Como a germinação afeta as propriedades bioativas e tecnofuncionais do arroz (*Oryza sativa*) e do feijão (*Phaseolus vulgaris*)?

Palavras-Chave: antidiabéticos; antioxidantes; concentrado proteico; compostos fenólicos.

Aluna: Fernanda Gimenes de Mello Abreu (RA: 252746); **Orientador:** Prof. Dr. Ruann Janser Soares de Castro; **Coorientadora:** Letícia Nunes da Cruz. Laboratório de Bioquímica de Alimentos, Departamento de Ciência de Alimentos e Nutrição, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

INTRODUÇÃO

O mercado global de proteínas vegetais está projetado para representar 7,7 % do mercado total de proteínas até 2030. No entanto, a aplicação dessas proteínas na formulação de alimentos ainda enfrenta diversos desafios, que vão desde limitações nutricionais até obstáculos tecnológicos, como a baixa solubilidade (Karabulut; Goksen; Mousavi Khaneghah, 2024). A adoção de diferentes estratégias para melhorar a funcionalidade das proteínas vegetais tem se mostrado essencial para impulsionar o avanço das proteínas alternativas. Entre essas estratégias, a hidrólise enzimática e a fermentação destacam-se como dois dos processos mais estudados. Embora os efeitos da germinação sobre as características nutricionais e bioativas de matrizes vegetais sejam bem documentados, seu impacto sobre as propriedades tecnofuncionais das proteínas ainda é pouco explorado (Chinma et al., 2024).

A combinação de arroz e feijão, alimentos amplamente consumidos e produzidos no Brasil, é especialmente vantajosa do ponto de vista nutricional, pois oferece um perfil complementar de aminoácidos essenciais, com destaque para a lisina no feijão e a metionina no arroz. Além disso, essas matérias-primas são acessíveis, de baixo custo e amplamente aceitas pela população brasileira. Nesse contexto, a germinação desponta como uma abordagem promissora para aprimorar suas propriedades bioativas e tecnofuncionais, ampliando seu valor agregado. Tais características tornam as proteínas de arroz e feijão candidatas promissoras para o desenvolvimento de produtos *plant-based*, com potencial para atender às demandas por alimentos mais saudáveis, funcionais e ambientalmente responsáveis (Lindemann et al., 2021).

METODOLOGIA

Grãos de arroz integral e feijão carioca foram submetidos ao processo de germinação à temperatura ambiente e ausência de luz, por um período de 72 horas. Amostras foram coletadas a cada 24 horas para monitoramento da cinética de germinação. As denominações adotadas para as amostras foram as seguintes: AC/FC = arroz/feijão cru; AI/FI = arroz/feijão intumescido; AG24/FG24 = arroz/feijão germinado por 24 horas; AG48/FG48 = arroz/feijão germinado por 48 horas; AG72/FG72 = arroz/feijão germinado por 72 horas. Após esse período, os grãos germinados foram congelados, liofilizados, moídos e as farinhas foram padronizadas em peneira Mesh Tyler 100. As farinhas foram caracterizadas quanto às suas propriedades tecnofuncionais, incluindo: capacidade de absorção de água e de óleo (WHC e OHC, respectivamente, g g^{-1}); concentração mínima de gelificação (CGC, g mL^{-1}); solubilidade (%); capacidade de formação de emulsão e espuma (%); e estabilidade de espuma (%) (Silva et al., 2022; Pérez-Andrés et al., 2019). Para as análises de bioatividade, extratos aquosos das farinhas na concentração de 50 mg mL^{-1} foram preparados e o teor de compostos fenólicos totais (mg GAE 100 g^{-1}) e a atividade antioxidante pelos métodos ABTS, DPPH e FRAP (µmol TE 100 g^{-1}) foram mensurados (Andrade; de Castro, 2023).

