto em determinadas épocas. Tais fatores podem afetar a rentabilidade e, em

alguns casos, levar à substituição da acerola por culturas, como manga e uva (Calgaro; Braga, 2012).

Melhoramento genético

Segundo Lopes e Paiva (2002), as primeiras iniciativas sistematizadas de melhoramento genético da aceroleira ocorreram no fim da década de 1940, com destaque para Porto Rico e a Flórida (EUA), onde foram lançadas seleções como B-15 e B-17, caracterizadas por sabor mais ácido e elevado teor de vitamina C, além da cultivar Florida Sweet, de sabor doce. Na década de 1960, programas no Havaí ampliaram o conjunto de materiais selecionados, incluindo acessos de sabor ácido e alto conteúdo de vitamina C e cultivares de sabor doce, como Manoa Sweet, Tropical Ruby e Hawaiian Queen (Morton, 1987). De modo geral, esses programas priorizaram produtividade, atributos de fruto e arquitetura/conformação da copa como critérios centrais de seleção.

No Brasil, os trabalhos direcionados ao melhoramento genético da aceroleira se estruturaram a partir da década de 1990, inicialmente conduzidos por instituições de pesquisa em diferentes estados, incluindo Pernambuco (IPA e Embrapa Semiárido), Paraíba (EMEP), Paraná (UEL), Bahia (Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical) e Ceará (Embrapa Agroindústria Tropical), com metas voltadas ao aumento da produtividade, elevação do teor de vitamina C e melhoria da qualidade e padronização dos frutos (Lopes e Paiva, 2002).

Diferente do cenário antigo composto por pomares com alta variabilidade genética decorrente da produção de mudas de sementes, atualmente, o cultivo comercial da aceroleira no Brasil, compõe-se de plantios uniformes estabelecidos por meio de mudas clonais. Segundo Ritzinger et al. (2018), a modernização dos métodos de propagação (como a estaquia e enxertia) foi decisiva para superar a heterogeneidade dos pomares antigos. Essa mudança tecnológica garantiu a padronização de características como o porte da planta e a qualidade do fruto, além de viabilizar o manejo racional e a colheita mecanizada, alinhando-se às diretrizes de produção técnica descritas por Calgaro e Braga (2012)

Diante do risco de acelerada erosão genética, devido à uniformização dos pomares comerciais, a variabilidade genética, que é essencial para o avanço do melhoramento da aceroleira, tem sido conservada e manejada nos Bancos Ativos de Germoplasma (BAGs). É a partir da caracterização e do uso estratégico desses acessos que se torna possível a identificação de genitores superiores (Souza, 2014). Esses genótipos são utilizados em

cruzamentos controlados para a geração de híbridos que reúnam características de interesse agrônomo e industrial, garantindo a continuidade do lançamento de novas cultivares adaptadas (Souza et al., 2017).

Na seleção de genótipos, caracteres físico-químicos de qualidade dos frutos como diâmetro, massa, sólidos solúveis, acidez titulável, pH e teor de ácido ascórbico têm sido amplamente utilizados para a escolha de materiais genéticos que apresentam a combinação desejada entre estes caracteres. Além disso, estes atributos de qualidade dos frutos são utilizadas para classificação dos genótipos em dois grupos distintos, de acordo com a finalidade: (i) os frutos frescos destinados ao consumo in natura são caracterizados por frutos maiores e mais firmes, com maior quantidade de sólidos solúveis e menores teores de ácidos orgânicos, o que garante a doçura desejada aos consumidores (Hoehn et al., 2005); e (ii) os frutos destinados à indústria, que devem apresentar teores mais elevados de ácido ascórbico para o processamento deste nutriente em alimentos e fármacos (Delva; Schneider, 2013).

Embora existam 18 cultivares de acerola registradas no Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2024), a realidade produtiva no Submédio do Vale do submédio do São Francisco apresenta uma nítida concentração varietal. Atualmente, a base dos pomares comerciais da região é composta majoritariamente pelas cultivares Junko e Sertaneja , amplamente adotadas pelos produtores em detrimento de variedades antigas como Flor Branca, Okinawa, Costa Rica e Coopama Nº1. A preferência pela Junko deve-se à maior produtividade e à sua boa adequação ao processamento industrial, com frutos de elevado teor de vitamina C e adaptação ao semiárido (Araújo et al., 2022).

Considerando a importância da cultura da aceroleira e a necessidade da introdução, caracterização, seleção e difusão de novo genótipos - para uso comercial ou para programas de melhoramento - adequados e adaptados para o cultivo irrigado desta espécie sob as condições edafoclimáticas da região, a Embrapa semiárido realiza pesquisas com acerolas desde 1992 em parceria com instituições públicas e privadas. Este trabalho iniciou-se com a coleta e introdução de plantas oriundas de diversas regiões do Nordeste, cujos acessos foram introduzidos, em sua maioria, através de mudas propagadas vegetativamente (enxerto ou estaca) e por semente. A implantação destes genótipos de aceroleira culminou na formação do BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido.

Em 1998, a avaliação de 18 acessos implantados no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, resultou na seleção e lançamento do clone CPATSA 4.3 como ‘BRS 152 –

Sertaneja', cujas principais características incluíam alta produtividade (superior a 60 t ha⁻¹ em condições experimentais), precocidade (início da produção seis meses após o plantio no campo) e alto conteúdo de vitamina C (superior a 1.500 mg 100 g⁻¹ de polpa), rapidamente se difundindo por todo o Nordeste (Gonzaga; Bezerra, 1999). Com o afastamento do pesquisador responsável pelos experimentos de acerola, os estudos com aceroleira na Embrapa Semiárido foram encerrados e a coleção de germoplasma foi extinta até 2012, quando uma nova coleção de genótipos de aceroleira foi implementada a partir da coleta de acessos oriundos das principais regiões produtoras de acerola no Brasil (Souza et al., 2017).

Perfil fitoquímico e potencial funcional da acerola

A acerola é fonte de diversos macro e micronutrientes como cálcio, ferro, magnésio, fósforo, potássio, sódio e zinco, além de vitaminas como tiamina, riboflavina, niacina, vitamina B6, folato e vitamina A (Assis et al., 2008).

Ácido Ascórbico

Seu principal destaque, entretanto, é a elevada concentração de ácido ascórbico (vitamina C), que o torna uma das fontes naturais mais ricas deste composto no mundo, comparável apenas ao camu camu (*Mirciaria dubia*) (Delva; Schneider, 2013). Isso despertou o interesse pelo cultivo comercial de acerola logo na década de 1950, após a descoberta do seu alto teor de vitamina C (Da Cruz et. al, 2019)

A procura por alimentos naturais, saudáveis e ricos em compostos bioativos tem contribuído para fortalecer e difundir o consumo da acerola a nível nacional e global (Farvid et al., 2016). O ácido ascórbico é uma das vitaminas hidrossolúveis mais importantes, essencial para a biossíntese de colágeno, carnitina, neurotransmissores, corticóides e catecolaminas, bem como na síntese e manutenção de tecidos, incluindo a formação de ossos, dentes e músculos (Mohammed, 2011; Prakash; Baskaran, 2018).

Trata-se de um nutriente essencial na dieta humana, cujas recomendações nutricionais diárias (RDAs, do inglês Recommended Dietary Allowances) para adultos (>19 anos) variam entre 75 e 90 mg dia⁻¹ para mulheres e homens, respectivamente (Krinsky et al., 2000). Com uma concentração média de ácido ascórbico que varia entre 1000 a 4500 mg 100 g⁻¹, que representa valores até 100 vezes superiores aos da laranja e 10 vezes ao da goiaba, apenas dois a quatro frutos de acerola por dia são suficientes para satisfazer as necessidades de vitamina C de um adulto (Almeida et al., 2014). O conteúdo de vitamina C nos frutos é

dependente de diversos fatores, tais como o genótipo, estágio de maturação, precipitação, aplicação de corretivos e fertilizantes, manejo da irrigação e controle de pragas e doenças.

Neste contexto, os estádios de maturação apresentam grande influência sobre o teor de ácido ascórbico de acerola, que tende a diminuir com o avanço da maturação. Produtos ricos em vitamina C são preparados a partir do extrato da acerola, utilizados como suplemento dietético ou como antioxidante natural, no preparo de produtos farmacêuticos e no enriquecimento de alimentos industrializados (Borges et al., 2021). Um estudo conduzido por Siqueira et al. (2020) comparou o custo de oito nutrientes de alimentos típicos da dieta brasileira e verificou que a vitamina C foi o nutriente mais barato na dieta, tendo como fonte o suco de acerola, o qual teve um custo aproximado de R\$0,01 por 30% das recomendações nutricionais diárias de um adulto saudável.

Flavonóides

Dentro do grupo dos compostos fenólicos, os flavonoides constituem a maior e mais importante subclasse, sendo amplamente reconhecidos por seus efeitos antioxidantes, anti-inflamatórios e cardioprotetores (Panche et al., 2016; Pietta, 2000). Esses compostos são amplamente distribuídos em alimentos de origem vegetal, incluindo frutos, hortaliças, grãos e bebidas como o chá, apresentando ampla ocorrência no reino vegetal (Scalbert & Williamson, 2000). Nas plantas, os flavonoides são sintetizados por meio da via dos fenilpropanoides como metabólitos secundários envolvidos em diversos processos fisiológicos, como defesa contra patógenos, proteção contra radiação ultravioleta e regulação de interações ecológicas, incluindo atração de polinizadores (Crozier et al., 2009).

Estruturalmente, os flavonoides apresentam um esqueleto básico composto por quinze átomos de carbono organizados em dois anéis aromáticos (A e B) ligados por uma cadeia heterocíclica de três carbonos, formando a estrutura característica C6–C3–C6. Variações no grau de oxidação do anel central e no padrão de hidroxilação ou glicosilação dos anéis aromáticos originam diferentes subclasses estruturais de flavonoides (Panche et al., 2016). Essas diferenças estruturais influenciam diretamente propriedades físico-químicas, como solubilidade, estabilidade e atividade antioxidante dessas moléculas (Kumar & Pandey, 2013).

As principais subclasses estruturais de flavonoides e suas diferenças químicas são apresentadas na Figura 1.2. Entre elas destacam-se flavonóis (ex.: quercetina e kaempferol), flavonas (ex.: apigenina e luteolina), flavanonas, isoflavonas, antocianidinas e

proantocianidinas, diferenciadas principalmente pela posição do anel B e pelo grau de saturação do anel heterocíclico (Crozier et al., 2009; Panche et al., 2016). Em frutos, as subclasses mais frequentemente encontradas são flavonóis, flavonas e antocianinas, estas últimas responsáveis pela coloração vermelha, roxa ou azul observada em diversas espécies frutíferas.

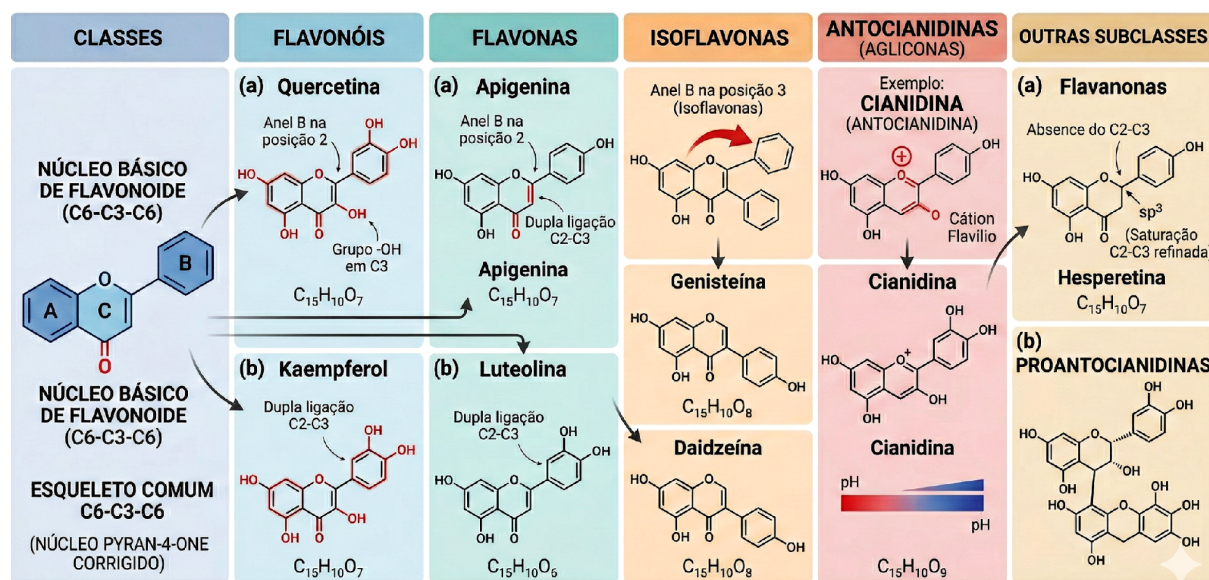


Figura 2 – Estrutura básica dos flavonoides (C6–C3–C6) e principais subclasses estruturais, incluindo flavonóis, flavonas, isoflavonas, flavanonas, antocianidinas e proantocianidinas. **Fonte:** Adaptado de Panche et al. (2016) e Crozier et al. (2009).

No caso da acerola, além do elevado teor de ácido ascórbico, diversos estudos relatam a presença significativa de compostos fenólicos, incluindo flavonoides e antocianinas, que contribuem para o potencial antioxidante do fruto e para a qualidade funcional do alimento (Leffa et al., 2012; Batista et al., 2018). Esses compostos desempenham papel importante tanto na fisiologia vegetal quanto na promoção de benefícios à saúde humana, estando associados à redução do risco de doenças crônicas, incluindo enfermidades cardiovasculares e processos inflamatórios (Manach et al., 2004; Ramos, 2008).

Antocianinas

Os antioxidantes presentes na alimentação desempenham papel relevante na prevenção e no retardamento da progressão de enfermidades associadas ao estresse oxidativo. Além da vitamina C, as antocianinas presentes na acerola constituem uma fonte expressiva de antioxidantes naturais, contribuindo para a promoção da saúde e para a redução do risco de doenças (Lima et al., 2005). A composição química da acerola é fortemente influenciada pelo

genótipo, pelas condições ambientais e pelo estágio de maturação. Entre os principais responsáveis por suas propriedades bioativas, destacam-se o ácido ascórbico e os compostos fenólicos, especialmente flavanóis, flavonóis e antocianinas (Mezadri et al., 2008; Nascimento et al., 2018).

As antocianinas constituem uma subclasse relevante dos flavonoides, com ampla distribuição no Reino Vegetal, formando um grupo de pigmentos polifenólicos hidrofílicos capazes de gerar cores que variam do vermelho ao azul em flores, folhas e frutos (Damodaran et al., 2010; Alapapat; Alappat, 2020; Hussain et al., 2023). Do ponto de vista químico, esses compostos são produzidos pela rota dos fenilpropanoides e ocorrem em diversos órgãos das plantas como metabólitos secundários. Estruturalmente, consistem em moléculas formadas por dois anéis aromáticos ligados por uma cadeia de três carbonos, resultando no esqueleto C6-C3-C6 (Delgado et al., 2000), com presença de carga positiva associada ao oxigênio no anel C. Entre as antocianinas mais comuns em frutos e hortaliças destacam-se cianidina, delphinidina, pelargonidina, peonidina, malvidina e petunidina (Mollaani; Monajjeami, 2020). Essas mesmas subclasses de antocianidinas compõem o perfil predominante de antocianinas da acerola, com destaque para a cianidina como principal pigmento responsável pela coloração vermelho-arroxeadada do fruto e por sua elevada atividade antioxidante (Vilvert, 2024)

A conformação estrutural das antocianinas depende fortemente do pH, em função de sua natureza iônica, com valores de pH em torno de 4 e 7 e ocorrência de múltiplas espécies químicas conforme o meio (Figura 1.3). Em soluções ácidas de baixo pH, predomina o cátion flavílico, forma mais estável e intensamente colorida. Na faixa aproximada de pH 4 a 5, ocorre a hidratação dessa forma, com redução da intensidade de cor e favorecimento da formação de pseudobase carbonílica (carbinol) praticamente incolor (Mollaani; Monajjeami, 2020; Trouillas et al., 2016; Brouillard, 1982). Com o aumento do pH, a estrutura tende a se rearranjar, resultando em formas associadas a cores violeta e azul e, em condições mais alcalinas, amarelo (chalcona). Adicionalmente, meios mais ácidos retardam a degradação do radical 3-glicosil, contribuindo para maior estabilidade dos pigmentos (Mazza; Brouillard, 1987; Mollaani; Monajjeami, 2020; Trouillas et al., 2016).

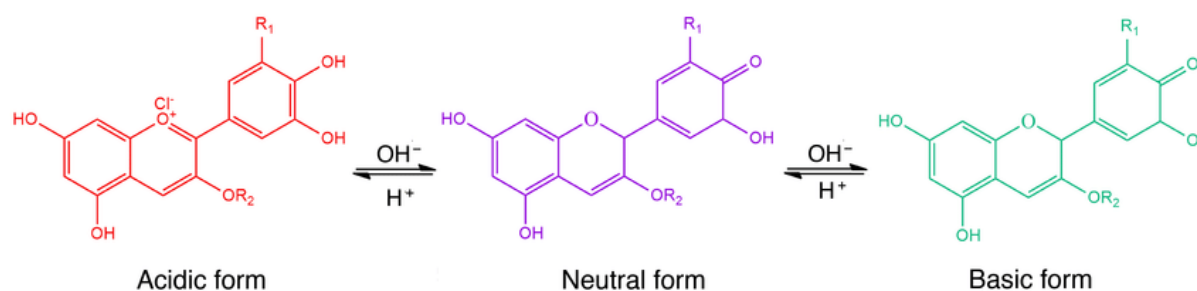


Figura 3 - Transformações estruturais reversíveis das antocianinas em função do pH. **Fonte:** Mazza; Brouillard, 1987.

As variações de tonalidade decorrem de diferenças nos grupos alquila ligados ao esqueleto flavonoídico e de padrões de substituição que influenciam propriedades físicoquímicas, como polaridade, tamanho molecular e hidrofobicidade, impactando o comportamento desses compostos em sistemas biológicos e tecnológicos (Mollaani; Monajjeami, 2020). Na acerola, a coloração externa é um atributo fundamental de qualidade, diretamente relacionado à presença e à concentração de antocianinas (Brunini et al., 2004), com destaque para a cianidina-3-glicosídeo como principal pigmento reportado.

Fatores como atividade de polifenoloxidase, pH do tecido e exposição térmica afetam significativamente sua síntese e manutenção. Devido à alta disponibilidade em materiais naturais e ao amplo repertório de cores, as antocianinas são exploradas nas indústrias de alimentos, fármacos e de nutracêuticos (Alapapat; Alappat, 2020), sendo apontadas como candidatas promissoras ao desenvolvimento de dispositivos colorimétricos e sensores visuais em comparação a outros pigmentos naturais (Zhay et al., 2022). Além do papel sensorial, as antocianinas podem contribuir para a qualidade dos alimentos ao retardar a degradação associada à ação de enzimas e bactérias (Moura et al., 2024), apresentam elevado potencial bioativo e capacidade de neutralizar espécies reativas de oxigênio, reduzindo o risco de doenças crônicas não transmissíveis, como enfermidades cardiovasculares, câncer e distúrbios neurodegenerativos (Smeriglio et al., 2016).

Carotenóides

Carotenóides são pigmentos orgânicos lipossolúveis amplamente distribuídos em plantas, algas e alguns microrganismos. Esses compostos apresentam coloração variando do amarelo ao vermelho e atuam como cromóforos responsáveis pela coloração de diferentes

frutos, hortaliças e flores. Além de sua importância na pigmentação vegetal, os carotenóides possuem relevante papel biológico e nutricional, sendo associados a diversas funções fisiológicas em organismos vivos (Rosas-Saavedra & Stange, 2016; Rodriguez-Concepcion et al., 2018).

Esses pigmentos estão associados às colorações amarela, alaranjada e vermelha em diversos tecidos vegetais, especialmente em frutos e hortaliças. Além das propriedades antioxidantes, estudos epidemiológicos indicam que o consumo de alimentos ricos em carotenóides está relacionado à redução do risco de doenças crônicas, incluindo câncer e doenças cardiovasculares (Rao & Rao, 2007; Rodriguez-Concepcion et al., 2018). Os carotenóides encontram-se amplamente distribuídos em frutos, folhas e órgãos de reserva, ocorrendo em concentrações relevantes em diversos alimentos de origem vegetal (Nisar et al., 2015).

Quimicamente, os carotenóides constituem um grupo de compostos isoprenoides derivados da via dos terpenoides, com mais de 700 estruturas já descritas na literatura. Em plantas, desempenham múltiplas funções fisiológicas. Nos cloroplastos, atuam como pigmentos acessórios na fotossíntese, ampliando o espectro de absorção de luz e contribuindo para a transferência de energia aos centros de reação fotossintéticos. Adicionalmente, exercem papel fotoprotetor fundamental, dissipando o excesso de energia luminosa e prevenindo danos oxidativos ao aparato fotossintético (Cazzonelli & Pogson, 2010; Rodriguez-Concepcion et al., 2018). Além das funções fotossintéticas, os carotenóides também participam de processos de sinalização celular em plantas. Produtos derivados da clivagem desses pigmentos atuam como moléculas sinalizadoras que regulam crescimento, desenvolvimento e respostas a estresses ambientais. Entre esses derivados destaca-se o ácido abscísico (ABA), um importante fitormônio envolvido na regulação da dormência, do fechamento estomático e da resposta ao estresse hídrico (Nisar et al., 2015; Perveen et al., 2021).

Do ponto de vista metabólico, a biossíntese dos carotenóides ocorre nos plastídios e envolve uma série de etapas enzimáticas bem caracterizadas. Inicialmente, enzimas como PSY (phytoene synthase), PDS (phytoene desaturase), ZDS (ζ -carotene desaturase), ZISO e CRTISO participam das reações que levam à formação do licopeno. Posteriormente, ocorrem reações de ciclização catalisadas por LCYB e LCYE, originando α -caroteno e β -caroteno. A partir desses compostos são formadas diversas xantofilas, como luteína, zeaxantina,

violaxantina e neoxantina, por meio de reações de hidroxilação e epoxidação. O equilíbrio entre essas rotas metabólicas influencia diretamente o perfil final de pigmentos acumulados nos tecidos vegetais (Rodriguez-Concepcion et al., 2018; Cazzonelli & Pogson, 2010).

Uma das funções mais estudadas dos carotenóides refere-se à sua capacidade antioxidante. Esses compostos atuam como sequestradores de radicais livres e espécies reativas de oxigênio, contribuindo para a proteção celular contra danos oxidativos. Dessa forma, estão associados à prevenção de diversas doenças relacionadas ao estresse oxidativo, como catarata, doenças cardiovasculares e determinados tipos de câncer (Shami & Moreira, 2004; Rao & Rao, 2007). Do ponto de vista nutricional, os carotenóides são considerados micronutrientes importantes para a saúde humana. Alguns deles apresentam atividade pró-vitamina A, podendo ser convertidos em retinol no organismo humano. Entre esses compostos destaca-se o β -caroteno, amplamente reconhecido por sua contribuição para a manutenção da visão, da integridade epitelial, do crescimento e da função imunológica (Krinsky et al., 2005; Rao & Rao, 2007).

No caso da acerola, os carotenóides desempenham papel relevante tanto na determinação da coloração do fruto quanto no seu potencial funcional. Estudos indicam que o β -caroteno é um dos principais carotenóides presentes na acerola, contribuindo para sua atividade pró-vitamina A e potencial antioxidante (Mezadri et al., 2008; Hornero-Méndez et al., 2005). A concentração desses pigmentos varia conforme o estágio de maturação dos frutos, sendo geralmente maior em frutos maduros devido à degradação das clorofilas e ao aumento da biossíntese de pigmentos carotenoides durante o amadurecimento (Lima et al., 2005). Além do estágio de maturação, fatores como condições climáticas, características do solo e variabilidade genética entre cultivares podem influenciar significativamente o conteúdo final desses compostos nos frutos (Mezadri et al., 2008).

Fisiologia pós-colheita e estabilidade dos compostos bioativos

A alta perecibilidade da acerola é um dos principais gargalos para a sua comercialização in natura e processamento industrial, o fruto apresenta um comportamento climatérico atípico (um comportamento respiratório intenso, embora caracterizado por uma baixa produção de etileno), exibe taxa respiratória extremamente elevada, alcançando picos de $900 \text{ ml CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Carrington; King, 2002). Este metabolismo acelerado resulta em uma rápida degradação das reservas e uma vida útil curta, variando entre 2 a 4 dias quando armazenada em temperatura ambiente ($>20^\circ\text{C}$) (Vendramini; Trugo, 2000; Scaloni et al.,

2004). A senescência é marcada pela rápida perda de firmeza, uma vez que o fruto imaturo é cerca de três vezes mais firme que o maduro (Batista et al., 2015; Lima et al., 2014). Esse amolecimento decorre da modificação dos polímeros de parede celular, que se tornam mais solúveis durante o amadurecimento, reduzindo a resistência mecânica do tecido (Assis et al., 2008).

A estabilidade dos compostos bioativos está intrinsecamente ligada ao estágio de maturação na colheita. Existe uma relação inversa clara entre a maturação e o teor de vitamina C. Frutos imaturos (verdes) podem apresentar concentrações de ácido ascórbico superiores a 3.700 mg 100g⁻¹, enquanto frutos maduros (vermelhos) variam entre 862 e 1.820 mg 100g⁻¹ (Figueiredo et al., 2014; Souza et al., 2014).

O declínio acentuado da vitamina C durante o amadurecimento é intensificado durante o amadurecimento e sob condições de estresse, em função do aumento de espécies reativas de oxigênio (EROs), que comprometem a qualidade e a vida útil dos frutos. Como mecanismo de defesa, enzimas antioxidantes, como a ascorbato peroxidase, utilizam o ácido ascórbico na neutralização dessas espécies (Mditshwa et al., 2017; Ribeiro e Freitas, 2020).

Devido a esse perfil, a indústria prioriza a colheita no estágio imaturo para maximizar a extração de vitamina C, enquanto o mercado de mesa e sucos requer frutos vermelhos, onde o declínio do ácido ascórbico é compensado pelo aumento de antocianinas, sólidos solúveis e redução da acidez e adstringência (Moura et al., 2018).

Após a colheita, o processo de senescência desencadeia reações fisiológicas como a degradação da clorofila, o acúmulo de novos pigmentos, a redução da acidez e da vitamina C, além do aumento nos teores de açúcares. Para mitigar esses efeitos, tecnologias de conservação têm sido aplicadas (Macedo et al., 2023). Frutos colhidos na maturidade fisiológica podem ter sua vida útil estendida para até 12 dias se mantidos sob refrigeração a 12°C e envoltos em filme de policloreto de vinila (PVC) (Scalon et al., 2004). Mesmo à temperatura ambiente (20°C), o uso de filme de PVC pode prolongar a conservação em 3 dias (Alves et al., 1999).

A definição do ponto de colheita deve considerar o mercado alvo, visto que as exigências internacionais variam: o mercado europeu requer um mínimo de 7,0 °Brix; o japonês, 7,5 °Brix; enquanto os Estados Unidos priorizam o teor de vitamina C, exigindo média de 1000 mg 100 g⁻¹ de polpa. Para maximizar a retenção desta vitamina, recomenda-se

a colheita nas primeiras horas do dia, evitando a degradação causada pela exposição à radiação solar. No processamento, a pasteurização seguida de congelamento é o método mais eficaz para estabilizar a vitamina C (Delva; Schneider, 2013).

Características Físico-Químicas e Qualidade

A qualidade da acerola é determinada por atributos físicos e químicos. O fruto maduro pesa entre 4 e 10 g, com a polpa representando até 80% desse total. A firmeza é um indicador crucial: frutos verdes são três vezes mais firmes que os maduros (Batista et al., 2015; Lima et al., 2014; Moura et al., 2007). O amolecimento decorre da perda de turgidez celular e alterações na parede celular, onde as pectinas desempenham papel central. O teor de pectinas varia de 94,93 a 246,71 mg 100 g⁻¹; durante a maturação, enzimas solubilizam a pectina, reduzindo a rigidez da parede celular (Assis et al., 2008). Além disso, a oxidação lipídica nas membranas celulares correlaciona-se com a perda de vitamina C, que atua como principal protetor antioxidante (Oliveira et al., 2012).

O sabor e aroma da acerola resultam de uma complexa mistura de compostos voláteis e do balanço entre açúcares e ácidos. O aroma, descrito como levemente doce e semelhante ao da maçã, compõe-se majoritariamente por ésteres (29%), álcoois (23%) e cetonas (16%), incluindo compostos como furfural e limoneno (Delva; Schneider, 2013). O sabor ácido característico deve-se à predominância do ácido málico (0,25%-0,38%), embora a relação açúcar/ácido aumente de 4,22 para 8,31 durante a maturação devido ao consumo de ácidos orgânicos na respiração (Lima et al., 2014).

A acerola é reconhecida como um alimento funcional devido à sua rica composição química. O teor de sólidos solúveis (SS) varia de 5,48 a 11,46 °Brix, correlacionando-se positivamente com os teores de vitamina C e polifenóis (Tabela 1) (Maciel et al., 2010; Oliveira et al., 2011). O maior atrativo nutricional é a vitamina C, cujos níveis variam de 862 a 1465 mg 100 g⁻¹ em frutos maduros, podendo chegar a 3756 mg 100 g⁻¹ em frutos imaturos (Figueiredo et al., 2014; Souza et al., 2014).

Tabela 1 Atributos de qualidade durante o crescimento e desenvolvimento de acerola.

