REID
REVISTA ELECTRÓNICA DE INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

ISSN: 2310-0036

Vol. 4 | Nº. 17| Ano 2026

Caracterização físico-química de pães de farinhas compostas de trigo, mandioca e soja

Physicochemical Characterisation of breads from Wheat, Cassava and Soybean Composite Flours

Marcos Ballat
Universidade Católica de Moçambique
mballat@ucm.ac.mz

Iñigo A. Martinicorena
Universidad Pública de Navarra
inigo.arozarena@unavarra.es

Maria R. Marín Arroyo
Universidad Pública de Navarra
remedios.marin@unavarra.es

Rua: Comandante Gaivão nº 688
C.P.: 821
Website: http://www.ucm.ac.mz/cms/
Revista: http://www.reid.ucm.ac.mz
Email: reid@ucm.ac.mz
Tel.: (+258) 23 324 809
Fax: (+258) 23 324 858
Beira, Moçambique

RESUMO

Moçambique enfrenta elevados índices de insegurança alimentar e forte dependência da importação de trigo, principal matéria-prima da panificação. O estudo objectivou desenvolver e caracterizar pães elaborados com farinhas compostas de trigo, mandioca e soja, avaliando o impacto da substituição parcial da farinha de trigo nas propriedades nutricionais, físicas e cromáticas do produto. Analisou-se a composição química das três farinhas e elaboraram-se doze formulações segundo um desenho experimental de misturas, avaliadas quanto à composição nutricional, volume, altura, textura (texturómetro TA.XT.PLUS) e cor (CIELab). Os dados instrumentais foram modelados por polinómios de Scheffé e submetidos a correlação linear, análise de componentes principais (PCA) e optimização múltipla pela função de desejabilidade. A farinha de soja revelou elevados teores de proteínas (49,0%), lípidos (23,5%), cinzas (4,2%) e fibras dietéticas totais (13,3%), complementando a farinha de mandioca, rica em hidratos de carbono (96,5%). A incorporação de soja aumentou o teor proteico dos pães até 17,3%, reduziu o volume e aumentou a firmeza, efeitos bem descritos pelos modelos de mistura ajustados (R^2 entre 76,1% e 99,9%). A PCA resumiu 86,4% da variância total em dois componentes. A substituição por mandioca até 30% não comprometeu as propriedades físicas, pelo que a substituição parcial da farinha de trigo por soja e mandioca é tecnologicamente viável em proporções moderadas.

Palavras-chave: panificação; farinhas compostas; trigo; soja; mandioca; desenho de misturas.

Abstract

Mozambique faces high levels of food insecurity and a strong dependence on wheat imports for bread production. This study aimed to develop and characterize breads made with composite flours of wheat, cassava and soybean, assessing the effect of partial wheat flour substitution on the nutritional, physical and colour properties of the final product. The chemical composition of the three flours was determined and twelve formulations were prepared according to a mixture experimental design, then evaluated for nutritional composition, loaf volume, height, texture (TA.XT.PLUS texturometer) and colour (CIELab). Instrumental data were modelled with Scheffé polynomials and examined through linear correlation, principal component analysis (PCA) and multiple-response optimisation using the desirability function. Soybean flour showed high protein (49.0%), lipid (23.5%), ash (4.2%) and total dietary fibre (13.3%) contents, complementing the energy-dense cassava flour (96.5% carbohydrates). Soybean incorporation increased bread protein content up to 17.3%, reduced loaf volume and

increased firmness, effects well captured by the fitted mixture models (R^2 between 76.1% and 99.9%). PCA summarised 86.4% of total variance in two components. Cassava substitution up to 30% did not compromise physical quality, so partial replacement of wheat flour with soybean and cassava flours is technologically feasible at moderate substitution levels.

Keywords: breadmaking; composite flours; wheat; soybean; cassava; mixture design.

1. Introdução

O pão é um dos alimentos mais consumidos a nível mundial e desempenha um papel central na alimentação humana, sobretudo em contextos urbanos. Tradicionalmente elaborado a partir de farinha de trigo, água, sal e levedura, a sua qualidade tecnológica depende da presença de glúten, responsável pelas propriedades reológicas da massa, pela retenção de gases durante a fermentação e pela estrutura final do produto (Dobraszczyk et al., 2001; Gutkoski et al., 1993).

Em Moçambique, o pão é uma fonte relevante de energia alimentar, mas o país não dispõe de condições agroclimáticas favoráveis à produção comercial de trigo, o que gera uma dependência crónica da importação e expõe o sector às flutuações do mercado internacional (FAO, 2024). Em contrapartida, o país dispõe de culturas locais amplamente produzidas, como a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), caracterizada por elevado teor de hidratos de carbono e ampla adaptabilidade edafoclimática (FAO, 2011). A mandioca apresenta, contudo, baixos teores de proteínas, fibras e minerais e ausência de glúten, o que compromete a qualidade tecnológica do pão em elevadas proporções de substituição (Pasqualone et al., 2010; Fiorda et al., 2013; Akintayo et al., 2020; Li et al., 2023).

A farinha de soja apresenta altos teores de proteínas de alto valor biológico, lípidos insaturados, minerais e fibras dietéticas, sendo reconhecida pelo seu potencial para enriquecer alimentos à base de cereais (Dhingra & Jood, 2004; Sabanis & Tzia, 2009). A sua incorporação em pães incrementa o teor proteico e mineral do produto, mas níveis elevados de substituição podem comprometer o volume, a firmeza e a cor, em resultado da diluição da rede de glúten e de interacções proteína-amido durante o processamento térmico (Ivanovski et al., 2012; Atudorei et al., 2023).

A utilização de farinhas compostas tem sido investigada como estratégia para reduzir a dependência do trigo, valorizar matérias-primas locais e melhorar o perfil nutricional dos produtos de panificação, desde que as proporções sejam ajustadas de modo a preservar a funcionalidade tecnológica e a aceitabilidade do produto final (Hoque et al., 2022; Amadeu et al., 2024; Alemu & Kuyu, 2025). A substituição parcial da farinha de trigo por farinha de mandioca mostra-se viável sobretudo quando combinada com ingredientes ricos em proteínas, como a soja (Akintayo et al., 2020; Udomkun et al., 2022; Alemu & Kuyu, 2025).

O presente estudo teve como objectivo desenvolver pães elaborados com farinhas compostas de trigo, mandioca e soja, avaliando o efeito da substituição parcial da farinha de trigo nas propriedades nutricionais, físicas, texturais e cromáticas do pão, incluindo a modelação dessas respostas por desenho experimental de misturas, e identificar proporções de substituição tecnologicamente viáveis para o contexto moçambicano.