Com base nos melhores resultados, foi determinado o tempo ótimo de germinação. A partir das farinhas germinadas, os concentrados proteicos foram obtidos por solubilização em pH alcalino (pH 12 para o arroz e 9,0 para o feijão) seguida de precipitação no ponto isoelétrico (pH = 4,5). Os concentrados foram liofilizados e utilizados para formulação de blends em diferentes proporções: apenas arroz ("A"), apenas feijão ("F"), e mistura de arroz e feijão em proporções de 1:1 ("A:F 1:1"), 2:1 ("A:F 2:1") e 1:2 ("A:F 1:2"). Esses blends foram novamente avaliados quanto às propriedades tecnofuncionais e bioativas anteriormente descritas, e quanto à atividade antidiabética (inibição das enzimas α-amilase e α-glicosidase) (Andrade; de Castro, 2023).

As análises foram realizadas em triplicata e a análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Tukey foi realizada utilizando o software Minitab® 19 (Minitab Inc., Pensilvânia, EUA) com nível de significância de 5 %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Propriedades tecnofuncionais das farinhas de arroz e feijão germinados

As propriedades tecnofuncionais das farinhas de arroz e feijão estão apresentadas na Tabela 1. Um efeito positivo da germinação foi observado sobre as propriedades WHC, OHC e solubilidade para ambas as farinhas. Para a farinha de arroz, os melhores resultados foram observados após 48 horas de germinação para WHC (1,48 g g^{-1}) e após 72 horas para OHC (0,96 g g^{-1}) e solubilidade (23,64 %). Já para a farinha de feijão, os valores mais elevados de WHC (1,80 g g^{-1}) e solubilidade (100 %) foram registrados após 48 horas, enquanto o maior valor de OHC (1,16 g g^{-1}) foi alcançado após 72 horas de germinação.

Tabela 1 – Propriedades tecnofuncionais das farinhas de arroz e feijão em diferentes tempos de germinação

Amostra	WHC (g g^{-1})	OHC (g g^{-1})	CGC (g mL^{-1})	Solubilidade em pH 7,0 (%)	Formação de emulsão (%)	Formação de espuma (%)	Estabilidade de espuma (%)
AC	$1,20 \pm 0,08^{b}$	$0,82 \pm 0,01^{b}$	$0,18^{a}$	$19,35 \pm 0,42^{b}$	$97,32 \pm 0,15^{a}$	-	-
AI	$1,27 \pm 0,15^{ab}$	$0,87 \pm 0,01^{ab}$	$0,18^{a}$	$18,03 \pm 0,31^{c}$	$97,32 \pm 1,09^{a}$	-	-
AG24	$1,37 \pm 0,03^{ab}$	$0,87 \pm 0,01^{ab}$	$0,18^{a}$	$19,38 \pm 0,29^{b}$	$96,27 \pm 0,26^{a}$	-	-
AG48	$1,48 \pm 0,03^{a}$	$0,91 \pm 0,08^{ab}$	$0,18^{a}$	$19,95 \pm 0,48^{b}$	$95,85 \pm 1,64^{a}$	$6,67 \pm 0,00^{a}$	$100,00 \pm 0,00^{a}$
AG72	$1,46 \pm 0,03^{a}$	$0,96 \pm 0,01^{a}$	$0,18^{a}$	$23,64 \pm 0,30^{a}$	$95,67 \pm 0,17^{a}$	$6,67 \pm 0,00^{a}$	$100,00 \pm 0,00^{a}$
FC	$1,59 \pm 0,04^{B}$	$0,81 \pm 0,02^{C}$	$0,10^{A}$	$85,82 \pm 1,20^{C}$	$99,87 \pm 0,12^{A}$	$37,78 \pm 7,70^{A}$	$85,61 \pm 4,12^{A}$
FI	$1,68 \pm 0,07^{AB}$	$1,14 \pm 0,01^{A}$	$0,10^{A}$	$85,20 \pm 2,04^{C}$	$99,66 \pm 0,10^{A}$	$40,00 \pm 6,67^{A}$	$82,74 \pm 6,65^{A}$
FG24	$1,78 \pm 0,02^{A}$	$1,10 \pm 0,01^{B}$	$0,10^{A}$	$92,12 \pm 1,55^{B}$	$99,67 \pm 0,06^{A}$	$35,56 \pm 3,85^{A}$	$88,65 \pm 7,12^{A}$
FG48	$1,80 \pm 0,04^{A}$	$1,13 \pm 0,01^{AB}$	$0,10^{A}$	$100,00 \pm 1,48^{A}$	$99,72 \pm 0,16^{A}$	$40,00 \pm 6,67^{A}$	$90,54 \pm 4,65^{A}$
FG72	$1,76 \pm 0,03^{A}$	$1,16 \pm 0,01^{A}$	$0,10^{A}$	$78,77 \pm 1,51^{D}$	$99,52 \pm 0,19^{A}$	$37,78 \pm 3,85^{A}$	$87,14 \pm 2,47^{A}$

