

**PALMA FORRAGEIRA INTEGRAL COMO ALTERNATIVA
TECNOLÓGICA, NUTRICIONAL E FUNCIONAL À GORDURA EM
MUFFINS: Inovação na busca por produtos mais saudáveis**

**Bianca Rodrigues Morais^{1*}, Mateus Alves Araújo², Kaliston Aurélio Lomba³,
João Pedro da Silva Santos⁴, Polyanna Mara de Oliveira⁵, Tatiana Nunes Amaral⁶,
Nathália de Andrade Neves⁷, Marcio Schmiele⁸**

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri *campus* JK, Instituto de Ciência e Tecnologia, Diamantina, Minas Gerais, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5266-4428>. E-mail: bianca.morais@ufvjm.edu.br

² Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri *campus* JK, Instituto de Ciência e Tecnologia, Diamantina, Minas Gerais, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5363-7473>. E-mail: mateus.araujo@ufvjm.edu.br

³ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri *campus* JK, Instituto de Ciência e Tecnologia, Diamantina, Minas Gerais, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5070-2881>. E-mail: kaliston.lomba@ict.ufvjm.edu.br

⁴ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri *campus* JK, Instituto de Ciência e Tecnologia, Diamantina, Minas Gerais, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4427-2969>. E-mail: joao-pedro.santos@ufvjm.edu.br

⁵ Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Campo Experimental de Gorutuba, Nova Porteirinha, Minas Gerais, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9892-373X>. E-mail: polyanna.mara@epamig.br

⁶ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri *campus* JK, Instituto de Ciência e Tecnologia, Diamantina, Minas Gerais, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3967-0947>. E-mail: tatiana.amaral@ict.ufvjm.edu.br

⁷ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Instituto de Ciência e Tecnologia, Diamantina, Minas Gerais, Brasil, 39100-000. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6936-2171>. E-mail: nathalia.neves@ict.ufvjm.edu.br

⁸ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri *campus* JK, Instituto de Ciência e Tecnologia, Diamantina, Minas Gerais, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8830-1710>. E-mail: marcio.sc@ict.ufvjm.edu.br

RESUMO

Este estudo investigou os efeitos da substituição parcial da gordura de palma (0 a 50%) por purê integral de cladódios de palma forrageira em muffins, avaliando-se os parâmetros físico-químicos, tecnológicos e nutricionais. A substituição resultou massas menos aeradas, mas com textura mais macia e com melhores características de fluxo, resultando em melhorias significativas no volume específico, em uma estrutura mais leve, associadas à presença de mucilagem e emulsificantes. A atividade de água não foi afetada, demonstrando que a palma forrageira não compromete a estabilidade microbiológica dos produtos. A cor dos muffins sofreu alterações perceptíveis, com redução no índice de branqueamento e aumento no escurecimento do miolos, resultando em mudanças na tonalidade, as quais foram atribuídas à

presença de pigmentos naturais como clorofilas e carotenoides. Texturalmente, a firmeza do miolo diminuiu e a resiliência aumentou com a substituição da gordura, refletindo um miolo mais macio e elástico, efeito da maior retenção de umidade e presença de compostos hidrofílicos da palma. A análise multivariada evidenciou a distinção clara entre as formulações. A amostra padrão se associou às características como maior teor lipídico, firmeza e coloração clara, enquanto as substituições graduais da gordura se destacou por maior umidade, resiliência e escurecimento. A substituição da gordura de palma por purê integral de palma forrageira apresentou desempenho físico-químico, tecnológico e nutricional satisfatório. O mapa de calor reforçou essas tendências, indicando que níveis superiores de substituição oferecem melhorias nutricionais e funcionais sem comprometer a qualidade tecnológica do produto final.

Palavras-chave: Substituto de gordura; Qualidade tecnológica; Textura; Saudabilidade; Valor nutricional.

INTRODUÇÃO

A panificação é um dos setores alimentícios que mais vem crescendo nos últimos anos no Brasil. O faturamento deste setor chegou a atingir R\$91,94 bi em 2020 (Mari *et al.*, 2024). Dentre esses produtos temos o bolo, que tem grande destaque no Brasil, sendo que no ano de 2024 chegou a movimentar 2,65 bilhões de reais, seu recorde de faturamento, e uma produção anual que atingiu 63 mil toneladas (ABIMAPI, 2025). Considerando que em torno de 15% de uma formulação é de gordura no produto acabado, foram consumidos entre 9 e 10 mil toneladas de lipídeos neste setor.

Denomina-se como bolo um produto assado, preparado à base de farinha, açúcar e fermento. Em sua formulação também pode conter outros ingredientes como ovos, uma fonte de lipídeo e leite. Ingredientes que compõem a formulação tradicional. O bolo no Brasil é comercializado em vários formatos e com características únicas como por exemplo, o rocambole, o bolo integral, bolo recheado e bolo tipo muffin (ABIMAPI, 2024).

Os muffins são bolos porcionados em pequenas frações e possuem formato redondo, sendo consumidos normalmente em refeições como lanche, café da manhã ou da tarde, por serem produtos prontos e fácil consumo e possuírem grande aceitação comercial devido à praticidade (Scarton *et al.*, 2021).

Gorduras têm papel fundamental nos alimentos, fornecendo características físico-químicas, tecnológicas e sensoriais únicas. Os lipídeos são capazes de intensificar e absorver sabores, influenciando diretamente no sabor e na textura final dos produtos. Além disso, as gorduras têm funções tecnológicas importantes na panificação, auxiliando na aeração da massa e ajudando a promover a textura, a maciez e a umidade, elementos que são fundamentais para a qualidade sensorial dos produtos assados. Desta forma, as gorduras são um ingrediente fundamental na produção de alimentos (Encyclopedia of foods, 2002).

A gordura é um nutriente fundamental para o nosso organismo. Precisamos de pequenas quantidades de diferentes ácidos graxos para a formação das membranas celulares e para a realização de funções vitais. A maioria dos profissionais de saúde está de acordo que a quantidade de gordura consumida deve ser moderada. O governo federal e a *American Heart Association* sugerem que, para um adulto saudável, a ingestão de gordura não ultrapasse 30% do total de calorias diárias. Além disso, estes órgãos indicam que menos de 6% das calorias totais devem vir de gorduras saturadas (AHA, 2025). Isto significa que uma pessoa adulta saudável, sem doenças, comorbidades ou restrições alimentares, pode consumir no máximo 13 gramas de gordura saturada diariamente, considerando uma dieta de 2000 calorias.

Atualmente, o mercado vem apresentando um crescente interesse por alimentos mais saudáveis, dessa maneira, também houve um aumento na demanda de formulações alternativas que diminuam as quantidades de ingredientes que não são consideradas benéficas à saúde. No entanto, o principal desafio em substituir algum ingrediente na formulação de alimentos está relacionado com a manutenção das características sensoriais dos produtos. Como temos um grande consumo de produtos de panificação no Brasil, como por exemplo, biscoitos, bolos e pães, alguns destes produtos tradicionalmente possuem uma formulação que apresenta alto teor de gorduras (Scarton *et al.*, 2021).

A substituição parcial da gordura na formulação de bolos impacta significativamente diversas propriedades tecnológicas do produto. A redução do teor de gordura compromete a incorporação de ar durante a mistura, resultando em bolos mais densos, secos e com menor volume específico. Além disso, a gordura contribui para a percepção de umidade, maciez e sabor característico, sendo que substitutos lipídicos nem sempre conseguem replicar essas propriedades de forma satisfatória (Colla *et al.*, 2018). A coloração da crosta pode ser prejudicada, visto que a menor participação da gordura reduz a intensidade das reações de Maillard, produzindo bolos com aparência menos dourada e atrativa. A vida útil também tende a ser encurtada, pois a redução lipídica favorece a retrogradação do amido, acelerando o endurecimento do miolo ao longo do tempo (Rehal *et al.*, 2025). Em termos de processamento, massas com menor teor de gordura apresentam maior pegajosidade e menor estabilidade durante a mistura e o forneamento, o que pode demandar ajustes nas condições de batimento, tempo de cocção e uso de emulsificantes ou hidrocolóides para garantir a estabilidade da emulsão e a qualidade final do bolo. Essas alterações tecnológicas, embora viáveis do ponto de vista nutricional, exigem reformulações criteriosas para manter a aceitabilidade sensorial e o desempenho industrial do produto (Yazar e Rosell, 2023).