Características	Verde	Intermediário	Maduro
Sólidos Solúveis (°Brix)	5.50–7.06	6.40–9.10	6.70–12.70
Acidez Titulável (% ácido málico)	0.90–1.59	0.83–1.17	0.61–1.06
Relação (SS/AT)	4.56–7.80	4.92–10.96	5.11–15.42
Açúcares Totais (%)	1.60–3.59	2.47–5.72	2.75–6.03
Vitamina C (mg/100 g)	1501.1–3756.0	1239.6–2495.9	862.8–1820.7
Proteína (mg/g)	1.20	0.90	0.20
Firmeza (N)	22.34–38.36	11.12–22.16	8.54–10.50

Fonte: Moura et al., 2018.

REFERÊNCIAS

- ACQUISTUCCI, R. et al. Effect of bread making process on bioactive molecules in durum wheat bread and assessment of antioxidant properties by Caco-2 cell culture model. *Journal of Cereal Science*, v. 83, p. 188-195, 2018.
- ALAPPAT, B.; ALAPPAT, J. Anthocyanin pigments: beyond aesthetics. *Molecules*, v. 25, n. 23, p. 5500, 2020.
- ALMEIDA, S.S. et al. Use of simulated annealing in standardization and optimization of the acerola wine production. *Food Science and Technology*, v. 34, n. 2, p. 292-297, 2014.
- ALVES, G.G.N.; SEBASTIANI, R. Malpighiaceae na Reserva Biológica do Alto da Serra de Paranapiacaba, Santo André, SP, Brasil. *Hoehnea*, v. 42, n. 3, p. 521-529, 2015.
- ALVES, R.E. et al. Brazilian experience on the handling of acerola fruits for international trade. *Acta Horticulturae*, v. 485, p. 31-36, 1999.
- AOAC. *Official methods of analysis*. 16. ed. Arlington: AOAC, 1995. 1141 p.
- ARAÚJO, J.F. et al. *Manual técnico sobre mercados e canais de comercialização de culturas agrícolas no Submédio São Francisco*. Petrolina: Bookerfield Editora, 2022.
- ASSIS, S.A. et al. Acerola: importance, culture conditions, production and biochemical aspects. *Fruits*, v. 63, n. 2, p. 93-101, 2008.

BARTLETT, M.S. Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, v. 160, n. 901, p. 268-282, 1937.

BATISTA, P.F. et al. Quality of different tropical fruit cultivars produced in the Lower Basin of the São Francisco Valley. *Revista Ciência Agronômica*, v. 46, n. 1, p. 176-184, 2015.

BATISTA, P.F. et al. Bioactive compounds and antioxidant activity in tropical fruits grown in the lower-middle São Francisco Valley. *Revista Ciência Agronômica*, v. 49, n. 4, p. 616-623, 2018.

BORGES, A.L. *Boas práticas agrícolas para produção orgânica de acerola*. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2022.

BORGES, O.M.A. et al. Integrated green-based methods to recover bioactive compounds from by-product of acerola processing. *LWT – Food Science and Technology*, v. 151, p. 112104, 2021.

BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, v. 26, n. 2, p. 211-243, 1964.

BROUILLARD, R. Chemical structure of anthocyanins. In: MARKAKIS, P. (ed.). *Anthocyanins as food colors*. New York: Academic Press, 1982.

BRUNINI, M.A. et al. Caracterização física e química de acerolas provenientes de diferentes regiões de cultivo. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 26, n. 3, p. 486-489, 2004.

CALGARO, M.; BRAGA, M.B. *A cultura da acerola*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2012.

CARRINGTON, C.M.S.; KING, G.A. Controlled atmosphere storage of acerola fruit. *Proceedings of the Interamerican Society for Tropical Horticulture*, v. 46, p. 52-54, 2002.

CAZZONELLI, C.I.; POGSON, B.J. Source to sink: regulation of carotenoid biosynthesis in plants. *Trends in Plant Science*, v. 15, p. 266-274, 2010.

CHANG, S.K.; ALASALVAR, C.; SHAHIDI, F. Superfruits: phytochemicals, antioxidant efficacies, and health effects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 59, n. 10, p. 1580-1604, 2019.

CHITARRA, M.I.F. *Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio*. Lavras: UFLA, 2005.

CORDEIRO, S. Z. *Malpighia emarginata* DC. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO), 2020. Disponível em: <https://www.unirio.br/ccbs/ibio/herbariohuni/malpighia-emarginata-dc>. Acesso em: 14 abr. 2026.

COUCEIRO, E.M. *Curso de extensão sobre a cultura da acerola*. Recife: UFRPE, 1981.

CROZIER, A.; JAGANATH, I.B.; CLIFFORD, M.N. Dietary phenolics: chemistry, bioavailability and effects on health. *Natural Product Reports*, v. 26, p. 1001-1043, 2009.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K.L.; FENNEMA, O.R. *Química de alimentos de Fennema*. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

DA CRUZ, Richtier Gonçalves et al. Comparison of the antioxidant property of acerola extracts with synthetic antioxidants using an in vivo method with yeasts. *Food chemistry*, v. 277, p. 698-705, 2019.

DE MEDEIROS, F.G.M. et al. Evaluation of the environmental performance of the production of polyphenol-rich fruit powders. *Journal of Food Engineering*, v. 372, p. 112010, 2024.

DE ROSSO, V.V.; MERCADANTE, A.Z. Carotenoid composition of two Brazilian genotypes of acerola (*Malpighia puniceifolia* L.) from two harvests. *Food Research International*, v. 38, n. 8-9, p. 1073-1077, 2005.

DELGADO-VARGAS, F.; JIMÉNEZ, A.R.; PAREDES-LÓPEZ, O. Natural pigments: carotenoids, anthocyanins and betalains. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 40, p. 173-289, 2000.

DELVA, L.; SCHNEIDER, R. Acerola (*Malpighia emarginata* DC): production, postharvest handling, nutrition and biological activity. *Food Reviews International*, v. 29, p. 107-126, 2013.

FARINELLI, D. et al. Variability of fruit quality among 103 acerola (*Malpighia emarginata* DC.) phenotypes from the subtropical region of Brazil. *Agriculture*, v. 11, n. 11, p. 1078, 2021.

FERREIRA, I.C. et al. Brazilian varieties of acerola produced under semi-arid conditions. *Journal of Food Biochemistry*, v. 45, e13829, 2021.

FERREIRA, M.A.R. et al. Multivariate selection index of acerola genotypes for fresh consumption. *Euphytica*, v. 218, p. 25, 2022.

FELIPPE, G. *Frutas: sabor à primeira dentada*. São Paulo: SENAC, 2005.

FIGUEIREDO, A. et al. Determinação de vitamina C em variedades de acerola. *Nucleus*, v. 11, p. 53-60, 2014.

FREITAS, S.T.; BARBOSA, M.A.G.; RYBKA, A.C.P. *Colheita e pós-colheita de acerola para consumo in natura*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2020.

GOMES NOBRE, Reginaldo et al. Salicylic Acid Reduces Salinity Stress in Barbados Cherry Irrigated with Oilfield Water in Semiarid Brazil. *ACS omega*, v. 10, n. 40, p. 47570-47581, 2025.

GONZAGA NETO, L.; SOARES, J.M. *Acerola para exportação*. Brasília: Embrapa, 1994.

HOLLMAN, P.C.H.; KATAN, M.B. Dietary flavonoids: intake and health effects. *Food and Chemical Toxicology*, v. 37, p. 937-942, 1999.

HOEHN, E. et al. Consumer expectations and soluble solids of plums. *Acta Horticulturae*, v. 682, p. 665-672, 2005.

IBGE. *Censo Agropecuário 2017*. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

KRINSKY, N.I.; JOHNSON, E.J. Carotenoid actions and their relation to health and disease. *Molecular Aspects of Medicine*, v. 26, n. 6, p. 459-516, 2005.

LAURINDO, L.F. et al. Health benefits of acerola (*Malpighia* spp.) and its by-products. *Food Bioscience*, v. 62, p. 105422, 2024.

LIMA, V.L.A.G. et al. Total phenolic and carotenoid contents in acerola genotypes. *Food Chemistry*, v. 90, p. 565-568, 2005.

LIMA, GEOVANI SOARES DE et al. Physicochemical quality of fruits of West Indian cherry under saline water irrigation and phosphate fertilization. *Revista Caatinga*, v. 33, p. 217-225, 2020.

LOPES, R.; PAIVA, J.R. Aceroleira. In: BRUCKNER, C.H. *Melhoramento de fruteiras tropicais*. Viçosa: UFV, 2002.

LORENZI, H. *Árvores brasileiras*. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2009.

MACEDO, José JN et al. Pulsed light influences several metabolic routes, delaying ripening and improving the postharvest quality of acerola. *Scientia Horticulturae*, v. 307, p. 111505, 2023.

MACIEL, M.I.S. et al. Caracterização físico-química de frutos de aceroleira. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 30, p. 865-869, 2010.

MANACH, C. et al. Polyphenols: food sources and bioavailability. *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 79, p. 727-747, 2004.

MANICA, I. *Acerola: tecnologia de produção, pós-colheita, congelamento e exportação*. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2003.

MDITSHWA, Asanda et al. Postharvest quality and composition of organically and conventionally produced fruits: A review. *Scientia Horticulturae*, v. 216, p. 148-159, 2017.

MEZADRI, T.; PÉREZ-GÁLVEZ, A.; HORNERO-MÉNDEZ, D. Carotenoid pigments in acerola fruits (*Malpighia emarginata* DC.) and derived products. *European Food Research and Technology*, v. 220, n. 1, p. 63-69, 2005.

MORTON, J.F. *Fruits of warm climates*. Miami: Julia F. Morton, 1987.

NAGATA, M.; YAMASHITA, I. Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, v. 39, n. 10, p. 925-928, 1992.

PANCHE, A.N.; DIWAN, A.D.; CHANDRA, S.R. Flavonoids: an overview. *Journal of Nutritional Science*, v. 5, e47, 2016.

PIO, R. *O cultivo da acerola*. Piracicaba: ESALQ, 2003.

POLETTTO, P. et al. Recovery of ascorbic acid, phenolic compounds and carotenoids from acerola by-products. *LWT – Food Science and Technology*, v. 146, p. 111654, 2021.

PRAKASH, A.; BASKARAN, R. Acerola: an untapped functional superfruit. *Journal of Food Science and Technology*, v. 55, p. 3373-3384, 2018.

- RAO, A.V.; RAO, L.G. Carotenoids and human health. *Pharmacological Research*, v. 55, p. 207-216, 2007.
- RIBEIRO, C.M.C.M. et al. Biochemical changes and peroxidase activity during development of acerola 'Okinawa'. *Revista Ciência Agronômica*, v. 55, e20218169, 2023.
- RIBEIRO, B. S; FREITAS, S. T. Maturity stage at harvest and storage temperature to maintain postharvest quality of acerola fruit. *Scientia Horticulturae*, v. 260, p. 108901, 2020.
- RITZINGER, R.; KOBAYASHI, A.K.; OLIVEIRA, J.R.P. *A cultura da aceroleira*. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2003.
- RITZINGER, R.; RITZINGER, C.H.S.P. *Acerola: aspectos gerais da cultura*. Brasília: Embrapa, 2011.
- ALISCIONI, S. S. et al. Structural diversity of elaiophores in Argentine species of Malpighiaceae: morphology, anatomy, and interaction with pollinators. *Protoplasma*, v. 259, n. 3, p. 789-807, 2022.
- SCALBERT, A.; WILLIAMSON, G. Dietary intake of polyphenols and health. *Journal of Nutrition*, v. 130, p. 2073-2085, 2000.
- SHAMI, N.J.I.E.; MOREIRA, E.A.M. Licopeno como antioxidante. *Revista de Nutrição*, v. 17, p. 227-236, 2004.
- SMERIGLIO, A. et al. Health benefits of anthocyanins. *Phytotherapy Research*, v. 30, p. 1265-1286, 2016.
- SOUZA, F.F. et al. Divergência genética entre genótipos de aceroleira da Embrapa Semiárido. *Congresso Brasileiro de Fruticultura*, 2014.
- TAIZ, L. et al. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TEIXEIRA, A.H.C.; AZEVEDO, P.V. Índices-limite do clima para o cultivo da acerola. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 30, p. 1403-1410, 1995.
- TROUILLAS, P. et al. Stabilizing color by copigmentation. *Chemical Reviews*, v. 116, p. 4937-4982, 2016.

VENDRAMINI, A.L.; TRUGO, L.C. Chemical composition of acerola fruit at three stages of maturity. *Food Chemistry*, v. 71, p. 195-198, 2000.

XU, M. et al. Metabolomic analysis of acerola fruit during ripening. *Food Research International*, v. 130, p. 108915, 2020.

CAPÍTULO II

RELAÇÃO ENTRE COLORAÇÃO, COMPOSIÇÃO DE PIGMENTOS E ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS EM GENÓTIPOS DE ACEROLA COLHIDOS EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO E PRODUZIDOS EM DIFERENTES SAFRAS

RESUMO

O amadurecimento da acerola promove alterações na composição físico-química e no perfil de compostos bioativos dos frutos, que variam conforme o genótipo e as condições de cultivo. Este estudo avaliou a relação entre coloração, composição de pigmentos e atributos físico-químicos de seis genótipos de acerola, colhidos nos estádios verde e maduro ao longo de três safras consecutivas no Vale do Submédio do São Francisco. Foram determinados atributos físicos, sólidos solúveis, acidez titulável, ácido ascórbico, antocianinas, flavonoides, carotenoides e parâmetros colorimétricos, com análises univariadas e multivariadas. Observou-se ampla variabilidade entre genótipos, safras e estádios de maturação, com redução do teor de ácido ascórbico e aumento de antocianinas, flavonoides e carotenoides durante o amadurecimento. A coloração dos frutos apresentou associação com o perfil de pigmentos e compostos bioativos, com maiores teores de antocianinas nos genótipos vermelhos e maior acúmulo de carotenoides em LAG 05, embora genótipos de casca vermelha, como Carp 01, também tenham apresentado concentrações elevadas desses pigmentos. Nos frutos maduros, o componente a^* da casca correlacionou-se positivamente com as antocianinas, enquanto b^* e Hue da polpa apresentaram associação com os carotenoides. Os resultados demonstram que os atributos colorimétricos podem ser utilizados para discriminar genótipos de acerola com diferentes perfis de qualidade e composição bioativa.

Palavras-chave: Compostos bioativos; pigmentos vegetais; qualidade de frutos; variabilidade genética.

RELATIONSHIP BETWEEN COLORATION, PIGMENT COMPOSITION, AND PHYSICOCHEMICAL ATTRIBUTES IN ACEROLA GENOTYPES HARVESTED AT DIFFERENT MATURITY STAGES AND PRODUCED IN DIFFERENT CROP SEASONS

ABSTRACT

Acerola ripening promotes changes in the physicochemical composition and bioactive compound profile of the fruits, which vary according to genotype and growing conditions. This study evaluated the relationship between fruit color, pigment composition, and physicochemical attributes of six acerola genotypes harvested at the green and ripe stages over three consecutive growing seasons in the São Francisco Sub-Middle Valley, Brazil. Physical attributes, soluble solids, titratable acidity, ascorbic acid, anthocyanins, flavonoids, carotenoids, and colorimetric parameters were determined using univariate and multivariate analyses. Substantial variability was observed among genotypes, growing seasons, and ripening stages, with a reduction in ascorbic acid content and increases in anthocyanins, flavonoids, and carotenoids during ripening. Fruit color was associated with pigment and bioactive compound profiles, with higher anthocyanin contents in red genotypes and greater carotenoid accumulation in LAG 05, although red-skinned genotypes such as Carp 01 also showed high concentrations of these pigments. In ripe fruits, the peel a^* value was positively correlated with anthocyanins, whereas pulp b^* and Hue were associated with carotenoids. These results demonstrate that colorimetric attributes can be used to discriminate acerola genotypes with distinct quality traits and bioactive composition.

Keywords: Bioactive compounds; plant pigments; fruit quality; genetic variability.

INTRODUÇÃO

A aceroleira (*Malpighia emarginata* Sessé & Moc. ex DC.) destaca-se entre as fruteiras tropicais de maior relevância nutricional e econômica, apresentando ampla adaptação às condições edafoclimáticas brasileiras. Na região do Vale do submédio do São Francisco, especialmente no polo irrigado Petrolina-Juazeiro, a cultura apresenta desempenho agrônomo consistente, e estudos demonstram que as condições ambientais regionais influenciam a composição físico-química e o teor de compostos bioativos dos frutos (Freitas et al., 2020).

Reconhecida como uma das principais fontes naturais de ácido ascórbico, a acerola também se caracteriza pela presença de compostos fenólicos, flavonoides, antocianinas e carotenoides, os quais contribuem para sua capacidade antioxidante e valor funcional (Pato et al., 2021; Miskinis et al., 2023). Revisões recentes indicam que a espécie apresenta ampla diversidade metabólica, reforçando seu interesse para estudos de qualidade e composição fitoquímica (Vilvert et al., 2024). A variabilidade genética da aceroleira é amplamente documentada em estudos de caracterização de germoplasma, evidenciando diferenças expressivas entre genótipos quanto a atributos morfológicos, parâmetros de cor e características físico-químicas (Farinelli et al., 2021; Ferreira et al., 2021). Essa variabilidade estende-se a múltiplos componentes da qualidade, indicando que o desempenho de cada material resulta da expressão fenotípica de sua constituição genética sob determinadas condições ambientais.

Durante os processos de crescimento e desenvolvimento, a maturação constitui um eixo adicional de variação, promovendo modificações no balanço entre açúcares e ácidos, refletidas em sólidos solúveis (SS), acidez titulável (AT) e razão SS/AT, bem como alterações na composição de vitamina C e pigmentos (Vendramini; Trugo, 2000; Vilvert et al., 2024). Assim, diferenças entre genótipos podem manifestar-se tanto em valores absolutos quanto na magnitude das mudanças observadas entre os estádios verde, caracterizado pelo fruto totalmente expandido e casca verde, e maduro caracterizado pelo fruto totalmente expandido e casca vermelha, amarela ou alaranjada, conforme o genótipo. Do ponto de vista metabólico, vitamina C, carotenoides e antocianinas pertencem a rotas biossintéticas distintas, mas contribuem conjuntamente para a atividade antioxidante e para a construção do fenótipo do fruto. Entretanto, a sensibilidade de determinados pigmentos, como as antocianinas, a fatores

ambientais e de processamento indica que a composição final resulta da interação entre constituição genética e condições externas (Oliveira Filho et al., 2023).

Apesar dos avanços na caracterização da variabilidade e da qualidade de acerolas, ainda são limitados os estudos que comparam de forma integrada genótipos de coloração contrastante, avaliando simultaneamente atributos morfológicos e composição fitoquímica ao longo da maturação e em múltiplas safras (Vilvert et al., 2024). Além disso, evidências metodológicas indicam elevada heterogeneidade para variáveis físico-químicas na espécie, reforçando a necessidade de interpretações cautelosas ao se estabelecer relações entre fenótipos externos e composição interna (Vilvert et al., 2025). Diante desse contexto, este estudo teve como objetivos avaliar a relação entre coloração, composição de pigmentos e atributos físico-químicos de genótipos de acerola colhidos em diferentes estádios de maturação e produzidos em diferentes safras.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área experimental e cultivo

O experimento foi realizado em um pomar experimental da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, Brasil, situado a 9°09' de latitude Sul e 40°22' de longitude Oeste, a uma altitude de 365 m. O clima local é do tipo BSh (semiárido), de acordo com a classificação de Köppen (Alvares, Stape, Sentelhas, Gonçalves & Sparovek, 2013), e o solo é classificado como Argissolo Amarelo distrófico (Santos et al., 2018). O pomar foi implantado em 2012, e as práticas culturais, incluindo irrigação por gotejo, adubação, poda e controle de plantas daninhas, pragas e doenças, foram realizadas conforme recomendações técnicas (Ritzinger, Kobayashi & Oliveira, 2003).

Os frutos foram colhidos em uma área experimental situada no Banco Ativo de Germoplasma da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, Brasil. O estudo foi conduzido em esquema fatorial 6×3 , correspondente a seis genótipos de acerola avaliados em três safras consecutivas. Um total de aproximadamente 500 gramas de acerolas no estágio de maturação maduro e verde foi colhido por genótipo em fevereiro, maio e julho de 2025. Os dados climáticos foram monitorados durante o período de pegamento/frutificação, ou seja, de 20 a 25 dias da antese até a colheita, dependendo do genótipo (Maranhão Ribeiro et al., 2018; Santos et al., 2019).

Os dados meteorológicos durante o período do experimento (fevereiro a julho de 2025) estão representados na Figura 1, que ilustra as variações de temperaturas média, mínima e máxima, bem como a precipitação e radiação global. O solo da área experimental é um Latossolo Amarelo distrófico, típico das condições edafoclimáticas do Vale do submédio do São Francisco, com textura argilosa e boa drenagem.

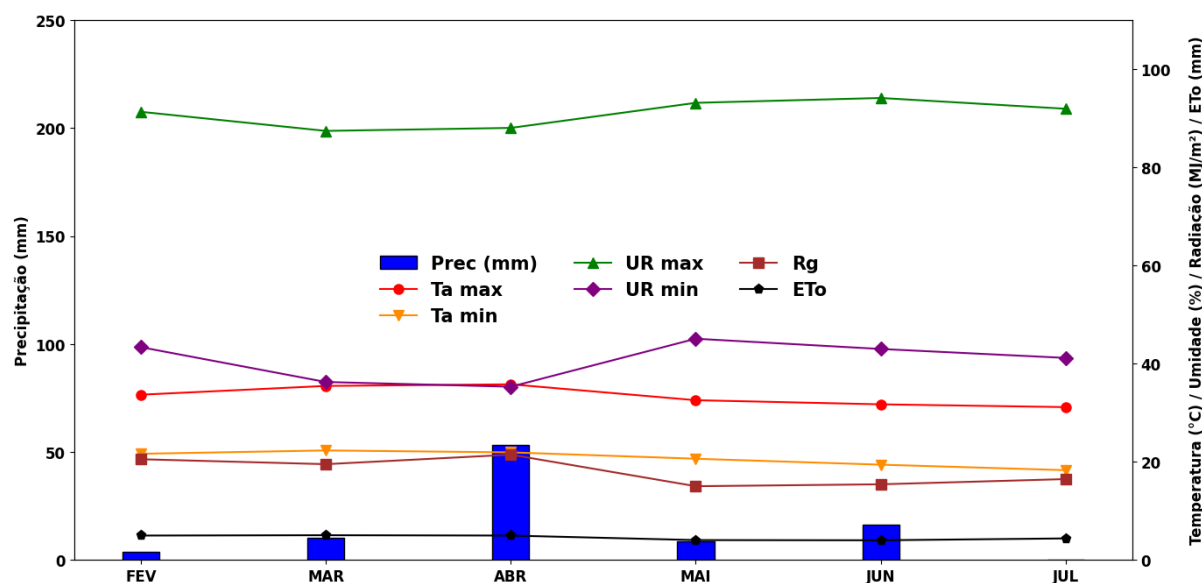


Figura 1 - Variáveis climáticas mensais no Campo Experimental de Bebedouro, Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, em 2025. Fonte: EMBRAPA, 2026

Colheita e processamento

Em função dessa variabilidade fenológica, a colheita de cada genótipo foi realizada quando os frutos atingiram seu máximo crescimento em dois estádios de maturação (verde e maduro) determinados pelo desenvolvimento da cor da casca. Foram selecionados apenas frutos saudáveis, eliminando-se aqueles com danos mecânicos, defeitos ou sinais de doenças e insetos. Imediatamente após a colheita, os frutos foram transportados ao Laboratório de Fisiologia Pós-colheita da Embrapa Semiárido, onde foram conduzidas as análises de peso, diâmetro e comprimento de fruto. Após a realização dessas análises, os frutos foram congelados para posterior realização das análises físico-químicas. Para essas análises, os frutos foram previamente descongelados e o suco foi obtido por meio de prensagem manual.

Análises físico-químicas

Massa e diâmetro e comprimento

A massa fresca dos frutos e a massa do suco foram determinadas em balança digital de precisão modelo AD50 (Marte Científica, São Paulo, Brasil), com resultados expressos em gramas (g). A mensuração dos atributos físicos comprimento e diâmetro foi realizada com auxílio de régua milimetrada, considerando-se o maior eixo longitudinal do fruto para o comprimento e o maior eixo transversal para o diâmetro, conforme metodologia usualmente adotada em estudos morfológicos de acerola (Matsuura et al., 2001).

Sólidos solúveis e acidez titulável

O sólidos solúveis (SS) foi determinado utilizando-se um refratômetro digital modelo PAL-1 (Atago, São Paulo, Brasil), equipado com compensação automática de temperatura. As análises seguiram o protocolo recomendado pela AOAC (2012). Para cada leitura, foi utilizado 1 mL de suco fresco, e os resultados foram expressos em graus Brix (°Brix). A faixa de leitura do equipamento varia de 0 a 65 °Brix.

A acidez titulável (AT) foi determinada por titulação manual, utilizando 1 mL de suco previamente diluído em 50 mL de água destilada. A solução foi titulada com hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 N até o ponto de viragem, identificado pela mudança de coloração do indicador fenolftaleína. Os resultados de acidez titulável foram expressos em gramas de ácido málico por 100 g de suco, conforme metodologia descrita pela AOAC (2012).

Compostos bioativos

Ácido ascórbico

O conteúdo de ácido ascórbico (AA) foi quantificado pela titulação do suco com uma solução de Tillman (DFI - 2,6-diclorofenol indofenol) 0,02%. Um total de 1 ml de suco de acerola foi diluído em 100 ml de ácido oxálico 0,5%. Por fim, 1 ml desta solução foi diluído em 49 ml de água destilada e titulado com a solução de Tillman até o desenvolvimento da coloração rosa claro permanente por 15 segundo (Strohecker e Henning, 1967). Os resultados foram expressos em mg de AA por 100 g de suco.

Carotenóides

A quantificação de carotenóides totais foi realizada segundo a metodologia proposta por Nagata e Yamashita (1992), utilizando-se uma solução extratora composta por hexano e

acetona na proporção de 6:4 (v/v). Para a análise, pesaram-se 5 g de suco em um tubo Falcon de 50 mL, ao qual foram adicionados 10 mL da solução extratora e 10 mL de cloreto de potássio. A mistura foi homogeneizada em agitador tipo vórtex por 1 minuto e, em seguida, centrifugada a 9000 rpm por 8 minutos, a 14 °C.

O protocolo de extração baseou-se nos métodos descritos por Mertz et al. (2009) e Acquistucci et al. (2018), com adaptação na etapa de separação de fases: utilizou-se cloreto de potássio (KCl) em substituição ao cloreto de sódio (NaCl). Essa modificação visou aumentar a força iônica do meio aquoso, induzindo o efeito *salting-out* para reduzir a solubilidade dos compostos orgânicos na fase aquosa e favorecer sua migração para a fase orgânica (Jaramillo-Flores et al., 2005). O processo de extração com solvente orgânico foi repetido de 2 a 3 vezes, até a completa descoloração da fase de resíduo, garantindo a recuperação exaustiva dos analitos (Acquistucci et al., 2018).

Após a separação, o sobrenadante foi transferido para cubetas de vidro, e a leitura da absorbância foi realizada em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 663 nm, 645 nm, 505 nm e 453 nm. O teor de beta-caroteno foi calculado conforme as equações abaixo, e os resultados foram multiplicados por 1000 para expressão em µg/100 mL.

$$\beta\text{-Caroteno } (\mu\text{g}/100\text{ml}) = 0.216 \times A_{663} - 1.22 \times A_{645} - 0.304 \times A_{505} + 0.452 \times A_{453}$$

Antocianinas e Flavonoides

A quantificação de antocianinas totais e flavonoides amarelos foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Francis (1982), utilizando etanol 95% acidificado com HCl 1,5 N, na proporção 85:15 (v/v), como solução extratora. Para isso, pesou-se 1,0 g de polpa e adicionaram-se 10 mL da solução extratora, homogeneizando-se em agitador tipo vórtex por 2 minutos. Em seguida, o extrato foi completado para 50 mL com a mesma solução, protegido da luz e mantido sob refrigeração (4 °C) por aproximadamente 12–18 horas. Após esse período, o extrato foi filtrado em papel Whatman nº 1, e as leituras foram realizadas em espectrofotômetro, utilizando-se cubetas apropriadas, nos comprimentos de onda de 535 nm (antocianinas) e 374 nm (flavonoides amarelos).

O teor de antocianinas totais e de flavonoides amarelos foi calculado pelas equações abaixo, considerando-se o fator de diluição (FD), quando aplicado:

$$\text{Antocianinas totais (mg/100 g)} = (A_{535} \times \text{Vextrato} \times \text{FD} \times 100) / (m \times 98,2)$$

$$\text{Flavonoides amarelos (mg/100 g)} = (A_{374} \times \text{Vextrato} \times \text{FD} \times 100) / (m \times 76,6)$$

em que A é a absorbância no comprimento de onda correspondente; Vextrato é o volume final do extrato (mL); m é a massa da amostra (g); e os valores 98,2 e 76,6 correspondem aos coeficientes de extinção utilizados para expressar os resultados como mg de cianidina e mg de quercetina por 100 g de massa fresca, respectivamente (Francis, 1982).

Análise colorimétrica (sistema CIELAB)

A coloração foi determinada de forma não destrutiva na região equatorial dos frutos inteiros e, posteriormente, na polpa dos frutos cortados, realizando-se duas medições por fruto. Utilizou-se um colorímetro digital modelo Minolta CR 400 (Konica Minolta, Ramsey, EUA), e os valores de cor foram determinados conforme (Pathare et al., 2012), sendo expressos em ângulo de matiz (°hue), em que 0° corresponde ao vermelho, 90° ao verde-amarelado, 180° ao azul-turquesa e 270° ao violeta.