Resultados apresentados como média (n = 3) ± desvio padrão. Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$) entre as amostras na mesma coluna. A estabilidade da espuma foi avaliada após 60 minutos.

Durante a etapa de embebição dos grãos, uma série de enzimas hidrolíticas é ativada para que as reservas de nutrientes possam ser mobilizadas e utilizadas no crescimento da nova planta. Entre essas enzimas destacam-se as proteases e as carboidrases, responsáveis por promover a hidrólise parcial das proteínas e dos polissacarídeos de reserva, tornando suas estruturas menos compactas e mais expostas ao meio. Essas alterações estruturais podem revelar sítios com afinidade por água, aumentando a capacidade de retenção de água (WHC) e a solubilidade, ou por lipídios, elevando a capacidade de retenção de óleo (OHC) (Haji et al., 2024; Chinma, 2024). Nenhuma diferença significativa ($p > 0,05$) foi observada em qualquer das duas matrizes estudadas para as demais análises realizadas.

2. Teor de fenólicos e propriedades antioxidantes das farinhas de arroz e feijão germinados

A Tabela 2 apresenta os resultados do teor de compostos fenólicos totais e da atividade antioxidante dos extratos aquosos de arroz e feijão germinados. Observou-se uma redução no teor de compostos fenólicos após a embebição dos grãos, seguida por um aumento progressivo ao longo do processo de germinação. Os maiores valores foram registrados após 72 horas para ambas as matrizes, atingindo 133,48 mg GAE 100 mg^{-1} para o arroz (AG72) e 485,12 mg GAE 100 mg^{-1} para o feijão (FG72) (Tabela 2). O processo de germinação envolve tanto a biossíntese de novos compostos fenólicos quanto a liberação de fenólicos ligados às estruturas da parede celular, mediada pela atividade de esterases endógenas. A redução do teor de fenólicos nas amostras intumescidas pode estar relacionada à perda destes compostos por lixiviação (Rasera; Hilkner; de Castro, 2020).

Em relação à atividade antioxidante, a germinação do arroz promoveu melhorias apenas em relação ao método DPPH (máximo de 364,98 µmol TE 100 g^{-1} para AG24); para os demais métodos, a amostra não germinada (AC) apresentou os maiores resultados (783,74 µmol TE 100 g^{-1} para ABTS e 344,20 µMol TE 100 g^{-1} para FRAP, embora este valor seja estatisticamente igual ($p < 0,05$) ao valor apresentado por AG24 – 318,41 µmol TE 100 g^{-1}). Para as amostras de feijão germinado, de maneira similar, a germinação não alterou o potencial antioxidante medido pelo método ABTS (maior valor observado em FC, 1535,46 µmol TE 100 g^{-1}) e diminuiu o potencial antioxidante medido pelos métodos DPPH e FRAP (valores máximos de 645,71 e 350,00 µMol TE 100 g^{-1}, respectivamente, também detectados na amostra FC) (Tabela 2). Apesar de ter sido detectado aumento no teor de compostos fenólicos totais durante a germinação, os resultados de atividade antioxidante dos extratos aquosos em geral indicaram redução ou manutenção da atividade em relação às amostras não germinadas. Essa aparente discrepância pode ser explicada por alterações na solubilidade e no perfil dos compostos fenólicos durante a germinação, visto que muitos compostos com elevada capacidade antioxidante apresentam maior solubilidade em solventes orgânicos.