Neste sentido, começou a ser de interesse que nesses produtos houvesse a

diminuição de gordura e vários estudos começaram a ser desenvolvidos para atender a essa crescente demanda da população, sendo que uma dessas alternativas é o uso de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*) como substituto de gordura, sendo bem sucedido em maionese (Schmiele *et al.*, 2024) e biscoito amanteigado (Vendruscolo *et al.*, 2023). No Brasil, a palma forrageira é usada basicamente para a alimentação animal, sendo que em alguns outros países, como por exemplo no México, a palma forrageira é também utilizada na alimentação humana (Alves *et al.*, 2021).

A palma forrageira é reconhecida por ser uma rica fonte de compostos bioativos, incluindo betalaínas, polifenóis, carotenoides, vitamina C e minerais. Esta matriz alimentícia ajuda na eliminação de toxinas provenientes do álcool e do tabaco absorvidas pelo corpo, favorece a metabolização de gorduras, reduz os níveis de glicose no sangue e contribui para a diminuição do colesterol, além de auxiliar no controle da diabetes. Além disso, devido à abundância em fibras solúveis e insolúveis, a palma forrageira promove um sistema digestivo saudável e ajuda a prevenir a acumulação de substâncias cancerígenas (Alves *et al.*, 2021).

Considerando a crescente demanda por alimentos mais saudáveis, este trabalho teve como objetivo desenvolver formulações de bolos tipo muffin por meio da incorporação de purê integral de cladódios de palma forrageira como substituto parcial de gordura, avaliando-se o potencial tecnológico, nutricional e funcional.

MATERIAL E MÉTODOS

Material

Os ingredientes empregados nas formulações consistiram em farinha de trigo refinada, sacarose refinada, ovo integral in natura, leite integral UHT, gordura de palma, purê integral de palma forrageira, impulsor de massa (amido de milho geneticamente modificado, bicarbonato de sódio, fosfato monocálcico e carbonato de cálcio), emulsificante comercial (água, emulsificantes: mono e diglicerídeos de ácido graxos [INS 471], sais de ácidos graxos [INS 470], monoestearato de sorbitana [INS 419] e polisorbato 60 [INS 435]) e aroma artificial de limão.

Os cladódios de palma forrageira foram doados pela Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) e colhidos em dezembro de 2023 no campo experimental Acauã (Distrito de Leme do Prado, no Estado de Minas Gerais), com coordenadas geográficas em 17°07'37"S para a latitude e 42°46'02"W para a longitude.

Os cladódios de palma forrageira foram selecionados e somente os sadios e íntegros foram utilizados. Em seguida, foi realizada a higienização dos cladódios utilizando-se uma

solução de hipoclorito de sódio a 200 ppm por 15 minutos. Na sequência, foi realizada outra lavagem em água corrente para a remoção do cloro residual. Posteriormente, os gloquídeos foram cuidadosamente removidos com o auxílio de uma faca, e os cladódios foram armazenados em sacos de polipropileno biorientado em condição de congelamento em freezer doméstico DFN41 (Electrolux, Curitiba, Brazil) a -18 °C até o momento de utilização.

Para o processo de preparação do purê, os cladódios foram descongelados overnight em câmara fria BF Inox 2520 (BF Cozinhas, São Paulo, Brasil). Em seguida, os cladódios foram cortados em cubos e triturados em liquidificador L-550 (Mondial, Conceição do Jacuípe, Brasil) até atingir uma homogeneização adequada e uniforme.

Delineamento experimental

Neste estudo, utilizou-se um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), no qual a gordura de palma foi parcialmente substituída por purê integral de palma forrageira, em níveis de até 50% do teor lipídico, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Formulações dos muffins, em base farinha.

Ingrediente (%)	P	F1	F2	F3	F4
Farinha de trigo	100	100	100	100	100
Sacarose	58,75	58,75	58,75	58,75	58,75
Ovo integral in natura	50	50	50	50	50
Leite UHT integral	45	45	45	45	45
Gordura de palma	40	35	30	25	20
Purê integral de palma forrageira	0	5	10	15	20
Impulsionador de massa	2	2	2	2	2
Emulsificante	2	2	2	2	2
Essência de limão	2	2	2	2	2

onde: P = Formulação com 100% de gordura palma; F1 = Formulação com 12,5% de substituição; F2 = Formulação com 25% de substituição; F3 = Formulação com 37,5% de substituição; F4 = Formulação com 50% de substituição.

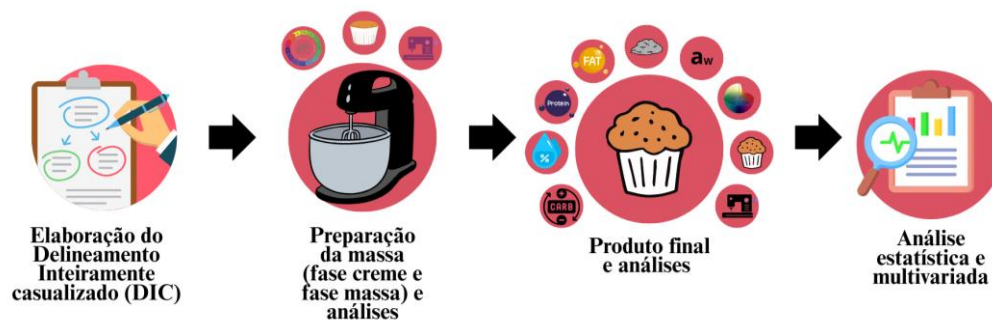
Preparação da massa dos muffin

A massa dos muffins foi preparada em 2 etapas, utilizando-se a batedeira Planetária Orbital Orbit Kitchen 600 (Cadence, Balneário Piçarras, Brasil). A primeira etapa conhecida como fase creme, consistiu em misturar a gordura de palma, o purê integral de palma forrageira, a sacarose e o emulsificante através de batimento por 3 minutos na velocidade 5 da batedeira,

utilizando o batedor tipo arame. Em seguida, acrescentou-se os ovos in natura previamente homogeneizados com o auxílio de um garfo, os quais foram incorporados ao creme, utilizando a mesma velocidade e tempo que a fase anterior. Na segunda etapa, denominada de fase massa, foi adicionada a farinha de trigo, o leite UHT integral e a essência de limão. Para essa etapa foi utilizada a batedeira na velocidade 1 até se obter uma massa homogênea (observado visualmente) e o batedor utilizado foi o tipo raquete. Nesta etapa foram separadas 3 frações de 50 g para proceder a determinação de gravidade específica, pH e textura instrumental da massa.

Por fim foi adicionado à mistura o impulsionador de massa e a batedeira foi ligada na velocidade 1 até acontecer a incorporação total do fermento à massa. A massa foi dividida em porções de 55 gramas em formas de alumínio contendo formas de papel e, em seguida as massas foram assadas em forno elétrico convector FC4EMV (Venâncio, Caxias do Sul, Brasil) pré-aquecido a 180 °C por 25 minutos. Os muffins foram resfriados a temperatura ambiente (~20 °C) por 2 horas e armazenadas em embalagens polietileno de baixa densidade até o dia seguinte para as análises das variáveis dependentes. Os muffins foram fatiados em fatiadora FPV12 (Venâncio, Venâncio Aires, Brasil) obtendo fatias com 12 mm de espessura.

Figura 1 – Esquema ilustrativo da elaboração e análise dos muffins com substituição parcial de gordura de palma por purê integral de palma forrageira.



Propriedades físico-químicas e tecnológicas das massas

Gravidade específica das massas

A determinação da gravidade específica da massa foi realizada em triplicata, conforme o método 55-50.01 da *American Association of Cereal Chemists International* (AACCI, 2010). Os resultados foram expressos em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

pH

A determinação do pH foi realizada de acordo com o método 981.12 da *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC, 2023), utilizando-se um potenciômetro de bancada mPA210 (Tecnozon, Piracicaba, Brasil). A análise foi conduzida em triplicata.