2. Materiais e Métodos

Matérias-primas e local do estudo

O estudo foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Alimentos da Universidad Pública de Navarra, Espanha. Foram utilizadas três farinhas comercialmente disponíveis: farinha de trigo (Farinhas Guría S.A., Biurrun-Campanas, Navarra, Espanha), farinha de mandioca de origem tailandesa (Tribal Trading S. Coop., Espanha) e farinha integral de soja (Biospirit, Girona, Espanha). Como ingredientes auxiliares foram utilizados água potável de rede pública, sal comum refinado e fermento biológico fresco (Saccharomyces cerevisiae).

Desenho experimental e formulações

Foi adoptado um desenho experimental de misturas, considerando três componentes variáveis: farinha de trigo, farinha de soja e farinha de mandioca, em diferentes proporções, totalizando dez tratamentos distintos. Duas formulações (T100:S0:M0 e T80:S10:M10) foram produzidas em duplicado para verificação da reprodutibilidade experimental. As proporções das farinhas em cada formulação encontram-se descritas na Tabela 1, sendo que em todas as formulações as percentagens das farinhas totalizaram 100%.

Tabela 1. Desenho experimental de misturas com proporções das farinhas utilizadas

Tratamento	Código	Trigo (%)	Soja (%)	Mandioca (%)
1	T100:S0:M0	100	0	0
2	T90:S0:M10	90	0	10
3	T90:S10:M0	90	10	0
4	T80:S0:M20	80	0	20
5	T80:S20:M0	80	20	0
6	T70:S30:M0	70	30	0
7	T70:S0:M30	70	0	30
8	T80:S10:M10	80	10	10
9	T70:S10:M20	70	10	20
10	T70:S20:M10	70	20	10
11 (rep.)	T100:S0:M0	100	0	0
12 (rep.)	T80:S10:M10	80	10	10

Nota. T = trigo; S = soja; M = mandioca; rep. = repetição.

Processo de elaboração dos pães

Para cada formulação foram produzidos seis pães por lote, utilizando a formulação base descrita na Tabela 2: 100% de farinha (mistura conforme o tratamento), 60% de água, 4% de levedura fresca e 2% de sal, expressos em percentagem face à massa total de farinha.

Tabela 2. Formulação base de preparação dos pães

Ingrediente	Proporção (% base farinha)	Quantidade (g)
Farinha(s)	100	1500

Água	60	900
Levedura fresca	4	60
Sal	2	30

Nota. Proporções expressas em percentagem relativamente à massa total de farinha (baker's percentage).

O processo de elaboração seguiu as etapas convencionais de panificação: mistura dos ingredientes secos, adição de água e amassadura até obtenção de massa homogénea, fermentação primária, moldagem, fermentação secundária e cozedura (Figura 1). Após a cozedura, os pães foram arrefecidos à temperatura ambiente antes da realização das análises.

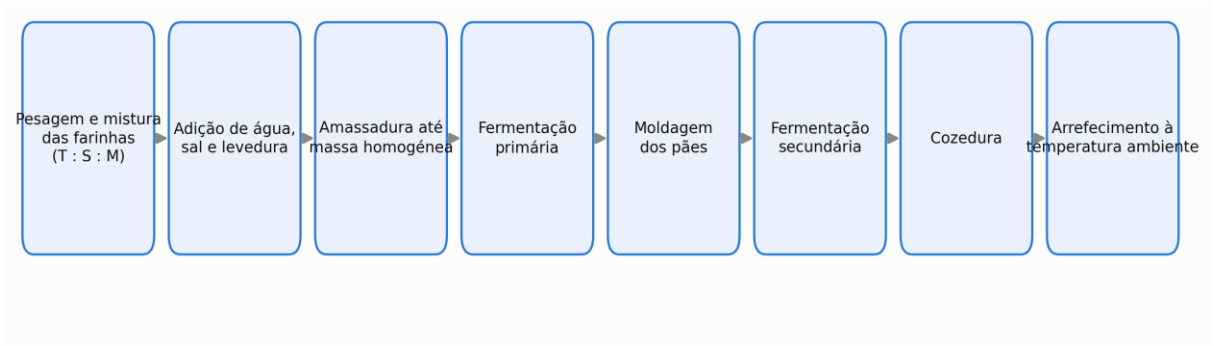


Figura 1. Fluxograma do processo de elaboração dos pães.

Caracterização química das farinhas

As farinhas foram analisadas quanto à composição química proximal. O teor de humidade foi determinado pelo método oficial ICC 109/1 (ICC, 1976) e o teor de cinzas pelo método ICC 104/1 (ICC, 1990). A determinação de lípidos foi efectuada pelo método de extracção Soxhlet com éter de petróleo (AACC 30-25.01; AACC, 1967). As proteínas foram quantificadas pelo método de Kjeldahl modificado (AOAC 979.09; AOAC, 2005), com factor de conversão de azoto adequado. As fibras dietéticas totais foram determinadas pelos métodos AOAC 985.29 e 960.52 (AOAC, 1997). O teor de hidratos de carbono foi calculado por diferença.

Propriedades físicas e texturais dos pães

O volume dos pães foi determinado por método indirecto utilizando sementes de colza em proveta graduada. A altura foi medida com paquímetro, registando-se a média de três medições por unidade. A análise de textura foi realizada com texturómetro TA.XT.PLUS (Stable Micro Systems, Reino Unido) equipado com acessório cilíndrico de alumínio de 36 mm de diâmetro, de acordo com a norma AACC 74-09 (AACC, 1986). Foram determinados a força máxima e a firmeza, expressos em Newton (N).

Análise da cor

A cor do miolo e da crosta dos pães foi determinada por espectrofotometria de reflexão, com espectrofotómetro calibrado, utilizando o sistema de coordenadas CIELab. Foram avaliados a

luminosidade (L*), a coordenada verde-vermelho (a*) e a coordenada azul-amarelo (b*). Para cada pão foram realizadas múltiplas leituras, sendo os resultados expressos como média ± desvio padrão.