Tabela 2 – Fenólicos totais e propriedades antioxidantes das farinhas de arroz e feijão em diferentes tempos de germinação

Amostra	Fenólicos Totais (mg GAE 100 mg^{-1})	ABTS (µmol TE 100 g^{-1})	DPPH (µmol TE 100 g^{-1})	FRAP (µmol TE 100 g^{-1})
AC	121,15 ± 3,94^{b}	783,74 ± 63,13^{a}	311,07 ± 5,16^{b}	344,20 ± 23,59^{a}
AI	109,40 ± 0,59^{b}	583,52 ± 5,28^{b}	292,72 ± 5,40^{bc}	277,12 ± 17,40^{b}
AG24	115,80 ± 2,02^{bc}	604,50 ± 12,12^{b}	364,98 ± 6,12^{a}	318,41 ± 11,90^{a}
AG48	113,31 ± 1,39^{cd}	627,66 ± 29,29^{b}	287,04 ± 19,45^{bc}	253,01 ± 2,52^{bc}
AG72	133,48 ± 1,66^{a}	595,07 ± 0,14^{b}	273,04 ± 14,17^{c}	228,24 ± 11,15^{c}
FC	412,66 ± 10,05^{C}	1535,46 ± 88,18^{A}	645,71 ± 23,22^{A}	350,00 ± 21,90^{A}
FI	408,17 ± 5,64^{C}	1439,21 ± 59,63^{A}	375,96 ± 19,24^{C}	138,45 ± 7,44^{C}
FG24	468,06 ± 5,50^{B}	1525,86 ± 75,91^{A}	465,23 ± 16,79^{B}	173,77 ± 8,99^{BC}
FG48	472,10 ± 3,58^{AB}	1419,37 ± 48,44^{A}	381,64 ± 5,52^{C}	166,54 ± 19,39^{BC}
FG72	485,12 ± 5,07^{A}	1542,29 ± 94,67^{A}	359,36 ± 30,76^{C}	192,75 ± 12,08^{B}

Resultados apresentados como média (n = 3) ± desvio padrão. Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$) entre as amostras na mesma coluna.

Dados não apresentados, obtidos a partir de extratos metanólicos, apontam incremento da atividade antioxidante ao longo da germinação, sugerindo que compostos fenólicos menos polares não foram plenamente extraídos em meio aquoso. Além disso, é possível que a germinação tenha promovido a degradação ou conversão de compostos antioxidantes em formas menos ativas, bem como o redirecionamento de aminoácidos e peptídeos bioativos – também dotados de atividade antioxidante – para vias de biossíntese proteica, reduzindo sua disponibilidade no extrato final. Tais fatores ajudam a elucidar a redução observada na atividade antioxidante de algumas amostras, apesar do aumento global de fenólicos totais (Gan et al., 2017).

3. Propriedades tecnofuncionais e bioativas dos concentrados proteicos de arroz e feijão germinados e blends

A definição do tempo ótimo de germinação para a obtenção dos concentrados proteicos foi baseada prioritariamente nos resultados das propriedades tecnofuncionais, especialmente os resultados de solubilidade proteica, uma vez que diversos parâmetros foram avaliados e nem todos convergiram para as mesmas condições de germinação. Dessa forma, foram estabelecidos 48 horas de germinação para o feijão e 72 horas para o arroz como os tempos mais adequados. Os resultados das análises de teor proteico, compostos fenólicos, propriedades tecnofuncionais e bioativas dos blends proteicos estão apresentados na Figura 1.

O teor proteico dos concentrados de proteína de arroz e feijão foi 75,14 e 68,92 %, respectivamente, e os blends apresentaram quantidades de proteína proporcionais às combinações realizadas (Figura 1A). A solubilidade máxima foi detectada na amostra F (62,54 % em pH 7), como observa-se na Figura 1B. Concentrados de proteína de arroz são ricos em glutenina (80 %), cuja estrutura altamente compacta compromete sua solubilidade em água, especialmente em pH neutro (a amostra A apresentou apenas 4,39 % de solubilidade em pH 7), o que limita sua aplicação em muitos alimentos (Li et al., 2025). Dessa forma, observa-se uma maior solubilidade dos blends à medida que a proporção de proteínas de feijão aumenta (Figura 1).