Avaliação do perfil de textura das massas

A textura instrumental das massas dos muffins foi determinada conforme o método 74-09.01 da AACCI (2010), utilizando o texturômetro TA-XT Plus (Stable Micro Systems, Godalming, GBR). As configurações do equipamento foram ajustadas com a sonda cilíndrica P/0.5S de 10 mm de diâmetro e a plataforma HDP/90 em modo de compressão, com velocidades de pré-teste, teste e pós-teste de 3,0, 1,0 e 1,0 mm/s respectivamente, penetração de 40% da amostra e limiar de força de 0,025 N. A determinação ocorreu em triplicata e os parâmetros obtidos nesta análise foram firmeza (N), consistência (N·s), adesividade (N) e índice de viscosidade (N·s) da massa.

Propriedades físico-químicas e tecnológicas dos muffins

pH

A medição do pH foi efetuada com base no método 981.12 (AOAC, 2023). As determinações foram realizadas em triplicata, empregando um potenciômetro de bancada modelo mPA210 (Tecnozon, Piracicaba, Brasil), devidamente calibrado para garantir a precisão dos resultados.

Volume específico

A determinação do volume específico dos muffins foi realizada pelo método do deslocamento de sementes de painço, conforme as diretrizes do protocolo 10-05.01 da AACCI (2010). As medições foram efetuadas em triplicata, sendo os valores expressos em centímetros cúbicos por grama ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$).

Cor instrumental

A avaliação instrumental dos muffins foi realizada conforme o método 14-22.01 da AACCI (2010), utilizando-se um espectrofotômetro CM-5 (Konica Minolta, Tóquio, Japão). As medições foram feitas no sistema de cor CIELab*, no qual L^* indica a luminosidade, a^* corresponde ao eixo verde-vermelho, e b^* ao eixo azul-amarelo. A partir desses parâmetros, calcularam-se o índice de branqueamento (WI^*) conforme a Equação 1 e o índice de

escurecimento (BI^*) segundo a Equação 2, de acordo com a metodologia proposta por Sharanagat (2023). Adicionalmente, o índice de cor (IC^*) foi determinado com base na fórmula sugerida por Choque-Quispe (2022) e apresentada na Equação 3.

$$WI^* = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$BI^* = \left[\left\{ \left(\frac{a+1,75L}{5,46L+a-3,01b} \right) - 0,31 \right\} \times 100 \right] \times \frac{1}{0,17} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$IC^* = \frac{a \times 1000}{L \times b} \quad (\text{Eq. 3})$$

Textura instrumental dos muffins

A avaliação instrumental da textura dos muffins foi realizada conforme o método 74-09.01 da AACCI (2010), utilizando-se um analisador de textura TA-XT Plus. Para cada amostra foram realizadas dez repetições, com duas fatias sobrepostas de 12 mm de espessura. Os parâmetros analisados incluíram firmeza (N) e resiliência (%). A análise foi conduzida em modo de compressão, com a sonda P/36R e a plataforma HDP/90. As condições operacionais do equipamento foram: velocidades de pré-teste, teste e pós-teste de 1,0; 1,0 e 5,0 mm/s, respectivamente; compressão de 40%; intervalo de 1 segundo entre os ciclos; e limiar de detecção ajustado para 0,049 N.

Composição centesimal dos muffins

Os muffins foram analisados quanto à composição centesimal, incluindo a determinação do teor de umidade (método 44-15.02), proteínas (método 46-13.01; N = 6,25) e cinzas (método 08-01.01) conforme a AACCI (2010). O teor de lipídeos foi quantificado utilizando o método Bligh e Dyer (1959), enquanto o conteúdo de carboidratos totais foi obtido por diferença. Todas as análises foram realizadas em triplicata e os resultados foram expressos em porcentagem.

Análise estatística

As análises estatísticas foram conduzidas por meio de análise de variância (ANOVA), seguida do agrupamento das médias pelo teste de Scott-Knott, adotando-se nível de significância de 5%. Para as análises multivariadas empregou-se o software MetaboAnalyst 6.0, no qual os dados experimentais foram submetidos à construção de mapa de calor (*heatmap*),

análise de componentes principais (PCA) e análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA), conforme a metodologia descrita por Massaretto *et al.* (2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados de gravidade específica, pH e perfil de textura das massas dos muffins. A gravidade específica dos muffins foi significativamente influenciada pelos níveis crescentes de substituição da gordura de palma pelo purê integral de palma forrageira ($p < 0,05$), com valores médios variando de $1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ na formulação padrão (P) a $1,25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ na formulação com 50% de substituição (F4), com distinções estatísticas entre todas as formulações. O aumento da gravidade específica pode ser atribuído à menor incorporação de ar na massa, uma vez que a gordura exerce papel fundamental na emulsificação e na formação de uma estrutura aerada (Yazar e Rosell, 2023).

Tabela 2 – Gravidade específica, pH e parâmetros de textura das massas dos muffins.

Formulação	Gravidade específica ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	pH	Firmeza (N)
P	$1,12 \pm 0,01^e$	$6,21 \pm 0,01^a$	$0,33 \pm 0,01^a$
F1	$1,18 \pm 0,01^d$	$6,10 \pm 0,02^b$	$0,19 \pm <0,01^b$
F2	$1,20 \pm 0,01^c$	$5,97 \pm 0,01^c$	$0,18 \pm 0,01^c$
F3	$1,21 \pm 0,01^b$	$5,75 \pm 0,02^d$	$0,14 \pm 0,01^d$
F4	$1,25 \pm 0,01^a$	$5,63 \pm 0,04^e$	$0,13 \pm <0,01^e$
Formulação	Consistência (N.s)	Adesividade (N)	Índice de viscosidade (N.s)
P	$11,69 \pm 0,27^a$	$-0,16 \pm 0,01^d$	$-1,04 \pm 0,12^a$
F1	$6,45 \pm 0,20^b$	$-0,06 \pm <0,01^c$	$-2,27 \pm 0,02^b$
F2	$5,60 \pm 0,23^c$	$-0,06 \pm <0,01^c$	$-1,35 \pm 0,59^a$
F3	$4,48 \pm 0,22^d$	$-0,05 \pm <0,01^b$	$-0,88 \pm 0,21^a$
F4	$3,98 \pm 0,06^e$	$-0,04 \pm <0,01^a$	$-1,10 \pm 0,11^a$

Valores correspondem a média aritmética \pm desvio padrão ($n = 3$). Letras distintas na mesma coluna indicam diferenças estatisticamente significativas entre as formulações, conforme análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). P corresponde a formulação padrão e F1, F2, F3 e F4 correspondem às formulações com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira em 12,5, 25,0, 37,5 e 50,0%, respectivamente.

Em contraste, o purê integral de palma forrageira, por apresentar elevado teor de umidade diminui a viscosidade da massa e reduz sua capacidade de retenção de ar, resultando

em produtos com maior densidade e menor expansão. A presença de fibras solúveis e insolúveis provenientes do purê integral de palma forrageira contribuiu não apenas para alterações nas propriedades físico-estruturais do produto, mas também para a valorização nutricional da formulação, aspecto alinhado à crescente demanda dos consumidores por alimentos com perfil mais saudável e funcional (Silva *et al.*, 2022).

A substituição progressiva da gordura de palma pelo purê integral de palma forrageira resultou em uma redução significativa do pH das massas, com valores variando de 6,21 na formulação padrão para 5,63 na formulação com 50% de substituição. Essa diminuição está relacionada à presença de compostos de natureza ácida na palma forrageira, como ácidos orgânicos e alguns compostos fenólicos, que contribuem diretamente para a acidificação do sistema. De acordo com Rocha *et al.* (2024), foram identificados 16 compostos fenólicos no extrato da palma, com destaque para a miricetina (785 mg/100 g), o ácido caftárico (265 mg/100 g) e a hesperidina (135 mg/100 g), além de concentrações expressivas de ácidos orgânicos, como o málico (16,84 g/L), cítrico (4,43 g/L) e succínico (3,26 g/L). A redução do pH, por sua vez, é capaz de alterar o equilíbrio químico da massa, afetando a solubilização de proteínas, a estabilidade da rede estrutural e as interações entre os ingredientes, especialmente nos equilíbrios ácido-base presentes na formulação (Assumpção, 2023). De acordo com Souza *et al.* (2022), uma pequena redução nos valores de pH na massa de muffin é interessante porque a reação desencadeada pelo impulsionador de massa resulta em um aumento no pH. Em meios alcalinos, a taxa de liberação de CO₂ é reduzida.