Delineamento experimental e Análises estatísticas

As amostras foram coletadas no Banco Ativo de Germoplasma da Embrapa Semiárido onde os genótipos encontram-se conservados em parcelas de duas plantas. Foram avaliados seis genótipos de aceroleira (Junko, Carp 01, BRS Sertaneja, AC 01, AC 32 e LAG 05) ao longo de três ciclos produtivos em 2025, correspondentes à I safra (fevereiro), II safra (maio) e III safra (julho). O experimento foi analisado em esquema fatorial 6×3 , correspondente à combinação entre seis genótipos e três safras.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro–Wilk e ao teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett (1937). Para variáveis que não atenderam aos pressupostos de normalidade e homoscedasticidade, foram aplicadas transformações utilizando o método de Box–Cox (Box & Cox, 1964) ou transformações de potência (Johnson, 1949). Após as transformações, os dados foram novamente avaliados quanto aos pressupostos estatísticos. As variáveis que atenderam aos critérios de normalidade e homogeneidade foram submetidas à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para variáveis que permaneceram não paramétricas mesmo após transformação, foi utilizado o teste de Kruskal–Wallis e, quando significativo ($p \leq 0,05$), as comparações múltiplas foram realizadas pelo teste de Dunn ($p \leq 0,05$).

Análise de componentes principais (ACP)

A ACP foi feita baseada na matriz de correlação entre as variáveis, com o objetivo de sintetizar o padrão conjunto das variáveis físicas (massa, diâmetro e comprimento) e químicas (sólidos solúveis totais, acidez titulável, vitamina C e relações SS/AT e AA/SS). A ACP foi realizada separadamente para frutos verdes e maduros

Os componentes principais são obtidos a partir da decomposição da matriz de correlação R em autovalores (λ_k) e autovetores (a_k), de modo que cada componente principal é definido por:

$$CP_k = a_{\{1k\}X_1} + a_{\{2k\}X_2} + \dots + a_{\{pk\}X_p}$$

em que:

- CP_k é o k -ésimo componente principal;
- A_{jk} corresponde ao peso (loading) da variável j no componente k ;
- X_j representa a j -ésima variável padronizada;
- p é o número total de variáveis.

Os componentes foram ordenados pela variância explicada, sendo retidos para interpretação aqueles associados aos maiores autovalores e à maior variância acumulada.

Análise de Agrupamento Hierárquico

A caracterização da divergência fenotípica entre os genótipos foi realizada por meio de técnicas de agrupamento hierárquico. Utilizou-se a distância euclidiana como medida de dissimilaridade, calculada sobre os dados padronizados conforme a equação:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2}$$

em que:

- d_{ij} é a distância entre os genótipos i e j ;
- x_{ik} e x_{jk} são os valores padronizados do caráter k .

O método de Ward foi empregado para a formação dos grupos, visando a minimização da soma dos quadrados dentro de cada grupo (Within-Cluster Sum of Squares), estimada por:

$$ESS_g = \sum_{i=1}^{n_g} (x_i - \{x\}_g)^2$$

em que:

- ESS_g é a soma dos quadrados dentro do grupo g ;
- n_g é o número de genótipos no grupo;
- $\{x\}_g$ é o centroide do grupo.

A delimitação do número final de grupos ocorreu mediante análise visual do dendrograma e de dissimilaridade observada.

Mapa de calor

A fim de permitir uma interpretação visual e integrada do comportamento dos genótipos, elaborou-se um mapa de calor. Os dados foram transformados em z-score para normalizar as diferentes escalas:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}$$

em que:

- z_{ij} é o valor padronizado do genótipo i para o caráter jj ;
- $\bar{x}_j$ é a média da variável j ;
- s_j é o desvio padrão da variável j .

A matriz foi associada a um dendrograma bidimensional, facilitando a identificação de padrões de similaridade simultâneos entre variáveis e genótipos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização físico-química dos frutos verdes

Nos frutos verdes a análise de variância evidenciou interação significativa entre Genótipos e Genótipo $\times$ Safra para todas as variáveis avaliadas, enquanto o efeito isolado de safra não foi significativo para massa e comprimento (Tabela 1). Esse padrão indica que as variações entre ciclos produtivos não são uniformes, mas dependem da resposta específica de cada genótipo às condições ambientais, caracterizando forte interação genótipo $\times$ ambiente (Ahmed et al., 2024; Ferreira et al., 2022).

Para os atributos físicos, os genótipos apresentaram respostas distintas às condições de cultivo. Junko e BRS Sertaneja atingiram maiores massas na safra 1 (5,05 g) e na safra 3 (5,83 g) respectivamente, enquanto Carp 01 manteve menor porte (2,31–3,38 g). AC01 apresentou alta estabilidade ($>4,0$ g em todas as safras), sugerindo menor sensibilidade ambiental. Diâmetro e comprimento confirmaram esse padrão: Carp 01 com menores valores e Junko com maior variação entre safras. As variáveis biométricas foram positivamente associadas. Esse comportamento sugere crescimento condicionado por fatores ambientais como disponibilidade hídrica, temperatura e radiação, que afetam a fotossíntese e o acúmulo de fotoassimilados (Niu et al., 2024; Benkeblia et al., 2011).

O índice de formato variou de 0,79 a 1,08, indicando diferenças na morfologia dos frutos entre os genótipos e safras. Valores próximos de 1,00 caracterizam frutos mais arredondados; valores inferiores a 0,90 indicam frutos mais achatados (oblatos), enquanto valores superiores a 1,00 refletem frutos alongados. Nesse contexto, Junko apresentou os maiores valores, caracterizando frutos mais arredondado, enquanto LAG 05 e AC01 exibiram índices mais baixos, associados a frutos mais achatados. Carp 01, AC32 e LAG 05 mostraram maior estabilidade desse atributo entre as safras, ao passo que AC01 apresentou incremento significativo após a primeira safra, evidenciando influência ambiental moderada sobre a expressão da forma do fruto.

Tabela 1 - Médias dos atributos físico-químicos de frutos verdes de genótipos de acerola ao longo de três safras. Os frutos foram produzidos no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE - 2025.

	Genótipo	MASSA (g)	DIA (cm)	COMP (cm)	INDICE	SS (%)	AT (g 100⁻¹)	SS/AT
SAFRA 1	AC01	4,75 Aa	2,32 Aa	1,82 Ba	0,79 Ca	7,40 Ab	2,18 Aa	3,45 Aab
	AC32	3,49 Ba	1,96 Bb	1,77 Ba	0,90 BCa	6,60 Ba	2,44 Aa	2,71 Ba
	LAG 05	3,51 Ba	1,97 Bb	1,69 Ba	0,86 Ca	7,20 Aa	2,02 Aa	3,58 Aa
	BRS SERTANEJA	3,96 Ba	1,98 Ba	1,77 Ba	0,89 Bb	6,93 Aab	2,28 Ab	3,04 Ab
	Carp 01	2,52 Ba	1,63 Cb	1,49 Ca	0,91 ABa	6,50 Bc	1,69 Ba	3,85 Aa
	JUNKO	5,05 Aa	2,14 Aa	2,10 Aa	0,98 Ab	6,87 Aab	1,85 Ba	3,71 Aa
	Média	3,88	2,03	1,77	0,94	6,92	2,08	3,4
SAFRA 2	AC01	4,53 Aa	2,08 Aa	1,83 Ba	0,88 Ca	7,50 Ab	2,71 Aa	2,77 Bb
	AC32	3,37 Ba	1,88 Aa	1,73 Ba	0,92 BCa	6,60 Aa	2,35 Aa	2,81 Ba
	LAG 05	3,55 Aa	1,95 Aa	1,65 Ca	0,85 Ca	7,37 Ab	2,18 Aa	3,41 Aa
	BRS SERTANEJA	3,24 Ba	1,75 Ba	1,72 Ba	0,99 ABa	6,43 Ba	1,87 Bb	3,55 Ab
	Carp 01	2,31 Ca	1,60 Ba	1,49 Ba	0,93 BCa	7,27 Ab	1,62 Ba	4,57 Aa
	JUNKO	4,03 Aa	1,83 Aa	1,98 Ab	1,08 Aa	6,40 Ba	1,98 Ba	3,24 Aa
	Média	3,59	1,85	1,73	0,88	6,93	2,12	3,39
SAFRA 3	AC01	4,19 Ba	2,01 Ab	1,76 Aa	0,88 ABa	8,03 Aa	1,94 Ab	4,14 Aa
	AC32	4,08 Ba	2,01 Ab	1,77 Aa	0,88 ABa	6,80 Ba	1,79 Ab	3,79 Bb
	LAG 05	3,29 Ba	1,88 Ab	1,63 Aa	0,87 ABa	7,80 Aa	1,84 Aa	4,23 Aa
	BRS SERTANEJA	5,83 Aa	2,08 Aa	1,78 Aa	0,86 Bb	7,23 Bb	1,47 Ba	4,97 Aa
	Carp 01	3,38 Ba	1,68 Bb	1,57 Ba	0,93 Aa	7,93 Aa	1,86 Aa	4,28 Aa
	JUNKO	5,43 Aa	1,98 Aa	1,82 Ac	0,92 Ab	7,43 Bb	1,92 Aa	3,89 Ba
	Média	4,20	1,94	1,72	0,88	7,54	1,80	4,22

Características biométricas e físico-químicas de frutos verdes de seis genótipos de acerola em três safras. Os valores correspondem às médias de três repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); letras maiúsculas comparam genótipos dentro da safra e letras minúsculas comparam safras dentro do genótipo. Fonte: Autora, 2026.

Os parâmetros SS, AT e SS/AT foram influenciados pelo genótipo, safra e sua interação, evidenciando dependência das condições ambientais (Ferreira et al., 2022; Vilvert et al., 2023). AC01 apresentou valores elevados e consistentes de SS e AT ao longo dos ciclos. Em contraste, Carp 01 e BRS Sertaneja exibiram padrões distintos. A relação SS/AT foi a variável mais discriminante, com destaque para BRS Sertaneja (4,97, Safra 3) e Carp 01 (3,85–4,57), indicando menor acidez relativa entre genótipos.

Caracterização de compostos bioativos frutos verdes

A avaliação da composição bioquímica de frutos verdes evidenciou que tanto o genótipo quanto a interação Genótipo $\times$ Safra foram determinantes para a variação dos compostos antioxidantes analisados (Tabela 2). Tal comportamento é semelhante com estudos sobre o perfil de metabólitos que destacam a influência conjunta de fatores genéticos e ambientais na determinação de metabólitos secundários e compostos de qualidade em frutos (Pacheco et al, 2026; Liang et al, 2024; Pott et al, 2023). Em frutos imaturos, caracterizados por elevada atividade fisiológica, essa variabilidade tende a ser ainda mais pronunciada, refletindo elevada plasticidade metabólica (Allwood et al, 2021)

Para o ácido ascórbico (AA), observaram-se diferenças significativas entre genótipos e safras. Carp 01 apresentou o maior valor na safra 1 (3750 mg 100 g⁻¹), enquanto AC32 se destacou na safra 2 (3694 mg 100 g⁻¹), ambos dentro da faixa reportada para frutos imaturos no Vale do submédio do São Francisco (Souza et al., 2014). Na safra 3, as diferenças entre genótipos não foram evidentes. A maior variação entre safras ocorreu em AC32 (2361-3694 mg 100 g⁻¹) e BRS Sertaneja (2037-3065 mg 100 g⁻¹) indicando maior sensibilidade ambiental, enquanto AC01, Junko e LAG 05 apresentaram maior estabilidade.

O comportamento de AA/SS corroborou esse padrão, com Carp 01 (578,33) destacando-se na safra 1 e AC32 nas safras 2 (559,93) e 3 (459,55), indicando maior capacidade de manutenção relativa de vitamina C sob condições variáveis. Essa variação pode estar associada a oscilações de temperatura, radiação e disponibilidade hídrica, que influenciam rotas metabólicas primárias e o sistema antioxidante (Kondle & Kapoor, 2023; Alem et al., 2021).

Tabela 2. Compostos bioativos em frutos de genótipos de acerola verde ao longo de três safras. Frutos foram produzidos no BAG Embrapa Semiárido, Petrolina-PE, 2025.

	Genótipo	AA	AA/SS	Antocianinas	Flavonóides	Carotenóides
SAFRA 1	AC01	3000 Ba	404,77 BCa	2,34 a ABb	8,24 Ba	8,11 Ba
	AC32	2361 Cc	357,53 BCb	1,36 Ba	8,49 Bb	10,81 Ba
	LAG 05	2806 Ba	382,80 Ba	1,37 Bb	9,84 Ba	15,94 Aa
	BRS SERTANEJA	2972 BCa	428,70 Ba	2,76 Aa	13,82 Aa	10,46 Bb
	Carp 01	3750 Aa	578,33 Aa	1,67 ABa	2,63 Ca	15,15 ABb
	JUNKO	2361 Ca	343,70 Ca	2,96 Aa	6,97 Ba	5,96 Ca
	Média	2851	413,83	2,14	8,17	11,11
SAFRA 2	AC01	3139 ABa	418,33 ABa	1,65 ABa	9,34 Ba	9,44 Ba
	AC32	3694 Aa	559,93 Aa	1,41 Ba	5,34 Bab	9,37 Ba
	LAG 05	2667 BCa	369,90 BCa	1,76 ABa	8,89 Ba	16,15 Aa
	BRS SERTANEJA	3065 ABa	480,93 ABa	2,55 Aab	18,11 Aa	12,32 Bab
	Carp 01	2500 Bb	343,90 Bb	1,25 Bb	5,08 Ba	15,27 ABb
	JUNKO	2660 Ba	417,53 ABa	2,47 Aba	5,85 ABab	6,69 Ba
	Média	2977	433,48	1,78	8,93	11,51
SAFRA 3	AC01	2667 Aa	332,00 BCb	2,15 ABab	10,00 Ba	8,09 Ba
	AC32	3125 Ab	459,55 Aab	0,60 Ba	4,99 Ba	12,03 ABa
	LAG 05	2972 Aa	380,60 ABa	0,83 Bc	9,46 Ba	17,97 Aa
	BRS SERTANEJA	2037 Ab	281,83 Cb	2,04 ABb	13,00 Aa	13,54 Aa
	Carp 01	2917 Aab	367,70 ABCb	1,45 ABc	3,97 Ba	17,64 Aa
	JUNKO	2944 Aa	396,70 ABa	2,03 ABa	4,94 Bb	9,25 Ba
	Média	2756	364,45	1,57	7,89	13,15

Valores médios de ácido ascórbico (AA, mg 100 g⁻¹ de polpa fresca), relação ácido ascórbico/acidez titulável (AA/SS), antocianinas(mg 100 g⁻¹), flavonoides(mg 100 g⁻¹) e carotenoides (µg), determinados em frutos de seis genótipos de acerola. Os valores correspondem às médias de três repetições experimentais. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05). Letras maiúsculas comparam genótipos dentro da mesma safra. Letras minúsculas comparam safras dentro do mesmo genótipo. **Fonte: Autora, 2026.**

Os compostos bioativos apresentaram elevada variabilidade (Tabela 2). Para as antocianinas, houve diferenças consistentes entre genótipos em todas as safras. AC32 apresentou os menores valores (0,6-1,41 mg 100 g⁻¹), enquanto Junko e BRS Sertaneja exibiram maiores concentrações com valores variando de 2,03 a 2,96 mg 100 g⁻¹. Em BRS Sertaneja e LAG 05, observou-se redução entre safras, possivelmente relacionada a limitações ambientais que afetam o acúmulo de compostos fenólicos, como já relatado em outras fruteiras (Alem et al., 2021).

Os flavonoides também diferiram significativamente entre genótipos, com BRS Sertaneja (13,0 - 18,11 mg 100 g⁻¹) se destacando em múltiplas comparações, especialmente em relação a Carp 01 (2,63 - 5,08 mg 100 g⁻¹), sugerindo maior capacidade antioxidante ainda na fase imatura (Pott et al, 2023). A variação entre safras foi dependente do genótipo, com tendência de redução na safra 3 em alguns materiais, como AC01 e Junko.

Para carotenoides, verificaram-se diferenças significativas entre genótipos em todas as safras, com LAG 05 apresentando valores superiores em todas as safras e Junko consistentemente inferior. Entre safras, houve variação significativa em alguns genótipos, como BRS Sertaneja e Carp 01, indicando sensibilidade às condições ambientais. Tal comportamento é amplamente descrito em estudos de carotenóides em diferentes espécies, nos quais o efeito genotípico é predominante, mas o componente G×E também exerce influência substancial (Zhao et al, 2026).

Caracterização colorimétrica (CIELAB) de frutos verdes de acerola

Diferenças significativas foram observadas para os atributos colorimétricos da casca e da polpa entre os genótipos de acerola avaliados nas três safras (Tabela 3). AC01 apresentaram os maiores valores de L* na casca, com destaque para a estabilidade entre safras, enquanto LAG05 exibiu elevada luminosidade na polpa, porém com maior variação na casca. Em contraste, Carp 01, BRS Sertaneja e Junko exibiram menores valores de L*, indicando coloração mais escura da casca.

Tabela 3 - Atributos de cor (L*, a*, b* e H°) da casca e da polpa de frutos verdes de seis genótipos de acerola avaliados em três safras. Os frutos foram produzidos no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE - 2025.

	Genótipo	L*		a*		b*		H°	
		CASCA	POUPA	CASCA	POUPA	CASCA	POUPA	CASCA	POUPA
Safra 1	AC01	73,03 Aa	50,28 Aa	-0,60 ABa	-7,10 Ba	27,20 Aa	31,77 ABCa	91,23 BCa	102,79 Ba
	LAG 05	56,59 BCa	50,04 Aa	-8,21 Cb	-11,25 Db	29,25 Aa	35,72 ABa	105,85 Aa	107,52 ABa
	AC32	65,83 ABa	47,10 ABa	1,60 Aa	-6,10 ABa	27,40 Aa	25,10 Ca	86,66 Ca	103,86 Ba
	BRS SERTANEJA	62,35 ABCa	36,95 BCa	-2,88 Ba	-4,20 Aa	26,24 Aa	40,62 Aa	96,64 Ba	95,98 Ca
	Carp 01	49,73 Ca	33,10 Ca	-2,70 Ba	-8,34 BCa	30,79 Aa	35,76 ABa	95,00 Ba	103,09 Ba
	JUNKO	51,89 Ca	38,00 BCa	-8,20 Ca	-10,81 CDb	28,48 Aa	30,01 BCa	106,32 Aa	109,82 Aa
	Média	59,9	42,58	-3,38	-7,95	28,23	33,16	95,95	103,84
Safra 2	AC01	70,05 Aa	51,52 Aa	-0,69 Ba	-6,93 Ba	24,10 Aab	30,15 BCa	91,66 Ba	103,04 Aa
	AC32	66,87 Aa	45,07 ABa	2,30 Aa	-6,53 ABa	24,40 Aa	24,60 Ca	84,59 Ca	105,06 Aa
	LAG 05	70,23 Aa	53,17 Aa	-1,63 Ba	-7,13 Ba	24,17 Aa	32,67 ABCa	93,83 Bb	102,38 Ab
	BRS SERTANEJA	57,72 Ba	36,95 Ba	-2,35 Ba	-4,20 Aa	25,60 Aa	40,62 Aa	95,24 Ba	95,98 Ba
	Carp 01	48,22 Ca	39,18 Ba	-2,52 Ba	-8,29 Ba	31,53 Aa	37,68 ABa	94,59 Ba	102,43 Aa
	JUNKO	46,24 Ca	37,94 Ba	-8,58 Ca	-7,93 Ba	29,25 Aa	27,64 Ca	106,56 Aa	106,26 Aa
	Média	59,89	45,64	-2,25	-6,67	26,58	32,74	93,51	103,19
Safra 3	AC01	74,40 Aa	51,67 Aa	-0,63 Ba	-6,97 ABa	21,53 Ab	30,57 BCa	91,64 Ba	102,94 ABa
	AC32	66,13 ABa	48,87 Aa	3,03 Aa	-6,30 ABa	25,00 Aa	24,80 CDa	83,12 Ca	104,48 ABa
	LAG 05	54,87 BCa	50,63 Aa	-5,96 Cb	-10,29 Cb	25,56 Aa	34,83 ABa	103,19 Aa	106,36 Aab
	BRS SERTANEJA	57,81 BCa	36,95 Ba	-1,71 Ba	-4,20 Aa	28,87 Aa	40,62 Aa	93,36 Ba	95,98 Ca
	Carp 01	48,82 Ca	37,99 Ba	-2,57 Ba	-7,54 BCa	30,51 Aa	41,08 Aa	94,84 Ba	100,34 BCa
	JUNKO	49,11 Ca	42,20 ABa	-6,95 Ca	-6,53 ABa	22,95 Aa	21,87 Da	106,92 Aa	106,68 Aa
	Média	58,52	44,71	-1,47	-6,97	24,9	33,96	95,51	103,63

L*: luminosidade; a*: componente verde (–) a vermelho (+); b*: componente azul (–) a amarelo (+); H°: ângulo de matiz. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey(p ≤ 0,05). Letras maiúsculas comparam genótipos dentro da mesma safra. Letras minúsculas comparam safras dentro do mesmo genótipo. **Fonte: Autora, 2026.**

Os valores de a^* foram negativos em todos os genótipos tanto na casca quanto na polpa, confirmando a predominância da coloração verde, com maior intensidade em Junko e LAG 05, enquanto AC32 apresentou os maiores valores de a^* na casca, indicando menor intensidade do verde. Para b^* , os valores positivos indicaram tonalidade amarelada, mais expressiva em BRS Sertaneja na polpa e em Carp 01 na casca, enquanto AC32 apresentou menores valores na polpa. O ângulo H° variou entre 83,12 e 109,82°, caracterizando a coloração verde a verde-amarelada.

As diferenças cromáticas observadas entre os genótipos podem estar associadas à variação genética no metabolismo de pigmentos durante a maturação, especialmente na degradação da clorofila e no acúmulo de carotenoides, processos já descritos para acerola (Lima et al., 2005). Além disso, alterações nos teores de clorofilas e carotenoides influenciam diretamente parâmetros colorimétricos como L^* , b^* e H° , refletindo diferenças na manutenção da coloração verde e no avanço do desverdecimento dos frutos (Park et al., 2024). A variação entre safras foi dependente do genótipo, com maior estabilidade em AC01 e AC32 e maior variação em Junko e LAG 05, indicando interação genótipo $\times$ ambiente. Apesar disso, o ordenamento dos genótipos foi mantido, evidenciando predominância do efeito genotípico sobre os atributos de cor.

Análise multivariada dos parâmetros colorimétricos e atributos físicos e físico-químicos do frutos verdes

A ACP (Figura 2) mostrou que o PC1 (45,9%) foi o principal eixo de discriminação, separando os genótipos por um gradiente relacionado ao crescimento e à acidez dos frutos. No sentido positivo, houve associação com AT, massa, comprimento, diâmetro e luminosidade (L^*) da casca e da polpa, indicando frutos maiores, mais claros e mais ácidos, esse padrão é consistente com estudos que demonstram que atributos biométricos estão diretamente associados à variação de características físico-químicas e ao perfil de qualidade dos frutos, refletindo diferenças no acúmulo de solutos e no metabolismo durante o desenvolvimento (Habibi et al., 2025).

Nesse grupo, AC01 e AC32 se destacaram, principalmente AC01, mais associado às variáveis biométricas e à acidez. Em oposição, o sentido negativo do eixo esteve relacionado ao ratio SS/AT, com destaque para Carp 01, indicando maior equilíbrio açúcar/ácido, característica associada ao avanço do amadurecimento e à redução dos ácidos orgânicos (Ribeiro & Freitas, 2020).

O PC2 (23,6%) esteve relacionado principalmente aos atributos de cor. Na porção superior do eixo, observou-se associação com a^* e luminosidade da polpa, destacando BRS Sertaneja e AC32, enquanto a porção inferior esteve associada ao Hue (H), indicando diferenças no matiz dos frutos. Junko apresentou valores fortemente negativos, evidenciando perfil de cor distinto, enquanto LAG 05 apresentou comportamento intermediário. Esse padrão reforça a relação entre mudanças de cor, degradação de clorofilas e acúmulo diferencial de pigmentos durante o amadurecimento (Arena et al., 2021).

A matriz de correlação (figura 3) confirmou os padrões observados na ACP, evidenciando associações positivas entre luminosidade da polpa (L^*) e diâmetro ($r = 0,54$), bem como entre L^* e acidez titulável ($r = 0,50$), conforme observado na matriz apresentada. Por outro lado, componentes cromáticos como b^* apresentaram correlação negativa com atributos biométricos, indicando relações inversas entre intensidade de cor e crescimento do fruto. Esses resultados demonstram que a coloração pode atuar como indicador indireto de características físico-químicas.

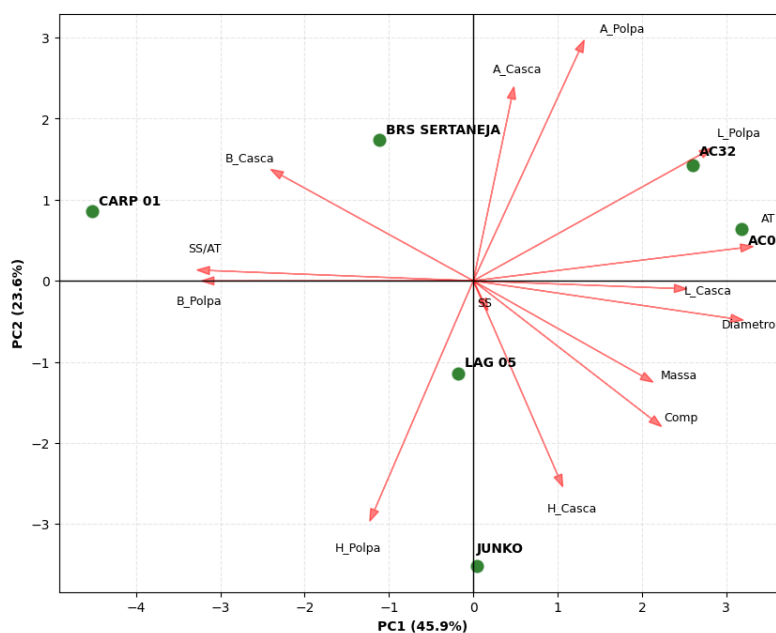


Figura 2: Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos físicos, físico-químicos e colorimétricos de frutos verdes de seis genótipos de acerola. O PC1 e o PC2 explicaram 45,9% e 23,6% da variância total, respectivamente. As setas indicam a contribuição e a direção das variáveis na discriminação dos genótipos. **Fonte: Autora, 2026.**

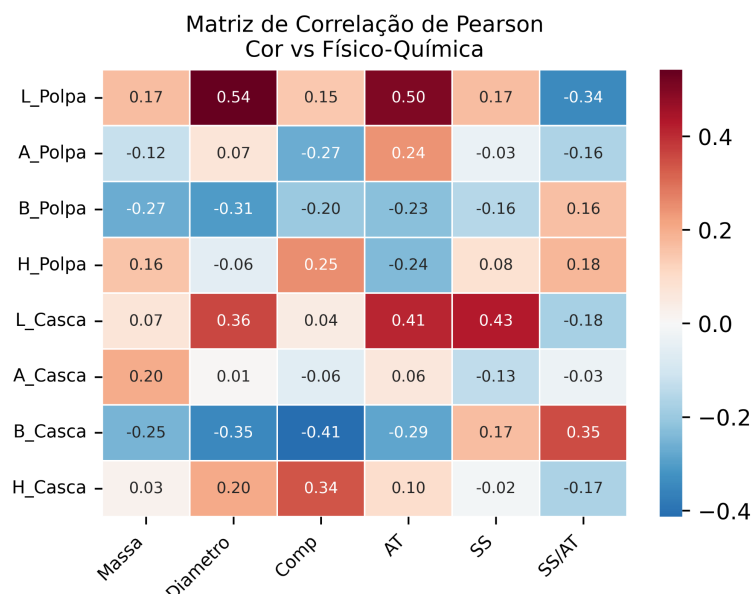


Figura 3: Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos da casca e da polpa e os atributos físicos e físico-químicos de frutos verdes de seis genótipos de acerola. Os coeficientes de correlação variaram de -1 a $+1$, sendo as cores quentes (vermelho) associadas a correlações positivas e as cores frias (Azul) a correlações negativas. Fonte: Autora, 2026.

Análise multivariada dos parâmetros colorimétricos e compostos bioativos dos frutos verdes

A ACP (Figura 4) mostrou que o PC1 (33,5%) foi o principal eixo de discriminação, separando os genótipos por um gradiente entre compostos bioativos e atributos de cor. No eixo positivo, houve associação com antocianinas, flavonoides e b^* da casca, indicando maior acúmulo de pigmentos fenólicos, típico de estádios mais avançados de maturação (Xu et al., 2020), com destaque para BRS Sertaneja. Em oposição, o eixo negativo esteve associado ao ácido ascórbico (AA) e à razão AA/SS, refletindo maior concentração de vitamina C em frutos menos maduros, padrão representado por AC32 (Ribeiro & Freitas, 2020; Xu et al., 2020).

O PC2 (26,5%) esteve relacionado principalmente aos parâmetros de cor. A porção superior associou-se a flavonoides e a^* , indicando maior intensidade de vermelho e atividade da via dos fenilpropanoides (Ninkuu et al., 2025), enquanto a inferior esteve ligada ao Hue e carotenoides, refletindo diferenças no matiz e na predominância de pigmentos amarelo-alaranjados (Arena et al., 2021). Junko apresentou maior associação com H Polpa, LAG 05 mostrou comportamento intermediário relacionado aos carotenoides e Carp 01

apresentou baixa associação com as variáveis principais. Em conjunto, os resultados evidenciam relação inversa entre vitamina C e compostos fenólicos e reforçam a forte associação entre bioativos e coloração dos frutos.