Observou-se certa convergência entre os resultados de solubilidade em água e as propriedades de superfície, como a formação de emulsão (Figura 1C) e de espuma (Figura 1D), indicando que amostras com maior teor de proteínas solúveis apresentaram maiores capacidades emulsificante e espumante. Desta forma, os melhores resultados de capacidade emulsificante foram observados na amostra F (96,64 %), embora não tenham sido encontradas diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre as amostras contendo proteína de feijão. Em relação à capacidade de formação de espuma, o maior valor também foi registrado na amostra F (64,58 %), sendo estatisticamente equivalente ($p < 0,05$) ao da amostra A:F 1:2 (54,17 %). A maior solubilidade das proteínas do feijão provavelmente favoreceu sua migração para as interfaces ar/óleo (emulsão) ou ar/água (espuma), onde puderam ser adsorvidas e formar filmes interfaciais com maior eficiência, promovendo a estabilização desses sistemas (Gouvêa et al., 2022). Todos os blends apresentaram boa estabilidade de espuma (Figura 1E), retendo no mínimo 79 % da espuma formada após 60 minutos.

Os maiores valores de WHC e OHC foram observados nos blends com maior proporção de proteína de arroz (WHC de 2,56 g g^{-1} para o blend A:F 2:1, embora estatisticamente igual, $p < 0,05$, ao valor da amostra A; e OHC de 1,20 g g^{-1} para a amostra A) (Figura 1F). A extração das proteínas do arroz foi realizada em pH mais elevado (pH = 12) em comparação à do feijão (pH = 9), com base em valores ótimos descritos na literatura. O pH mais alto pode ter promovido uma desnaturação parcial das proteínas, favorecendo a exposição de sítios hidrofílicos e hidrofóbicos, o que aumentaria a afinidade das proteínas do arroz por água e óleo, melhorando, consequentemente, suas capacidades de retenção (Gouvêa et al., 2022). A CGC dos blends contendo proteína de

feijão (0,12 mg mL^{-1}) foi menor que a CGC da amostra A (0,14 mg mL^{-1}), indicando uma maior facilidade de formação de gel (Figura 1G).