A firmeza das massas foi significativamente reduzida com o aumento da substituição da gordura pelo purê integral de palma forrageira ($p < 0,05$), variando de 0,33 N na formulação padrão para 0,13 N na formulação com 50% de substituição (F4). Cada incremento no nível de substituição resultou em diferenças estatísticas entre as formulações, refletindo na influência direta da composição do purê sobre a estrutura da massa. Essa redução pode ser atribuída à menor presença de gordura, que normalmente contribui para a coesão e resistência da matriz, somada ao efeito das fibras solúveis presentes na palma forrageira, que atuam como plastificantes e umectantes. Essas fibras afetam a reologia da massa ao interagirem com a água por meio de ligações de hidrogênio, cuja densidade, juntamente com o parâmetro de interação da água, influencia diretamente sua capacidade de modificar a estrutura do sistema. Como resultado, forma-se uma matriz menos compacta e mais deformável, o que pode favorecer o espalhamento da massa e influenciar a textura do produto final após o cozimento (Renzetti *et al.*, 2025).

Conforme demonstrado na Tabela 2, a consistência das massas diminuiu significativamente com o aumento da substituição da gordura pelo purê integral de palma forrageira ($p < 0,05$), variando de 11,69 N.s (P) para 3,98 N.s (F4), com diferenças entre todas as formulações. A gordura contribui para a coesão da massa, enquanto o purê integral de palma forrageira, composto majoritariamente por água permitiu uma redução nos parâmetros de textura da massa, resultando em uma estrutura mais fluida.

A adesividade das massas diminuiu progressivamente com a substituição da gordura de palma pelo purê integral de palma forrageira, com valores variando de -0,16 N na formulação padrão para -0,04 N em F4. Esse comportamento está diretamente relacionado à redução do teor de gordura, ingrediente que exerce importante função na lubrificação da massa, contribuindo para sua plasticidade, suavidade de textura e maleabilidade. Na ausência parcial dessa gordura, a massa tende a apresentar menor coesão superficial e, portanto, menor adesividade (Dumbra *et al.*, 2023; Guarabira *et al.*, 2023).

A substituição da gordura de palma pelo purê integral de palma forrageira influenciou significativamente o índice de viscosidade na formulação F1, que apresentou o maior valor (-2,27 N·s), evidenciando maior coesão estrutural e menor fluidez da massa. Esse resultado pode ser atribuído à redução do teor lipídico, sem alteração suficiente dos constituintes estruturantes do purê, como fibras solúveis e mucilaginosas, que atuam na retenção de água e estabilização da matriz. Nas demais formulações P, os valores do índice de viscosidade não diferiram entre si, indicando que níveis mais elevados de substituição promoveram equilíbrio entre a redução da gordura e a incorporação de componentes provenientes dos hidrocoloides do purê. Além disso, a presença do emulsificante pode ter contribuído para essa estabilidade, ao favorecer a dispersão dos ingredientes e melhorar as interações entre fases, favorecendo a viscosidade da massa quando baixas concentrações de purê integral de palma forrageira foram incorporadas.

A Tabela 3 apresenta os resultados de volume específico e atividade de água dos muffins elaborados. O volume específico é um indicador essencial da qualidade de produtos de panificação, refletindo a retenção de água e a incorporação de ar na massa. Valores baixos estão associados a produtos densos, úmidos, de difícil mastigação e com características sensoriais prejudicadas (Monteiro *et al.*, 2021).

Conforme demonstrado na Tabela 3, o volume específico dos muffins aumentou de forma significativa com a substituição parcial da gordura pelo purê integral de palma forrageira. A formulação padrão apresentou o menor valor ($1,80 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$), enquanto as formulações F1 ($2,29 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) e F3 ($2,32 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) registraram os maiores volumes específicos,

sendo semelhantes entre si. Esse aumento representa uma elevação de aproximadamente 28,9% em relação à formulação padrão (Figura 2), evidenciando o efeito positivo da substituição sobre a popeidade de expansão do produto em função da aeração e da capacidade do meio viscoso em reter o CO₂ liberado pelo fermento químico.

Tabela 3 – Volume específico e atividade de água dos muffins.

Formulação	Volume específico (cm ³ .g ⁻¹)	Atividade de água ^{ns}
P	1,80 ± 0,03 ^d	0,8930 ± 0,0134
F1	2,29 ± 0,01 ^a	0,8887 ± 0,0116
F2	1,90 ± 0,08 ^c	0,8889 ± 0,0150
F3	2,32 ± 0,04 ^a	0,8886 ± 0,0053
F4	2,01 ± <0,01 ^b	0,8861 ± 0,0175

Valores correspondem a média aritmética ± desvio padrão (n = 3). Letras distintas na mesma coluna indicam diferenças estatisticamente significativas entre as formulações, conforme análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Scott-Knott (p < 0,05). ns = não significativo (p >0,05) P corresponde a formulação padrão e F1, F2, F3 e F4 correspondem às formulações com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira em 12,5, 25,0, 37,5 e 50,0%, respectivamente.

Esse comportamento pode estar relacionado principalmente à presença da mucilagem da palma forrageira, que favorece a retenção de gases durante o batimento e a cocção, resultando em uma estrutura mais expandida. Além disso, a presença do emulsificante na formulação pode ter atuado na estabilização da emulsão e na incorporação de ar, diminuindo a coalescência e contribuindo para uma textura mais leve e homogênea. Os resultados indicam que níveis moderados de substituição como 12,5% e 37,5% promovem melhoria na expansão do produto sem prejuízos à qualidade tecnológica do produto final.

Figura 2 – Aparência visual dos muffins com substituição de gordura



onde: F1, F2, F3 e F4 correspondem às formulações com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira em 12,5, 25,0, 37,5 e 50,0%, respectivamente.

A atividade de água é um fator determinante na estabilidade físico-química e microbiológica dos alimentos, influenciando diretamente na vida-de-prateleira, na segurança e na qualidade sensorial. A quantificação deste parâmetro é fundamental em diversas etapas da cadeia produtiva, desde o desenvolvimento de formulações até os processos de conservação, pois reflete diretamente no crescimento microbiano e no prolongamento da vida útil dos produtos (Barbosa-Canovas *et al.*, 2020). Conforme detalhado na Tabela 3, a substituição da gordura de palma pelo purê integral de palma forrageira não influenciou a atividade de água das massas ($p = 0,9118$), com valores variando de 0,8861 (F4) a 0,8930 (P). Embora os cladódios de palma forrageira constituam de aproximadamente 90% de água (Silva *et al.*, 2020), sua adição não alterou a quantidade de água livre disponível na matriz dos muffins. Esse comportamento indica que a água presente no purê encontra-se, em grande parte, retida em estruturas que não afetam diretamente a atividade de água, preservando a estabilidade físico-química da massa e as condições associadas à conservação do produto.

A Tabela 4 apresenta o índice de branqueamento (WI^*), índice de escurecimento (BI^*) e índice de cor (CI^*) do miolo das fatias dos muffins. A substituição progressiva da gordura de palma por purê integral de palma forrageira nos muffins resultou em alterações perceptíveis na coloração das amostras, refletindo nos índices de branqueamento (WI^*), escurecimento (BI^*) e intensidade de cor (CI^*). O índice de branqueamento (WI^*) apresentou redução significativa com o aumento da proporção de purê integral de palma forrageira nas formulações ($p < 0,05$), variando de 65,58 na amostra padrão (P) para 61,53 em F4.

Tabela 4 – Propriedades de cor instrumental do miolo dos muffins.

