

Pastas funcionales a partir de residuos hortofrutícolas: integración entre compuestos bioactivos y caracterización

Functional pasta from horticultural by-products: integration of bioactive compounds and technological characterization

G. López-García ^a, F. A. López-Medina ^a, G. Heredia-García ^a, A. G. Morachis-Valdez ^a, K. Saucedo-Vence ^{a, b}, O. Dublán-García ^{a, *}

^a Facultad de Química, Departamento de Alimentos, Universidad Autónoma del Estado de México, 50120, Toluca, Estado de México, México.

^b Procesos alimentarios, Universidad Tecnológica del Valle de Toluca, 52044, Lerma de Villada, Estado de México, México.

Resumen

El presente trabajo evaluó el potencial de residuos hortofrutícolas (hojas de col, coliflor y betabel, cáscaras de haba y naranja) como ingredientes funcionales en la elaboración de pasta enriquecida. Se caracterizaron las harinas obtenidas mediante análisis proximal, determinación de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante (DPPH• y ABTS•±), así como pruebas tecnológicas y sensoriales. Los resultados mostraron alto contenido de fibra y minerales, incremento significativo ($p < 0.05$) en el contenido de compuestos fenólicos y en la actividad antioxidante, especialmente en las formulaciones con cáscara de naranja y betabel, sin afectar la calidad tecnológica ni la aceptación del consumidor. Estos hallazgos demuestran que los subproductos vegetales pueden aprovecharse de manera sostenible en el desarrollo de alimentos funcionales, contribuyendo a la economía circular y al aprovechamiento integral de los recursos agroalimentarios.

Palabras Clave: Residuos hortofrutícolas, pastas funcionales, compuestos bioactivos.

Abstract

This study evaluated the potential of horticultural by-products (cabbage, cauliflower, and beet leaves, broad bean and orange peels) as functional ingredients in enriched pasta formulations. The resulting flours were characterized by proximate composition, total phenolic content, and antioxidant activity (DPPH• and ABTS•±), as well as technological and sensory analyses. Results showed high fiber and mineral contents, a significant ($p < 0.05$) increase in phenolic compounds and antioxidant capacity, particularly in formulations containing orange peel and beet leaves, without compromising technological quality or consumer acceptance. These findings demonstrate that plant by-products can be sustainably utilized in the development of functional foods, contributing to circular economy strategies and comprehensive agri-food resource valorization.

Keywords: Horticultural by-products, functional pasta, bioactive compounds.

1. Introducción

El incremento global en la generación de residuos agroalimentarios constituye uno de los principales desafíos ambientales, económicos y sociales de la actualidad. Se estima que cerca de un tercio de los alimentos producidos a nivel mundial se pierde o desperdicia a lo largo de la cadena de suministro; esto equivale a 1.3 mil millones de toneladas anuales aproximadamente (Benítez *et al.*, 2020; FAO, 2018).

En México, esta cifra asciende a más de 22 millones de toneladas, representando cerca del 33 % de la producción nacional de alimentos (CEDRSSA, 2019). La falta de aprovechamiento adecuado de estos residuos no solo incrementa la contaminación ambiental y la emisión de gases de efecto invernadero, sino que también implica la pérdida de biomasa con alto valor nutricional y funcional (UNEP, 2024).

En este contexto, los residuos hortofrutícolas se reconocen como una fuente abundante y subutilizada de compuestos bioactivos. Diversas investigaciones han demostrado que los