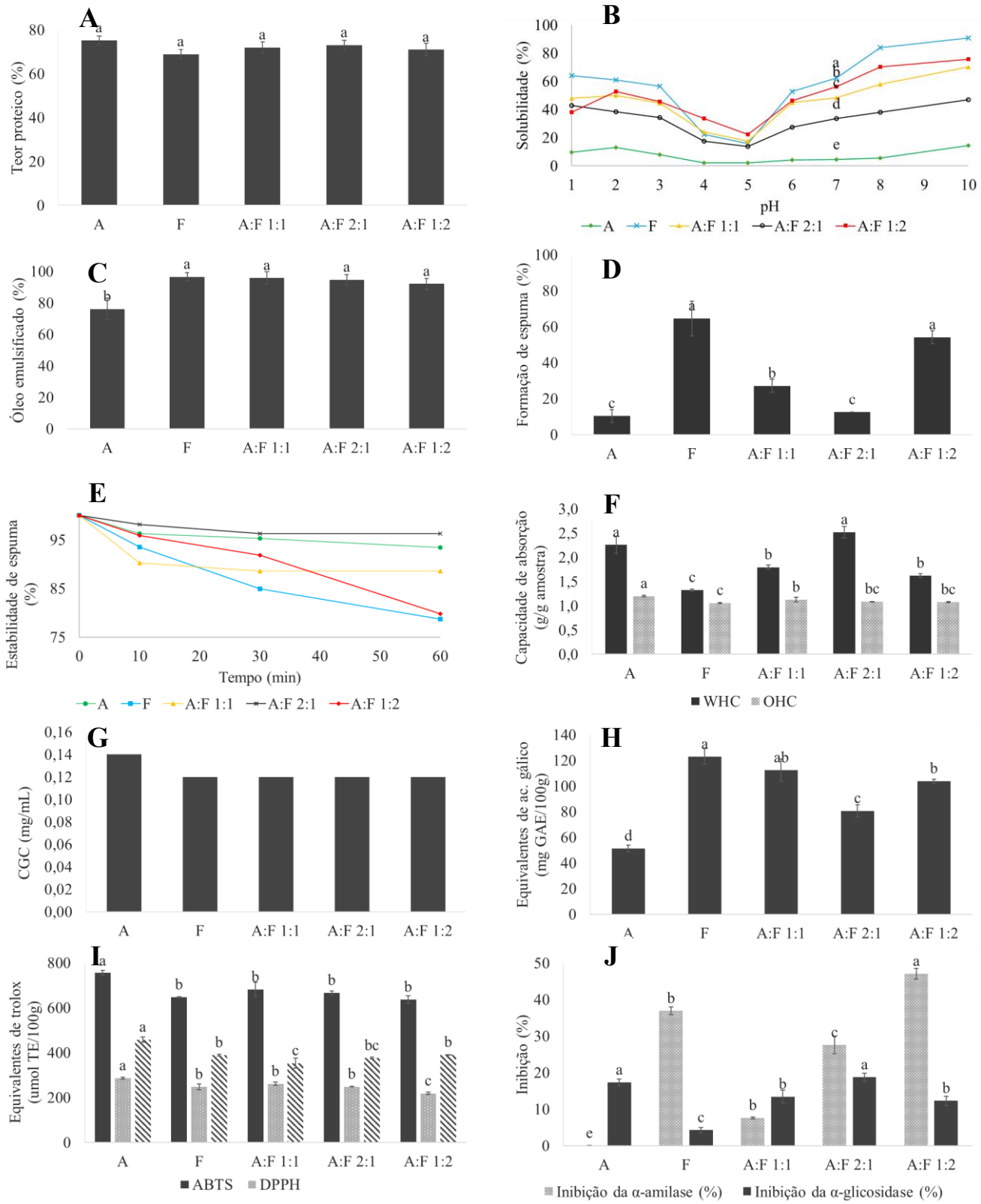

Figura 1 – Teor proteico (A), solubilidade (B), capacidade emulsificante (C), formação de espuma (D), estabilidade de espuma (E), WHC e OHC (F), CGC (G), fenólicos totais (H), atividade antioxidante (I) e atividade antidiabética (J) dos blends de concentrados proteicos de arroz e feijão germinados. Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$) entre as amostras para a mesma análise.

Amostras contendo proteína de feijão apresentaram maiores teores de fenólicos totais (máximo de 122,98 mg GAE 100 g^{-1}, amostra F, Figura 1H). No entanto, este resultado não se reflete nos resultados de capacidade

antioxidante, para os quais a amostra A apresentou os melhores resultados (755,91, 286,67 e 458,22 μmol TE 100 g^{-1} para ABTS, DPPH e FRAP, respectivamente). Esse resultado pode ser atribuído à presença de compostos antioxidantes não fenólicos no arroz, como sulfidrilas livres, peptídeos bioativos e ácido gama-aminobutírico (GABA), além de possíveis diferenças na biodisponibilidade, estrutura química e mecanismos de ação dos antioxidantes presentes em cada matriz (Baccin, 2023).

A Figura 1J apresenta os resultados de inibição das enzimas α-amilase e α-glicosidase. O blend A:F 1:2 apresentou os melhores resultados para a atividade inibitória da α-amilase (47,06 %), superior à da amostra contendo somente proteína de feijão (F, 36,96 %). A faseolamina, presente na fração proteica de feijões, atua como inibidor natural da enzima digestiva α-amilase, contribuindo para a redução da taxa de absorção da glicose (Araújo et al., 2022). A maior inibição detectada no blend pode ser atribuída a um efeito sinérgico com a proteína de arroz ou ao efeito da concentração otimizada da proteína de feijão. Em relação à α-glicosidase, a amostra A apresentou a maior inibição (17,31 %) o que pode ser atribuído à presença de compostos relatados como inibidores eficazes da α-glicosidase, como os ácidos ferúlico e clorogênico (Andrade; de Castro, 2023).