Formulação	WI^*	BI^*	CI^*
P	65,58 ± 0,97 ^a	38,53 ± 2,30 ^c	1,30 ± 0,29 ^a
F1	64,33 ± 0,79 ^b	39,73 ± 0,62 ^c	0,72 ± 0,05 ^b
F2	63,34 ± 0,74 ^b	41,83 ± 1,06 ^b	0,16 ± 0,06 ^c
F3	62,98 ± 0,86 ^b	42,34 ± 1,63 ^b	-0,45 ± 0,09 ^d
F4	61,53 ± 0,58 ^c	44,41 ± 1,31 ^a	-0,58 ± 0,27 ^d

Valores correspondem a média aritmética ± desvio padrão ($n = 3$). Letras distintas na mesma coluna indicam diferenças estatisticamente significativas entre as formulações, conforme análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). ns = não significativo ($p > 0,05$) P corresponde a formulação padrão e F1, F2, F3 e F4 correspondem às formulações com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira em 12,5, 25,0, 37,5 e 50,0%, respectivamente. WI = índice de branqueamento; BI – índice de escurecimento; CI = índice de cor.

Essa diminuição evidencia uma menor percepção visual de brancura nas amostras

com maior teor de substituição, o que pode estar associado à presença de pigmentos naturais na palma, como clorofilas e carotenoides (Xavier *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2024). Esses compostos, embora possam ser parcialmente degradados durante o processo térmico, ainda contribuem para a coloração mais escura do miolo.

Paralelamente, observou-se um aumento gradativo no índice de escurecimento (BI^*), que atingiu seu valor máximo em F4 (44,41), reforçando a intensificação da coloração promovida pela adição do purê integral de palma forrageira. Esse escurecimento pode estar relacionado a reações de escurecimento não enzimático, como a reação de Maillard e a caramelização, potencializadas pela maior disponibilidade de açúcares redutores e compostos nitrogenados presentes na matriz vegetal adicionada (Leite e Liberato, 2021). Além disso, a degradação térmica de carotenoides e clorofilas resultam em colorações mais escuras, conforme reportado para a diminuição do índice de branqueamento.

O índice de cor (CI^*) evidenciou alterações significativas ($p < 0,05$) na tonalidade dos muffins em função da substituição da fração lipídica. A formulação padrão (P) apresentou valor de 1,30, seguida por F1 (0,72) e F2 (0,16), todas situadas na faixa correspondente ao amarelo-esverdeado. Já F3 (-0,45) e F4 (-0,58) apresentaram valores negativos, indicando uma leve transição para tonalidades de verde-amarelado. Essas modificações podem ser atribuídas à presença de pigmentos naturais da palma forrageira, especialmente clorofilas e carotenoides. A clorofila, predominante nos tecidos vegetais, tende a se degradar durante o processo de cocção, revelando os carotenoides, que são pigmentos acessórios associados à coloração amarelada (Pinho *et al.*, 2021). Esse fenômeno justifica a tendência de tons mais quentes e esverdeados conforme se aumenta o nível de substituição, influenciando levemente a percepção visual do produto final, conforme é possível observar na Figura 3.

Figura 3 – Aparência visual dos miolos dos muffins com redução do teor de gordura.



onde: F1, F2, F3 e F4 correspondem às formulações com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira em 12,5, 25,0, 37,5 e 50,0%, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros de firmeza e resiliência do miolo dos muffins obtidos a partir da análise de textura instrumental. A firmeza do miolo dos muffins foi significativamente favorecida pela substituição parcial da gordura de palma, evidenciada por um miolo mais macio conforme o teor de substituição aumentou. A formulação padrão (P) apresentou a maior firmeza (2,55 N), enquanto a F4, com maior teor de purê integral de palma forrageira, apresentou o menor valor (1,08 N), representando uma redução de aproximadamente 29% em relação à formulação padrão.

Tabela 5 – Firmeza e resiliência do miolo dos muffins.

Formulação	Firmeza (N)	Resiliência (%)
P	2,55 ± 0,66 ^a	15,58 ± 0,20 ^c
F1	2,41 ± 0,28 ^a	15,45 ± 0,75 ^c
F2	2,30 ± 0,11 ^a	17,35 ± 0,51 ^b
F3	2,08 ± 0,15 ^b	17,92 ± 0,29 ^b
F4	1,08 ± 0,17 ^b	20,58 ± 0,49 ^a

Valores correspondem a média aritmética ± desvio padrão (n = 10). Letras distintas na mesma coluna indicam diferenças estatisticamente significativas entre as formulações, conforme análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). P corresponde a formulação padrão e F1, F2, F3 e F4 correspondem às formulações com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira em 12,5, 25,0, 37,5 e 50,0%, respectivamente.

A presença da palma forrageira, rica em umidade e compostos gelificantes, pode ter promovido uma estrutura de miolo mais hidratada e menos compacta, conferindo maior maciez ao produto final. As formulações F1 e F2 mantiveram-se estatisticamente semelhantes à P, enquanto F3 e F4 se destacaram por apresentarem diferenças significativas, evidenciando que a substituição parcial da gordura impactou diretamente a estrutura interna do produto, favorecendo a obtenção de um miolo mais macio com o uso de maiores proporções de palma forrageira.

A análise da resiliência do miolo revelou um aumento progressivo com a elevação da proporção de palma forrageira nas formulações. As amostras P (15,58%) e F1 (15,45%) apresentaram os menores valores e não diferiram entre si estatisticamente. A partir da formulação F2 (17,35%), observou-se um incremento significativo, atingindo 20,58% em F4, o que representa um aumento de aproximadamente 32% em relação à formulação padrão. Considerando que a resiliência representa a fração da energia que a estrutura do produto é capaz de recuperar imediatamente após a remoção da primeira compressão (Lopes *et al.*, 2021), os dados indicam que a incorporação do purê integral de palma forrageira contribui para uma

estrutura interna mais elástica e resiliente. Tal efeito pode estar associado à presença de compostos hidrofílicos, como mucilagens, que favorecem a retenção de umidade e reforçam a estrutura da matriz do miolo, aumentando sua capacidade de recuperação após deformações.

Composição centesimal dos muffins

Os conteúdos de umidade, proteínas, cinzas, lipídeos e carboidratos totais estão apresentados na Tabela 6. As formulações apresentaram variação significativa nos teores de umidade ($p < 0,05$), com valores crescentes à medida que se elevou a proporção de purê de palma forrageira, partindo de 19,20% na formulação controle (P) e alcançando 23,88% em F4.

Tabela 6 – Composição centesimal (em porcentagem) dos muffins com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira.

Formulação	Umidade	Proteínas ^{ns}	Cinzas	Lipídios	Carboidratos totais ^{ns}
P	19,20 ± 0,26 ^c	9,54 ± 1,10	1,08 ± 0,02 ^b	16,97 ± 0,10 ^a	53,22 ± 1,30
F1	19,36 ± 0,39 ^c	10,30 ± 1,19	0,99 ± 0,01 ^d	16,34 ± 0,41 ^b	53,00 ± 1,28
F2	21,61 ± 0,23 ^b	10,02 ± 0,61	1,05 ± 0,02 ^c	13,95 ± 0,13 ^c	53,36 ± 0,57
F3	21,91 ± 0,14 ^b	11,22 ± 1,53	1,07 ± 0,01 ^b	12,44 ± 0,11 ^d	53,37 ± 1,68
F4	23,88 ± 0,22 ^a	10,74 ± 1,55	1,12 ± 0,01 ^a	10,25 ± 0,50 ^e	54,00 ± 1,57

Valores correspondem a média aritmética ± desvio padrão ($n = 3$). Letras distintas na mesma coluna indicam diferenças estatisticamente significativas entre as formulações, conforme análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). ns = não significativo ($p > 0,05$). P corresponde a formulação padrão e F1, F2, F3 e F4 correspondem às formulações com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira em 12,5, 25,0, 37,5 e 50,0%, respectivamente.

Esse aumento está diretamente relacionado à elevada umidade característica da palma, a qual apresenta uma notável capacidade de retenção hídrica, resultado de sua adaptação a ambientes semiáridos (Machado *et al.*, 2025). Essa condição ecológica da cactácea favorece o acúmulo de água em sua matriz, contribuindo para o acréscimo do teor de umidade no produto final, o que por sua vez, também influencia positivamente na textura, resultando em produtos com maior maciez na panificação, conforme observado em discussões anteriores.