Análise estatística

Os dados foram analisados com o software *Statgraphics Centurion*, versão XVI, e os resultados são expressos como média ± desvio padrão. As respostas instrumentais (altura, volume, força máxima, firmeza e parâmetros CIELab) foram modeladas em função da composição da farinha composta (trigo, soja e mandioca, em proporção decimal de soma unitária) através de polinómios canónicos de Scheffé, nas formas linear, quadrática, cúbica especial e cúbica completa (Cornell, 2002), seleccionando-se para cada variável o modelo mais complexo estatisticamente significativo ($p < 0,05$) por análise de variância da regressão. Realizaram-se ainda correlações lineares de Pearson e análise de componentes principais (PCA) entre as variáveis estudadas, e as formulações com propriedades mais próximas do pão de referência (100% trigo) foram identificadas por optimização múltipla mediante a função de desejabilidade de Derringer e Suich (1980).

3. Resultados e Discussão

Caracterização química das farinhas

A composição química proximal das farinhas de trigo, soja e mandioca encontra-se apresentada na Tabela 3. Observou-se variabilidade significativa entre as matérias-primas, reflectindo as diferenças inerentes à sua origem botânica e função tecnológica na panificação.

Tabela 3. Composição química das farinhas (g/100 g de matéria seca)

Farinha	Gorduras (%)	Proteínas (%)	Cinzas (%)	FDT (%)	HC (%)
Soja	23,5	49,0	4,2	13,3	9,8
Trigo	1,7	12,7	0,6	0,7	84,5
Mandioca	0,7	2,3	0,2	0,3	96,5

Nota. FDT = fibras dietéticas totais; HC = hidratos de carbono (calculados por diferença).

A farinha integral de soja apresentou os valores mais elevados de proteínas (49,0%), lípidos (23,5%), cinzas (4,2%) e fibras dietéticas totais (13,3%), confirmando o seu elevado valor nutricional. Estes resultados estão em concordância com estudos recentes que destacam a soja como fonte relevante de proteínas de alto valor biológico, lípidos insaturados e minerais (Hoque et al., 2022; Amadeu et al., 2024; Alemu & Kuyu, 2025).

A farinha de mandioca evidenciou um teor muito elevado de hidratos de carbono (96,5%) e baixos teores de proteínas, lípidos e fibras, corroborando a literatura, que a descreve como matéria-prima rica em amido mas nutricionalmente limitada quando utilizada isoladamente (Pasqualone et al., 2010; Akintayo et al., 2020; Li et al., 2023). A farinha de trigo apresentou teor intermédio de proteínas (12,7%), associado à presença de glúten, essencial ao desenvolvimento da estrutura da massa. A complementaridade entre as três farinhas sugere

que a sua combinação pode originar produtos com perfil nutricional melhorado, respeitados os limites tecnológicos adequados.

Composição nutricional dos pães

A composição nutricional dos pães elaborados com as diferentes formulações encontra-se apresentada na Tabela 4. A substituição parcial da farinha de trigo por farinha de soja promoveu aumentos significativos nos teores de proteínas, lípidos, fibras dietéticas totais e cinzas.

Tabela 4. Composição nutricional dos pães (g/100 g de base húmida)

Formulação	Água (%)	Proteínas (%)	Lípidos (%)	HC (%)	FDT (%)	Cinzas (%)
T100:S0:M0	31,1	9,7	1,3	55,2	0,8	1,9
T90:S0:M10	31,5	8,8	1,2	55,8	0,8	1,9
T90:S10:M0	32,1	12,0	2,8	49,3	1,7	2,1
T80:S0:M20	30,1	8,2	1,2	57,9	0,8	1,9
T80:S20:M0	30,3	14,8	4,5	45,5	2,6	2,4
T70:S30:M0	30,2	17,3	6,0	40,4	3,5	2,6
T70:S0:M30	31,6	7,3	1,1	57,5	0,8	1,8
T80:S10:M10	30,9	11,4	2,8	51,1	1,7	2,1
T70:S10:M20	31,6	10,5	2,7	51,4	1,7	2,1
T70:S20:M10	31,4	13,8	4,3	45,6	2,5	2,3
T100:S0:M0 (rep.)	31,7	9,6	1,3	54,7	0,8	1,9
T80:S10:M10 (rep.)	31,9	11,3	2,8	50,4	1,7	2,1

Nota. HC = hidratos de carbono; FDT = fibras dietéticas totais; T = trigo; S = soja; M = mandioca; rep. = repetição.

A formulação T70:S30:M0 apresentou o maior teor proteico (17,3%), representando um incremento expressivo face ao pão controlo (≈9,6–9,7%). O aumento do teor proteico com a incorporação de farinha de soja é amplamente reportado na literatura e está associado ao elevado conteúdo proteico desta leguminosa (Sanful & Darko, 2010; Atudorei et al., 2023). Em sentido contrário, o aumento da proporção de farinha de mandioca resultou numa diminuição do teor de proteínas, reflectindo a baixa contribuição proteica desta matéria-prima. A formulação T80:S0:M20 apresentou o maior teor de hidratos de carbono (57,9%), evidenciando o efeito diluidor da mandioca sobre os componentes proteicos e lipídicos.

Relativamente às fibras dietéticas totais, verificou-se um aumento progressivo com a incorporação de farinha de soja, atingindo 3,5% nas formulações com 30% de soja. Estes resultados reforçam o potencial da soja para o enriquecimento funcional de produtos de panificação (Udomkun et al., 2022). Do ponto de vista nutricional, a incorporação de farinha de soja mostrou-se altamente vantajosa, enquanto a mandioca contribuiu essencialmente para o aporte energético.

Propriedades físicas e texturais dos pães

Os resultados das determinações de altura, volume, força máxima e firmeza encontram-se na Tabela 5. Os pães controlo (100% trigo) apresentaram os maiores valores de volume (até 1520 cm^3) e altura (até 9,8 cm), confirmando a importância do glúten na retenção de gases e no desenvolvimento da estrutura do pão.