A matriz de correlação (Figura 5) confirmou os padrões observados na ACP, evidenciando associação entre atributos de cor e compostos bioativos. Os parâmetros a^* e b^* da casca correlacionaram-se positivamente com flavonoides e carotenoides, indicando relação entre o deslocamento cromático para tons mais vermelhos e amarelados e o acúmulo de pigmentos. Em contraste, o Hue da casca apresentou correlação negativa com flavonoides, refletindo mudanças no matiz durante a maturação. Também foram observadas associações entre antocianinas e H_polpa, além de correlação negativa entre A_polpa e antocianinas, sugerindo diferenças metabólicas entre casca e polpa. Esses resultados reforçam o gradiente entre pigmentação e composição bioativa observado na ACP.

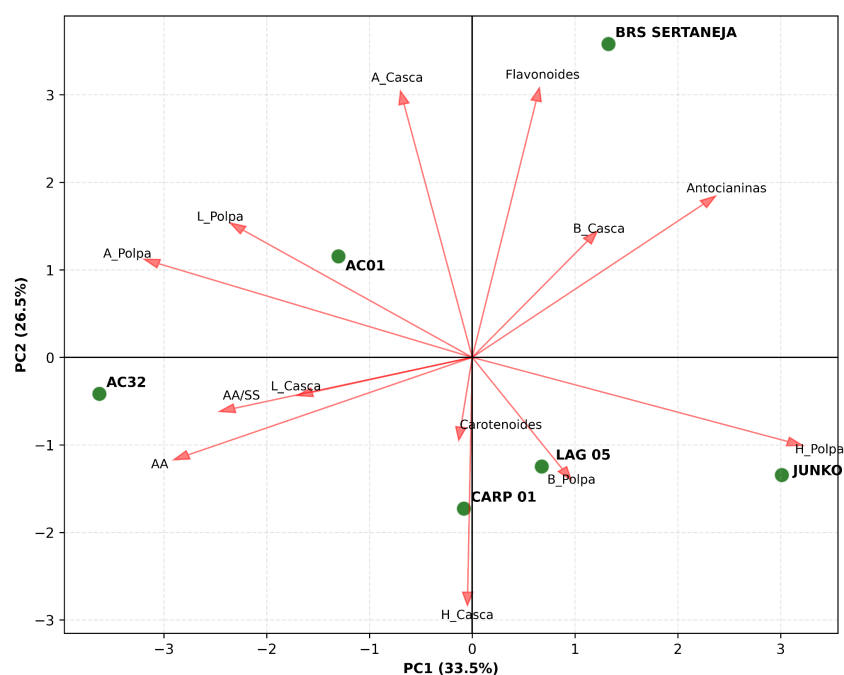


Figura 4: Análise de Componentes Principais (ACP) dos compostos bioativos e colorimétricos de frutos verdes de seis genótipos de acerola. O PC1 e o PC2 explicaram 33.5% e 26,5% da variância total, respectivamente. As setas indicam a contribuição e a direção das variáveis na discriminação dos genótipos. **Fonte: Autora, 2026.**

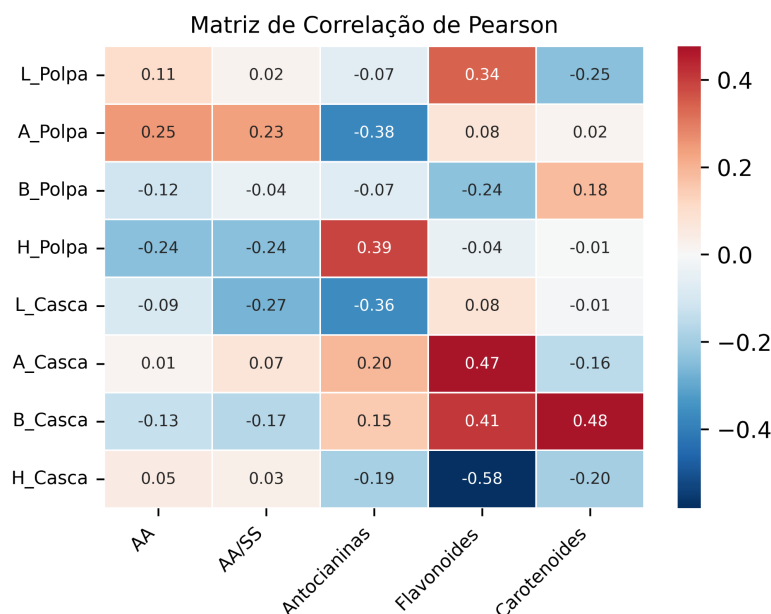


Figura 5: Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos da casca e da polpa e composto bioativos de frutos verdes de seis genótipos de acerola. Os coeficientes de correlação variaram de -1 a $+1$, sendo as cores quentes (vermelho) associadas a correlações positivas e as cores frias (azul) a correlações negativas. **Fonte:** Autora, 2026.

Caracterização físico-química dos frutos maduros

Os atributos físico-químicos dos frutos estão diretamente relacionados aos processos de expansão celular durante a maturação, especialmente aqueles associados ao acúmulo de água e à extensibilidade da parede celular (Joshi et al., 2021). A massa dos frutos foi influenciada exclusivamente pelo genótipo. De acordo com o teste de médias (Tabela 4), AC01 (7,55 - 7,76 g) e Junko (7,80 - 8,02 g) apresentaram maiores massas, enquanto Carp 01 (3,45 - 4,31 g) apresentou os menores valores, indicando diferenças consistentes entre os materiais, independentemente das condições sazonais.

As variáveis dimensionais foram influenciadas por genótipo, safra e sua interação, evidenciando elevada sensibilidade ambiental. AC01 apresentou diâmetro elevado e estável (2,37 - 2,60cm), enquanto Junko manteve valores altos com maior variação (2,08 - 2,54 cm), e Carp 01 exibiu maior oscilação (1,65–2,78 cm). Para comprimento, Junko destacou-se por maiores valores e AC01 manteve estabilidade intermediária (2,17; 2,20; 2,00 cm). A maior variação, sobretudo no diâmetro, indica elevada plasticidade fenotípica e expansão celular associada ao aumento do turgor, sem incremento proporcional de biomassa (Gariglio et al., 2024).

Tabela 4 - Médias dos atributos físico-químicos de frutos maduros de genótipos de acerola ao longo de três safras. Os frutos foram produzidos no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE - 2025.

	Genótipo	MASSA (g)	DIA (cm)	COMP (cm)	ÍNDICE	SS (%)	AT (g 100⁻¹)	SS/AT
SAFRA 1	AC01	7,65 Aa	2,60 Aa	2,17 BCa	0,83 Ca	8,50 Ab	1,57 Ba	5,60 ABa
	AC32	5,40 Ba	2,13 BCa	1,83 Ca	0,86 BCa	7,00 CDa	1,52 BCa	4,62 BCa
	LAG 05	5,62 Ba	2,33 ABa	2,00 BCa	0,86 BCa	7,73 Ba	1,17 Cb	6,65 Aa
	BRS SERTANEJA	5,97 Bb	1,95 Cb	2,23 ABa	1,15 Aa	7,57 BCa	2,16 Aa	3,51 CDa
	Carp 01	3,45 Cb	1,65 Db	1,83 Ca	1,11 Aa	6,73 Dab	1,52 BCa	4,43 BCa
	JUNKO	8,02 Aa	2,54 Aa	2,54 Aa	1,00 ABa	6,40 Da	1,91 ABa	3,35 Db
	Média	5,68	2,15	2,10	0,94	7,32	1,54	4,69
SAFRA 2	AC01	7,76 Aa	2,57 Aa	2,20 Aa	0,86 Ba	8,77 Aa	1,46 Ca	5,99 Aa
	AC32	5,60 Ba	2,13 BCa	1,83 Ba	0,86 Ba	6,90 DEab	1,73 ABa	4,03 Ba
	LAG 05	6,04 Ba	2,37 ABa	1,90 ABa	0,80 Ba	8,10 Ba	1,20 Db	6,76 Aa
	BRS SERTANEJA	5,97 Bb	2,10 BCab	2,16 Aa	1,03 Aab	7,67 BCa	1,96 Aab	3,92 Ba
	Carp 01	3,79 Cab	1,95 Cab	1,67 Ba	0,86 Bb	7,27 CDa	1,67 ABCa	4,35 Ba
	JUNKO	7,80 Aa	2,08 BCb	1,95 ABb	0,96 ABa	6,33 Ea	1,53 BCb	4,13 Ba
	Média	5,83	2,13	1,95	0,88	7,51	1,59	4,86
SAFRA 3	AC01	7,55 ABa	2,37 Aa	2,00 BCa	0,85 ABa	8,03 ABc	1,46 Ba	5,49 Aa
	AC32	5,49 CDa	2,13 Aa	1,87 Ca	0,87Aa	6,77 Cb	1,69 ABa	4,00 BCa
	LAG 05	5,64 Ca	2,37 Aa	1,97 BCa	0,83 ABa	8,17 Aa	1,64 ABa	4,99 ABb
	BRS SERTANEJA	6,46 BCa	2,31 Aa	2,24 ABa	0,97 Ab	6,97 BCa	1,78 ABb	3,92 Ca
	Carp 01	4,31 Da	2,78 Aa	1,71 Ca	0,69 Bc	6,40 Cb	1,53 Ba	4,23 BCa
	JUNKO	7,94 Aa	2,43 Aa	2,33 Aa	0,96 Aa	6,40 Ca	1,91 Aa	3,35 Cb
	Média	6,61	2,47	2,02	0,88	7,13	1,66	4,41

Características biométricas e físico-químicas de frutos maduros de seis genótipos de acerola em três safras. Os valores correspondem às médias de três repetições. Médias seguidas por letras iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); letras maiúsculas comparam genótipos dentro da safra e letras minúsculas comparam safras dentro do genótipo. Fonte: Autora, 2026.

O índice de formato da polpa variou de 0,69 a 1,15, evidenciando diferenças expressivas entre genótipos e safras. BRS Sertaneja apresentou os maiores valores, especialmente na primeira safra (1,15), indicando polpas mais alongadas, embora tenha havido redução gradual nas safras subsequentes até atingir 0,97. CARP 01 exibiu a maior variação temporal, passando de 1,11 na primeira safra para 0,69 na terceira, o que indica mudança de polpas inicialmente arredondadas para fortemente achatadas. JUNKO manteve valores próximos de 1,00 em todas as safras, demonstrando elevada estabilidade e formato predominantemente arredondado. AC32, LAG 05 e AC01 apresentaram valores consistentemente inferiores a 0,90, caracterizando polpas mais achatadas e com baixa variação entre os ciclos produtivos.

Os sólidos solúveis (SS), a acidez titulável (AT) e a relação SS/AT foram influenciados pelo genótipo e pela interação genótipo $\times$ safra (Tabela 4), evidenciando a dependência desses atributos tanto do material genético quanto das condições ambientais. Os teores de SS variaram de 6,33 a 8,77 °Brix, com destaque para AC01 (8,50; 8,77; 8,03 °Brix) e LAG 05 (7,73; 8,10; 8,17 °Brix), enquanto Junko apresentou os menores valores (6,40; 6,33; 6,40 °Brix). Observou-se tendência de manutenção ou incremento dos teores de SS na Safra 3, o que pode estar associado às temperaturas mais amenas no período de colheita (julho), conforme evidenciado no gráfico climático apresentado na Figura 1, temperaturas mais baixas tendem a reduzir a taxa respiratória dos frutos e retardar o consumo de carboidratos utilizados como fonte energética, favorecendo a manutenção e o acúmulo de açúcares solúveis nos frutos (Park et al., 2024).

Uma resposta fisiológica particular foi observada no genótipo Junko, que apresentou redução nos teores de SS ao atingir o estágio maduro, com queda de 6,87% no estágio verde para 6,40% no estágio maduro na Safra 1. Esse comportamento sugere efeito de diluição hídrica, no qual o aumento do volume celular reduz a concentração de sólidos solúveis, mesmo na presença de acúmulo absoluto de açúcares (Dai et al., 2016). Em contraste, AC01 apresentou incremento expressivo de SS do estágio verde para o maduro, evidenciando diferenças entre genótipos quanto à capacidade de acúmulo de carboidratos.

Caracterização de compostos bioativos dos frutos maduros nas três safras

Os compostos bioativos foram influenciados pelo genótipo, pela safra e pela interação genótipo $\times$ safra (Tabela 5). O amadurecimento dos frutos reduziu fortemente o ácido

ascórbico, devido ao aumento da respiração, ao maior consumo de antioxidantes e à ação da ascorbato oxidase (Vendramini; Trugo, 2000). Em contrapartida, antocianinas, flavonoides e carotenoides apresentaram aumento.

O ácido ascórbico variou de 999,99 a 2222,22 mg 100 g⁻¹, com maiores valores em BRS Sertaneja. e AC32 na safra 1, enquanto reduções nas safras posteriores indicaram influência ambiental sobre a síntese e estabilidade da vitamina C. França et al. (2021) relataram forte associação entre maturação, metabolismo antioxidante e conteúdo de ácido ascórbico em acerola, enquanto Pardo-Hernandez et al. (2024) demonstraram que alterações ambientais e estresses abióticos modificam significativamente o metabolismo antioxidante dos frutos. A relação AA/SS apresentou maiores valores em BRS Sertaneja e AC32, reforçando o elevado potencial funcional desses genótipos.

As antocianinas atingiram 70,57 e 67,97 mg 100 g⁻¹ em BRS Sertaneja e Junko na Safra 3, valores ligeiramente superiores à faixa de 6,4–64,6 mg 100 g⁻¹ descrita por Lima et al. (2007). BRS Sertaneja apresentou os maiores teores de flavonoides amarelos totais (176,00–182,90 mg 100 g⁻¹), dentro da faixa de 100–200 mg 100 g⁻¹ reportada por Lima et al. (2014). O aumento desses compostos está associado à ativação da via dos fenilpropanoides e ao seu papel protetor frente ao estresse ambiental (Taiz et al., 2017; Miskinis et al., 2023).

Os carotenoides aumentaram com a degradação das clorofilas e a formação de cromoplastos, processo observado durante o amadurecimento de frutos de acerola (Ribeiro et al., 2024). LAG 05 apresentou os maiores teores (413,95 - 544,10 µg 100 g⁻¹), seguido de Carp 01 (436,25 µg 100 g⁻¹), valores compatíveis com De Rosso e Mercadante (2005). Apesar dos elevados teores em ambos os genótipos, LAG 05 apresentou polpa amarelo-alaranjada e Carp 01 polpa vermelho-intensa (Figura 6), evidenciando que a coloração final depende da interação entre carotenoides e antocianinas, as quais podem mascarar visualmente a contribuição desses pigmentos (Sharma et al., 2021; Schaefer et al., 2011).

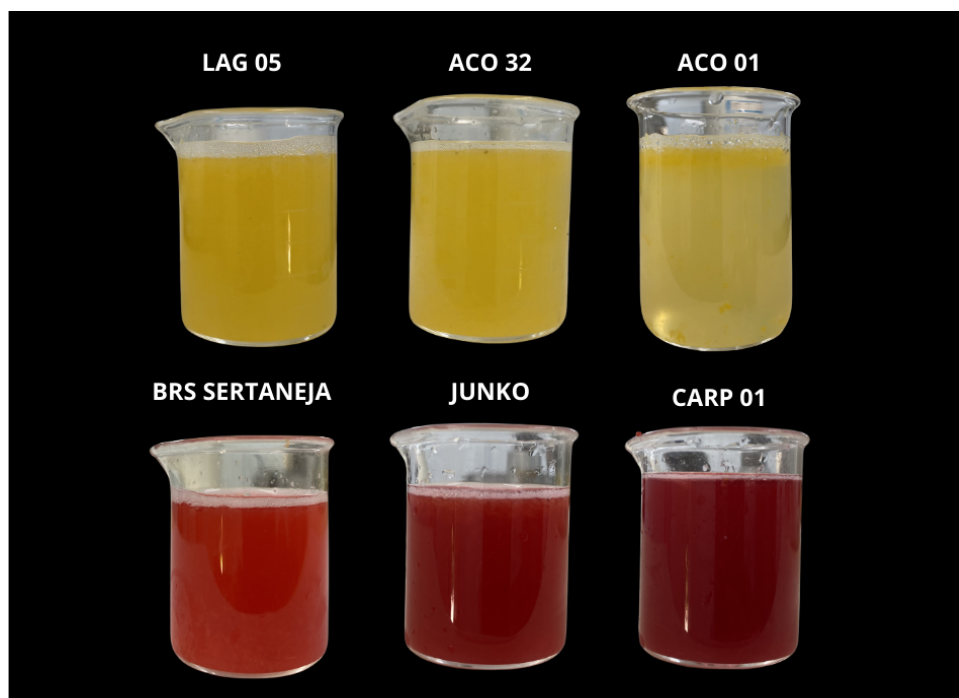


Figura 6 – Aspecto visual dos extratos de polpa dos genótipos de acerola no estágio maduro. Diferenças na tonalidade refletem a predominância de carotenóides (amarelo-alaranjado: LAG 05, AC 32, AC 01) e antocianinas (vermelho intenso: BRS Sertaneja, Junko, Carp 01).
Fonte: Autora, 2025.

Tabela 5. Compostos bioativos em frutos de genótipos de acerola maduro avaliados ao longo de três safras. Frutos foram produzidos no BAG Embrapa Semiárido, Petrolina-PE, 2025.

	Genótipo	AA	AA/SS	Antocianinas	Flavonóides	Carotenóides
SAFRA 1	AC01	1000 Cb	117,47 Cb	17,77 CDa	69,63 Ba	108,05 Da
	AC32	1861 Aa	265,90 Aa	5,19 Ea	65,01 CDb	142,90 CDab
	LAG 05	1194 BCa	154,47 BCa	11,37 DEa	65,85 Ba	413,95Ab
	BRS SERTANEJA	2222 Aa	293,63 Aa	64,92 Ab	176,63 Ab	236,00 Bb
	Carp 01	1583 ABCa	235,30 ABa	30,86 BCab	40,34 Ca	358,1 Ab
	JUNKO	1667 ABa	264,43 Aa	51,93 ABb	62,47 Ba	158,43 Ca
	Média	1587,83	221,86	30,46	80,82	236,65
SAFRA 2	AC01	1722 Aa	196,47 ABCa	14,98 CDa	70,48 Ba	116,47 Da
	AC32	1639 Aa	237,73 ABa	4,79 Eab	14,64 Cb	151,01 CDab
	LAG 05	1306 ABa	162,33 BCa	9,93 DEa	56,41 Ba	465,69 Aab
	BRS SERTANEJA	1763 Ab	230,47 ABa	68,13 Aab	181,92 Aab	264,80 Bab
	Carp 01	1028 Bb	141,07 Cb	29,63 BCb	35,77 Cb	399,65 Aab
	JUNKO	1722 Aa	272,10 Aa	60,03 ABab	58,75 Ba	156,43 Ca
	Média	1496,67	206,63	29,58	70,00	259,7
SAFRA 3	AC01	1500 ABa	186,70 BCa	16,23 CDa	68,51 Ba	119,59 Da
	AC32	1667 Aa	246,60 ABa	3,67 Eb	15,06 Cb	155,30 CDa
	LAG 05	1111 Ba	136,13 Ca	10,96 DEa	62,89 Ba	544,10 Aa
	BRS SERTANEJA	1944 Aab	281,47 Aa	70,57 Aa	182,90 Aa	300,34 Ba
	Carp 01	1420 ABab	222,33 ABCa	32,48 BCa	41,64 BCa	436,25Aa
	JUNKO	1512 ABa	238,17 ABa	67,97 ABa	58,94 Ba	143,58 Cb
	Média	1459,00	218,59	33,65	71,65	331,60

Valores médios de ácido ascórbico (AA, mg 100 g⁻¹ de polpa fresca), relação ácido ascórbico/acidez titulável (AA/SS), antocianinas(mg 100 g⁻¹), flavonoides(mg 100 g⁻¹) e carotenoides (µg), determinados em frutos de seis genótipos de acerola. Os valores correspondem às médias de três repetições experimentais. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ou Dunn ($p \leq 0,05$). Letras maiúsculas comparam genótipos dentro da mesma safra. Letras minúsculas comparam safras dentro do mesmo genótipo. **Fonte: Autora, 2026.**

Caracterização colorimétrica (CIELAB) de frutos maduros de acerola

Os atributos de cor da casca e da polpa dos frutos maduros foram influenciados principalmente pelo genótipo, enquanto o efeito das safras foi menos expressivo (Tabela 4), evidenciando forte controle genético sobre a coloração dos frutos. Resultados semelhantes foram relatados por Ferreira et al. (2021) e Vilvert et al. (2024), que observaram elevada variabilidade nos parâmetros colorimétricos entre genótipos de acerola cultivados em condições tropicais e semiáridas.

Na casca, os valores de luminosidade (L^*) variaram de 19,76 a 62,58, indicando ampla variação na intensidade da coloração entre os genótipos. AC32 e LAG 05 apresentaram frutos mais claros, enquanto Carp 01, Junko e BRS Sertaneja apresentaram menores valores de L^* , associados a coloração vermelho-escura mais intensa. Os valores positivos de a^* confirmaram predominância de tonalidades vermelhas nos genótipos BRS Sertaneja, Junko e Carp 01, com destaque para BRS Sertaneja. Segundo Ferreira et al. (2021), maiores valores de a^* estão relacionados ao maior acúmulo de antocianinas e compostos fenólicos antioxidantes.

A coloração da polpa seguiu um padrão análogo e estatisticamente coerente com a casca. A consistência destes agrupamentos estatísticos inter-safras demonstra que, embora o efeito de safra module as médias absolutas, os parâmetros de qualidade e a biossíntese de compostos bioativos da acerola evidenciam predominância do efeito genotípico na expressão desses caracteres (Ferreira et al., 2022). A variabilidade observada entre os genótipos pode ser visualmente constatada na Figura 7, evidenciando diferenças no padrão de coloração da casca e da polpa entre os estádios verde e maduro.

Entre os parâmetros colorimétricos, o componente b^* apresentou maiores valores em AC32 e LAG 05, indicando maior tendência à coloração amarelo-alaranjada. Essa diferença é visualmente confirmada na Figura 7, na qual esses genótipos apresentam frutos com tonalidades mais amareladas, enquanto BRS Sertaneja, Junko e Carp 01 e AC01 exibem menores valores de Hue (20,31–28,82), caracterizando coloração vermelha mais intensa.

Tabela 6 - Atributos de cor (L*, a*, b* e H°) da casca e da polpa de frutos maduros de seis genótipos de acerola avaliados em três safras. Os frutos foram produzidos no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE - 2025.

	Genótipo	L*		a*		b*		Hue*	
		CASCA	POUPA	CASCA	POUPA	CASCA	POUPA	CASCA	POUPA
Safra 1	AC01	45,33 Ba	71,01 Aa	35,43 Aa	5,44 Ba	32,50 ABa	35,30 ABa	42,52 Ba	81,27 ABa
	AC32	57,68 Aa	61,27 ABa	21,73 Ca	11,70 ABa	41,93 Aa	41,90 ABa	62,58 Aa	74,22 ABa
	BRS SERTANEJA	32,22 Ca	51,70 Ba	39,61 Aa	15,40 Aa	20,45 Ca	37,12 ABa	27,36 Ca	67,39 Ba
	Carp 01	19,76 Db	60,05 ABa	38,51 Aa	8,88 ABa	21,68 BCa	35,22 ABa	28,82 Ca	75,45 ABa
	JUNKO	22,51 CDa	60,75 ABa	32,48 ABa	9,39 ABa	13,07 Ca	31,29 Ba	21,86 Ca	72,66 ABa
	LAG 05	49,32 ABa	49,40 Ba	25,49 BCa	5,34 Ba	42,72 Aa	46,53 Aa	58,94 Aa	83,37 Aa
	Média	37,89	60,36	32,53	9,19	25,72	37,89	40,65	75,53
Safra 2	AC01	42,52 Ba	70,54 Aa	35,29 Aa	7,92 ABa	33,05 ABa	25,33 Ba	43,09 Ba	60,32 Aa
	AC32	62,58 Aa	63,13 ABa	24,20 Ba	11,60 ABa	40,67 Aa	43,55 Aa	59,38 Aa	75,03 Aa
	BRS SERTANEJA	27,36 Ca	51,19 Ba	37,88 Aa	13,68 Aa	20,35 BCa	35,67 ABa	28,25 Ca	69,01 Aa
	Carp 01	28,82 Ca	58,60 ABa	36,88 Aa	9,47 ABa	15,87 Ca	35,58 ABa	22,51 Ca	73,93 Aa
	JUNKO	21,86 Ca	60,55 ABa	32,88 Aa	9,20 ABa	13,12 Ca	30,89 ABa	21,72 Ca	73,59 Aa
	LAG 05	58,94 Aa	53,68 Ba	25,25 Ba	6,55 Ba	36,98 Aa	42,92 Aa	55,11 Aa	80,05 Aa
	Média	40,39	59,21	31,89	9,75	23,34	35,65	38,42	72,15
Safra 3	AC01	50,54 ABa	69,16 Aa	36,47 ABa	8,38 Ba	35,10 Aa	38,72 ABa	43,89 Ba	77,99 Aa
	AC32	53,03 Aa	61,53 ABa	26,33 Ca	13,00 ABa	40,70 Aa	44,88 Aa	57,13 Aa	73,74 ABa
	BRS SERTANEJA	31,63 Ca	51,02 Ca	38,82 Aa	15,97 Aa	20,87 Ba	38,15 ABa	28,35 Ca	67,30 Ba
	Carp 01	35,83 Ca	62,17 ABa	30,70 BCa	10,15 ABa	11,47 Ca	36,90 ABa	20,31 Da	74,57 ABa
	JUNKO	23,86 Da	56,16 BCa	34,47 ABa	8,95 Ba	14,00 BCa	30,80 Ba	22,10 CDa	73,69 ABa
	LAG 05	47,91 Ba	58,98 BCa	27,18 Ca	6,67 Ba	39,15 Aa	50,18 Aa	55,05 Aa	82,18 Aa
	Média	40,46	59,85	31,51	10,57	21,88	38,21	31,13	74,58

L*: luminosidade; a*: componente verde (–) a vermelho (+); b*: componente azul (–) a amarelo (+); H°: ângulo de matiz. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ou Dunn ($p \leq 0,05$). Letras maiúsculas comparam genótipos dentro da mesma safra. Letras minúsculas comparam safras dentro do mesmo genótipo. Fonte: Autora, 2026.

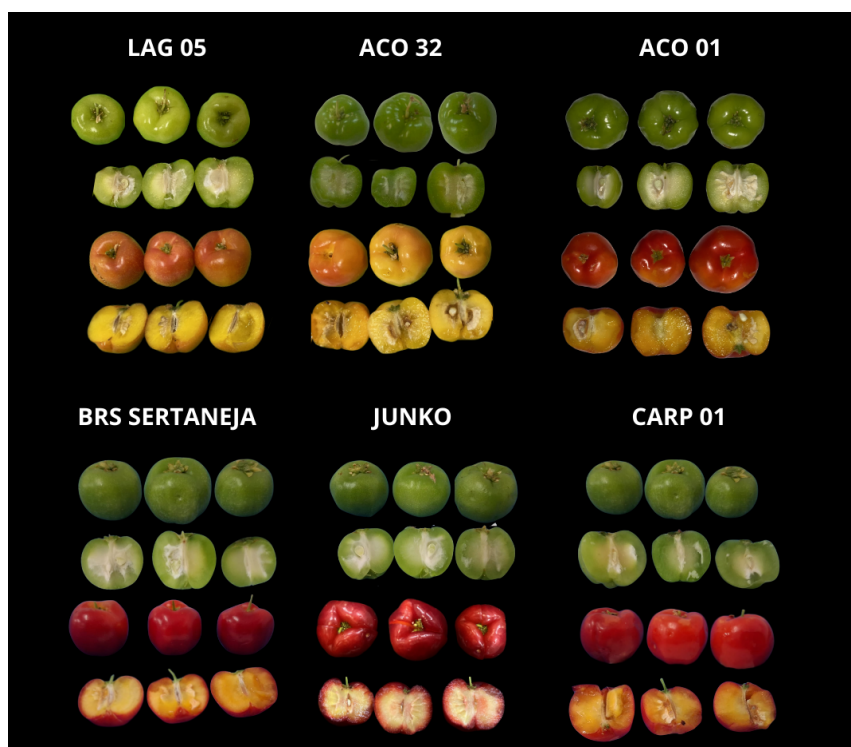


Figura 7. Caracterização visual dos genótipos de acerola nos estádios verde e maduro. Vista externa (frutos inteiros) e interna (corte longitudinal), evidenciando diferenças do padrão de coloração da casca e polpa. **Fonte:** Autora, 2026.

Embora carotenoides estejam frequentemente associados às tonalidades amarelo-alaranjadas em frutos tropicais (De Rosso e Mercadante, 2007), os resultados demonstram que a coloração da polpa não esteve diretamente relacionada ao teor total desses pigmentos. LAG 05 apresentou elevados teores de carotenoides e altos valores de b^* e Hue, enquanto AC32 exibiu comportamento cromático semelhante, apesar de apresentar baixos teores totais. Adicionalmente, o Hue da polpa de AC32 foi semelhante ao observado nos genótipos de coloração vermelha, indicando tonalidade mais deslocada para o vermelho. Esses resultados evidenciam que a coloração depende não apenas da concentração total, mas também da composição e da proporção entre os diferentes pigmentos presentes no tecido, sendo o ângulo Hue um indicador sensível para detectar diferenças qualitativas na pigmentação (Pathare et al., 2012; Arena et al., 2021).

Análise multivariada dos parâmetros colorimétricos e atributos físicos e físico-químicos do frutos maduros

A matriz de correlação de Pearson (Figura 8) evidenciou associações consistentes entre os parâmetros colorimétricos e os atributos físico-químicos dos frutos maduros. Na

polpa, o componente a^* apresentou forte correlação positiva com a acidez titulável (AT; $r = 0,87$) e forte correlação negativa com o ratio SS/AT ($r = -0,76$), indicando que frutos com tonalidades mais avermelhadas tendem a apresentar maior acidez e menor equilíbrio entre açúcares e ácidos. De forma complementar, o ângulo Hue da polpa apresentou correlação negativa muito forte com a AT ($r = -0,89$) e positiva com o ratio SS/AT ($r = 0,71$), evidenciando que o deslocamento da cor para tonalidades amarelo-alaranjadas está associado à redução da acidez e ao aumento da doçura relativa. A luminosidade da polpa (L^*) correlacionou-se positivamente com o diâmetro ($r = 0,53$), sugerindo que frutos maiores tendem a apresentar polpa mais clara.