Os teores de proteínas variaram de 9,54% (P) a 11,22% (F3), enquanto os de carboidratos totais oscilaram entre 53,00% (F1) e 54,00% (F4), sem diferenças estatisticamente significativas entre as formulações ($p > 0,05$). A estabilidade destes parâmetros indica que a substituição parcial da gordura por purê de palma forrageira não compromete o conteúdo nutricional global do produto, especialmente no que se refere às frações proteica e glicídica. Embora o purê de palma integral forrageira apresenta baixo teor proteico em base úmida (1,88%

± 0,17%), estudos como o de Silva *et al.* (2024) revelam que, em base seca, esse valor pode atingir 15,80%, o que destaca seu potencial como fonte complementar de proteína vegetal.

No que diz respeito aos carboidratos totais, a ausência de variações significativas pode estar relacionada à composição complexa dessa fração, que inclui tanto carboidratos digestíveis quanto fibras alimentares. A palma forrageira apresenta elevado teor de fibra alimentar (67,30% em base seca), conforme relatado por Silva *et al.* (2024), o que contribui expressivamente para o perfil glicídico do purê incorporado às formulações. Assim, embora os teores totais de carboidratos se mantenham estáveis, é plausível inferir que houve um enriquecimento da fração não digerível das formulações com o aumento da proporção de substituição. Tal modificação pode promover benefícios funcionais ao produto final, considerando o papel da fibra alimentar na modulação glicêmica, saciedade e saúde intestinal (Fechine *et al.*, 2021).

Quanto aos lipídios, observou-se uma redução significativa ($p < 0,05$) associada ao aumento da substituição da gordura pela palma, com valores decrescentes de 16,97% (P) a 10,25% (F4), representando uma redução de aproximadamente 39,6%. Essa diminuição expressiva está diretamente relacionada ao fato de o purê integral de palma forrageira possuir teores mínimos de gordura, atuando como um diluente da fração lipídica da formulação. A incorporação do purê impactou não apenas no valor calórico do produto, mas também na sua qualidade nutricional, uma vez que níveis elevados de lipídios estão associados a desfechos negativos à saúde, como obesidade, dislipidemias e doenças cardiovasculares (Bonin, 2021).

Diversos estudos têm destacado o uso de matérias-primas alternativas com conteúdo de mucilagem como substitutos parciais ou totais de gordura, devido à capacidade funcional de retenção de água, formação de géis e estabilização de emulsões. Da Silva (2025), por exemplo, utilizou a mucilagem de psyllium na substituição de gordura em hambúrgueres, obtendo produtos com redução lipídica e manutenção das características sensoriais. Fortes (2024) aplicou a mucilagem de quiabo na elaboração de maioneses com perfil lipídico reduzido, alcançando emulsões estáveis e boa aceitação. De forma semelhante, Lise *et al.* (2021) exploraram o uso da mucilagem de ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata* Miller) em produtos cárneos emulsionados, observando efeitos positivos na textura e estabilidade das formulações. Os resultados destes estudos reforçam o potencial funcional de mucilagens em diversos produtos, o que converge com os achados do presente estudo ao evidenciar que a palma forrageira também pode atuar como um agente substitutivo viável na produção de produtos de panificação, com melhor perfil nutricional e qualidade tecnológica preservada.

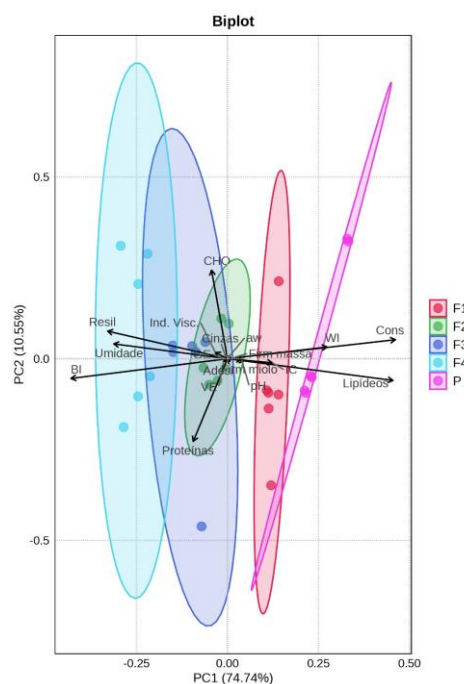
No que tange ao teor de cinzas, observou-se um aumento significativo ($p < 0,05$) com a inclusão crescente da palma nas formulações, variando de 0,99% (F1) a 1,12% (F4). Tal incremento está diretamente associado à elevada carga mineral da palma forrageira, cuja concentração de cinzas pode atingir até 15,13% em base seca, conforme descrito por Silva *et al.* (2024). De acordo com os autores, o cálcio é o mineral mais abundante, correspondendo a cerca de 65,03% da composição mineral total, seguido por potássio (26,67%) e cloro (7,30%). A elevada densidade mineral da palma contribui para o enriquecimento nutricional do produto final, especialmente no que se refere à incorporação de minerais essenciais à saúde humana, evidenciando seu potencial como ingrediente funcional em formulações de panificação.

Análise multivariada

A Figura 4 apresenta o gráfico da análise de componentes principais (PCA) para os parâmetros analisados na elaboração dos muffins, permitindo uma avaliação dinâmica em relação aos resultados observados. A análise de componentes principais evidenciou, de forma clara, o impacto progressivo da substituição da gordura de palma por purê integral de palma forrageira nas características físico-químicas e tecnológicas das formulações de muffins. A ordenação das amostras ao longo do primeiro componente principal (PC1), que explicou 74,74% da variância total, refletiu uma transição consistente nas propriedades dos produtos à medida que aumentou o percentual de substituição. Já o segundo componente principal (PC2), responsável por 16,78% da variância, permitiu discriminar as formulações com base em atributos texturais e de retenção de água, como firmeza do miolo, firmeza da massa e umidade, além de indicar uma diferença entre as amostras associadas aos teores de proteínas e carboidratos digeríveis, contribuindo para uma separação mais refinada entre amostras com níveis intermediários de substituição.

Conforme observado, a formulação padrão, composta integralmente por gordura de palma, apresentou forte correlação com variáveis como lipídios, consistência da massa, firmeza do miolo e índice de branqueamento (WI^*). Esses resultados são coerentes com a maior densidade energética e a estrutura mais coesa conferida pelo teor lipídico elevado, resultando em massas menos hidratadas, com coloração mais clara e textura mais firme, características típicas de produtos com elevado conteúdo de gordura (Santos, 2022). As formulações com substituição intermediária (F1, F2 e F3) mostraram comportamento distinto, ocupando uma posição de transição no espaço multivariado. Essas formulações apresentaram associação com características como viscosidade, teor de carboidratos, proteínas e cinzas, sugerindo uma modulação positiva da composição centesimal.

Figura 4 – Análise de componentes principais dos parâmetros físico-químicos, tecnológicos e nutricionais das massas e dos muffins.



onde: P corresponde a formulação padrão e F1, F2, F3 e F4 correspondem às formulações com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira em 12,5, 25,0, 37,5 e 50,0%, respectivamente. CHO (carboidratos totais); Ind. Visc. (índice de viscosidade); BI (índice de escurecimento); Resil (resiliência); VE (Volume específico); Adesi (Adesividade); GE (Gravidade específica); Cons (Consistência); Firm massa (Firmeza da massa); aw (Atividade de água); IC (Índice de cor); WI (índice de branqueamento); Firm miolo (Firmeza do miolo).