Tabela 5. Propriedades físicas e texturais dos pães (média ± desvio padrão)

Formulação	Altura (cm)	Volume (cm^3)	Força máx. (N)	Firmeza (N)
T100:S0:M0	9,8 ± 0,3	1487 ± 64	1,85 ± 0,11	1,10 ± 0,09
T90:S0:M10	9,3 ± 0,2	1497 ± 57	1,86 ± 0,13	1,08 ± 0,09
T90:S10:M0	7,3 ± 0,3	1297 ± 50	7,67 ± 0,82	4,43 ± 0,48
T80:S0:M20	9,4 ± 0,2	1423 ± 49	4,98 ± 0,24	3,38 ± 0,20
T80:S20:M0	7,4 ± 0,2	1327 ± 68	6,36 ± 1,41	4,20 ± 1,05
T70:S30:M0	7,3 ± 0,3	1033 ± 50	6,05 ± 0,43	3,98 ± 0,29
T70:S0:M30	9,0 ± 0,3	1417 ± 40	1,84 ± 0,10	1,11 ± 0,08
T80:S10:M10	7,3 ± 0,3	1200 ± 59	5,60 ± 0,41	3,30 ± 0,24
T70:S10:M20	7,3 ± 0,2	1190 ± 46	6,15 ± 0,32	3,87 ± 0,31
T70:S20:M10	6,1 ± 0,4	1070 ± 46	9,28 ± 0,28	5,45 ± 0,27
T100:S0:M0 (rep.)	9,3 ± 0,2	1520 ± 27	2,23 ± 0,28	1,28 ± 0,25
T80:S10:M10 (rep.)	6,7 ± 0,2	1097 ± 25	5,78 ± 0,70	3,14 ± 0,53

Nota. T = trigo; S = soja; M = mandioca; rep. = repetição.

A substituição parcial da farinha de trigo por farinha de soja resultou numa redução significativa do volume e da altura dos pães, sendo a formulação T70:S30:M0 a que apresentou o menor volume (1033 cm^3). Este comportamento pode ser atribuído à diluição da rede de glúten e à interferência das proteínas da soja na formação da matriz viscoelástica da massa, fenómeno amplamente descrito para pães enriquecidos com leguminosas (Ivanovski et al., 2012; Atudorei et al., 2023).

Em contraste, a incorporação de farinha de mandioca até 30% permitiu obter pães com volume e altura próximos aos do controlo, sugerindo que níveis moderados de substituição por mandioca são tecnologicamente viáveis. Resultados semelhantes foram reportados por Akintayo et al. (2020) e por Li et al. (2023), que identificaram 30% como o limiar de substituição por mandioca a partir do qual as propriedades tecnológicas da massa começam a deteriorar-se de forma mais acentuada.

Relativamente à textura, verificou-se um aumento significativo da força máxima e da firmeza com o incremento da proporção de farinha de soja. Os pães sem soja apresentaram valores de firmeza próximos de 1 N, enquanto os pães com maiores teores de soja atingiram valores superiores a 5 N. Este aumento pode ser associado à maior densidade da matriz proteica e à redução da capacidade de expansão da massa durante a fermentação, conforme descrito por Sabanis e Tzia (2009).

Caracterização da cor dos pães

Os parâmetros de cor do miolo e da crosta, determinados pelo sistema CIELab, encontram-se na Tabela 6. A luminosidade do miolo (L*) variou entre 56,6 e 66,5, sendo os valores mais elevados observados nos pães com maior proporção de trigo e mandioca. A incorporação de farinha de soja resultou numa diminuição da luminosidade do miolo, conferindo colorações mais escuras e amareladas.

Tabela 6. Parâmetros de cor CIELab do miolo e da crosta dos pães (média ± desvio padrão)

Formulação	L* (miolo)	a* (miolo)	b* (miolo)	L* (crosta)	a* (crosta)	b* (crosta)
T100:S0:M0	63,9 ± 1,3	0,4 ± 0,1	14,4 ± 0,8	54,3 ± 2,0	14,5 ± 0,9	39,6 ± 1,2
T90:S0:M10	64,4 ± 1,6	0,6 ± 0,1	15,3 ± 1,6	60,5 ± 1,5	11,3 ± 1,1	37,1 ± 0,8
T90:S10:M0	64,4 ± 2,8	1,9 ± 0,3	21,3 ± 1,2	37,0 ± 1,5	18,4 ± 0,3	40,9 ± 0,9
T80:S0:M20	59,4 ± 4,6	0,3 ± 0,2	14,0 ± 1,1	65,7 ± 1,2	7,4 ± 1,8	32,0 ± 4,3
T80:S20:M0	56,6 ± 2,9	2,3 ± 0,7	23,4 ± 2,1	26,7 ± 2,5	19,2 ± 1,1	39,2 ± 4,3
T70:S30:M0	56,8 ± 2,4	2,5 ± 0,2	27,2 ± 0,8	19,9 ± 1,4	22,2 ± 1,3	32,6 ± 4,3
T70:S0:M30	61,5 ± 1,9	0,1 ± 0,1	13,1 ± 0,8	69,9 ± 0,9	8,8 ± 0,8	37,7 ± 1,6
T80:S10:M10	62,5 ± 1,3	1,3 ± 0,1	19,6 ± 1,0	43,5 ± 2,9	16,6 ± 1,3	43,9 ± 1,6
T70:S10:M20	63,7 ± 1,2	1,4 ± 0,1	20,7 ± 0,9	54,7 ± 2,4	12,6 ± 1,0	39,2 ± 2,4
T70:S20:M10	63,0 ± 2,4	1,6 ± 0,2	23,8 ± 0,7	32,6 ± 1,1	18,7 ± 0,4	49,6 ± 0,9
T100:S0:M0 (rep.)	66,5 ± 1,8	0,5 ± 0,1	15,3 ± 0,7	57,3 ± 0,1	14,3 ± 0,8	41,6 ± 1,6
T80:S10:M10 (rep.)	62,0 ± 1,7	1,4 ± 0,1	20,6 ± 1,2	42,7 ± 3,3	17,3 ± 1,3	44,0 ± 1,6

Nota. L = luminosidade; a* = coordenada verde-vermelho; b* = coordenada azul-amarelo; T = trigo; S = soja; M = mandioca; rep. = repetição.*

Na crosta, a influência da soja foi ainda mais evidente, com redução acentuada de L* e aumento de a* (vermelho) e b* (amarelo), apresentando a formulação T70:S30:M0 a crosta mais escura e avermelhada. Este comportamento está associado à intensificação das reacções de Maillard durante a cozedura, promovidas pela maior disponibilidade de aminoácidos livres provenientes da farinha de soja (Fiorda et al., 2013; Hoque et al., 2022). A mandioca produziu o efeito inverso, com crostas mais claras, menos avermelhadas e menos amareladas, atribuível ao seu menor teor proteico e à consequente menor intensidade do escurecimento não enzimático (Pasqualone et al., 2010).

Modelos preditivos das variáveis instrumentais

A composição da farinha composta (proporções de trigo, soja e mandioca) foi utilizada como preditora das respostas instrumentais através de polinómios canónicos de Scheffé, seleccionando-se para cada variável o modelo mais complexo (linear, quadrático, cúbico especial ou cúbico completo) que resultou estatisticamente significativo. A Tabela 7 resume os modelos seleccionados, os respectivos coeficientes de determinação (R^2) e os valores de significância (p).