Na casca, os parâmetros b^* e Hue apresentaram correlações positivas com SS ($r = 0,58$ e $0,47$, respectivamente) e com o ratio SS/AT ($r = 0,67$ e $0,61$, respectivamente), indicando que frutos com tonalidades mais amarelas e alaranjadas concentram maiores teores de sólidos solúveis e melhor relação entre açúcares e ácidos. Em contraste, esses mesmos parâmetros correlacionaram-se negativamente com a acidez titulável ($r = -0,59$ e $-0,58$), confirmando que o avanço do amadurecimento é acompanhado pela redução dos ácidos orgânicos e pelo acúmulo de açúcares (Ribeiro & Freitas, 2020; Arena et al., 2021). Esses resultados demonstram que os atributos cromáticos da casca, especialmente b^* e Hue, foram os indicadores mais consistentes da qualidade físico-química dos frutos maduros.

A análise de componentes principais (Figura 9) corroborou os padrões observados na matriz de correlação. O PC1 (48,1%) separou os genótipos por um gradiente de maturação, associando positivamente SS, SS/AT e os parâmetros b^* e Hue da casca, enquanto a acidez titulável posicionou-se no sentido oposto. Nesse eixo, LAG 05 destacou-se pela forte associação com maiores valores de SS, ratio e coloração amarelo-alaranjada, indicando frutos mais doces e visualmente mais intensos. Em contraste, BRS Sertaneja apresentou maior associação com a acidez titulável, enquanto Junko se relacionou ao componente a^* da casca, evidenciando maior intensidade de tonalidades vermelhas. O PC2 (24,2%) esteve mais relacionado aos atributos biométricos e à luminosidade da polpa, destacando AC01 pela associação com massa e diâmetro.

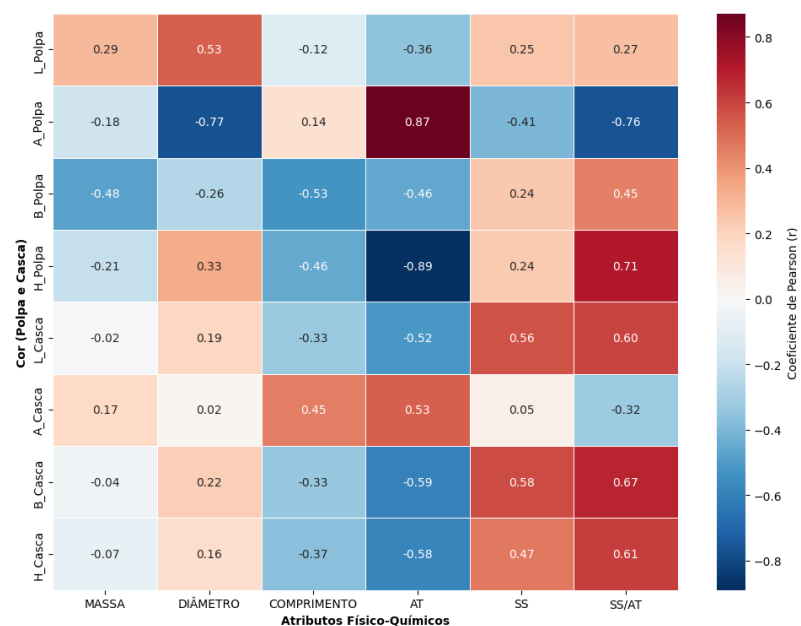


Figura 8: Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos da casca e da polpa e os atributos físicos e físico-químicos de frutos maduros de seis genótipos de acerola. Os coeficientes de correlação variaram de -1 a $+1$, sendo as cores quentes (vermelho) associadas a correlações positivas e as cores frias (Azul) a correlações negativas. **Fonte:** Autora, 2026.

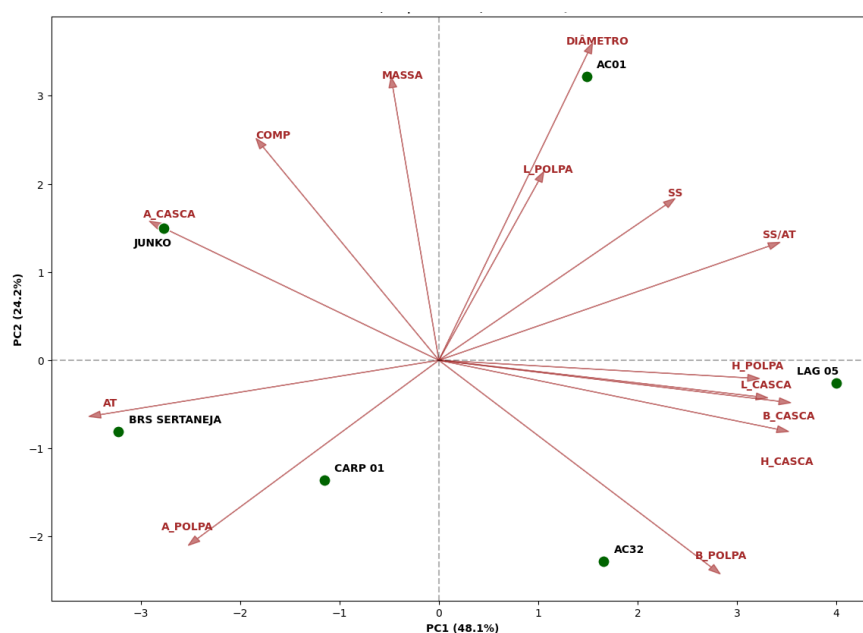


Figura 9: Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos físicos, físico-químicos e colorimétricos de frutos maduros de seis genótipos de acerola. O PC1 e o PC2 explicaram 48,1% e 24,2% da variância total, respectivamente. As setas indicam a contribuição e a direção das variáveis na discriminação dos genótipos. **Fonte:** Autora, 2026.

Análise multivariada dos parâmetros colorimétricos e atributos físicos e físico-químicos do frutos maduros

A matriz de correlação de Pearson (Figura 10) evidenciou associações consistentes entre os parâmetros colorimétricos e os compostos bioativos dos frutos maduros, demonstrando que a coloração está diretamente relacionada ao perfil antioxidante. Entre os compostos fenólicos, as antocianinas apresentaram as correlações mais expressivas com o componente a^* da casca ($r = 0,72$) e com o ângulo Hue da casca ($r = -0,84$), além de associação positiva com a^* da polpa ($r = 0,52$). Esses resultados indicam que o aumento do teor de antocianinas está diretamente relacionado à intensificação da coloração vermelha e à redução do Hue, refletindo o deslocamento da cor para tons mais avermelhados. Os flavonoides apresentaram comportamento semelhante, destacando-se as correlações com a^* da casca ($r = 0,62$), a^* da polpa ($r = 0,61$) e Hue da polpa ($r = -0,63$), confirmando a contribuição desses compostos para a formação da coloração vermelha por meio da via dos fenilpropanoides (Xu et al., 2020; Ninkuu et al., 2025).

Os carotenoides mostraram maior influência sobre a coloração da polpa, com correlações positivas com b^* ($r = 0,54$) e Hue ($r = 0,57$), e correlação negativa com L^* ($r = -0,60$). Esses resultados indicam que o aumento desses pigmentos está associado à intensificação de tonalidades amarelo-alaranjadas e à redução da luminosidade, tornando a polpa visualmente mais intensa. Padrões semelhantes foram observados em pequi e cambucá, nos quais os carotenoides também apresentaram forte associação com b^* e Hue da polpa (Nascimento-Silva et al., 2026; Pazzini et al., 2026).

O ácido ascórbico (AA) apresentou sua associação mais forte com a^* da polpa ($r = 0,93$), enquanto a razão AA/SS também se correlacionou intensamente com esse parâmetro ($r = 0,85$). Em ambos os casos, observaram-se correlações negativas com Hue da polpa ($r = -0,84$ e $-0,73$, respectivamente). Esses resultados indicam que frutos com polpa mais avermelhada tendem a apresentar maiores concentrações de vitamina C e melhor equilíbrio entre teor de ácido ascórbico e sólidos solúveis.

A análise de componentes principais (Figura 11) corroborou os padrões observados na matriz de correlação. O PC1 (52,8%) separou os genótipos em um gradiente entre compostos fenólicos e atributos de cor vermelha, no sentido positivo, e carotenoides e parâmetros associados à coloração amarelo-alaranjada da polpa, no sentido negativo. BRS Sertaneja destacou-se pela associação com flavonoides, ácido ascórbico e a^* da polpa, enquanto LAG

05 apresentou forte relação com carotenoides e com os parâmetros b^* e Hue da polpa. O PC2 (20,8%) representou principalmente variações na intensidade e luminosidade da coloração da polpa e da casca. Escores positivos estiveram associados a maiores valores de a^* da polpa e da casca, indicando frutos com coloração vermelha mais intensa, enquanto escores negativos estiveram relacionados a maiores valores de Hue e L^* da polpa, caracterizando frutos com tonalidade mais clara e amarelada. Em conjunto, os resultados demonstram que os parâmetros a^* e H^* são os melhores preditores do conteúdo de compostos bioativos em acerolas maduras, enquanto b^* está mais diretamente relacionado ao acúmulo de carotenoides.

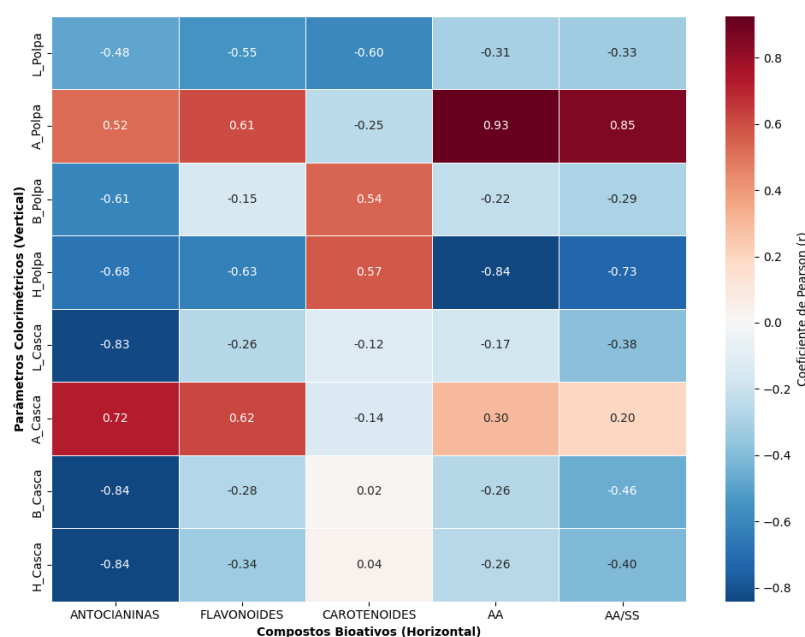


Figura 10: Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos da casca e da polpa e composto bioativos de frutos maduros de seis genótipos de acerola. Os coeficientes de correlação variaram de -1 a $+1$, sendo as cores quentes (vermelho) associadas a correlações positivas e as cores frias (azul) a correlações negativas. **Fonte:** Autora, 2026.

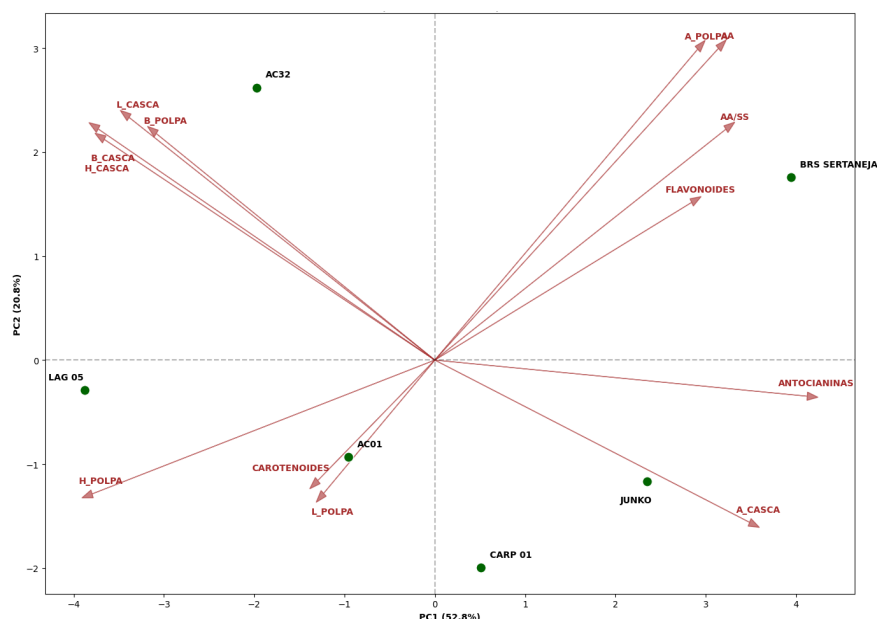


Figura 11: Análise de Componentes Principais (ACP) dos compostos bioativos e colorimétricos de frutos maduros de seis genótipos de acerola. O PC1 e o PC2 explicaram 52,8% e 20,8% da variância total, respectivamente. As setas indicam a contribuição e a direção das variáveis na discriminação dos genótipos. **Fonte: Autora, 2026.**

CONCLUSÃO

A coloração dos frutos de acerola apresentou associação limitada com os atributos físico-químicos e os compostos bioativos no estágio verde, indicando que, nessa fase, a cor não é um indicador preciso da qualidade dos frutos. Em frutos maduros, entretanto, os parâmetros colorimétricos mostraram associações consistentes com compostos bioativos e atributos físico-químicos, evidenciando que a coloração pode ser utilizada como um indicador do perfil qualitativo dos frutos. Diferenças entre os genótipos foram observadas na composição de compostos bioativos, com maior associação de BRS Sertaneja e Junko a compostos fenólicos, enquanto LAG 05 se destacou pelo maior acúmulo de carotenoides, embora teores elevados desses pigmentos também tenham sido observados em Carp 01. Não houve separação absoluta entre genótipos de frutos vermelhos e amarelo-alaranjados, indicando que a qualidade dos frutos depende da interação entre múltiplas características e não exclusivamente da coloração externa.

REFERÊNCIAS

- ACQUISTUCCI, R. et al. Effect of bread making process on bioactive molecules in durum wheat bread and assessment of antioxidant properties by Caco-2 cell culture model. *Journal of Cereal Science*, v. 83, p. 188-195, 2018.
- AHMED, I. et al. Yield stability among potato varieties suitable for different agroecological regions of Bangladesh. *Heliyon*, v. 10, n. 11, 2024.
- ALEM, Hubert, et al. Effect of the plant sink/source balance on the metabolic content of the *Vitis vinifera* L. red grape. *European Journal of Agronomy*, 2021, 122: 126168.
- ALLWOOD, J.W.; GIBON, Y.; OSORIO, S.; ARAÚJO, W.L.; VALLARINO, J.G.; PÉTRIACQ, P.; MOING, A. Developmental metabolomics to decipher and improve fleshy fruit quality. In: *Advances in Botanical Research*. [S.l.]: Elsevier, 2021. v. 98, p. 3-34.
- AOAC. *Official methods of analysis*. 16. ed. Arlington: AOAC, 1995. 1141 p.
- ARENA, Miriam E., et al. Changes in physicochemical properties at different development stages of *Hexachlamys edulis* fruit, an underutilized South American species. *Heliyon*, 2021, 7.11.
- BARTLETT, M.S. Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, v. 160, n. 901, p. 268-282, 1937.
- BENKEBLIA, N. et al. Preharvest and harvest factors influencing the postharvest quality of tropical and subtropical fruits. In: *postharvest biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*. Woodhead Publishing, 2011. p. 112-142e.
- BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Statistical Methodology*, v. 26, n. 2, p. 211-243, 1964.
- CARNEIRO FERREIRA, Ianca et al. Brazilian varieties of acerola (*Malpighia emarginata* DC.) produced under tropical semi-arid conditions: bioactive phenolic compounds, sugars, organic acids, and antioxidant capacity. *Journal of food biochemistry*, v. 45, n. 8, p. e13829, 2021.

DAI, Zhanwu et al. Inter-species comparative analysis of components of soluble sugar concentration in fleshy fruits. *Frontiers in plant science*, v. 7, p. 649, 2016.

DE OLIVEIRA FILHO, J.G. et al. Acerola (*Malpighia emarginata*) pulp: characterization and stability of anthocyanins under different conditions. *Food Science and Technology*, v. 43, 2023.

DE ROSSO, V.V.; MERCADANTE, A.Z. Carotenoid composition of two Brazilian genotypes of acerola (*Malpighia punicifolia* L.) from two harvests. *Food Research International*, v. 38, n. 8-9, p. 1073-1077, 2005.

FARINELLI, D. et al. Variability of fruit quality among 103 acerola (*Malpighia emarginata* DC.) phenotypes from the subtropical region of Brazil. *Agriculture*, v. 11, n. 11, p. 1078, 2021.

FERREIRA, M.A.R. et al. A multivariate selection index of acerola genotypes for fresh consumption based on fruit physicochemical attributes. *Euphytica*, v. 218, p. 1-16, 2022.

FRANCIS, F.J. Analysis of anthocyanins. In: MARKAKIS, P. (ed.). *Anthocyanins as food colors*. New York: Academic Press, 1982. p. 181-207.

FREITAS, S.T. de; BARBOSA, M.A.G.; RYBKA, A.C.P. *Colheita e pós-colheita de acerola para o consumo in natura*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2020. (Circular Técnica, 123).

HABIBI, Fariborz; KHALIL, Uzman; SARKHOSH, Ali. Physicochemical and Quality Attributes of ‘Possum Purple’ Passion Fruit in Relation to Fruit Weight Categories. *HortScience*, 2025, 60.9: 1561-1568.

JARAMILLO-FLORES, M.E. et al. Effect of sodium chloride, acetic acid, and enzymes on carotene extraction in carrots (*Daucus carota* L.). *Journal of Food Science*, v. 70, n. 2, p. S136-S142, 2005.

JOHNSON, N.L. Systems of frequency curves generated by methods of translation. *Biometrika*, v. 36, n. 1-2, p. 149-176, 1949.

JOSHI, Mukul; SCHMILOVITCH, Ze’ev; GINZBERG, Idit. Pomegranate fruit growth and skin characteristics in hot and dry climate. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, p. 725479, 2021.

KONDLE, R.; KAPOOR, H. Physiological and Biochemical Responses of Fruit Crops Under Stress. *J Food Chem Nanotechnol*, 2023, 9.S1: S381-S389.

LIANG, Xiao, et al. Genomic and metabolomic insights into the selection and differentiation of bioactive compounds in citrus. *Molecular Plant*, 2024, 17.11: 1753-1772.

LIMA, V.L.A.G.; MÉLO, E.A.; MACIEL, M.I.S.; PRAZERES, F.G.; MUSSER, R.S.; LIMA, D.E.S. Total phenolic and carotenoid contents in acerola genotypes harvested at three ripening stages. *Food Chemistry*, v. 90, n. 4, p. 565-568, 2005.

LIMA, V.L.A.G.; MELO, E. de A.; GUERRA, N.B. Correlação entre o teor de antocianinas e caracterização cromática de polpas de diferentes genótipos de aceroleira. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 10, n. 1, p. 51-55, 2007.

MARANHÃO RIBEIRO, C.M.C. et al. Fruit development and ripening of acerola ‘Okinawa’ cultivar. *Acta Horticulturae*, n. 1198, p. 199-204, 2018.

MATSUURA, F.C.A.U. et al. Avaliações físico-químicas em frutos de diferentes genótipos de acerola (*Malpighia puniceifolia* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 23, n. 3, p. 602-606, 2001.

MERTZ, C.; GEVAN, D.; CARIS-VEYRAT, C.; GÜNATA, Z. Phenolic compounds, carotenoids and antioxidant activity of three tropical fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 22, n. 4, p. 381-387, 2009.

MISKINIS, K. et al. Acerola (*Malpighia emarginata* DC.) production, postharvest handling, nutritional value, and biological activity: a review. *Frontiers in Nutrition*, v. 10, p. 1122606, 2023.

NAGATA, M.; YAMASHITA, I. Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, v. 39, n. 10, p. 925-928, 1992.

NINKUU, V.; ALUKO, O.O.; YAN, J.; ZENG, H.; LIU, G.; ZHAO, J.; LI, H.; CHEN, S.; DAKORA, F.D. Phenylpropanoids metabolism: recent insight into stress tolerance and plant development cues. *Frontiers in Plant Science*, v. 16, p. 1571825, 2025.

NIU, Yahong et al. Transcriptome and metabolome reveal the molecular mechanism of quality formation in different planting areas of *Ziziphus jujuba* Mill. 'Jingudazao' fruit. *Industrial Crops and Products*, v. 222, p. 119737, 2024.

PARDO-HERNÁNDEZ, Miriam, et al. Seasonal influence on tomato fruit metabolome profile: Implications for ABA signaling in multi-stress resilience. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 217: 109234.

PATHARE, P.B.; OPARA, U.L.; AL-SAID, F.A. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology*, v. 6, n. 1, p. 36–60, 2013.

PARK, H.; EO, H.J.; KIM, C.-W.; STEWART, J.E.; LEE, U.; LEE, J. Physiological disorders in cold-stored 'Autumn Sense' hardy kiwifruit depend on the storage temperature and the modulation of targeted metabolites. *Food Chemistry*, v. 460, p. 140730, 2024.

PACHECO-RUIZ, P. et al. Cultivar-by-environment interactions shape strawberry fruit quality: a multi-omics approach across European climates. *Food Chemistry*, p. 148161, 2026.

POTT, D.M. et al. Dissecting the impact of environment, season and genotype on blackcurrant fruit quality traits. *Food Chemistry*, v. 402, p. 134360, 2023.

RIBEIRO, B.S.; FREITAS, S.T. Maturity stage at harvest and storage temperature to maintain postharvest quality of acerola fruit. *Scientia Horticulturae*, v. 260, p. 108901, 2020.

RIBEIRO, C.M.C.M.; SOUSA, T.P.A.; RIBEIRO, M.T.J.B.; FARIAS, L.R.G.; HOLSCHUH, H.J.; SILVA, S.M.; BEZERRA, T.K.A.; MACIEL, M.I.S. Biochemical changes and peroxidase activity during development of acerola Okinawa. *Revista Ciência Agronômica*, v. 55, p. e20218169, 2023.

RITZINGER, R.; KOBAYASHI, A.K.; OLIVEIRA, J.R.P. *A cultura da aceroleira*. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2003.

ROSSO, V.V. de; MERCADANTE, A.Z. Identification and quantification of carotenoids, by HPLC-PDA-MS/MS, from Amazonian fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 55, n. 13, p. 5062-5072, 2007.

SANTOS, C.P. et al. Transcriptome analysis of acerola fruit ripening: insights into ascorbate, ethylene, respiration, and softening metabolisms. *Plant Molecular Biology*, v. 101, n. 3, p. 269-296, 2019.

SANTOS, H.G. et al. *Brazilian Soil Classification System*. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SHARMA, Shweta; KATOCH, Viveka; KUMAR, Satish; CHATTERJEE, Subhrajyoti. Functional relationship of vegetable colors and bioactive compounds: implications in human health. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, v. 92, p. 108615, 2021.

STROHECKER, R.; HENNING, H.M. *Análises de vitaminas: métodos comprovados*. Madrid: Paz Montalvo, 1967. 428 p.

TAIZ, L. et al. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

VILVERT, J.C. et al. Genetic diversity on acerola quality: a systematic review. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 67, p. e24220490, 2023.

VILVERT, J.C. et al. Phenolic compounds in acerola fruit and by-products: an overview on identification, quantification, influencing factors, and biological properties. *Journal of Food Measurement and Characterization*, v. 18, n. 1, p. 216-239, 2024.

VILVERT, J.C. et al. How many acerola (*Malpighia emarginata* DC.) fruit are required for reliable postharvest quality assessment? *Horticulturae*, v. 11, n. 8, p. 941, 2025.

XU, M.; SHEN, C.; ZHENG, H.; XU, Y.; XUE, C.; ZHU, B.; HU, J. Metabolomic analysis of acerola cherry (*Malpighia emarginata*) fruit during ripening development via UPLC-Q-TOF and contribution to the antioxidant activity. *Food Research International*, v. 130, p. 108915, 2020.

ZHAO, X. et al. Genotype $\times$ environment interactions underlying geographic divergence in carotenoid accumulation and kernel pigmentation of foxtail millet. *BMC Plant Biology*, v. 26, n. 1, p. 201, 2026.

CAPÍTULO III:

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, SELEÇÃO MULTIVARIADA E DESEMPENHO PRODUTIVO DE GENÓTIPOS DE ACEROLA PARA CONSUMO *IN NATURA* E USO INDUSTRIAL

RESUMO

A acerola (*Malpighia emarginata* Sessé & Moc. ex DC.) apresenta elevada variabilidade para atributos de qualidade e produtividade, o que permite selecionar genótipos para diferentes finalidades. Este estudo teve como objetivos caracterizar a qualidade físico-química e o desempenho produtivo de genótipos de acerola cultivados no submédio do Vale do submédio do São Francisco, visando a seleção de materiais para processamento industrial e para consumo *in natura*. Foram avaliados genótipos do programa de melhoramento genético da Embrapa Semiárido, em três safras, com quantificação de atributos físicos (massa e forma), químicos (sólidos solúveis, acidez titulável e ácido ascórbico), cor, além do acompanhamento da produção mensal por planta. Os dados foram analisados por métodos univariados e multivariados, com estimativas de repetibilidade e aplicação do índice MGIDI para seleção multicaracterística. Os resultados evidenciaram ampla variabilidade entre genótipos e influência das safras sobre parte dos atributos avaliados. Massa do fruto e sólidos solúveis apresentaram maior estabilidade entre safras. As análises multivariadas e o índice MGIDI permitiram identificar o PROG 195 como o genótipo mais promissor para uso industrial, por combinar elevado teor de ácido ascórbico e alta produtividade, e a Rubra como o material mais promissor para consumo *in natura*, por associar elevada qualidade sensorial e produção distribuída ao longo de dez meses do ano.

Palavras-chave: qualidade de frutos; produtividade; variabilidade genética; repetibilidade; seleção multicaracterística

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION, MULTIVARIATE SELECTION, AND PRODUCTIVE PERFORMANCE OF ACEROLA GENOTYPES FOR FRESH CONSUMPTION AND INDUSTRIAL PROCESSING

ABSTRACT

Acerola (*Malpighia emarginata* Sessé & Moc. ex DC.) exhibits high variability in fruit quality and yield traits, enabling the selection of genotypes for different market purposes. This study aimed to characterize the physicochemical quality and productive performance of acerola genotypes cultivated in the Lower-Middle São Francisco Valley, with the objective of selecting materials for industrial processing and fresh consumption. Genotypes from the breeding program of Embrapa Semiárido were evaluated over three harvest seasons. Physical attributes (fruit weight and shape), chemical attributes (soluble solids, titratable acidity, and ascorbic acid), color parameters, and monthly yield per plant were assessed. Data were analyzed using univariate and multivariate methods, including repeatability estimates and the application of the MGIDI index for multi-trait selection. The results revealed substantial variability among genotypes and a significant influence of harvest seasons on part of the evaluated traits. Fruit weight and soluble solids showed greater stability across seasons. Multivariate analyses and the MGIDI index identified PROG 195 as the most promising genotype for industrial use, combining high ascorbic acid content and high productivity, and Rubra as the most promising genotype for fresh consumption, due to its superior sensory quality and fruit production distributed over approximately ten months of the year.

Keywords: fruit quality; productivity; genetic variability; repeatability; multi-trait selection

INTRODUÇÃO

A acerola (*Malpighia emarginata* Sessé & Moc. ex DC.) é reconhecida mundialmente como uma das fontes naturais mais expressivas de ácido ascórbico, com teores que podem superar em até 100 vezes os encontrados na laranja (Delva; Schneider, 2013). No Brasil, a cultura consolidou-se como atividade de grande relevância socioeconômica, especialmente na região Nordeste, onde as condições edafoclimáticas associadas ao manejo irrigado permitem a produção contínua ao longo do ano (Ritzinger; Ritzinger, 2011; Pio, 2003). O Vale do Submédio do São Francisco destaca-se como polo estratégico dessa produção, não apenas pela expressiva produtividade, mas também pela qualidade dos frutos que atendem tanto à demanda industrial quanto ao mercado de frutas frescas (Silveira et al., 2020).

No entanto, o setor produtivo ainda enfrenta desafios relacionados à concentração varietal. A maioria dos pomares comerciais utiliza genótipos selecionados prioritariamente para o processamento industrial, focando em altos teores de vitamina C e acidez, como as cultivares Junko e Sertaneja (Araújo et al., 2022). Para o consumo in natura, as exigências de qualidade são distintas: o consumidor prioriza frutos de maior calibre, coloração atraente, textura firme e, fundamentalmente, um sabor agradável, caracterizado por uma relação equilibrada entre açúcares e ácidos orgânicos, expresso pela relação sólidos solúveis/acidez titulável (SS/AT) (Hoehn et al., 2005; Ferreira et al., 2021).