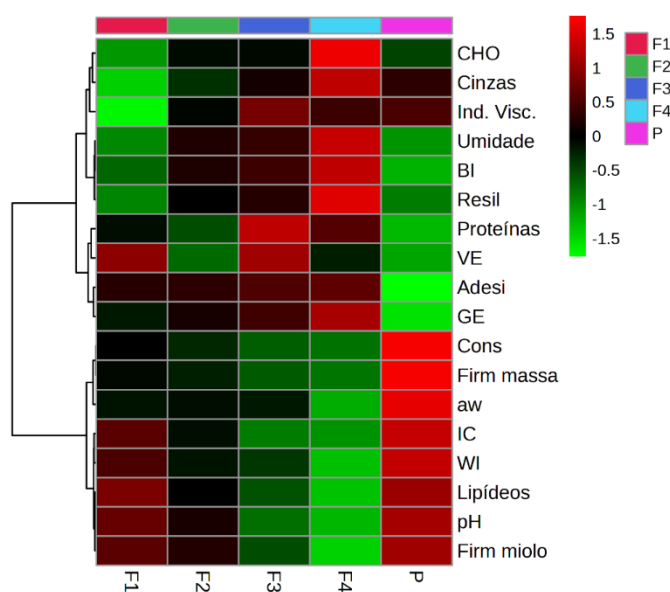
A incorporação progressiva do purê integral de palma forrageira promoveu uma redução do teor de lipídios, com aumento proporcional do teor de umidade e conteúdo de macro e micronutrientes, refletido pelo incremento nos teores de cinzas e proteínas. Tais alterações são justificadas pela própria composição da palma forrageira, rica em fibras solúveis, compostos hidrofílicos e minerais (Silva *et al.*, 2020; Santana *et al.*, 2021), os quais influenciam tanto o perfil nutricional quanto a estrutura da massa. Destaca-se, nesse grupo, a formulação F2, que parece representar um ponto de equilíbrio entre valor nutricional e desempenho tecnológico, evidenciado pela sua posição central no gráfico e associação com características como maior viscosidade e teor de carboidratos complexos, sem que haja comprometimento acentuado da firmeza da massa ou da aparência do produto.

Por outro lado, a formulação F4, com 50% de substituição, apresentou comportamento mais afastado das demais, sendo correlacionada com maior escurecimento do miolo (BI), resiliência e teor de umidade. Esses efeitos indicam que o alto teor de purê integral de palma forrageira interfere diretamente nas propriedades estruturais e sensoriais do muffins, promovendo retenção hídrica e maior elasticidade, mas também aumento da adesividade e

intensificação das reações de escurecimento não enzimático. Embora esses aspectos possam representar ganhos em termos de funcionalidade e potencial antioxidante, exigem ajustes na formulação para evitar comprometimentos sensoriais e tecnológicos.

O mapa de calor gerado (Figura 5) a partir dos dados físico-químicos, tecnológicos e nutricionais reforça as tendências observadas na análise de componentes principais, ao evidenciar visualmente as intensidades relativas de cada variável nas diferentes formulações. Observa-se, de forma clara, a distinção da formulação padrão (P), que apresenta maiores intensidades relativas de lipídios, firmeza da massa, consistência da massa, índice de viscosidade e índice de cor (IC), refletindo o impacto da gordura de palma nesses parâmetros estruturais e de viscosidade.

Figura 5 – Mapa de calor (*heatmap*) dos parâmetros físico-químicos, tecnológicos e nutricionais das massas e dos muffins.



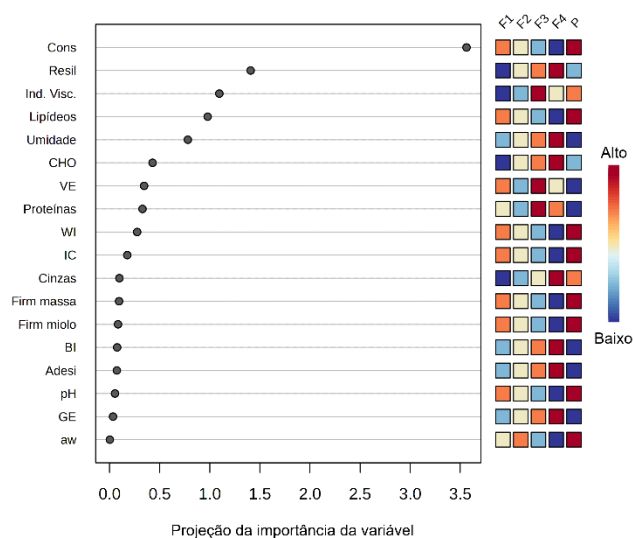
onde: P corresponde a formulação padrão e F1, F2, F3 e F4 correspondem às formulações com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira em 12,5, 25,0, 37,5 e 50,0%, respectivamente. CHO (carboidratos totais); Ind. Visc. (índice de viscosidade); BI (índice de escurecimento); Resil (resiliência); VE (Volume específico); Adesi (Adesividade); GE (Gravidade específica); Cons (Consistência); Firm massa (Firmeza da massa); aw (Atividade de água); IC (Índice de cor); WI (índice de branqueamento); Firm miolo (Firmeza do miolo).

Em contraste, a formulação com maior nível de substituição por purê integral de palma forrageira (F4) apresentou maior intensidade relativa para umidade, resiliência e índice de escurecimento (BI), indicando a influência do ingrediente alternativo na retenção de água, estrutura do miolo e características visuais do produto.

As formulações intermediárias (F1, F2 e F3) apresentam padrões variáveis, mas com tendência a maior concentração relativa de cinzas e proteínas, especialmente em F2 e F3, sugerindo que níveis moderados de substituição contribuem para um enriquecimento da composição centesimal, possivelmente associado à matriz nutricional da palma forrageira. Além disso, a formulação F3 mostra valores mais elevados para o volume específico e menor adesividade da massa, o que pode indicar um ponto de equilíbrio tecnológico favorável entre as propriedades estruturais e funcionais do produto.

A análise de regressão por mínimos quadrados parciais (Figura 6), empregada para identificar as variáveis físico-químicas, tecnológicas e nutricionais mais relevantes na discriminação das formulações, indicou que as variáveis de maior importância foram a umidade e o teor de lipídeos, o índice de viscosidade e a consistência da massa e a resiliência do miolo dos muffins na separação entre as amostras. Esses scores medem a contribuição global de cada variável na explicação da variância de todos os componentes, sendo considerados como menos importantes quando menores que 0,8 e altamente relevantes quando maiores que 0,8, para os modelos de regressão (Kumawat *et al.*, 2024; Ray *et al.*, 2015).

Figura 6 – Regressão por mínimos quadrados parciais dos parâmetros físico-químicos, tecnológicos e nutricionais das massas e dos muffins.



onde: P corresponde a formulação padrão e F1, F2, F3 e F4 correspondem às formulações com substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira em 12,5, 25,0, 37,5 e 50,0%, respectivamente. CHO (carboidratos totais); Ind. Visc. (índice de viscosidade); BI (índice de escurecimento); Resil (resiliência); VE (Volume específico); Adesi (Adesividade); GE (Gravidade específica); Cons (Consistência); Firm massa (Firmeza da massa); aw (Atividade de água); IC (Índice de cor); WI (índice de branqueamento); Firm miolo (Firmeza do miolo).

A formulação padrão foi mais fortemente associada às variáveis relacionadas à estrutura densa e ao elevado teor de gordura, enquanto a formulação F4 destacou-se pelas características ligadas à hidratação, elasticidade e escurecimento. As formulações intermediárias, por sua vez, apresentaram valores intermediários ou associações mistas, reforçando a ideia de que a substituição parcial pela palma forrageira pode resultar em formulações mais equilibradas. A análise de regressão por mínimos quadrados parciais, portanto, corroborou os achados anteriores no mapa de calor e na análise de componentes principais, destacando a viabilidade tecnológica, nutricional e funcional do uso da palma forrageira como substituto parcial da gordura de palma, especialmente em níveis moderados de substituição.

CONCLUSÃO

A substituição parcial da gordura de palma por purê integral de palma forrageira na elaboração de muffins demonstrou ser uma estratégia viável sob os pontos de vista físico-químico, tecnológico, nutricional e funcional. Embora a substituição de 50% da gordura de palma por purê integral de palma forrageira tenha aumentado a gravidade específica da massa, a leve diminuição do pH, aliado à elaboração de massas com textura de menor firmeza e menos adesiva, juntamente com uma consistência e um índice de viscosidade que apresenta menor resistência ao deslocamento de fluxo, proporcionou o desenvolvimento de muffins com melhores características de volume específico e de textura do miolo. Embora a substituição tenha promovido alterações perceptíveis na cor e textura dos produtos, essas modificações não comprometem sua integridade estrutural nem sua estabilidade físico-química, conforme indicado pela manutenção da atividade de água. Além disso, a substituição da gordura permitiu apresentar um muffin com menores teores de lipídios, além de aumentar a umidade do miolo, favorecendo a textura. A análise multivariada confirmou a eficácia do purê integral de palma forrageira como ingrediente tecnofuncional, proporcionando um desempenho tecnológico satisfatório e uma qualidade nutricional aprimorada. Dessa forma, os resultados obtidos ressaltam o potencial da palma forrageira como alternativa inovadora na formulação de produtos de panificação mais saudáveis, alinhados às demandas atuais do consumidor e às tendências de reformulação de alimentos com melhor perfil nutricional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri e ao Instituto de Ciência e Tecnologia pelo suporte institucional e financeiro (processo

23086.001699/2022-41) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo suporte financeiro (código 001) e pela bolsa de estudos de Mateus Alves Araújo (#88887.990587/2024-00). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo suporte financeiro (protocolo 421777/2021-4) e à Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais pela doação dos cladódios de palma forrageira. Por fim, agradecemos ainda à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pela bolsa de estudos Bianca Rodrigues Moraes (#7640).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AACCI. American Association of Cereal Chemists International. *Approved Methods of Analysis*. 11th ed. St. Paul, MN: AACCI, 2010.