Tabela 7. Modelos de mistura seleccionados para as variáveis instrumentais

Variável	Modelo	R^2 (%)	p	g.l. resíduo
Altura	Quadrático	94,1	0,0013	6
Volume	Linear	76,1	0,0016	9
Força máxima	Cúbico completo	99,9	0,0058	2
Firmeza	Cúbico completo	99,9	0,0052	2
L*-miolo	Quadrático	79,0	0,0471	6
a*-miolo	Linear	89,1	< 0,0001	9
b*-miolo	Linear	94,9	< 0,0001	9
L*-crosta	Quadrático	99,1	< 0,0001	6
a*-crosta	Cúbico especial	97,8	0,0005	5
b*-crosta	Cúbico completo	99,2	0,0342	2

Nota. Modelos reajustados a partir dos dados brutos das Tabelas 5 e 6 por regressão de mínimos quadrados sobre os termos canónicos de Scheffé (T, S, M e respectivos produtos), sem intercepto, com significância avaliada por ANOVA da regressão (F-teste). Os modelos cúbico completo dispõem de apenas 2 graus de liberdade residuais (12 observações, 10 parâmetros).

O modelo quadrático explicou 94,1% da variação da altura (p = 0,0013) e o modelo linear 76,1% da variação do volume (p = 0,0016), confirmando que o trigo favorece ambas as respostas, que a soja as reduz de forma marcada e que a mandioca tem efeito muito mais moderado. Para a força máxima e a firmeza, apenas o modelo cúbico completo atingiu significância (R^2 = 99,9%; p = 0,0058 e p = 0,0052), traduzindo a interacção mais complexa entre os três componentes sobre a resistência da miga; como se assinala na Tabela 7, este ajuste quase perfeito decorre também do reduzido número de graus de liberdade residuais, pelo que deve ser lido como descritivo da região estudada e não como evidência de um mecanismo cúbico literal. A Figura 2 ilustra, sobre a região de mistura ensaiada (trigo entre 70% e 100%; soja e mandioca entre 0% e 30%, com soja + mandioca ≤ 30%), o efeito da formulação sobre estas respostas: o afastamento do vértice do trigo por via da soja reduz fortemente a altura e o volume e eleva a firmeza, ao passo que o afastamento pela mandioca tem impacto muito menor.

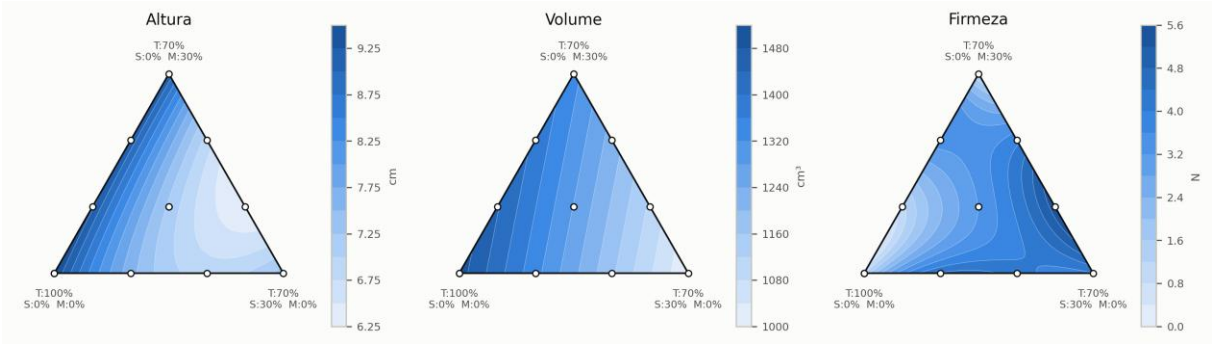


Figura 2. Efeito da formulação da farinha composta sobre a altura, o volume e a firmeza do pão, segundo os modelos da Tabela 7 (região de mistura ensaiada; os pontos brancos assinalam as formulações efectivamente testadas).

Nos parâmetros de cor, os modelos lineares para a*-miolo e b*-miolo (R^2 = 89,1% e 94,9%, respectivamente; $p < 0,0001$) confirmam que a soja é o principal factor que desloca a coloração do miolo para tons mais vermelhos e amarelos. Para a crosta, o modelo quadrático de L*-crosta (R^2 = 99,1%; $p < 0,0001$) e o modelo cúbico especial de a*-crosta (R^2 = 97,8%; $p = 0,0005$) mostram um padrão oposto entre soja e mandioca: a soja escurece e avermelha a crosta, enquanto a mandioca a clareia, resultado consistente com a maior disponibilidade de açúcares redutores e aminoácidos livres da soja para as reacções de Maillard durante a cozedura (Fiorda et al., 2013; Hoque et al., 2022). A Figura 3 sintetiza estes efeitos para L*-crosta, a*-crosta e b*-miolo.

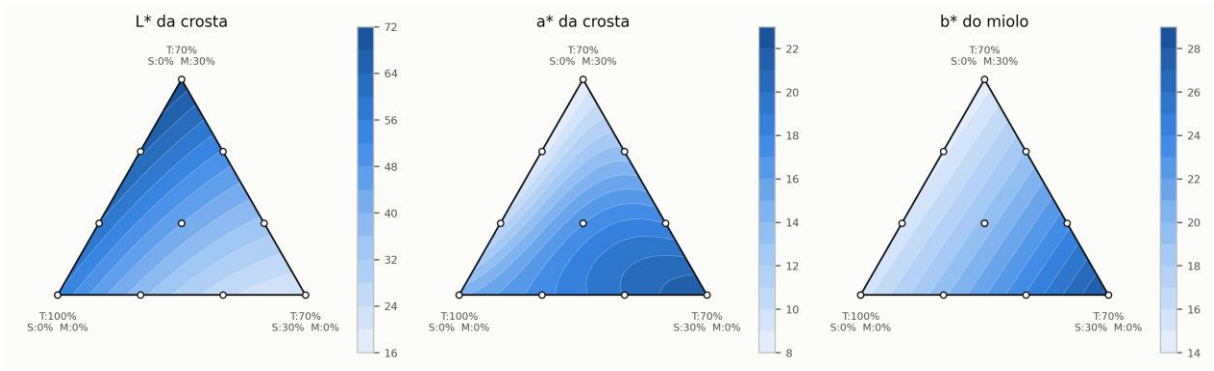


Figura 3. Efeito da formulação da farinha composta sobre a luminosidade (L) e o índice de vermelho (a*) da crosta e sobre o índice de amarelo (b*) do miolo, segundo os modelos da Tabela 7.*

Análise de correlação e componentes principais

A análise de correlação de Pearson revelou forte correlação positiva entre o volume e a altura dos pães ($r = 0,91$; $p < 0,01$) e correlação negativa significativa entre a firmeza e ambos os parâmetros ($r < -0,76$; $p < 0,01$), indicando que pães mais volumosos tendem a apresentar textura menos firme.