A qualidade físico-química da acerola é um caráter complexo, influenciado tanto por fatores genéticos, quanto por fatores ambientais relacionados ao manejo, temperatura, precipitação, e radiação característicos da estação de cultivo (Alves et al., 1999; Delva; Schneider, 2013). Como diversos fatores influenciam a expressão das características dos frutos, a avaliação dos genótipos em diferentes épocas e estádios de maturação é fundamental para compreender a amplitude da variação fenotípica observada. Nesse sentido, a variabilidade genética preservada nos Bancos Ativos de Germoplasma (BAGs), como o da Embrapa Semiárido, oferece uma oportunidade estratégica para a identificação de materiais que reúnam características de interesse para o mercado in natura e para a indústria (Souza et al., 2017). Pesquisas anteriores já indicaram que genótipos superiores podem apresentar dupla aptidão ou características específicas que agregam valor ao produto final (Ferreira et al., 2021).

A estabilidade fenotípica dos genótipos ao longo de diferentes safras constitui, portanto, um critério de seleção essencial em programas de melhoramento. A interação

genótipo x ambiente (G×A) pode alterar significativamente a expressão de atributos de qualidade dos frutos, comprometendo a previsibilidade do desempenho de cultivares em diferentes condições produtivas (Nogueira et al., 2002). A compreensão dessa interação permite identificar materiais com maior adaptabilidade e estabilidade, subsidiando recomendações mais seguras (Nogueira et al., 2002).

Dessa forma, este estudo teve como objetivo caracterizar a qualidade físico-química de dezoito genótipos de aceroleira cultivados na área experimental de clones do Campo Experimental de Bebedouro, Embrapa Semiárido, Petrolina-PE, avaliados em diferentes épocas de cultivo e estádios de maturação, sendo oito genótipos analisados quanto ao potencial para processamento industrial e dez quanto ao potencial para consumo in natura, visando identificar materiais com desempenho agrônômico superior nas condições de cultivo do Vale Submédio do São Francisco.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área experimental e cultivo

Este estudo foi conduzido com genótipos de aceroleira cultivados na área experimental de clones da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE (09°09' S, 40°22' W, altitude de 365 m). O clima da região é classificado como BSh (semiárido quente e seco), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado por uma temperatura média anual de 26 °C, precipitação pluviométrica anual média de 500 mm e umidade relativa média de 66 %. As condições climáticas durante o período do experimento (fevereiro a julho de 2025) estão representadas na Figura 3, que ilustra as variações de temperaturas média, mínima e máxima, bem como a precipitação e radiação global. O solo da área experimental é um Argissolo Amarelo Distrófico, típico das condições edafoclimáticas do Vale do Submédio do São Francisco, com textura argilosa e boa drenagem.

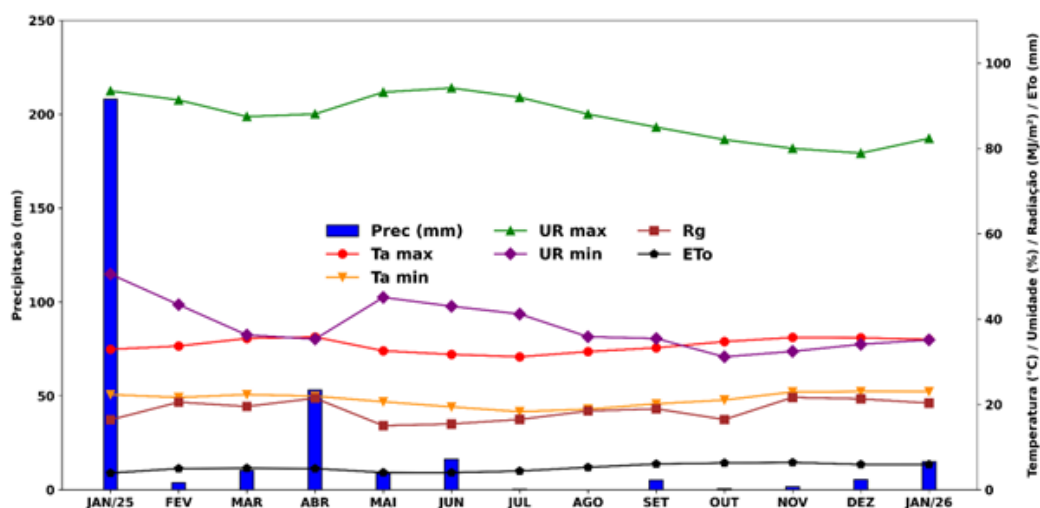


Figura 1 - Variáveis climáticas mensais no Campo Experimental de Bebedouro (Embrapa Semiárido), Petrolina-PE, em 2025. Fonte: **Autora, 2026**.

O transplante das plantas foi realizado em 2022. A irrigação foi conduzida diariamente por gotejamento, com lâmina de água definida com base na evapotranspiração da cultura. Durante o período experimental, o sistema de irrigação passou por ajustes operacionais, incluindo a substituição de uma linha de gotejamento por duas linhas por fileira, além da ocorrência de precipitações pluviométricas entre as safras. Apesar dessas alterações, todos os genótipos foram submetidos às mesmas condições de manejo hídrico. A adubação e o manejo fitossanitário seguiram as recomendações técnicas para a cultura da aceroleira (Calgaro e Braga, 2012) e para sistemas irrigados do Vale do Submédio do São Francisco. A colheita foi realizada em fevereiro, maio e julho, correspondendo às safras 1, 2 e 3, respectivamente.

Colheita e processamento

Em função dessa variabilidade fenológica, a colheita de cada genótipo foi realizada quando os frutos atingiram seu máximo crescimento em dois estádios de maturação (verde e maduro) determinados pelo desenvolvimento da cor da casca dos frutos ao final da fase de crescimento. Foram selecionados apenas frutos saudáveis, eliminando-se aqueles com danos mecânicos, defeitos ou sinais de doenças e insetos. Ao todo, foram avaliados 18 genótipos, 10 destinados ao consumo *in natura*: AC17, BV 01, Costa Rica, Florida Sweet, LAG 01, Morena, Mulata, PROG 052, PROG 216, Rubra e 8 para uso industrial: Junko, Monami, Okinawa, PROG 102, PROG 195, PROG 244, BRS Sertaneja e Carp 01

Imediatamente após a colheita, os frutos foram transportados ao Laboratório de Fisiologia Pós-colheita da Embrapa Semiárido, onde foram conduzidas as análises iniciais.

Essas análises incluíram a avaliação da mensuração de parâmetros morfométricos, tais como peso, diâmetro e comprimento. Após a realização dessas análises, o material foi congelado para posterior análises de parâmetros de qualidade, conforme descrito abaixo.

Análises físico-químicas

Coloração

A coloração foi determinada de forma não destrutiva na região equatorial dos frutos inteiros e, posteriormente, na polpa dos frutos cortados, realizando-se duas medições por fruto. Utilizou-se um colorímetro digital modelo Minolta CR 400 (Konica Minolta, Ramsey, EUA), e os valores de cor foram determinados conforme (Pathare et al., 2012), sendo expressos em ângulo de matiz ($^{\circ}$ hue), em que 0° corresponde ao vermelho, 90° ao verde-amarelado, 180° ao azul-turquesa e 270° ao violeta.

Massa e diâmetro e comprimento

A massa fresca dos frutos e a massa do suco foram determinadas em balança digital de precisão modelo AD50 (Marte Científica, São Paulo, Brasil), com resultados expressos em gramas (g). A mensuração dos atributos físicos comprimento e diâmetro dos frutos foi realizada com auxílio de régua milimetrada, considerando-se o maior eixo longitudinal para determinação do comprimento e o maior eixo transversal para o diâmetro equatorial. A partir dessas medidas, o índice de formato foi calculado pela razão entre comprimento e diâmetro ($IF = C/D$), conforme descrito por Fan et al. (2026).

Sólidos solúveis e acidez titulável

O teor de sólidos solúveis (SS) foi determinado utilizando-se um refratômetro digital modelo PAL-1 (Atago, São Paulo, Brasil), equipado com compensação automática de temperatura. As análises seguiram o protocolo recomendado pela AOAC (2012). Para cada leitura, foram utilizados 1 mL de suco fresco, e os resultados foram expressos em graus Brix ($^{\circ}$ Brix). A faixa de leitura do equipamento varia de 0 a 65° Brix.

A acidez titulável (AT) foi determinada por titulação manual, utilizando 1 mL de suco previamente diluído em 50 mL de água destilada. A solução foi titulada com hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 N até o ponto de viragem, identificado pela mudança de coloração do indicador fenolftaleína. Os resultados de acidez titulável foram expressos em gramas de ácido málico por 100 g de suco, conforme metodologia descrita pela AOAC (2012).

Ácido ascórbico

O conteúdo de ácido ascórbico (AA) foi quantificado pela titulação do suco com uma solução de Tillman (DFI - 2,6-diclorofenol indofenol) 0,02%. Um total de 1 ml de suco de acerola foi diluído em 100 ml de ácido oxálico 0,5%. Por fim, 1 ml desta solução foi diluído em 49 ml de água destilada e titulado com a solução de Tillman até o desenvolvimento da coloração rosa claro permanente por 15 segundos (STROHECKER e HENNING, 1967). Os resultados foram expressos em mg de ácido ascórbico 100 g⁻¹.

Delineamento experimental e análises estatísticas

O experimento foi conduzido com três blocos, cada um constituído por duas plantas de cada genótipo (Apêndice 1). Para as análises, foi utilizada uma amostra composta obtida pela homogeneização dos frutos coletados nos três blocos, de modo que as determinações laboratoriais foram realizadas com o material combinado de todas as repetições de campo. As colheitas foram realizadas em três épocas de 2025: I safra (fevereiro), II safra (maio) e III safra (julho), utilizando genótipos oriundos do programa de melhoramento do Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da Embrapa Semiárido, no Campo Experimental de Bebedouro, Petrolina-PE. Para os genótipos destinados ao consumo in natura, adotou-se esquema fatorial 10 × 3 (genótipos × safras), enquanto para uso industrial foi utilizado esquema 8 × 3, ambos com três repetições.

Os dados foram analisados considerando os efeitos de genótipo, safra e a interação genótipo × safra. Os pressupostos foram avaliados pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene/Brown-Forsythe. Quando necessário, aplicou-se a transformação Box-Cox. As variáveis que atenderam aos pressupostos foram submetidas à análise de variância (ANOVA), com comparação de médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Na presença de interação significativa, realizaram-se análises de efeitos simples. Variáveis que permaneceram sem atender aos pressupostos foram analisadas por Aligned Rank Transform (ART).

Análises multivariadas e índice de seleção multicaracterístico

Análise de componentes principais (ACP)

A análise de componentes principais (ACP) foi realizada com base nas médias dos genótipos para os caracteres físicos e químicos avaliados. Previamente, as variáveis foram padronizadas (média zero e variância unitária), a fim de eliminar efeitos de escala entre caracteres mensurados em diferentes unidades.

A obtenção dos componentes principais consiste na decomposição da matriz de correlação R em autovalores (λ_k) e autovetores (a_k), de modo que cada componente principal seja definido por:

$$CP_k = a_{\{1k\}X_1} + a_{\{2k\}X_2} + \dots + a_{\{pk\}X_p}$$

em que:

- CP_k é o k -ésimo componente principal;
- A_{jk} corresponde ao peso (loading) da variável j no componente k ;
- X_j representa a j -ésima variável padronizada;
- p é o número total de variáveis.

Os componentes foram ordenados em função da variância explicada, sendo retidos para interpretação aqueles com maiores autovalores e maior contribuição acumulada da variância total.

Análise de Agrupamento Hierárquico

A divergência fenotípica entre genótipos foi avaliada por meio de análise de agrupamento hierárquico, utilizando-se a distância euclidiana com base nas variáveis padronizadas.

A distância entre dois genótipos i e j foi calculada por:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2}$$

em que:

- d_{ij} é a distância entre os genótipos i e j ;
- x_{ik} e x_{jk} são os valores padronizados do caráter k .

Para a formação dos grupos foi utilizado o método de Ward, que minimiza a soma dos quadrados dentro dos grupos (Within-Cluster Sum of Squares). A soma dos quadrados para um grupo g foi estimada por:

$$ESS_g = \sum_{i=1}^{n_g} (x_i - \bar{x}_g)^2$$

em que:

- ESS_g é a soma dos quadrados dentro do grupo g ;
- n_g é o número de genótipos no grupo;
- $\bar{x}_g$ é o centroide do grupo.

O número de grupos foi definido com base na inspeção visual do dendrograma e na estrutura de dissimilaridade observada.

Mapa de calor

Para visualização integrada do desempenho relativo dos genótipos, foi construído mapa de calor (heatmap) com base nos valores padronizados (z-score) das variáveis:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}$$

em que:

- Z_{ij} é o valor padronizado do genótipo i para o caráter jj ;
- $\bar{x}_j$ é a média da variável j ;
- s_j é o desvio padrão da variável j .

O mapa de calorheatmap foi acompanhado de agrupamento hierárquico para genótipos e variáveis, permitindo a identificação simultânea de padrões de similaridade.

Índice MGIDI (Multi-trait Genotype–Ideotype Distance Index)

A seleção multicaracterística foi realizada por meio do índice MGIDI, conforme proposto por Olivoto e Nardino (2020). Inicialmente, os caracteres foram reescalados para o intervalo $[0,100][0,100][0,100]$, considerando a direção desejada de seleção (maximização ou minimização do caráter):

Para caracteres a serem maximizados:

$$r_{ij} = 100 \times \frac{x_{ij} - (x_j)}{(x_j) - (x_j)}$$

Para caracteres a serem minimizados:

$$r_{ij} = 100 \times \frac{(x_j) - x_{ij}}{(x_j) - (x_j)}$$

Posteriormente, aplicou-se análise fatorial sobre a matriz reescalada, obtendo-se os escores fatoriais Y_{ik} . O índice MGIDI foi então calculado como a distância euclidiana entre os escores do genótipo e do ideótipo:

$$MGIDI_i = \sqrt{\sum_{k=1}^f (Y_{ik} - Y_k^*)^2}$$

em que:

- $MGIDI_i$ é o índice do i-ésimo genótipo;
- Y_{ik} é o escore do genótipo iii no fator kkk;
- Y_k^* é o escore do ideótipo no fator kkk;
- f é o número de fatores retidos.

Genótipos com menores valores de MGIDI foram considerados mais próximos do perfil ideal.

Estimativa do coeficiente de repetibilidade

A repetibilidade dos caracteres foi estimada pelo método REML/BLUP, utilizando o Modelo 63 do software Selegen (Resende, 2002), apropriado para dados com medições repetidas em delineamento de blocos.

O modelo estatístico adotado foi:

$$y = Xb + Zp + e$$

em que b representa os efeitos fixos de blocos e média geral, p corresponde ao efeito permanente dos genótipos (aleatório) e e ao erro residual.

O coeficiente de repetibilidade foi estimado por:

$$r = \frac{\sigma_p^2}{\sigma_p^2 + \sigma_e^2}$$

em que σ_p^2 é a variância fenotípica permanente e σ_e^2 a variância residual. A repetibilidade da média de mmm avaliações foi obtida por:

$$r_m = \frac{mr}{1+(m-1)r}$$

A acurácia seletiva associada à média foi estimada por:

$$A_{cm} = \sqrt{r_m}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando as diferenças fisiológicas entre os estádios de maturação e o destino comercial dos frutos avaliados neste estudo, foram utilizados índices distintos para interpretação da qualidade. Para frutos colhidos no estágio verde, destinados ao processamento industrial, foi considerada a relação ácido ascórbico/sólidos solúveis (AA/SS), utilizada como indicador do potencial de matéria-prima para extração de vitamina C. Para frutos maduros, destinados ao consumo in natura, foi utilizada a relação sólidos solúveis/acidez titulável (SS/AT), amplamente empregada como indicador do equilíbrio entre açúcares e ácidos orgânicos e da qualidade sensorial dos frutos.

Variabilidade dos atributos físico-químicos dos frutos destinados ao uso industrial

Para os genótipos pré-selecionados para uso industrial a análise de variância evidenciou diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre genótipos para todos os atributos físico-químicos avaliados, bem como efeito de safra e interação genótipo $\times$ safra para a maioria das variáveis (Tabela 1). Esse resultado demonstra a existência de ampla variabilidade fenotípica entre os materiais avaliados, associada tanto ao controle genético quanto à influência ambiental sobre a expressão dos caracteres.

A presença predominante de interação genótipo $\times$ safra indica que o desempenho relativo dos genótipos variou entre os ciclos produtivos, evidenciando resposta diferencial às condições ambientais. Tal comportamento é coerente com as condições de manejo hídrico ao longo das safras. Na Safra 1, o sistema ainda operava com uma única linha de gotejamento e menor uniformidade de irrigação. Na Safra 2, ocorreu a transição para duas linhas de gotejamento por fileira. Na Safra 3, o sistema já se encontrava estabilizado, proporcionando maior uniformidade no fornecimento de água. Associadas à ocorrência de chuvas no período, essas variações podem ter influenciado os atributos de crescimento e a qualidade dos frutos.

A massa dos frutos apresentou ampla oscilação entre ciclos produtivos, com menores valores observados para Carp 01 (2,52 g) e PROG 195 (2,67 g) na Safra 1, enquanto Monami (5,53 g) e Okinawa (6,07 g) mantiveram maiores massas mesmo sob condições menos favoráveis. Nas safras subsequentes, destacou-se o incremento principalmente na Safra 3 observado em PROG 102 (5,97 g) e PROG 195 (6,59 g), evidenciando elevada responsividade desses materiais ao ambiente produtivo. Os valores encontrados foram semelhantes aos relatados por Estevan (2018), que variaram de 4,16 g a 7,62 g.

Tabela 1- Médias dos atributos físico-químicos de frutos de genótipos de acerola produzidos em diferentes safras no Vale do Submédio do São Francisco, 2025.

	Genótipo	Massa	Índice	SS	AT	AA/SS	AA	Hue
SAFRA 1	Carp 01	2,52 E b	1,06 AB a	6,50 CD c	1,69 BC a	411 ABC a	2667 AB a	92,4 B a
	PROG 195	2,67 E c	1,05 AB a	7,53 B ab	2,27 A a	354 ABC a	2667 AB a	94,4 B a
	PROG 244	3,55 D b	1,14 A a	6,13 D b	1,75 BC a	458 A a	2806 AB a	106,8 A a
	BRS SERTANEJA	3,96 CD b	1,11 A a	6,93 BC ab	2,28 A a	429 AB a	2972 AB a	105,4 AB a
	PROG 102	4,69 BC b	1,11 A a	7,47 B a	2,01 AB a	406 ABC a	3028 A a	102,6 AB a
	JUNKO	5,05 B a	0,98 B a	6,87 BCD b	1,85 ABC a	344 BC a	2361 B b	107,0 A a
	OKINAWA	5,53 AB b	0,98 B a	8,60 A a	1,52 C a	313 C a	2694 AB a	105,9 A a
	MONAMI	6,07 A a	1,02 AB a	7,23 BC b	1,97 AB a	415 ABC a	3000 AB a	103,9 AB a
SAFRA 2	Carp 01	2,31 E b	0,92 A b	7,27 A b	1,62 B a	344 BCD a	2500 AB a	106,8 A a
	BRS SERTANEJA	3,24 D c	0,86 A b	6,43 B b	1,87 AB b	481 A a	3065 A a	104,3 AB a
	JUNKO	4,03 CD b	0,91 A a	6,40 B b	1,98 AB a	418 AB a	2660 A ab	106,8 A a
	PROG 244	4,17 C b	0,86 A b	7,27 A a	2,00 AB a	369 BC b	2679 A a	102,4 AB a
	PROG 195	4,19 C b	0,86 A b	7,30 A b	2,17 A a	381 ABC a	2786 A a	91,9 B a
	MONAMI	5,19 B b	0,92 A b	7,60 A b	1,82 AB a	317 BCD b	2411 AB b	96,6 B a
	OKINAWA	5,75 AB ab	0,91 A a	7,93 A b	1,69 B a	311 CD a	2470 AB a	105,1 AB a
	PROG 102	6,10 A a	0,88 A b	7,63 A a	1,70 B a	261 D b	1987 B b	100,8 AB a
SAFRA 3	Carp 01	3,38 D a	0,92 A b	7,93 BC a	1,86 BC a	368 AB a	2917 A a	103,7 AB a
	PROG 244	5,26 C a	0,86 A b	7,10 D a	1,79 BC a	305 AB b	2160 B b	106,8 A a
	JUNKO	5,43 BC a	0,91 A a	7,43 CD a	1,92 AB a	397 A a	2944 A a	107,1 A a
	MONAMI	5,64 BC ab	0,92 A b	8,50 AB a	1,97 AB a	302 AB b	2562 AB ab	101,5 AB a
	BRS SERTANEJA	5,83 ABC a	0,86 A b	7,23 CD a	1,47 C c	282 B b	2037 B b	101,5 AB a
	PROG 102	5,97 ABC a	0,88 A b	7,40 CD a	1,76 BC a	334 AB ab	2469 AB b	100,8 A a
	OKINAWA	6,25 AB a	0,91 A a	8,87 A a	1,83 BC a	299 AB a	2654 AB a	105,8 AB a
	PROG 195	6,59 A a	0,86 A b	7,97 BC a	2,31 A a	368 AB a	2932 A a	96,7 B b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna (dentro de cada safra) não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Variáveis: índice de formato, sólidos solúveis(SS), acidez titulável (AT), relação AA/SS, ácido ascórbico (AA) e ângulo Hue **Fonte: Autora, 2026.**

Para os teores de sólidos solúveis (SS), verificou-se baixa variação entre as safras, apesar das diferenças nas condições hídricas. O genótipo Okinawa manteve teores elevados e consistentes (8,6; 7,93 e 8,87 °Brix), dentro da faixa de 5–12 °Brix reportada para o Nordeste (Alves, 1996), evidenciando maior estabilidade fenotípica. Embora os teores de SS possam ser reduzidos por efeito de diluição sob maior disponibilidade hídrica e aumentados sob temperaturas e luminosidade elevadas (Dhillon; Singh; Kundal, 1990), a limitada oscilação observada indica predominância do controle genotípico sobre a influência ambiental.

Para a acidez titulável (AT), os maiores valores foram observados em PROG 195 (2,27%) e BRS Sertaneja (2,27%), especialmente na Safra 1, ciclo em que esses genótipos também apresentaram menor massa dos frutos quando comparados à Safra 3, período de irrigação estabilizada. Esse padrão sugere maior concentração de ácidos orgânicos em frutos com crescimento mais restrito. A AT, expressa (% de ácido málico) apresenta ampla variação na acerola. Estevam et al. (2018) reportaram valores médios mais estreitos (0,97–1,01%), enquanto França (2016) destaca a forte influência do genótipo, do estágio de maturação e das condições de cultivo sobre esse atributo de qualidade.

A vitamina C na acerola é influenciada pelo estágio de maturação, pelo genótipo e pelas condições de cultivo, apresentando, em geral, maiores teores em frutos menos maduros (Vendramini; Trugo, 2000; Moura et al., 2018). Observou-se alteração no ranqueamento genotípico entre as safras, com destaque para BRS Sertaneja (2.972; 3.665; 2.037 mg 100 g⁻¹) e PROG 195 (2.667; 2.086; 2.932 mg 100 g⁻¹). Esses mesmos genótipos também apresentaram maiores valores de acidez titulável, sugerindo associação entre o acúmulo de ácido ascórbico e a concentração de ácidos orgânicos nos frutos. Os teores obtidos foram próximos aos descritos por França (2016) para frutos verdes (1.375,95–3.125,10 mg 100 g⁻¹), embora valores superiores tenham sido registrados para BRS Sertaneja na Safra 2.

A relação AA/SS foi utilizada como indicador do balanço entre vitamina C e açúcares, complementando os índices sensoriais usuais. O índice evidenciou variação no equilíbrio entre ácido ascórbico e sólidos solúveis entre safras, com mudanças no ranqueamento genotípico. PROG 244 apresentou o maior valor na Safra 1 (458), BRS Sertaneja destacou-se na Safra 2 (481) e Junko na Safra 3 (397), enquanto Okinawa manteve valores consistentemente inferiores (313; 311; 299), indicando maior estabilidade desse atributo. Esse comportamento confirma a interação genótipo × safra, sugerindo que o balanço entre açúcares

e compostos antioxidantes é predominantemente dependente do genótipo, com modulação secundária pelas condições de cultivo (França, 2016; Moura et al., 2018).

O índice de formato dos frutos apresentou baixa variação entre as safras, indicando estabilidade morfológica entre os genótipos avaliados. Valores próximos à unidade evidenciam frutos com proporções semelhantes entre comprimento e diâmetro, caracterizando formato predominantemente arredondado. A reduzida oscilação observada ao longo dos ciclos produtivos sugere predominância do controle genotípico sobre a influência ambiental nesse atributo, indicando que a conformação dos frutos foi pouco afetada pelas variações nas condições de cultivo.

O ângulo Hue (h°) é um descritor de cor em que valores próximos de 0° indicam vermelho, enquanto valores próximos de 90° e 180° correspondem a tonalidades amareladas e esverdeadas, respectivamente (Pathare et al., 2012). Nos frutos verdes avaliados, o Hue variou entre 92 e 107° ao longo das três safras, caracterizando coloração amarelo-esverdeada típica desse estágio. Não houve diferença significativa entre genótipos dentro de cada ciclo produtivo, indicando uniformidade na coloração. Vilvert (2024) reportou valores entre $103,33$ e $122,2^\circ$ para frutos verdes, faixa ligeiramente superior à observada neste estudo.

De maneira geral, a massa foi o atributo que mais variou entre as safras, indicando maior sensibilidade às condições ambientais e aos processos de crescimento do fruto. As características químicas apresentaram comportamento intermediário, refletindo tanto o efeito do genótipo quanto ajustes metabólicos ao longo dos ciclos. Já os atributos morfológicos e visuais mostraram maior estabilidade. O ácido ascórbico e a relação AA/SS, por sua vez, foram mais responsivos às variações entre safras, evidenciando a influência da interação genótipo $\times$ ambiente na composição dos frutos. Esses resultados mostram que os diferentes componentes da qualidade não respondem da mesma forma às variações sazonais, reforçando a importância de avaliações em mais de um ciclo produtivo para seleção mais segura de genótipos.

Repetibilidade dos caracteres de qualidade dos frutos

Os componentes de variância (Tabela 2) evidenciaram diferenças na contribuição da variância fenotípica permanente entre plantas (V_{fp}) e da variância ambiental temporária entre safras (V_{et}), indicando distintos níveis de estabilidade fenotípica. Em espécies perenes, a repetibilidade expressa a consistência do desempenho genotípico em avaliações sucessivas,

sendo utilizada para estimar a confiabilidade da seleção baseada em medições repetidas (Resende, 2002).

Para massa do fruto ($V_{fp} = 0,9658$; $V_{et} = 0,4892$) e sólidos solúveis SS) ($V_{fp} = 0,2976$; $V_{et} = 0,168$), observou-se predominância da variância permanente, resultando em elevada repetibilidade ($r = 0,66 \pm 0,27$ e $r = 0,64 \pm 0,27$), indicando maior estabilidade entre safras e confiabilidade da média obtida a partir de três avaliações, comportamento também relatado para caracteres físicos da aceroleira (Lopes et al., 2001; Vilvert et al., 2024).

Para acidez titulável (AT), a maior contribuição da variância ambiental resultou em repetibilidade moderada ($r = 0,33 \pm 0,19$), enquanto AA/SS, ângulo Hue e índice de formato apresentaram baixos coeficientes, evidenciando maior influência ambiental. Há escassez de estudos que estimem repetibilidade para atributos de qualidade especificamente em frutos verdes de acerola, uma vez que a maioria das pesquisas é conduzida com frutos maduros, limitando comparações diretas.

O ácido ascórbico apresentou repetibilidade praticamente nula ($r \approx 0,002$), associada à predominância da variância ambiental temporária e à elevada plasticidade do metabolismo antioxidante em estágios iniciais do desenvolvimento do fruto. Em espécies perenes, baixos coeficientes de repetibilidade são comuns para caracteres complexos e fortemente influenciados pelo ambiente, indicando necessidade de maior número de avaliações para estabilização do desempenho genotípico (Spinelli et al., 2015).

A repetibilidade das médias considerando três safras confirmou esse padrão: massa e sólidos solúveis apresentaram elevados valores de r_m (0,86 e 0,84) e acurácia seletiva ($A_{cm} = 0,92$), enquanto AA/SS, Hue, índice de formato e ácido ascórbico apresentaram menor confiabilidade seletiva. No Hue, estudos com acerola demonstram ampla variação genotípica e ambiental na composição de antocianinas e carotenoides, tornando a coloração um atributo mais plástico e menos consistente ao longo do tempo (Ferreira et al., 2021; Vilvert et al., 2024). Assim, características estruturais, como a massa do fruto, mostraram maior estabilidade temporal, enquanto atributos relacionados à composição química e à coloração foram mais influenciados pelas variações ambientais entre safras, exigindo maior número de avaliações para aumentar a precisão da seleção (Resende, 2002).

Tabela 2- Componentes de variância e parâmetros de repetibilidade estimados para os caracteres de qualidade dos frutos de acerola obtidos pelo método REML/BLUP (Modelo 63 – Selegen).

Característica	Vfp	Vet	Vip	r ± EP	rm	Acm
Massa	0,9658	0,4892	1,455	0,66 ± 0,27	0,86	0,92
Índice	5,00E-06	0,00265	0,00265	0,002 ± 0,01	0,005	0,07
SS	0,2976	0,168	0,4656	0,64 ± 0,27	0,84	0,92
AT	0,0244	0,0489	0,0732	0,33 ± 0,19	0,6	0,77
AA	227,77	126484	126711	0,002 ± 0,01	0,005	0,07
AA/SS	522,31	3309,63	3831,93	0,14 ± 0,12	0,32	0,57
Hue	12,04	35,35	47,39	0,25 ± 0,17	0,51	0,71

Vfp: variância fenotípica permanente entre plantas; Vet: variância ambiental temporária entre avaliações (safras); Vip: variância fenotípica individual total; r: coeficiente de repetibilidade individual ($\pm$ erro-padrão); rm: repetibilidade da média das avaliações; Acm: acurácia seletiva baseada na média das medições. **Fonte: Autora, 2026**

Análise multivariada dos atributos de qualidade dos frutos

A análise multivariada permitiu avaliar simultaneamente as relações entre genótipos e atributos de qualidade, evidenciando padrões consistentes de divergência fenotípica (Figura 2). A análise de componentes principais (ACP) explicou 58,0% da variabilidade total, sendo 39,7% representados pelo primeiro componente (Dim 1) e 18,3% pelo segundo (Dim 2), indicando adequada representação da variação conjunta dos caracteres, conforme esperado em análises integradas de múltiplos atributos em espécies perenes (Resende, 2002).