ABIMAPI. Associação Brasileira de Indústrias de Biscoitos, Massas Alimentícias, Pães & Bolos Industrializados. Anuário BB Editora. 2024.

ABIMAPI. Associação Brasileira de Indústrias de Biscoitos, Massas Alimentícias, Pães & Bolos Industrializados. Bolos Industrializados. 2025

AHA. American Heart Association. **Saturated fat**. Disponível em: <https://www.heart.org/en/healthy-living/healthy-eating/eat-smart/fats/saturated-fats>. Acesso em 18 de abril de 2025.

ALVES, S. de A. *et al.* Avaliação físico-química e sensorial de pão de forma elaborado com farinha de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e14101119433, 2021.

ASSUMPCÃO, R. S. C. Extração e modificação de proteína vegetal de Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) por técnicas não tradicionais. 2023.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. *et al.* (Ed.). *Water activity in foods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, 2020.

BONIN, M. C. Estratégias para a redução de gordura em bolos e biscoitos: uma revisão sistemática. 2021.

CHOQUE-QUISPE, D. Preliminary characterization of a spray-dried hydrocolloid from a high Andean algae (*Nostoc sphaericum*). **Foods**, v. 11, n. 11, p. 1640, 2022.

COLLA, K., *et al.* Fat replacers in baked food products. **Foods**, v. 7, n. 12, p. 192, 2018.

DA SILVA, C. I. *et al.* Perfil do consumidor e aceitabilidade de hambúrgueres de carne bovina desenvolvidos substituindo gordura suína por mucilagem de psyllium. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 2, p. 56, 2025.

DOLE FOOD COMPANY; MAYO CLINIC; UCLA CENTER FOR HUMAN NUTRITION. *Encyclopedia of foods: a guide to healthy nutrition*. San Diego: Academic Press, 2002.

DUMBRA, C. S. O. *et al.* Biscoito amanteigado sabor chocolate com bacon “chocobacon”. **Revista Científica Unilago**, v. 1, n. 1, 2023.

FECHINE, C. P. N. S. *et al.* Suplementação com fibra dietética: efeitos na pressão arterial, perfil metabólico e polimorfismo C677T do gene MTHFR em mulheres com excesso de peso. 2021.

FORTES, P. S. Estudo de viabilidade do uso de mucilagem de quiabo na elaboração de maionese. 2024.

GUARABIRA, M. E. F. *et al.* Avaliação da qualidade de pães integrais: impacto do uso de farinhas integrais reconstituídas. 2023.

KUMAWAT, K. L. *et al.* Association of reproductive phenology with air temperature in almond (*Prunus dulcis* [Mill.] D.A. Webb) cultivars under Northwestern Himalayan conditions. **Applied Fruit Science**, v. 66, n. 2, p. 581–588, 2024.

RAY, A. *et al.* An analysis of the influence of growth periods on potential functional and biochemical properties and thermal analysis of freeze-dried *Aloe vera* L. gel. **Industrial Crops and Products**, v. 76, p. 298–305, 2015.

LEITE, M. P.; LIBERATO, M. C. T. C. Reação de Maillard. *Pesquisas Bibliográficas Realizadas por Alunos das Disciplinas de Bioquímica e Química dos Alimentos UECE–2022-1*, p. 16.

LISE, C. C. *et al.* Mucilagem da ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata* Miller): aplicação em emulsionado cárneo e avaliação das propriedades funcionais mediante diferentes condições de secagem. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LOPES, F. S. F. *et al.* Avaliação da incorporação do pó de folhas de moringa (*Moringa oleifera* Lam.) nas características tecnológicas de bolo. 2021.

MACHADO, V. *et al.* Comparative assessment for forage palm and Agave sisalana biomass for sustainable biofuel production. **Journal of Bioengineering, Technologies and Health**, v. 8, n. 1, p. 15–19, 2025.

MARI, V. *et al.* Oficinas profissionalizantes e feira de panificação e quitandas no distrito de Antônio Pereira, Ouro Preto, MG: relato de experiência. **Além dos Muros da Universidade**, v. 9, n. 2, p. 01–06, 2024.

MASSARETTO I. L. *et al.* Nutritional characterization and effect of cooking on phenolic compounds, antioxidant capacity and sensory acceptability of commercial wild rice (*Zizania aquatica* L.). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, 50, 102705, 2023.

MONTEIRO, J. *et al.* A systematic review on gluten-free bread formulations using specific volume as a quality indicator. **Foods**, v. 10, n. 3, p. 614, 2021.

PINHO, L. G. R. *et al.* Reversão da fitotoxidez por glifosato com aplicação de aminoácidos em mudas de café conilon (*Coffea canephora* P.) clone LB. 1 Demuner. **Revista Ifes Ciência**, v. 7, n. 1, p. 01–11, 2021.

REHAL, J. *et al.* Fat replacers: Definition, types, and uses in different food products-a review.

International Journal of Food Science and Nutrition, v. 10, n. 2, p. 4–8, 2025.

RENZETTI, S. *et al.* Soluble fibres modulate dough rheology and gluten structure via hydrogen bond density and Flory-Huggins water interaction parameter. **Current Research in Food Science**, v. 10, p. 100991, 2025.

ROCHA, S. S. *et al.* Caracterização físico-química e nutricional e avaliação do potencial prebiótico e antioxidante do liofilizado de cladódios de palma [*Opuntia dillenii* (Ker Gawl). Haw.]. 2024.

SANTANA, F. B. *et al.* Evaluation of the mineral content in forage palm (*Opuntia ficus-indica* Mill and *Nopalea cochenillifera*) using chemometric tools. **Biological Trace Element Research**, v. 199, p. 3939–3949, 2021.

SANTOS, G. M. *Elaboração e avaliação nutricional de biscoitos tipo cookies*. 2022.

SCARTON, M. *et al.* Muffin com farinha de abóbora: qualidade tecnológica, sensorial e nutricional. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 24, e2021229, 2021.

SCHMIELE, M. *et al.* **Uso de palma forrageira como substituto de óleo em maionese**. Patente. Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Número do registro BR 10 2024 014082-6, 2024.

SILVA, A. S. *et al.* Sistema de produção, valor nutricional e eficiência da palma forrageira no semiárido: uma revisão. **Nucleus Animalium**, v. 12, n. 2, 2020.

SILVA, L. E. P. *et al.* Use of integral forage palm flour as an innovative ingredient in new fettuccine-type pasta: thermomechanical and technological properties, and sensory acceptance. **Foods**, v. 13, n. 17, p. 2683, 2024.

SILVA, S. J. M. *et al.* Otimização e caracterização físico-química de bolo tipo muffim adicionado de derivados de café (*Coffea arabica* L.). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, p. e32011931793, 2022.

Souza, E. C. *et al.* Development of muffin with the incorporation of olive pomace flour, extra virgin olive oil and hydrolyzed soy protein. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e58511226012, 2022.

VENDRUSCOLO, R. G. *et al.* Cowpea flour as a protein fortifier in low-fat and low-sugar buttery biscuit. In: *Anais da IX Conferência Internacional de Proteínas e Coloides Alimentares*. 2023

XAVIER, I. R. *et al.* Estudo da estabilidade da farinha de palma (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) armazenada em sachês de alumínio. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 11, p. 104692–104717, 2021.

YAZAR, G.; ROSELL, C. M. Fat replacers in baked products: their impact on rheological properties and final product quality. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n. 25, p. 7653–7676, 2023.