*Autor para la correspondencia: odublang@uaemex.mx

Correo electrónico: logg_sf@hotmail.com (Guadalupe López-García), flopezmedina92@gmail.com (Francisco Antonio López-Medina), gherediag516@alumno.uaemex.mx (Gerardo Heredia-García), agmorachis@gmail.com (Ana Gabriela Morachis-Valdez), karinne.saucedo@utvtol.edu.mx (Karinne Saucedo-Vence), odublang@uaemex.mx (Octavio Dublán García)

subproductos de crucíferas, como la col y la coliflor, son ricos en fibra dietaria, polifenoles y glucosinolatos, los cuales presentan propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y quimioprotectoras (Baenas *et al.*, 2019; Doniec *et al.*, 2022; Das *et al.*, 2024). Por su parte, las hojas y raíces de betabel (*Beta vulgaris*) contienen betalainas, antocianinas y flavonoides con elevada capacidad antioxidante, así como efectos cardioprotectores y hepatoprotectores (Clifford *et al.*, 2015; Khan *et al.*, 2016; Wallace *et al.*, 2021).

De manera complementaria, las cáscaras de haba (*Vicia faba*) representan una fuente relevante de compuestos fenólicos, taninos y proteínas con potencial hipoglucémico e hipocolesterolémico (Książak *et al.*, 2023), mientras que las cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) destacan por su alto contenido de pectinas, flavonoides y vitamina C, compuestos que contribuyen tanto a la funcionalidad nutricional como a la mejora de las propiedades tecnológicas de los alimentos (Cheok *et al.*, 2018; Feumba *et al.*, 2026).

La selección de estos subproductos se fundamenta en su alta disponibilidad regional y en su elevada generación como residuos agroindustriales. Además, su perfil bioactivo documentado respalda su potencial para el desarrollo de alimentos con valor agregado (Carvalho *et al.*, 2025).

El aprovechamiento de estos subproductos toma como base estrategias de economía circular y bioeconomía, las cuales promueven la revalorización de residuos orgánicos mediante su reincorporación en la cadena alimentaria para generar productos de alto valor agregado (Cerdá *et al.*, 2016; Castro-Muñoz *et al.*, 2022). En este sentido, la elaboración de pastas funcionales constituye una alternativa tecnológica viable y sostenible, ya que la pasta es un alimento de consumo masivo, bajo costo y larga vida de anaquel, que puede actuar como matriz vehicular para compuestos bioactivos y fibra dietaria (Bianchi *et al.*, 2021; Gazza *et al.*, 2022). La incorporación de harinas vegetales provenientes de residuos agroalimentarios ha demostrado incrementar el contenido de fibra total, minerales y antioxidantes sin comprometer significativamente la aceptabilidad sensorial o las propiedades de cocción (Foschia *et al.*, 2013; Bavaro *et al.*, 2025).

El desarrollo de pastas funcionales a partir de residuos hortofrutícolas contribuye así a tres ejes fundamentales: ambiental, al disminuir el volumen de residuos orgánicos; nutricional, al incrementar el valor funcional de un alimento básico mediante la adición de compuestos bioactivos naturales; y socioeconómico, al fomentar la innovación tecnológica y la valorización de biomasa regional. En consecuencia, la integración de hojas de col, coliflor y betabel, junto con cáscaras de haba y naranja, ofrece una vía eficaz para combinar sustentabilidad y salud mediante el diseño de alimentos funcionales de nueva generación.

2. Metodología

2.1 Materiales y reactivos

Se emplearon reactivos de grado analítico (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA), incluyendo DPPH• (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo), ABTS•± (2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)), reactivo de Folin-

Ciocalteu y ácido gálico como patrón. Los solventes fueron grado reactivo.

2.2 Obtención de residuos hortofrutícolas

Se recolectaron hojas externas de col (*Brassica oleracea* var. *capitata*), coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*), hojas de betabel (*Beta vulgaris*), cáscaras de haba (*Vicia faba*) y cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*), proporcionadas por comerciantes locales de la Central de Abasto de San Martín Atlacomulco, Estado de México. Los residuos correspondieron a material de descarte generado durante la comercialización de productos hortofrutícolas; en el caso específico de la cáscara de naranja, estas se obtuvieron como subproducto del exprimido para la elaboración de jugos.