O primeiro componente esteve associado principalmente a relação SS/AT, índice de formato, acidez titulável (AT) e ácido ascórbico (AA), refletindo atributos relacionados ao equilíbrio químico e ao metabolismo dos frutos, enquanto o segundo componente apresentou maior associação com massa e sólidos solúveis (SS), ligados ao crescimento e acúmulo de fotoassimilados. Essa separação entre atributos estruturais e metabólicos é coerente com a organização funcional da qualidade em acerola (Moura et al., 2018). O posicionamento dos genótipos indicou perfis distintos de qualidade. PROG 195 associou-se aos vetores AA e AT, evidenciando maior expressão de atributos metabólicos, enquanto Okinawa e Monami apresentaram maior relação com massa e SS, indicando desempenho superior para características produtivas.

Os padrões observados foram confirmados pelo mapa de calor (Figura 3) e pela análise de agrupamento hierárquico (Figura 4), que evidenciaram a formação de grupos

fenotipicamente distintos. A concordância entre ACP e agrupamento reforça a consistência da interpretação multivariada na identificação de perfis diferenciados de qualidade (Olivoto e Nardino, 2021).

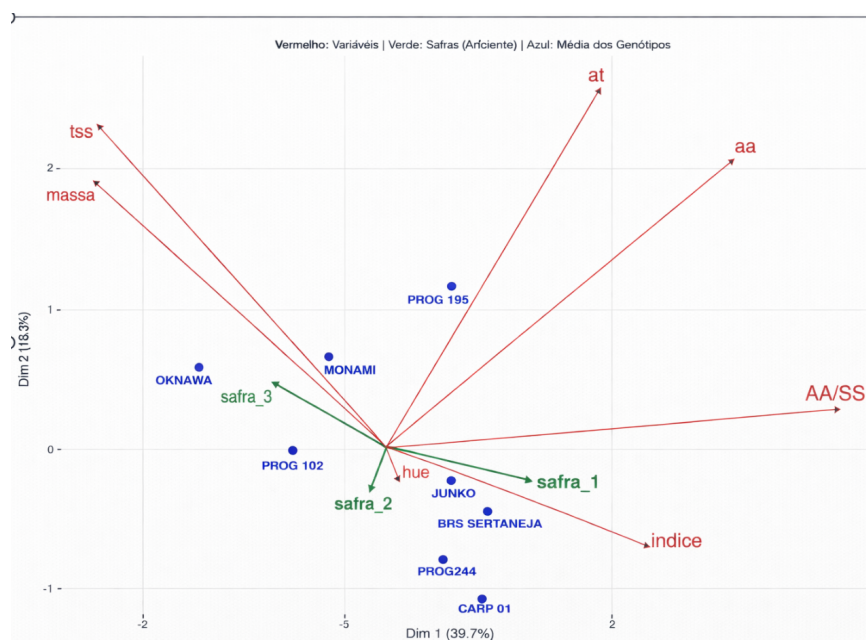


Figura 2. Biplot da análise de componentes principais (ACP) dos atributos de qualidade dos frutos de acerola. Setas vermelhas representam as variáveis, setas verdes as safras e pontos azuis as médias dos genótipos. Dim 1 e Dim 2 explicam 39,7% e 18,3% da variância total, respectivamente. **Fonte:** Autora, 2026.

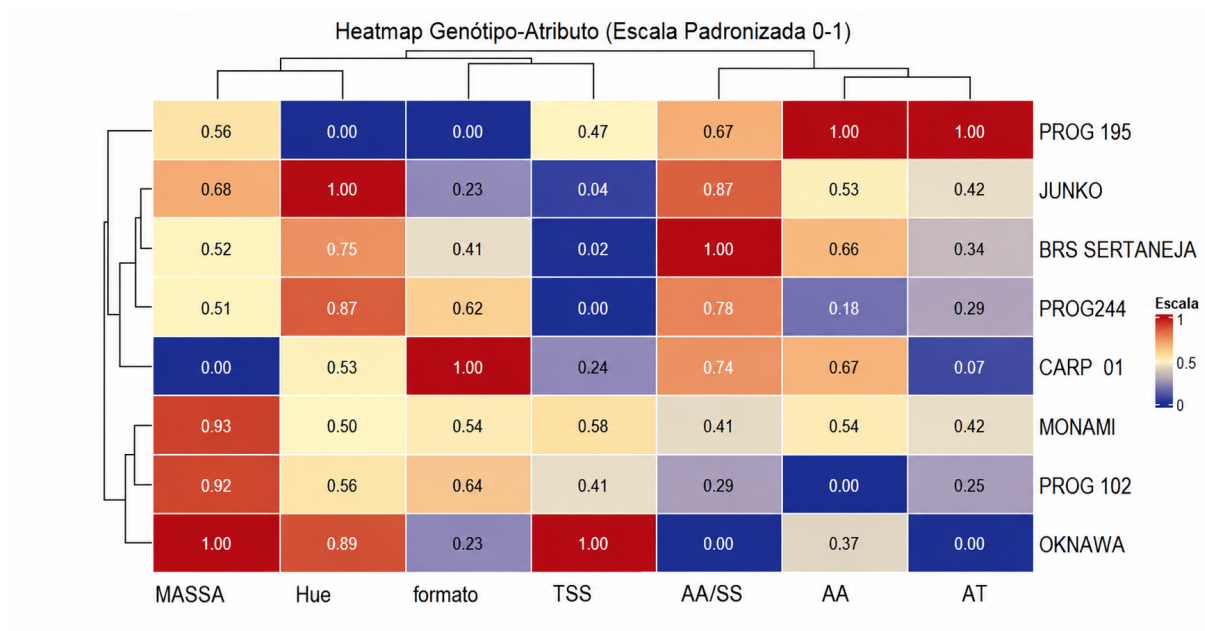


Figura 3. Mapa de calor (Heatmap) do desempenho relativo dos genótipos para os atributos de qualidade dos frutos, com dados padronizados (0–1). As cores indicam menor (azul) e maior (vermelho) magnitude dos caracteres, e os dendrogramas representam o agrupamento hierárquico de genótipos e variáveis. **Fonte: Autora 2026**

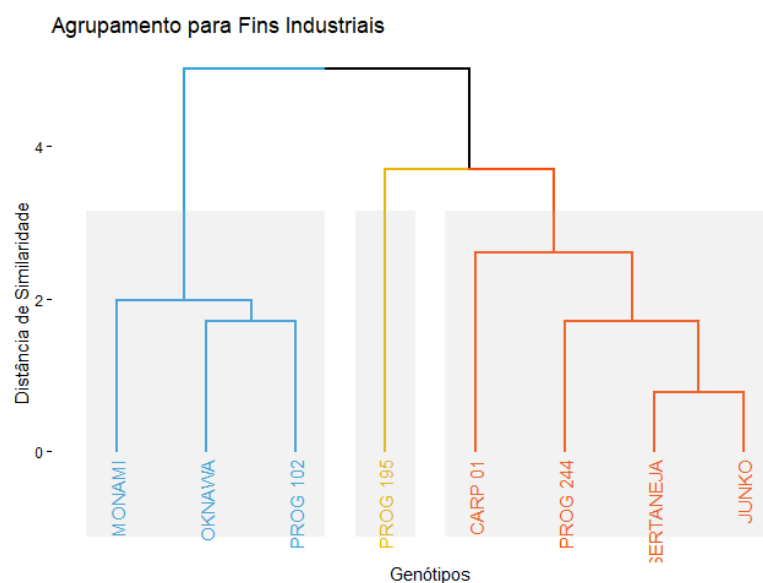


Figura 4. Dendrograma de agrupamento hierárquico dos genótipos destinados ao uso industrial, baseado na distância euclidiana e método de Ward. A altura dos ramos indica o grau de dissimilaridade entre os grupos formados. **Fonte: Autora 2026.**

Seleção multicaracterística de genótipos industriais pelo índice MGIDI

O índice MGIDI permitiu discriminar os genótipos industriais quanto à proximidade ao ideótipo definido com base em massa do fruto, AA, AT e relação AA/SS (Figura 5). O método considera simultaneamente múltiplos caracteres, permitindo seleção equilibrada dos genótipos em relação ao perfil industrial desejado (Olivoto e Nardino, 2021). O genótipo PROG 195 apresentou menor distância ao ideótipo, destacando-se pelos elevados valores relativos de AA e AT. Esses atributos estão diretamente relacionados ao uso industrial da acerola, uma vez que elevados teores de vitamina C aumentam o rendimento de processamento, enquanto a acidez contribui para estabilidade da matéria-prima e qualidade tecnológica dos produtos derivados (Moura et al., 2018).

Os genótipos Monami e Junko apresentaram bom desempenho para massa e relação AA/SS, porém menor contribuição do ácido ascórbico, resultando em maior distância ao ideótipo. Os demais genótipos apresentaram desempenho desequilibrado entre os caracteres avaliados, evidenciando que a aptidão industrial depende do desempenho simultâneo dos atributos químicos e físicos. De modo geral, o MGDI priorizou genótipos com elevada concentração de vitamina C, adequada acidez e maior rendimento de fruto, destacando o genótipo PROG 195 como material mais promissor para processamento industrial da acerola.

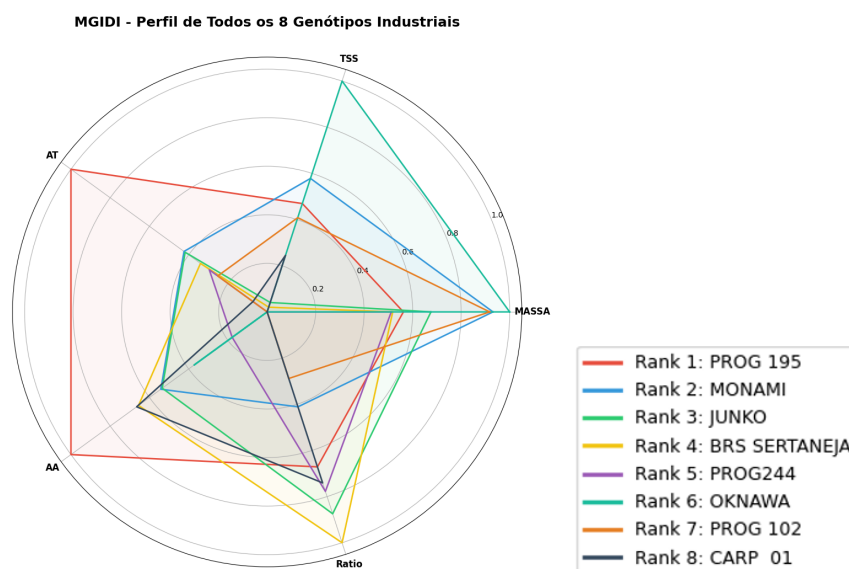


Figura 5 - Perfil multicaracterístico dos genótipos industriais segundo o índice MGIDI. O gráfico radar apresenta o desempenho relativo dos oito genótipos para os caracteres avaliados (massa, TSS, AT, AA e ratio AA/SS), considerando a direção desejada de seleção. Genótipos com menor MGIDI apresentam maior proximidade ao ideótipo. **Fonte: Autora, 2026.**

Dinâmica produtiva mensal e desempenho agrônômico dos genótipos para uso industrial

A produção mensal média por planta evidenciou um padrão sazonal bem definido, com picos produtivos concentrados em determinados períodos do ano e intervalos sem produção entre os ciclos (Figura 6). Esse comportamento também é sintetizado na Tabela 3, que apresenta a produção total média por planta, os meses produtivos, o pico produtivo e o mês correspondente para cada genótipo avaliado. Esse padrão é consistente com a dinâmica fenológica da aceroleira, espécie capaz de apresentar múltiplos eventos de floração e frutificação ao longo do ano em condições tropicais, especialmente quando cultivada sob irrigação (Mohammed, 2011; Mezadri et al., 2006).

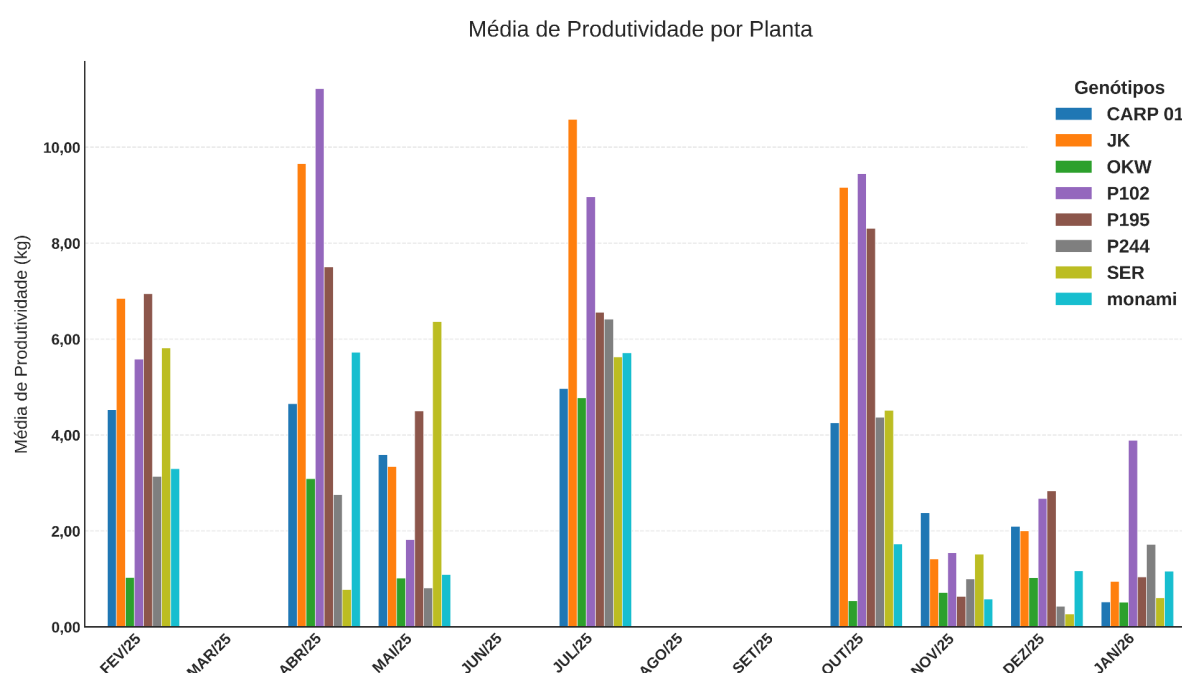


Figura 6 - Produção média mensal de frutos (kg planta^{-1}) dos genótipos Carp 01, Junko (JK), Okinawa (OKW), P102, P195, P244, BRS Sertaneja (SER) e Monami avaliados no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Vale do Submédio do São Francisco, de fevereiro de 2025 a janeiro de 2026. **Fonte: Autora, 2026.**

Tabela 3 - Desempenho produtivo anual e dinâmica de produção mensal de genótipos de aceroleira avaliados no Vale do Submédio do São Francisco.

Genótipo	Produção total média (kg/planta/ano)	Meses produtivos (n)	Meses produtivos	Pico produtivo (kg/planta/mês)	Mês do pico
PROG 102	45,14	8	Fev; Abr; Mai; Jul; Out; Nov; Dez; Jan	11,22	abr./25
JUNKO	43,96	8	Fev; Abr; Mai; Jul; Out; Nov; Dez; Jan	10,58	jul./25
PROG 195	38,33	8	Fev; Abr; Mai; Jul; Out; Nov; Dez; Jan	8,31	out./25
Carp 01	27,00	8	Fev; Abr; Mai; Jul; Out; Nov; Dez; Jan	4,97	jul./25
BRS SERTANEJA	25,34	8	Fev; Abr; Mai; Jul; Out; Nov; Dez; Jan	6,37	mai./25
PROG 244	20,65	8	Fev; Abr; Mai; Jul; Out; Nov; Dez; Jan	6,42	jul./25
MONAMI	20,47	8	Fev; Abr; Mai; Jul; Out; Nov; Dez; Jan	5,73	abr./25
OKINAWA	12,72	8	Fev; Abr; Mai; Jul; Out; Nov; Dez; Jan	4,78	jul./25

Produção total média por planta ($\text{kg planta}^{-1} \text{ano}^{-1}$), número de meses produtivos, meses de ocorrência de produção, pico produtivo mensal ($\text{kg planta}^{-1} \text{mês}^{-1}$) e respectivo mês de ocorrência para genótipos de aceroleira avaliados no período de fevereiro de 2025 a janeiro de 2026. A produção total corresponde à soma das médias mensais de produção por planta ao longo do ciclo produtivo. O pico produtivo foi definido como o maior valor médio mensal observado para cada genótipo. Todos os genótipos apresentaram oito meses com produção ao longo do ciclo, evidenciando padrão de frutificação intermitente típico da cultura. **Fonte: Autora, 2026**

Qualidade de frutos destinados ao consumo in natura

A variabilidade observada entre genótipos e safras para os atributos físico-químicos avaliados evidencia ampla divergência fenotípica entre os materiais destinados ao consumo in natura (Tabela 4). Para esse segmento, a qualidade comercial está associada principalmente ao tamanho do fruto, teor de SS, equilíbrio doce-ácido e aparência visual, atributos diretamente relacionados à aceitação do consumidor. (Moura, 2018).

A massa foi o atributo de maior amplitude entre safras, evidenciando sensibilidade do crescimento às condições de cultivo. Na Safra 1, MORENA apresentou a maior massa (8,10 g), seguida por MULATA (7,43 g) e PROG 216 (6,79 g), enquanto LAG 01 (4,55 g) e FLORIDA SWEET (4,71 g) apresentaram menores valores. Na Safra 2 houve redução expressiva em alguns genótipos, especialmente AC 17 (3,50 g) e PROG 216 (4,76 g), sugerindo influência da instabilidade hídrica durante o desenvolvimento. A expansão celular, determinante do tamanho final do fruto, depende do turgor e do suprimento de água (Taiz et al., 2017). Com a irrigação estabilizada na Safra 3, observou-se incremento generalizado, destacando-se COSTA RICA (9,24 g), BV 01 (8,05 g) e MULATA (8,01 g), indicando recuperação do crescimento. Os valores obtidos situam-se dentro da amplitude reportada por Farinelli et al. (2021), que avaliaram 103 genótipos de acerola e observaram massas variando de 1,53 a 8,85 g em frutos maduros, indicando coerência dos resultados com a variabilidade fenotípica descrita para a cultura.

Os teores de SS apresentaram menor variação entre safras em comparação à massa dos frutos. LAG 01 manteve elevados teores ao longo dos três ciclos (10,80; 9,27 e 10,60 °Brix), assim como FLORIDA SWEET (10,27; 9,77 e 9,50 °Brix), evidenciando estabilidade desse atributo mesmo sob oscilações ambientais. Os valores obtidos foram compatíveis com a faixa reportada para frutos maduros de acerola (Farinelli et al., 2021). A ausência de incremento consistente de SS na Safra 1 indica que a instabilidade hídrica não promoveu concentração sistemática de açúcares, sugerindo menor sensibilidade desse atributo às variações ambientais nas condições avaliadas (Batista-Silva et al., 2018; Famiani et al., 2015).

Tabela 4 - Médias dos atributos físico-químicos de frutos de acerola por genótipo e safra.

	Genótipo	Massa (g)	Índice	SS (°Brix)	AT (%)	SS/AT	AA (mg/100g)	Hue (°)
SAFRA 1	AC 17	5,80 CD b	0,76 D a	9,00 BC a	1,05 C b	8,79 CD a	1055,56 BC b	30,50 ABC a
	BV 01	6,28 BC b	0,88 CD a	8,07 CD a	1,12 BC ab	7,21 CDE ab	944,44 BC b	35,98 A a
	COSTA RICA	6,64 BC b	0,96 AB b	7,53 D a	1,09 BC b	6,94 DE a	1055,55 BC a	21,31 DE a
	FLORIDA SWEET	4,71 D a	0,80 CD a	10,27 AB a	0,83 CD a	12,43 B a	777,78 BC a	27,38 BCD a
	LAG 01	4,55 D b	0,77 D ab	10,80 A a	1,06 BC ab	10,14 BC a	638,89 BC a	22,98 CDE a
	MORENA	8,10 A ab	1,05 A b	8,03 CD a	1,12 BC b	7,22 CDE a	777,78 BC a	24,37 BCD a
	MULATA	7,43 AB a	0,95 AB a	7,17 D ab	1,02 C ab	7,09 DE a	888,89 BC b	25,91 BCD a
	PROG 216	6,79 ABC a	1,02 A b	6,83 D b	1,95 A b	3,51 F a	2166,67 A a	31,50 AB a
	PROG 52	5,40 CD b	0,89 CD a	7,03 D b	1,37 B a	5,17 EF a	1111,11 B a	15,91 E a
	RUBRA	5,96 CD b	0,78 D a	9,70 AB a	0,63 D b	16,10 A a	555,56 C b	19,85 DE a
SAFRA 2	AC 17	3,50 F c	0,94 BC b	7,93 CD b	1,38 B a	5,84 DE b	1222,22 A b	14,33 C b
	BV 01	6,03 BCD b	0,80 CD a	8,30 BC a	0,93 C b	8,98 BC a	897,44 AB b	33,06 A a
	COSTA RICA	6,31 BC b	0,82 CD a	8,47 ABC a	1,30 B ab	6,92 CD a	927,35 AB a	22,76 B a
	FLORIDA SWEET	4,88 CDEF a	0,97 A b	9,77 A a	0,79 C a	12,34 A a	544,87 B a	21,95 BC a
	LAG 01	4,37 EF b	0,82 CD b	9,27 AB b	0,93 C b	10,10 AB a	888,89 AB a	17,14 BC b
	MORENA	9,09 A a	0,91 AB a	6,30 E b	1,75 A a	3,58 E b	1111,11 A a	23,88 B a
	MULATA	5,79 BCDE b	0,93 AB a	6,67 DE b	0,93 C b	7,19 BCD a	1282,05 A a	22,83 B ab
	PROG 216	4,76 DEF b	0,97 A b	7,43 CDE ab	1,52 AB c	4,90 DE a	1405,99 A b	16,41 BC b
	PROG 52	6,64 B a	0,95 AB a	7,40 CDE ab	1,41 B a	5,27 DE a	1410,26 A a	21,48 BC a
	RUBRA	4,40 EF c	0,76 D a	8,43 BC b	0,89 C a	9,52 ABC b	1025,64 AB a	22,05 BC a
SAFRA 3	AC 17	7,00 BC a	0,91 AB b	8,90 BCD ab	1,49 BC a	5,97 DE b	1759,26 AB a	16,59 A b
	BV 01	8,05 AB a	0,80 CD a	7,83 CDE a	1,32 BCD a	5,92 DE b	1481,48 ABC a	17,99 A b
	COSTA RICA	9,24 A a	0,91 AB ab	8,40 BCDE a	1,37 BCD a	6,15 CDE a	1080,25 CDE a	21,31 A a
	FLORIDA SWEET	5,13 D a	1,03 A b	9,50 AB a	0,86 G a	11,04 A a	771,60 DE a	21,95 A a
	LAG 01	6,55 CD a	0,73 D a	10,60 A a	1,18 DEF a	9,03 ABC a	771,60 DE a	19,07 A ab
	MORENA	7,67 BC b	0,96 AB ab	7,27 E ab	0,93 EFG b	7,85 BCD a	802,47 DE a	21,59 A a
	MULATA	8,01 AB a	0,95 AB a	7,67 DE a	1,23 CDE a	6,25 CDE a	1296,30 BCD a	18,64 A b
	PROG 216	7,48 BC a	0,87 CD a	7,87 CDE a	2,30 A a	3,43 E a	1851,85 A a	21,30 A b
	PROG 52	6,34 CD ab	0,92 AB a	8,27 BCDE a	1,54 B a	5,37 DE a	1141,97 CDE a	15,91 A a
	RUBRA	7,64 BC a	0,76 D a	9,10 BC ab	0,86 FG a	10,55 AB b	648,15 E ab	19,85 A a

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas (comparação entre genótipos) e minúsculas nas linhas (comparação entre safras), não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As variáveis Índice, TSS, AT, SS/AT, e Hue foram analisadas via Aligned Rank Transform (ART) devido à não observância dos pressupostos de normalidade e/ou homogeneidade de variâncias. **Fonte: Autora, 2026.**

A AT apresentou incremento na Safra 3 para diversos genótipos, destacando-se PROG 216 (1,95 → 2,30%) e PROG 52 (1,37 → 1,54%), enquanto FLORIDA SWEET manteve baixos valores ao longo dos ciclos (0,83; 0,79; 0,86%). O aumento observado sugere efeito sazonal, uma vez que temperaturas mais amenas durante a maturação podem reduzir o catabolismo respiratório de ácidos orgânicos, favorecendo maior acidez residual nos frutos (Famiani et al., 2015; Batista-Silva et al., 2018). Valores semelhantes foram reportados por Vilvert (2024b), embora amplitudes ligeiramente superiores tenham sido registradas na Safra 3, indicando maior resposta dos genótipos às condições ambientais.

A relação SS/AT apresentou variação entre safras, refletindo principalmente alterações na acidez titulável. FLORIDA SWEET manteve valores elevados e estáveis ao longo dos ciclos (12,43; 12,34; 11,04), caracterizando perfil sensorial consistente para consumo in natura. Em contraste, MORENA apresentou redução expressiva na Safra 2 (7,22 → 3,58), associada ao aumento da acidez, enquanto RUBRA exibiu maior relação SS/AT na Safra 1 (16,10), com redução nas safras subsequentes (9,52; 10,55). Como os sólidos solúveis apresentaram menor amplitude entre ciclos, as oscilações da relação SS/AT foram predominantemente determinadas pela modulação dos ácidos orgânicos. Esse comportamento confirma que a relação SS/AT constitui parâmetro mais representativo da qualidade sensorial do que a avaliação isolada dos teores de SS ou da AT (Cavalcante et al., 2007; Ribeiro; Freitas, 2020).

O teor de AA apresentou alteração no ranqueamento genotípico entre safras. PROG 216 destacou-se pelos maiores teores nas três avaliações (2167; 1406; 1852 mg 100 g⁻¹), enquanto Rubra apresentou os menores valores na Safra 1 (556 mg 100 g⁻¹). Em vários genótipos, observou-se aumento dos teores de ácido ascórbico na Safra 3, indicando que o aumento da vitamina C não esteve diretamente associado ao período de maior instabilidade hídrica. A literatura descreve que o acúmulo de ácido ascórbico em acerola depende fortemente do genótipo, estágio de maturação e ambiente de cultivo (Vendramini; Trugo, 2000; Moura et al., 2018), padrão compatível com a elevada variação observada.

O índice de formato apresentou pouca variação entre as safras, o que demonstra estabilidade na conformação dos frutos entre os genótipos avaliados. Valores abaixo de 1 indicam frutos com formato achatado. A pequena variação observada ao longo dos ciclos sugere que esse caráter esteve mais associado às diferenças genéticas entre os materiais do que às variações nas condições de cultivo.

O ângulo Hue apresentou redução média do verão para o inverno, indicando alteração na tonalidade dos frutos maduros entre ciclos produtivos. AC 17 apresentou elevada variação ($30,5^\circ$; $14,3^\circ$; $16,6^\circ$), enquanto COSTA RICA manteve valores mais estáveis ($21,3^\circ$; $22,8^\circ$; $21,3^\circ$). Como o Hue representa mudanças na expressão de pigmentos (Pathare et al., 2012), tais oscilações indicam influência ambiental sobre a uniformidade de maturação e aparência comercial.

Repetibilidade dos caracteres de qualidade dos frutos

A análise de repetibilidade evidenciou diferenças na estabilidade fenotípica dos atributos de qualidade ao longo das safras (Tabela 5). O teor de SS ($r = 0,74$), a acidez titulável ($r = 0,70$) e a relação SS/AT ($r = 0,74$) apresentaram elevados coeficientes de repetibilidade, acompanhados de altas repetibilidades da média ($r_m \geq 0,87$) e acurácias seletivas ($A_{cm} \geq 0,93$), indicando predominância da variância fenotípica permanente sobre a variância ambiental temporária. Coeficientes de repetibilidade mais próximos de 1 indicam maior constância do desempenho genotípico ao longo das medições, aumentando a confiabilidade da seleção com número reduzido de avaliações (Resende, 2002).

Para massa fresca ($r = 0,56$), índice de formato ($r = 0,52$) e AA ($r = 0,60$), observou-se repetibilidade moderada, com acurácias entre 0,88 e 0,91, sugerindo influência ambiental intermediária e possível reordenamento parcial dos genótipos entre safras. Em contraste, o Hue apresentou baixa repetibilidade ($r = 0,26$), associada à maior contribuição da variância ambiental temporária ($V_{et} > V_{fp}$), evidenciando elevada sensibilidade da coloração às condições sazonais, especialmente variações térmicas e luminosas que influenciam a síntese e degradação de pigmentos (Batista-silva et al., 2018). Assim, enquanto SS, AT e SS/AT demonstraram maior estabilidade e maior potencial para seleção precoce, o Hue revelou maior dependência ambiental, exigindo maior número de avaliações para aumento da precisão seletiva (Resende, 2002).

Tabela 5 - Componentes de variância e parâmetros de repetibilidade estimados para os caracteres de qualidade dos frutos de acerola obtidos pelo método REML/BLUP (Modelo 63 – Selegen).