CONCLUSÕES

A germinação de arroz e de feijão mostrou-se uma estratégia eficaz para melhorar características tecnofuncionais desses grãos, como a capacidade de absorção de água e óleo e, especialmente, a solubilidade proteica – um dos principais entraves ao uso de proteínas vegetais em formulações alimentícias. O processo também aumentou o teor de compostos fenólicos. Os blends de concentrados proteicos germinados apresentaram propriedades tecnofuncionais promissoras, com destaque para aqueles ricos em proteína de feijão quanto à solubilidade e às propriedades interfaciais, e para os com maior proporção de proteína de arroz quanto às capacidades de retenção de água e óleo. Do ponto de vista bioativo, observou-se potencial antidiabético complementar entre as diferentes matrizes estudadas: inibição de α-amilase superior pelas proteínas de feijão e de α-glicosidase pelas proteínas de arroz. Esses resultados evidenciam o potencial dos concentrados e blends como ingredientes para o desenvolvimento de alimentos com funcionalidades tecnológicas aprimoradas e apelo nutracêutico, especialmente por utilizarem matérias-primas acessíveis e culturalmente familiares à população brasileira, o que pode favorecer sua aceitação.

BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, Vívian Tomasco; DE CASTRO, Ruann Janser Soares. Fermented grain-based beverages as probiotic vehicles and their potential antioxidant and antidiabetic properties. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 53, p. 102873, 2023.

BACCIN, Marina Andrea et al. **Elaboração de cerveja sem glúten com utilização de malte de arroz e quinoa**. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS, Erechim, 2023

ARAÚJO, Danielle *et al.* Efeitos hipoglicêmicos do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em roedores com diabetes mellitus. **Arquivos de Ciências da Saúde**, v. 30, 2022.

CHINMA, Chiemela Enyinnaya *et al.* Impact of germination on the techno-functional properties, nutritional composition, and health-promoting compounds of brown rice and its products: A review. **Journal of Food Science**, v. 89, p. 8-32, 2024.

GAN, Ren You *et al.* Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts: An updated review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 59, p. 1–14, 2017.

GOUVÊA, Lucas *et al.* Physical and techno-functional properties of a common bean protein concentrate compared to commercial legume ingredients for the plant-based market. **Food Hydrocolloids**, v. 137, p. 108351, 2023.

HAJI, Abdulmajid *et al.* Effect of processing methods on the nutrient, antinutrient, functional, and antioxidant properties of pigeon pea (*Cajanus cajan (L.)* Millsp.) flour. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101493, 2024.

KARABULUT, Gulsah; GOKSEN, Gulden; MOUSAVI KHANEGHAH, Amin. Plant-based protein modification strategies towards challenges. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 15, p. 101017, 2024.

LI, Zhaoying *et al.* Enhancement of the rice protein solubility using industry-scale microfluidization and pH cycling: A mechanistic study. **Food Hydrocolloids**, v. 160, p. 110844, 2025.

LINDEMANN, Igor *et al.* Rice and common bean blends: Effect of cooking on in vitro starch digestibility and phenolics profile. **Food Chemistry**, v. 340, p. 127908, 2021.

PÉREZ-ANDRÉS, Juan M. *et al.* Effect of cold plasma on the techno-functional properties of animal protein food ingredients. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 58, p. 102205, 2019.

RASERA, Gabriela Boscariol; HILKNER, Marina Hermenegildo; DE CASTRO, Ruann Janser Soares. Free and insoluble-bound phenolics: How does the variation of these compounds affect the antioxidant properties of mustard grains during germination? **Food Research International**, v. 133, p. 109115, 2020.

SILVA, Caroline Mellinger *et al.* Guia para Caracterização Tecnológica-Funcional de Ingredientes Proteicos para o Mercado de Produtos de Origem Vegetal. **Embrapa**, 27 p. (Série Documentos, 145).