Previo al procesamiento, se realizó una selección manual, descartando aquellas muestras que presentaran signos visibles de descomposición, daño mecánico o contaminación microbiológica, incluyendo crecimiento fúngico o indicios de contaminación bacteriana. Posteriormente, las muestras seleccionadas se lavaron con agua potable, se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio (30 ppm) y se secaron en un horno de aire forzado a 60 °C hasta alcanzar una humedad inferior al 12 %. Finalmente, el material seco se molió y se tamizó mediante malla número 100 (125–150 µm), y se almacenó en bolsas de polietileno dentro de un desecador hasta su análisis.

2.3 Análisis químico proximal

La composición proximal de las harinas obtenidas a partir de subproductos hortofrutícolas se determinó conforme a los métodos oficiales de la AOAC (1997), evaluándose humedad (925.09), cenizas (923.03), proteína (2001.11, método micro-Kjeldahl), grasa (920.39, extracción Soxhlet) y fibra cruda (962.09). Los resultados se expresaron en base seca (bs) como g/100 g de muestra.

2.4 Análisis microbiológico

La inocuidad de las harinas se verificó mediante los métodos oficiales mexicanos: la Norma Oficial Mexicana NOM-092-SSA1-1994, para la cuenta de bacterias aerobias en placa (Secretaría de Salud, 1994); la Norma Oficial Mexicana NOM-113-SSA1-1994, para la determinación de coliformes totales (Secretaría de Salud, 1994); y la Norma Oficial Mexicana NOM-111-SSA1-1994, para la determinación de mohos y levaduras (Secretaría de Salud, 1994). Con el fin de caracterizar las harinas de subproductos antes de su incorporación en las formulaciones de pasta, se evaluó su contenido de compuestos fenólicos totales y su actividad antioxidante.

2.5 Elaboración de pastas funcionales

Las pastas se elaboraron empleando sémola de trigo (*Triticum durum*) y harinas de residuos hortofrutícolas. Se desarrollaron dieciséis formulaciones, incluyendo un control (B0) sin sustitución y formulaciones con sustitución parcial de sémola por harinas de hojas de col (C), coliflor (Ci), betabel

(B), cáscaras de haba (H) y cáscaras de naranja (N) en niveles de 3, 5 y 7 % (p/p, base seca).

Para cada formulación, los ingredientes secos se homogeneizaron y se adicionaron 10 mL de agua por cada 100 g de mezcla, seguido de amasado manual. La masa se conformó por laminación utilizando una laminadora KitchenAid y se cortó en láminas de 10 × 5 cm. Posteriormente, las pastas se secaron a 45 °C durante 12 h y se enfriaron a temperatura ambiente antes de su almacenamiento y análisis, de acuerdo con Foschia *et al.*, (2013) y Granito *et al.* (2003).

2.6 Determinación de compuestos fenólicos totales

Los compuestos fenólicos totales se determinaron a partir de extractos acuosos obtenidos de las pastas elaboradas, siguiendo la metodología descrita por López-García *et al.*, (2018). Para ello, se pesaron 5 g de harina seca, los cuales se mezclaron con 20 mL de agua destilada y se agitaron a 200 rpm durante 4 h en oscuridad. Posteriormente, las mezclas se centrifugaron en una centrifuga refrigerada Eppendorf 5810 R (modelo 5811F, Eppendorf AG, Hamburg, Germany) a 11 000 rpm, a 4 °C durante 15 min, y los sobrenadantes obtenidos se emplearon para los análisis posteriores.

El contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) se determinó por el método de Folin-Ciocalteu según Gao *et al.*, (2002). A 60 µL de extracto se añadieron 690 µL de agua destilada y 375 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu; tras 3 min se adicionaron 900 µL de Na₂CO₃. Se incubó durante 90 min en oscuridad y se midió la absorbancia a 765 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (VELAB, modelo VE-5100UV, México). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g muestra. Los análisis se realizaron tanto en las harinas de subproductos como en las pastas elaboradas, empleando extractos acuosos obtenidos bajo las mismas condiciones experimentales, con el fin de evaluar el efecto del proceso de elaboración sobre el contenido fenólico.