A Tabela 8 apresenta o resumo das correlações lineares entre as variáveis instrumentais. O volume correlaciona-se de forma muito positiva com a altura dos pães. A força máxima e a firmeza apresentam uma correlação muito próxima de 1 ($r = 0,99$), indicando que fornecem informação essencialmente equivalente. Verificou-se ainda, como esperado, uma correlação negativa entre a firmeza e os parâmetros de altura e volume.

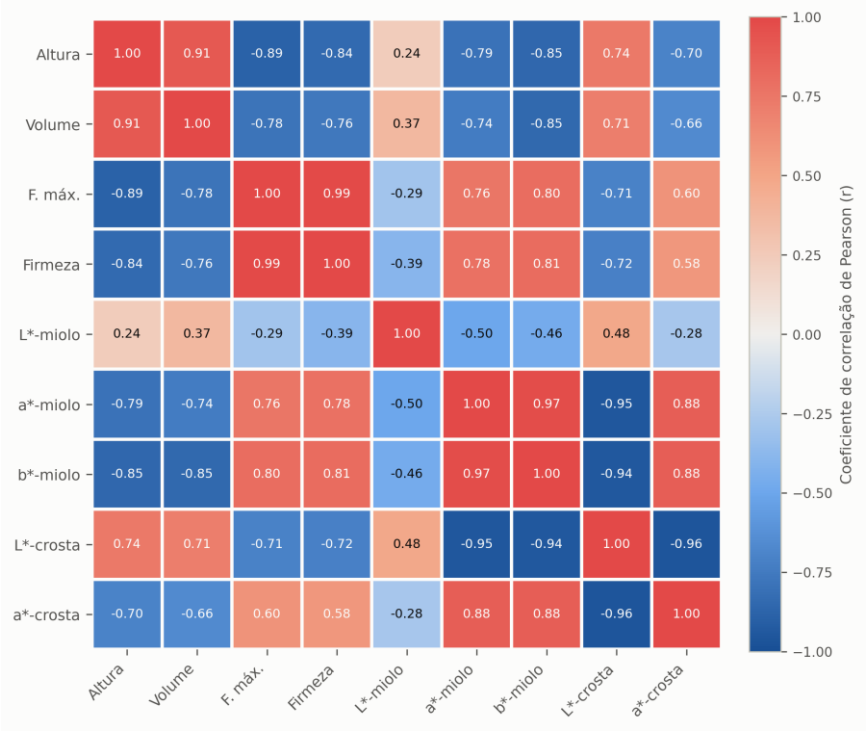


Figura 4. Matriz de correlações lineares de Pearson entre as variáveis instrumentais (n = 12 formulações).

Tabela 8. Resultado das correlações lineares entre as variáveis instrumentais

	Altura	Volume	Fmax	Firmeza	L-miolo	a-miolo	b-miolo	L-crosta	a-crosta
Volume	0,91								
Fmax	-0,89	-0,78							
Firmeza	-0,84	-0,76	0,99						
L-miolo	0,24	0,37	-0,29	-0,39					
a-miolo	-0,79	-0,74	0,76	0,78	-0,50				
b-miolo	-0,85	-0,85	0,80	0,81	-0,46	0,97			
L-crosta	0,74	0,71	-0,71	-0,72	0,48	-0,95	-0,94		
a-crosta	-0,70	-0,66	0,60	0,58	-0,28	0,88	0,88	-0,96	
b-crosta	-0,52	-0,31	0,39	0,28	0,47	0,12	0,21	-0,23	0,35

Nota. Coeficientes de correlação de Pearson (n = 12), recalculados a partir dos dados brutos das Tabelas 5 e 6.

Nos parâmetros de cor, a luminosidade da crosta (L*-crosta) correlaciona-se negativamente com a* da crosta e do miolo, e com b* do miolo. Por sua vez, os parâmetros a* e b* do miolo correlacionam-se positivamente entre si e com a* da crosta. Observa-se também que a luminosidade da crosta se correlaciona positivamente com a altura e o volume dos pães e, como seria de esperar, negativamente com a força máxima e com a firmeza.

A análise de componentes principais (PCA), realizada sobre as nove variáveis instrumentais padronizadas, resumiu 86,4% da variância total nos dois primeiros componentes principais (CP1 = 76,0%; CP2 = 10,4%). O CP1 separou claramente as formulações em função da presença ou ausência de soja: as formulações sem soja apresentaram escores negativos, associados a

maiores valores de volume, altura e luminosidade da crosta, enquanto as formulações com soja apresentaram escores positivos, associados a maior firmeza, força máxima e parâmetros cromáticos a* e b* mais elevados (Figura 5). O CP2 esteve associado sobretudo à luminosidade do miolo (L*-miolo), variável menos correlacionada com o conjunto das restantes. Estes resultados demonstram que a farinha de soja é o principal factor discriminante das propriedades tecnológicas dos pães analisados, ao passo que a farinha de mandioca exerce um efeito mais moderado, projectando-se principalmente ao longo do eixo do CP1 associado ao volume e à altura.