Características	Vfp	Vet	Vip	r ± SE	rm	Acm
Massa	10,297	8,062	18,359	0,56 ± 0,22	0,79	0,89
IF	94	86	180	0,52 ± 0,21	0,77	0,88
SS	11,489	3,997	15,486	0,74 ± 0,26	0,90	0,95
TA	1,005	438	1,444	0,70 ± 0,25	0,87	0,93
SS/AT	70,479	25,047	95,526	0,74 ± 0,26	0,89	0,95
AA	99471,42	65594,07	165065,49	0,60 ± 0,23	0,82	0,91
Hue	69,102	201,281	270,384	0,26 ± 0,15	0,51	0,71

Vfp: variância fenotípica permanente entre plantas; Vet: variância ambiental temporária entre avaliações (safras); Vip: variância fenotípica individual total; r: coeficiente de repetibilidade individual ($\pm$ erro-padrão); rm: repetibilidade da média das avaliações; Acm: acurácia seletiva baseada na média das medições. **Fonte: Autora, 2026**

Análise multivariada dos atributos de qualidade dos frutos

A ACP (Figura 7) permitiu sintetizar a variação conjunta dos atributos avaliados em frutos maduros destinados ao consumo in natura, explicando 63,6% da variabilidade total nos dois primeiros componentes principais (Dim1 = 48,1% e Dim2 = 15,5%). O primeiro componente esteve principalmente associado aos teores de SS, relação SS/AT e índice de formato, enquanto o segundo componente apresentou maior contribuição do ângulo Hue e da massa dos frutos, evidenciando separação entre atributos relacionados à qualidade sensorial e características estruturais.

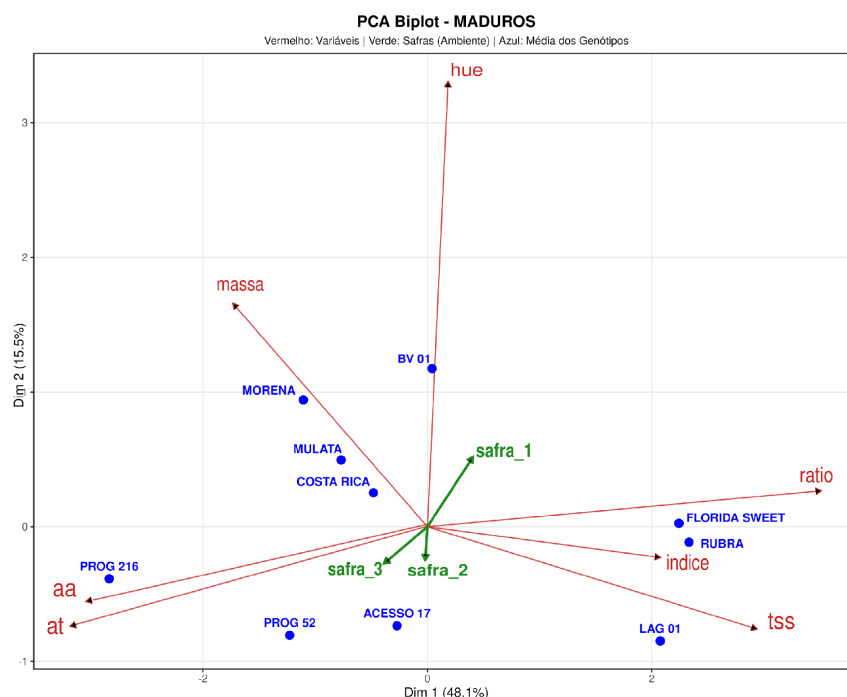


Figura 7 - Biplot da análise de componentes principais (ACP) dos atributos de qualidade dos frutos de acerola. Setas vermelhas representam as variáveis, setas verdes as safras e pontos azuis as médias dos genótipos. Dim 1 e Dim 2 explicam 48.1% e 15.5% da variância total, respectivamente. **Fonte:** Autora, 2026.

Os genótipos FLORIDA SWEET, RUBRA e LAG 01 posicionaram-se no sentido positivo do eixo principal, fortemente associados a elevados valores de SS e relação SS/AT, indicando perfil mais relacionado ao equilíbrio doce-ácido desejável para consumo fresco. Esse padrão confirma os resultados univariados e a elevada repetibilidade observada para esses atributos, demonstrando consistência na expressão fenotípica entre safras. Em contraste, PROG 216 apresentou associação com maiores teores de ácido ascórbico e acidez titulável, caracterizando perfil mais relacionado ao valor nutricional do que ao equilíbrio sensorial. Já MORENA, MULATA e COSTA RICA agruparam-se próximos ao vetor massa, indicando maior contribuição de atributos físicos, sem associação direta com os parâmetros gustativos predominantes para consumo in natura. A distribuição das safras próximas à origem do biplot indica reduzida contribuição da variação ambiental na discriminação dos genótipos maduros, corroborando os resultados de repetibilidade que evidenciaram maior estabilidade fenotípica para SS, AT e relação SS/AT, sugerindo predominância do efeito genotípico na estrutura multivariada observada.

O dendrograma multivariado (Figura 8) confirmou a formação de grupos distintos de desempenho, separando FLORIDA SWEET, RUBRA e LAG 01 em agrupamento

caracterizado por maior associação com atributos sensoriais, enquanto PROG 216, AC 17 e PROG 52 formaram grupo relacionado a maiores valores de acidez e AA. Genótipos intermediários, como COSTA RICA, MULATA e MORENA, apresentaram perfil balanceado entre atributos físicos e químicos.

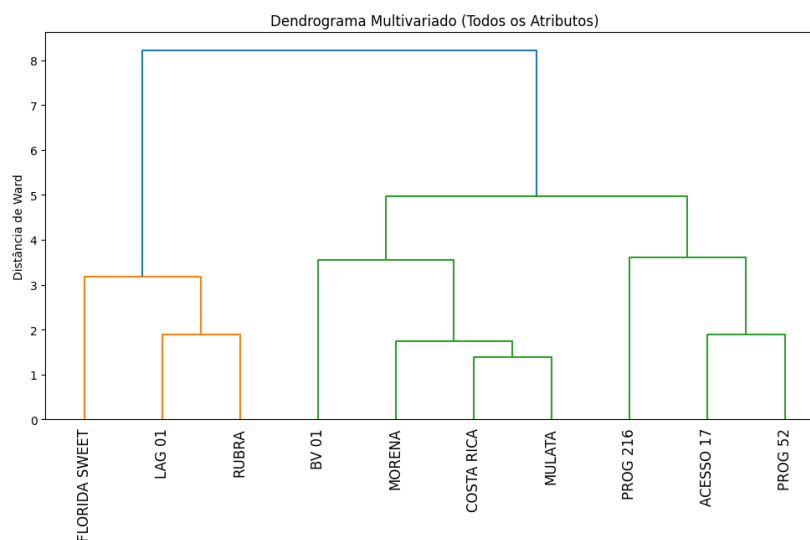


Figura 8 – Dendrograma de agrupamento hierárquico dos genótipos destinados ao consumo in natura, baseado na distância euclidiana e método de Ward. A altura dos ramos indica o grau de dissimilaridade entre os grupos formados. **Fonte: Autora 2026.**

O Mapa de calor (Figura 9) reforçou esse padrão ao evidenciar simultaneamente elevados valores padronizados de SS e relação SS/AT para RUBRA, LAG 01 e FLORIDA SWEET, enquanto PROG 216 concentrou maiores intensidades para AT e ácido ascórbico. A concordância entre ACP, agrupamento hierárquico e mapa de calor demonstra robustez na identificação dos padrões fenotípicos de qualidade entre genótipos.

Heatmap Genótipo-Atributo (Escala Padronizada 0-1)

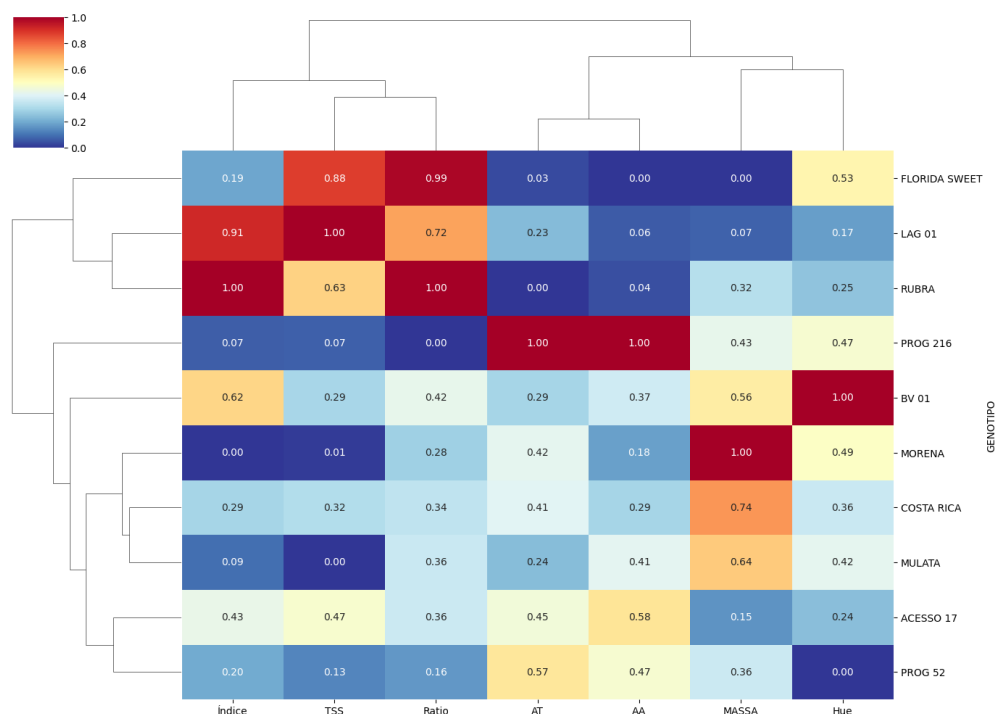


Figura 9 - Heatmap do desempenho relativo dos genótipos para os atributos de qualidade dos frutos, com dados padronizados (0–1). As cores indicam menor (azul) e maior (vermelho) magnitude dos caracteres, e os dendrogramas representam o agrupamento hierárquico de genótipos e variáveis. **Fonte: Autora 2025**

Seleção multicaracterística de genótipos in natura pelo índice MGIDI

O índice MGIDI (Figura 10) permitiu integrar simultaneamente os atributos físico-químicos e visuais avaliados, classificando os genótipos quanto à proximidade ao ideótipo estabelecido para consumo in natura. O ranqueamento indicou RUBRA como o genótipo de melhor desempenho global, destacando-se pela elevada relação SS/AT e teores de SS, associados à acidez moderada, refletindo melhor equilíbrio doce-ácido. COSTA RICA apresentou perfil balanceado entre massa, SS e AT, enquanto AC 17 destacou-se pelo maior teor de AA, agregando valor nutricional, embora com desempenho intermediário para os atributos sensoriais integrados. Genótipos como LAG 01 e MULATA apresentaram bom desempenho para características específicas, porém sem combinação ideal entre todos os caracteres, enquanto PROG 216, apesar do elevado teor de AA, apresentou maior AT e menor relação SS/AT, reduzindo sua adequação ao perfil sensorial esperado. De forma integrada, o MGIDI confirmou que a superioridade para o mercado fresco está associada ao equilíbrio

entre SS, AT e relação SS/AT, corroborando os resultados das análises univariadas, de repetibilidade e da ACP, e indicando RUBRA, seguida por COSTA RICA e AC 17, como os genótipos de maior potencial para consumo in natura.

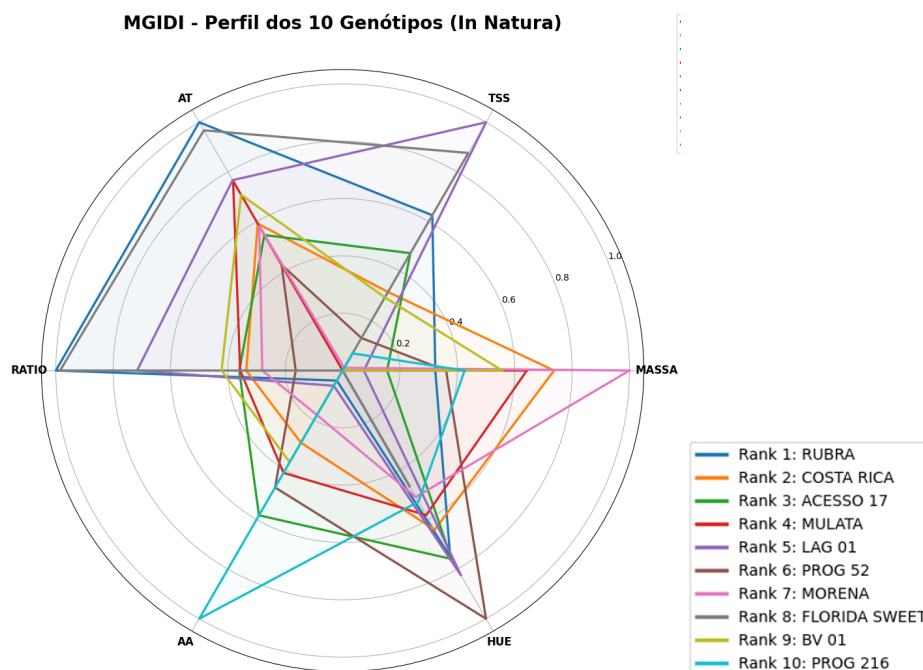


Figura 10 - Perfil multicaracterístico dos genótipos destinados ao consumo in natura segundo o índice MGIDI. O gráfico radar apresenta o desempenho relativo para os caracteres avaliados, considerando a direção desejada de seleção. Genótipos com menor MGIDI apresentam maior proximidade ao ideótipo. **Fonte: Autora, 2026**

Dinâmica produtiva mensal e desempenho agrônômico dos genótipos para consumo in natura

A produção mensal média por planta evidenciou padrão sazonal bem definido, com picos produtivos concentrados em determinados períodos do ano e intervalos com baixa ou ausência de produção (Figura 11). Esse comportamento é típico da aceroleira cultivada em regiões tropicais e está associado à dinâmica fenológica da espécie, que apresenta sucessivos ciclos de floração e frutificação ao longo do ano quando as condições ambientais e de manejo são favoráveis (Mezadri et al., 2006; Mohammed, 2011). A síntese do desempenho produtivo dos genótipos encontra-se apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Desempenho produtivo anual e dinâmica de produção mensal de genótipos de aceroleira avaliados no Vale do Submédio do São Francisco.

Genótipo	Produção total média (kg/planta/ano)	Meses produtivos (n)	Meses produtivos	Pico produtivo (kg/planta/mês)	Mês do pico
PROG 52	38,62	10	Fev/ Mar/ Abr/ Mai/ Jul/ Set/ Out/ Nov/ Dez/ Jan/26	9,38	out./25
COSTA RICA	31,69	9	Fev/ Mar/ Abr/ Mai/ Jul/ Out/ Nov/ Dez/ Jan/26	7,83	fev./25
PROG 216	28,33	9	Fev/ Mar/ Abr/ Mai/ Jul/ Out/ Nov/ Dez/ Jan/26	6,40	fev./25
RUBRA	25,53	10	Fev/ Mar/ Abr/ Mai/ Jul/ Set/ Out/ Nov/ Dez/ Jan/26	5,31	abr./25
BV	20,00	9	Fev/ Mar/ Abr/ Mai/ Jul/ Out/ Nov/ Dez/ Jan/26	5,83	out./25
MULATA	12,67	7	Fev/ Mar/ Abr/ Jul/ Out/ Nov/ Dez/25	3,36	fev./25
MORENA	12,37	9	Fev/ Mar/ Abr/ Mai/ Jul/ Out/ Nov/ Dez/ Jan/26	2,96	out./25
LAG 01	9,49	9	Fev/ Mar/ Abr/ Jul/ Set/ Out/ Nov/ Dez/ Jan/26	2,85	jul./25
FLORIDA SWEET	09,01	9	Fev/ Mar/ Abr/ Mai/ Jul/ Out/ Nov/ Dez/ Jan/26	1,81	out./25
AC 17	7,41	6	Abr/ Mai/ Jul/ Out/ Nov/ Dez	2,63	jul./25

Produção total média por planta ($\text{kg planta}^{-1} \text{ano}^{-1}$), número de meses produtivos, meses de ocorrência de produção, pico produtivo mensal ($\text{kg planta}^{-1} \text{mês}^{-1}$) e respectivo mês de ocorrência para genótipos de aceroleira avaliados no período de fevereiro de 2025 a janeiro de 2026. A produção total corresponde à soma das médias mensais de produção por planta ao longo do ciclo produtivo. O pico produtivo foi definido como o maior valor médio mensal observado para cada genótipo. Todos os genótipos apresentaram oito meses com produção ao longo do ciclo, evidenciando padrão de frutificação intermitente típico da cultura. **Fonte: Autora, 2026**

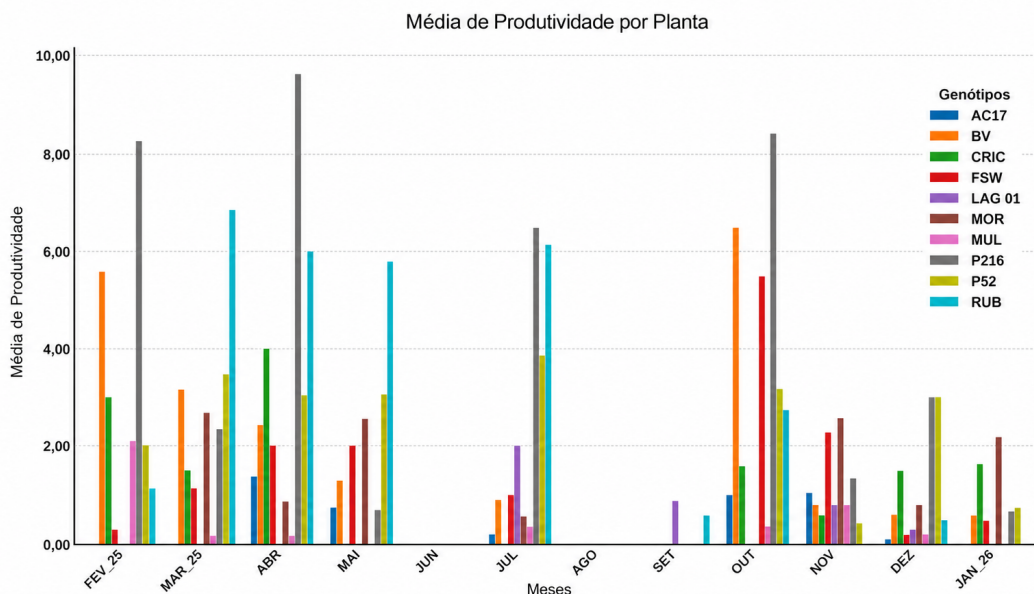


Figura 11 - Produção média mensal de frutos (kg planta^{-1}) dos genótipos AC 17 (AC17), BV, Costa Rica (CRIC), Florida Sweet (FSW), LAG 01, Morena (MOR), Mulata (MUL), PROG 216 (P216), PROG 52 (P52) E Rubra (RUB), avaliados no BAG de aceroleira da Embrapa Semiárido, Vale do Submédio do São Francisco, de fevereiro de 2025 a janeiro de 2026. **Fonte:** Autora, 2026.

Observou-se elevada variabilidade produtiva entre os genótipos avaliados, com diferenças expressivas na produção total anual e na intensidade dos picos produtivos (Tabela 3.6). Essa variação reflete a ampla diversidade genética existente na aceroleira para características produtivas e de qualidade de frutos, aspecto amplamente documentado em estudos de caracterização de germoplasma da espécie (Farinelli et al., 2021).

Os valores de produtividade anual observados neste estudo ($\approx 7,41\text{--}38,62 \text{ kg planta}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) situam-se dentro ou acima da faixa relatada na literatura para aceroleiras cultivadas sob irrigação, na qual produções entre aproximadamente $2,0$ e $27,1 \text{ kg planta}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ são frequentemente reportadas em sistemas com múltiplas colheitas anuais (Mohammed, 2011). Em condições comerciais de cultivo irrigado, produtividades médias de 25 t ha^{-1} , podendo atingir até 60 t ha^{-1} , também foram relatadas para pomares no Vale do Submédio do São Francisco (Barboza et al., 2012).

A análise conjunta da produção mensal (Figura 3.11) e das condições climáticas indica que os picos produtivos não estiveram diretamente associados à precipitação mensal, sugerindo maior influência do manejo hídrico por irrigação na manutenção da produção. Em

sistemas irrigados, a disponibilidade hídrica contínua favorece o pegamento de flores e frutos e permite a ocorrência sucessiva de ciclos produtivos ao longo do ano (Mohammed, 2011; Mezdari et al., 2006).

Para genótipos destinados ao mercado in natura, além da produtividade total, a regularidade de produção ao longo do ano constitui característica desejável, pois contribui para maior estabilidade na oferta de frutos ao mercado fresco. Assim, genótipos com maior produção média por planta e maior distribuição da produção ao longo dos meses avaliados apresentam maior potencial para sistemas de produção voltados ao consumo in natura, devendo ser avaliados em conjunto com atributos de qualidade dos frutos (Farinelli et al., 2021; Mezdari et al., 2006).

CONCLUSÃO

Os genótipos avaliados apresentaram ampla variabilidade para atributos de qualidade e produtividade, evidenciando potencial para diferentes segmentos de mercado. Para uso industrial, o PROG 195 destacou-se pelo elevado teor de ácido ascórbico, alta relação AA/SS, frutos de bom tamanho e alta produtividade, ocupando a primeira posição no índice MGIDI. Para consumo in natura, Florida Sweet, Rubra e LAG 01 apresentaram maiores teores de sólidos solúveis e melhor equilíbrio entre açúcares e acidez. Entre esses, Rubra mostrou-se o genótipo mais promissor por combinar qualidade sensorial, produtividade intermediária e produção distribuída ao longo de aproximadamente dez meses do ano. Assim, PROG 195 e Rubra foram os materiais mais promissores para os segmentos industrial e in natura, respectivamente, com elevado potencial para recomendação comercial e uso em programas de melhoramento genético.

REFERÊNCIAS

- ALVES, R.E. et al. Brazilian experience on the handling of acerola fruits for international trade: harvest and postharvest recommendations. *Acta Horticulturae*, v. 485, p. 31–36, 1999.
- AOAC. *Official methods of analysis*. 19. ed. Gaithersburg: AOAC International, 2012.

- ARAÚJO, J.F. et al. *Manual técnico sobre mercados e canais de comercialização de culturas agrícolas no Submédio São Francisco*. Bookerfield Editora, 2022.
- BARBOZA, A.A.T.; SOUZA, F.V.D.; LIMA, M.A.C. *A cultura da aceroleira no Vale do São Francisco*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2012.
- BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, v. 26, n. 2, p. 211–243, 1964.
- CARRINGTON, C.M.S.; KING, R.A. Fruit development and ripening in acerola (*Malpighia emarginata*). *Acta Horticulturae*, 2002.
- CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. *Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio*. 2. ed. Lavras: UFLA, 2005.
- COUCEIRO, E.M. *Curso de extensão sobre o cultivo da acerola*. Recife: UFRPE, 1985.
- DELVA, L.; SCHNEIDER, R.G. Acerola (*Malpighia emarginata* DC): production, postharvest handling, nutrition, and biological activity. *Food Reviews International*, v. 29, n. 2, p. 107–126, 2013.
- DHILLON, B.S.; SINGH, S.N.; KUNDAL, G.S. Studies on the developmental physiology of guava fruit (*Psidium guajava* L.). II. Biochemical characters. *Punjab Horticultural Journal*, v. 27, n. 3/4, 1990.
- ESTEVAM, M.I.F. et al. Físico-química de variedades de acerola em dois estádios de maturação. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 13, n. 4, p. 459–465, 2018.
- FAN, C. et al. Integrative genome-wide association study and transcriptomic analyses unveil key candidate genes regulating fruit shape diversity in mango. *Scientia Horticulturae*, v. 358, p. 114677, 2026.
- FARINELLI, D. et al. Variability of fruit quality among 103 acerola (*Malpighia emarginata* DC.) phenotypes from the subtropical region of Brazil. *Agriculture*, v. 11, n. 11, p. 1078, 2021.

- FRANÇA, L.G. Indicação de clones de acerola visando a qualidade de frutos verdes para processamento. 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Instituto Federal do Ceará, Limoeiro do Norte, 2016.
- FREIRE, J.L.O. et al. Características físicas de frutos de acerola cultivada em pomares de diferentes microrregiões do estado da Paraíba. *Agropecuária Técnica*, v. 27, n. 2, 2006.
- HOEHN, E. et al. Consumer expectations and soluble solids, acidity and firmness of plums (*Prunus domestica*). *Acta Horticulturae*, v. 682, p. 665–672, 2005.
- JOHNSON, N.L. Systems of frequency curves generated by methods of translation. *Biometrika*, v. 36, n. 1–2, p. 149–176, 1949.
- KAYS, S.J. *Postharvest physiology of perishable plant products*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- LOPES, R. et al. Repetibilidade de características do fruto de aceroleira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 3, p. 507–513, 2001.
- MACIEL, M.I.S. et al. Caracterização físico-química de frutos de genótipos de aceroleira (*Malpighia emarginata* DC.). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 30, n. 4, p. 865–869, 2010.
- MEZADRI, T. et al. Acerola fruit: composition, productive characteristics and economic importance. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, v. 56, n. 2, p. 101–109, 2006.
- MOHAMMED, M. Acerola (*Malpighia emarginata* DC.). In: YAHIA, E.M. (ed.). *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. p. 65–75.
- MOSCOSO, C.G. West Indian cherry: richest known source of natural vitamin C. *Economic Botany*, v. 10, n. 3, 1956.
- MOURA, C.F.H. et al. Acerola – *Malpighia emarginata*. In: *Exotic Fruits*. Academic Press, 2018. p. 7–14.
- NOGUEIRA, R.J.M.C. et al. Comportamento estomático e potencial da água da folha em três genótipos de acerola sob tratamentos hídricos. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 24, n. 1, p. 236–240, 2002.

PATHARE, P.B.; OPARA, U.L.; AL-SAID, F.A. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology*, v. 6, n. 1, p. 36–60, 2013.

PIO, R. *O cultivo da acerola*. Piracicaba: ESALQ, 2003.

RESENDE, M.D.V. *Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002.

RITZINGER, R.; RITZINGER, C.H.S.P. Acerola. In: DONADIO, L.C. *Frutas brasileiras*. Jaboticabal: FUNEP, 2011.

RITZINGER, R.; RITZINGER, C.H.S.P. *Acerola: aspectos gerais da cultura*. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2011.

SALUNKHE, D.K.; DESAI, B.B. *Postharvest biotechnology of fruits*. Boca Raton: CRC Press, 1984.

SILVEIRA, G.C.D. et al. Acerola: detalhes do cultivo no Brasil. *Campo & Negócio*, 2020. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br>. Acesso em: 20 abr. 2025.

SOUZA, F.F. et al. *Contribuições das pesquisas realizadas na Embrapa Semiárido para a cultura da aceroleira*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2017.

SPINELLI, V.M. et al. Repeated measures and minimum number of harvests required for selection in physic nut (*Jatropha curcas* L.). *Industrial Crops and Products*, v. 67, p. 498–503, 2015.

STROHECKER, R.; HENNING, H.M. *Análises de vitaminas: métodos comprovados*. Madrid: Paz Montalvo, 1967.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.M.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

VENDRAMINI, A.L.; TRUGO, L.C. Chemical composition of acerola fruit (*Malpighia puniceifolia* L.) at three stages of maturity. *Food Chemistry*, v. 71, p. 195–198, 2000.

VILVERT, J.C. et al. Genetic parameters and repeatability of postharvest quality traits in acerola. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 46, e70807, 2024.

VILVERT, J.C. et al. Artificial neural networks reveal genetic diversity in acerola (*Malpighia emarginata* DC.) based on fruit quality traits. 2024.

APÊNDICE

Apêndice 1 - Croqui esquemático da área experimental de clones de aceroleira, indicando a disposição espacial dos genótipos avaliados e linhas de plantio.

CROQUI DOS EXPERIMENTOS SELEÇÃO DE CLONES PARA CONSUMO IN NATURA E PROCESSAMENTO INDUSTRIAL															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	RUB RUB	CAB CAB	MUL MUL	MOR MOR	TROP TROP	CRIC CRIC	BV01 BV01	FSW FSW	UE3 UE3	OLI OLI	P52 P52	P69 P69	P216 P216	AC17 AC17	LAG01 LAG01
2	CRIC CRIC	BV01 BV01	FSW FSW	UE3 UE3	OLI OLI	P216 P216	AC17 AC17	P52 P52	P69 P69	LAG01 LAG01	TROP TROP	MUL MUL	CAB CAB	RUB RUB	MOR MOR
3	P52 P52	P69 P69	P216 P216	AC17 AC17	LAG01 LAG01	RUB RUB	CAB CAB	MUL MUL	MOR MOR	TROP TROP	UE3 UE3	BV01 BV01	OLI OLI	FSW FSW	CRIC CRIC
1	SER SER	MON MON	JNK JNK	OKW OKW	CARP1 CARP1	AC3 AC3	P23 P23	APO APO	P102 P102	P122 P122	P142 P142	P188 P188	P195 P195	ALHA5 ALHA5	P244 P244
2	AC3 AC3	P23 P23	APO APO	P102 P102	P122 P122	P188 P188	ALHA5 ALHA5	P195 P195	P142 P142	P244 P244	CARP1 CARP1	JNK JNK	17 17	SER SER	OKW OKW
3	P142 P142	P188 P188	P195 P195	ALHA5 ALHA5	P244 P244	SER SER	MON MON	JNK JNK	OKW OKW	CARP1 CARP1	P102 P102	P23 P23	P122 P122	APO APO	AC3 AC3