2.7 Actividad antioxidante en pastas elaboradas

La actividad antioxidante se evaluó utilizando los extractos acuosos obtenidos de las pastas elaboradas, mediante los métodos DPPH• y ABTS•±. Los reactivos y soluciones estándar se prepararon conforme a los procedimientos descritos por Alam *et al.*, (2013) y Gao *et al.*, (2002). Para el ensayo DPPH•, se mezclaron 2.8 mL de una solución de DPPH• (0.1 mM) con 100 µL de extracto, y la absorbancia se midió a 520 nm tras el tiempo de reacción establecido. En el ensayo ABTS•±, 1 mL del reactivo ABTS•± se mezcló con 100 µL de muestra, registrándose la absorbancia a 734 nm. Los resultados de ambos ensayos se expresaron como mg equivalentes de Trolox por gramo de muestra [mg TE/g].

2.8 Evaluación tecnológica

Se evaluaron los parámetros de calidad de cocción: tiempo óptimo de cocción (TOC) [min], ganancia de peso [%], absorción de agua (IAA) [%] y pérdida de sólidos solubles (PC) [g/100 g, base seca], siguiendo la metodología de Foschia *et al.*, (2013).

El espesor se midió mediante un micrómetro digital (Mitutoyo, modelo 547-400S) efectuando mediciones por triplicado en distintos puntos de cada muestra para evaluar la uniformidad dimensional.

El color instrumental (L*, a*, b*) se determinó con un colorímetro HunterLab MiniScan EZ en pasta seca y pasta cocida (al TOC), con la finalidad de evaluar el efecto de la incorporación de harinas de subproductos y del proceso de cocción sobre la apariencia del producto.

La textura de la pasta cocida (al TOC) se analizó mediante un texturómetro TA-XT2 (Stable Micro Systems), registrando la dureza (N), definida como la fuerza máxima, y la adhesividad (N·s), correspondiente al área negativa durante la compresión. Estos parámetros se seleccionaron por ser representativos de la calidad textural de la pasta cocida y ampliamente utilizados en estudios de formulación de pastas enriquecidas (Bianchi *et al.*, 2021).

2.9 Evaluación sensorial

La evaluación sensorial se realizó únicamente en las pastas formuladas con un nivel de sustitución del 5 %, así como en el control sin sustitución (B0). Este nivel fue seleccionado con base en criterios experimentales y bibliográficos, considerando que concentraciones cercanas al 5 % de ingredientes ricos en fibra han sido reportadas como adecuadas para mantener la aceptabilidad sensorial en productos de pasta enriquecidos. Asimismo, este nivel cumple con los criterios establecidos para considerar un alimento como fuente de fibra dietaria (contenido superior al 3 %) y permitió evaluar un nivel intermedio de sustitución dentro del rango estudiado (Bianchi *et al.*, 2021).

2.10 Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante ANOVA de una vía. Cuando se detectaron diferencias significativas, se aplicó la prueba post hoc de Tukey HSD (p < 0.05) para comparación de medias, utilizando el software Statgraphics Centurion.

3. Resultados

3.1 Composición y caracterización fisicoquímica de los subproductos

La presente sección describe la caracterización proximal de las harinas obtenidas a partir de subproductos hortofrutícolas, consideradas como materias primas para la posterior elaboración de pastas funcionales. En la Figura 1 se presentan los subproductos secos utilizados para la obtención de las harinas. La Tabla 1 muestra la composición proximal de las harinas derivadas de hojas de col (C), coliflor (Ci), betabel (B), cáscaras de haba (H) y cáscaras de naranja (N).

Los contenidos de humedad oscilaron entre 3.61 y 10.63 %, valores que se encuentran dentro del rango de estabilidad reportado para harinas vegetales (≤12 %), considerado seguro para almacenamiento y control microbiológico en productos secos (ICMSF, 2018). Las diferencias observadas entre harinas pueden atribuirse a la estructura del tejido vegetal y a la capacidad diferencial de retención de agua tras el proceso de secado.