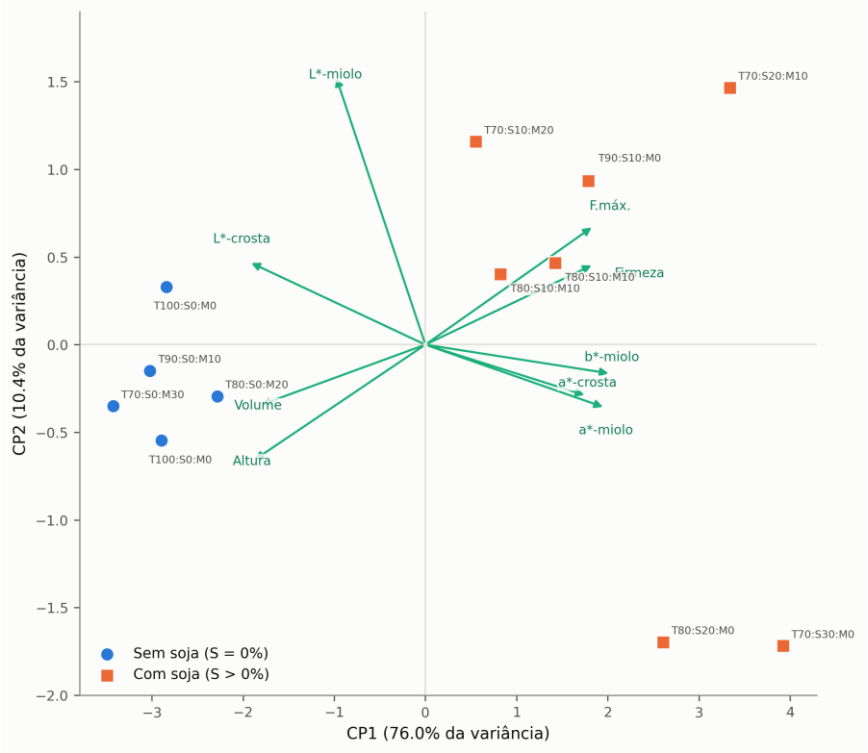


Figura 5. Componentes principais entre as formulações dos pães: escores das formulações (pontos) e pesos ("loadings") das variáveis instrumentais (vectores).

Optimização múltipla das variáveis instrumentais

A optimização múltipla teve por objectivo identificar formulações com características próximas às do pão controlo (100% trigo). Foi conduzida pela função de desejabilidade de Derringer e Suich (1980), aplicada em conjunto aos modelos de volume, firmeza, b*-miolo, L*-crosta, a*-crosta e b*-crosta apresentados na Tabela 7; as restantes variáveis não foram incluídas por serem redundantes com estas (Tabela 8) ou por não apresentarem modelo significativo a 95% de confiança. Os intervalos observados para as variáveis incluídas constam da Tabela 9.

Tabela 9. Valores mínimos e máximos observados para as variáveis incluídas na optimização múltipla

Característica	Mínimo observado	Máximo observado
Volume (cm³)	1033	1520
Firmeza (N)	1,1	5,5

b-miolo	13,1	27,2
L-crosta	19,9	69,3
a-crosta	7,4	22,2
b-crosta	32,0	49,6

Realizaram-se cinco optimizações sucessivas, alterando em cada uma os objectivos impostos às respostas (Tabela 10). Na primeira, maximizando o volume e a luminosidade da crosta e minimizando a firmeza, o b* do miolo e o a* e o b* da crosta, a solução foi 70% de trigo e 30% de mandioca, com volume previsto ainda moderado (1334 cm^3) e crosta muito clara (L* = 70,6). Fixando L*-crosta em 55, valor correspondente ao pão 100% trigo, a proporção de mandioca desce para 10% e o volume previsto sobe para 1443 cm^3 (optimização 2). Reduzindo sucessivamente o volume pretendido para 1400 cm^3 e para 1350 cm^3 (optimizações 3 e 4), surge na formulação uma pequena proporção de soja, entre 1,9% e 3,2%. Na optimização 5, fixando também a*-crosta em 14 e b*-crosta em 40, obteve-se a formulação com 85% de trigo, 5% de soja e 10% de mandioca.

Tabela 10. Características previstas do pão nas cinco optimizações múltiplas sucessivas

Optimização (T:S:M)	Volume (cm^3)	Firmeza (N)	b*-miolo	L*-crosta	a*-crosta	b*-crosta
1 (70:0:30)	1334	1,11	14,3	70,6	8,2	37,7
2 (90:0:10)	1443	1,1	15,1	60,1	10,4	37,1
3 (85,9:1,9:12,1)	1400	2,1	15,8	57,6	11,6	37,1
4 (82,7:3,2:13,9)	1368	2,6	16,3	56,4	12,2	37,0
5 (85:5:10)	1364	2,3	17,1	52,2	14,0	40,0

Com base nestes resultados, seleccionaram-se três formulações para a análise sensorial: 100% de trigo, por constituir o pão de referência; 70% de trigo e 30% de mandioca, por apresentar um volume apreciável e por uma substituição desta ordem ser economicamente atractiva no contexto moçambicano; e 85% de trigo, 5% de soja e 10% de mandioca, por permitir obter um pão com aspecto próximo do de referência, reduzindo a necessidade de trigo e compensando com soja a perda de propriedades nutricionais.

Implicações tecnológicas e aplicabilidade

Os resultados indicam que a substituição parcial da farinha de trigo por farinhas de soja e mandioca permite desenvolver pães com perfil nutricional melhorado, com impactos diferenciados nas propriedades tecnológicas. A farinha de soja é eficaz no enriquecimento proteico e funcional, devendo contudo ser limitada para evitar perdas excessivas de volume e aumento indesejável da firmeza (Tabela 7 e Figura 2). A farinha de mandioca pode ser incorporada até 30% sem comprometer significativamente a qualidade física do pão, limiar também identificado por Li et al. (2023), constituindo uma alternativa viável para reduzir a dependência do trigo importado em Moçambique.

4. Conclusão

O presente estudo demonstrou que a utilização de farinhas compostas de trigo, mandioca e soja na panificação é tecnicamente viável e permite melhorar o perfil nutricional do pão, contribuindo para a valorização de matérias-primas alternativas ao trigo importado.

A farinha de soja destacou-se pelos elevados teores de proteínas, lípidos, fibras dietéticas totais e minerais, enquanto a farinha de mandioca se revelou uma fonte predominantemente energética. A incorporação de soja aumentou o teor proteico dos pães até 17,3%, mas reduziu o volume e a altura e aumentou a firmeza, efeitos atribuídos à diluição da rede de glúten e bem descritos pelos modelos de mistura de Scheffé ajustados (R^2 entre 76,1% e 99,9%; Tabela 7); a substituição por mandioca até 30% mostrou-se tecnologicamente viável. A soja intensificou ainda as reacções de escurecimento durante a cozedura, originando miolos menos luminosos e crostas mais escuras e avermelhadas, ao passo que a mandioca favoreceu colorações mais claras. A análise multivariada confirmou a farinha de soja como principal factor discriminante das propriedades tecnológicas, com 86,4% da variância total explicada pelos dois primeiros componentes principais.

Em síntese, a substituição parcial da farinha de trigo por combinações adequadas de farinhas de soja e mandioca permite desenvolver pães com melhor valor nutricional e qualidade tecnológica aceitável, com potencial aplicação em Moçambique, onde a redução da dependência do trigo importado e a valorização de culturas locais constituem desafios estratégicos para a segurança alimentar. Como limitação, assinala-se que os modelos cúbicos completos ajustados para a força máxima, a firmeza e o b*-crosta dispõem de apenas dois graus de liberdade residuais, pelo que as suas previsões devem ser confirmadas em desenhos de mistura mais amplos. A validação sensorial das formulações seleccionadas constitui a etapa seguinte, já reportada em estudo complementar.

Referências Bibliográficas

Akintayo, O. A., Oyeyinka, S. A., Aziz, A. O., Olawuyi, I. F., Kayode, R. M. O., & Karim, O. R. (2020). Quality attributes of breads from high-quality cassava flour improved with wet gluten. *Journal of Food Science, 85*(8), 2310–2316. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15347

Alemu, T. T., & Kuyu, C. G. (2025). Review on the role of soybean and cassava root flours in enhancing the nutritional value, antioxidant capacity, anti-nutritional factors reduction, and sensory properties of wheat flour-based bread. *Discover Food, 6*(1), 49. https://doi.org/10.1007/s44187-025-00763-2

Amadeu, C. A. A., Martelli, S. M., & Vanin, F. M. (2024). Nutritional aspects of composite flours for baked and extruded products: A review. *Cereal Chemistry, 101*(3), 450–467. https://doi.org/10.1002/cche.10765

American Association of Cereal Chemists [AACC]. (1967). *Approved methods of the AACC* (Method 30-25). St. Paul, MN: AACC.

American Association of Cereal Chemists [AACC]. (1986). *Approved methods of the AACC* (Method 74-09). St. Paul, MN: AACC.

Association of Official Analytical Chemists [AOAC]. (1997). *Official methods of analysis of AOAC International* (16th ed., Methods 985.29 and 960.52). Gaithersburg, MD: AOAC International.

Association of Official Analytical Chemists [AOAC]. (2005). *Official methods of analysis of AOAC International* (18th ed., Method 979.09). Gaithersburg, MD: AOAC International.

Atudorei, D., Mironeasa, S., & Codină, G. G. (2023). Dough rheological behavior and bread quality as affected by addition of soybean flour in a germinated form. *Foods, 12*(6), 1316. https://doi.org/10.3390/foods12061316

Cornell, J. A. (2002). *Experiments with mixtures: Designs, models, and the analysis of mixture data* (3rd ed.). New York, NY: Wiley.

Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology, 12*(4), 214–219. https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968

Dhingra, S., & Jood, S. (2004). Effect of flour blending on functional, baking and organoleptic characteristics of bread. *International Journal of Food Science and Technology, 39*(2), 213–222. https://doi.org/10.1046/j.0950-5423.2003.00766.x

Dobraszczyk, B. J., Campbell, G. M., & Gan, Z. (2001). Breadmaking processes. In B. J. Dobraszczyk & M. P. Morgenstern (Eds.), *Bread: A slice of life* (pp. 226–227). Cambridge: Woodhead.

Fiorda, F. A., Soares Júnior, M. S., da Silva, F. A., Grosmann, M. V. E., & Souto, L. R. F. (2013). Microstructure, texture and colour of gluten-free pasta made with amaranth flour, cassava starch and cassava bagasse. *LWT – Food Science and Technology, 54*(1), 132–138. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.04.020

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2011). *Nutrition country profile: Republic of Mozambique*. Rome: FAO. Recuperado de https://www.fao.org/4/ap844e/ap844e.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2024). *GIEWS country brief: Mozambique*. Rome: FAO. Recuperado de https://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jsp?code=MOZ

Gutkoski, L. C., Veloso, C. B., Doro, C. T., Silveira, A. A. E., & Bonafe, L. Z. (1993). Uso de farinha mista de trigo e aveia em produtos de panificação. *Boletim do CEPPA, 11*(2), 33–45.

Hoque, M., Biswas, R., Alam, M., Sarkar, A., Haque, M. I., & Hasan, M. M. (2022). Pulse fortified whole wheat bread: A review on dough rheology, bread quality, and sensory properties. *F1000Research, 11*, 536. https://doi.org/10.12688/f1000research.113421.1

International Association for Cereal Science and Technology [ICC]. (1976). *ICC standard No. 109/1: Determination of the moisture content of cereals and cereal products (basic reference method)*. Vienna: ICC.

International Association for Cereal Science and Technology [ICC]. (1990). *ICC standard No. 104/1: Determination of ash in cereals and cereal products*. Vienna: ICC.

Ivanovski, B., Seetharaman, K., & Duizer, L. M. (2012). Development of soy-based bread with acceptable sensory properties. *Journal of Food Science, 77*(1), S71–S76. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02510.x

Li, M., Zhang, Y., You, X., Wang, Y., Zhou, K., Wei, P., & Wei, L. (2023). Assessment of functional properties of wheat–cassava composite flour. *Foods, 12*(19), 3585. https://doi.org/10.3390/foods12193585

Pasqualone, A., Caponio, F., Summo, C., Paradiso, V. M., Bottega, G., & Pagani, M. A. (2010). Gluten-free bread making trials from cassava (Manihot esculenta Crantz) flour and sensory evaluation of the final product. *International Journal of Food Properties, 13*(3), 562–573. https://doi.org/10.1080/10942910802713172

Rodríguez-España, M., Figueroa-Hernández, C. Y., Suárez-Quiroz, M. L., Canelo-Álvarez, F., Figueroa-Cárdenas, J. de D., González-Ríos, O., … Hernández-Estrada, Z. J. (2025). Optimization of gluten-free bread formulation using whole sorghum-based flour by response surface methodology. *Foods, 14*(17), 3113. https://doi.org/10.3390/foods14173113

Sabanis, D., & Tzia, C. (2009). Effect of rice, corn and soy flour addition on characteristics of bread produced from different wheat cultivars. *Food and Bioprocess Technology, 2*(1), 68–79. https://doi.org/10.1007/s11947-007-0037-7

Sanful, R. E., & Darko, S. (2010). Utilization of soybean flour in the production of bread. *Pakistan Journal of Nutrition, 9*(8), 815–818. https://doi.org/10.3923/pjn.2010.815.818

Udomkun, P., Masso, C., Swennen, R., Romuli, S., Innawong, B., Fotso Kuate, A., ... Vanlauwe, B. (2022). Comparative study of physicochemical, nutritional, phytochemical, and sensory properties of bread with plantain and soy flours partly replacing wheat flour. *Food Science & Nutrition, 10*(9), 3085–3097. https://doi.org/10.1002/fsn3.2907