La harina de col (C) presentó el mayor contenido de fibra y cenizas (15.87 ± 0.26 %), superando significativamente ($p < 0.05$) al resto de las harinas evaluadas. Este comportamiento es consistente con lo descrito para especies del género *Brassica*, caracterizadas por su elevado contenido mineral y de fibra dietaria y bajo contenido lipídico (Drabińska *et al.*, 2018).

En contraste, la harina de coliflor (Ci) mostró el mayor contenido de lípidos (14.12 ± 0.40 %), junto con niveles moderados de fibra y cenizas. Aunque las crucíferas suelen asociarse con bajo contenido graso, variaciones en la fracción estructural y en el grado de madurez pueden influir en la composición proximal (Papoutsis *et al.*, 2018).

Las harinas de betabel (B) y haba (H) presentaron perfiles intermedios de proteína y fibra. En particular, la harina de haba mostró alto contenido de fibra y bajos niveles lipídicos, patrón característico de leguminosas como *Vicia faba* (Krenz *et al.*, 2024). Por su parte, la harina de naranja (N) destacó por su elevado contenido de fibra (13.58 ± 0.65 %) y bajo contenido de proteína (3.92 ± 0.07 %), rasgos típicos de cáscaras cítricas ricas en fracción insoluble y compuestos bioactivos (Papoutsis *et al.*, 2018).

En conjunto, las harinas obtenidas presentan características composicionales que respaldan su potencial como ingredientes funcionales en el desarrollo de productos alimentarios enriquecidos.

Tabla 1: Composición proximal de las harinas obtenidas a partir de subproductos hortofrutícolas (materias primas del estudio).

Harina	Humedad [%]	Cenizas [%]	Lípidos [%]	Proteína [%]	Fibra [%]
C	7.71 ± 0.44^b	15.87 ± 0.26^a	0.42 ± 0.02^e	7.01 ± 0.22^b	22.80 ± 0.47^a
Ci	10.63 ± 0.42^a	10.75 ± 0.14^c	14.12 ± 0.40^a	3.48 ± 0.18^d	12.41 ± 0.15^b
B	3.78 ± 0.48^c	13.53 ± 0.30^b	8.57 ± 0.26^b	9.03 ± 0.23^a	13.88 ± 2.04^b
H	4.58 ± 0.33^c	3.76 ± 0.39^d	1.4 ± 0.40^d	5.71 ± 0.31^c	20.60 ± 1.28^a
N	3.61 ± 0.20^c	3.54 ± 0.04^d	2.98 ± 0.49^c	3.92 ± 0.07^d	13.58 ± 0.65^b

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (ANOVA y Tukey, $p < 0.05$). Fuente: Elaboración propia.



Figura 1: Subproductos hortofrutícolas deshidratados empleados en las formulaciones: a) cáscara de haba; b) hojas de betabel; c) hojas de coliflor; d) hojas de col; e) cáscara de naranja. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Análisis microbiológico de las harinas de subproductos

Los resultados del análisis microbiológico (Figura 2) indicaron que todas las harinas de subproductos (hojas de col, coliflor, betabel y cáscaras de naranja y haba) presentaron recuentos de mesófilos aerobios inferiores a 30,000 UFC/g, ausencia de coliformes totales y recuentos de hongos menores a 10 UFC/g. Estos niveles se consideran indicativos de una adecuada calidad microbiológica para ingredientes secos de bajo contenido de humedad, basándose en criterios internacionales de inocuidad alimentaria (Codex Alimentarius Commission, 1997) que sugieren que recuentos microbianos bajos y ausencia de indicadores fecales reflejan buenas prácticas de higiene y control de calidad en productos de origen vegetal. En este contexto, los subproductos analizados podrían considerarse aptos para su uso como ingredientes alimentarios desde el punto de vista microbiológico.

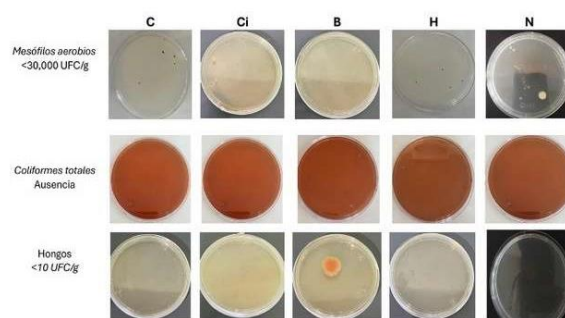


Figura 2: Recuento microbiológico de harinas de subproductos vegetales: mesófilos aerobios (UFC/g), coliformes totales y hongos.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Contenido de compuestos fenólicos totales

Los resultados de la Figura 3 muestran que la incorporación de fibras vegetales incrementó significativamente el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) en comparación con la pasta control ($p < 0.05$). Las formulaciones con naranja (N5–N7) y haba (H5–H7) presentaron los valores más elevados de CFT, superando significativamente al control. En contraste, las formulaciones con col y coliflor mostraron incrementos más moderados, en concordancia con la menor densidad fenólica reportada para estos subproductos.

El descenso del CFT tras la cocción puede atribuirse principalmente a la lixiviación de polifenoles hidrosolubles al agua de cocción, así como a procesos de degradación térmica y oxidación, especialmente en compuestos sensibles como flavonoides y ácidos fenólicos. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en matrices de pasta enriquecidas con subproductos vegetales, donde se reporta pérdida parcial de compuestos fenólicos por difusión y transformación estructural durante el tratamiento térmico (Crizel *et al.*, 2015; Iuga *et al.*, 2021). Estudios en pastas enriquecidas con subproductos de uva y alcachofa han señalado reducciones similares tras cocción, asociadas a la solubilidad y estabilidad térmica diferencial de los compuestos fenólicos (Iuga *et al.*, 2021).

No obstante, algunas formulaciones, particularmente las enriquecidas con haba y betabel, mostraron mayor retención relativa de CFT tras la cocción. Este fenómeno podría estar relacionado con interacciones matriz-polifenol, tales como

enlaces no covalentes con proteínas o complejos con almidón, que limitan su difusión y degradación térmica. Comportamientos similares han sido descritos en productos de pasta enriquecidos con fibras vegetales, donde la estructura del alimento actúa como barrera física y química frente a la pérdida de compuestos bioactivos (Iuga *et al.*, 2021; Bavaro *et al.*, 2025).

En comparación con la literatura, los niveles de CFT obtenidos en este estudio son equivalentes o superiores a los reportados para pastas enriquecidas con fibra de naranja, uva o hortalizas, lo que posiciona a las formulaciones con 5–7 % de fibra de haba, naranja y betabel como alternativas con potencial funcional mejorado.

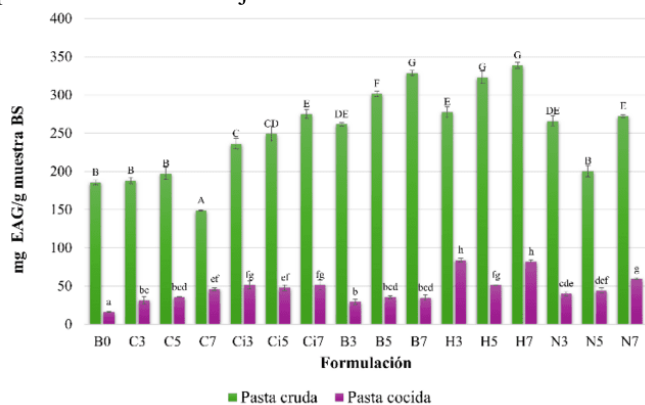


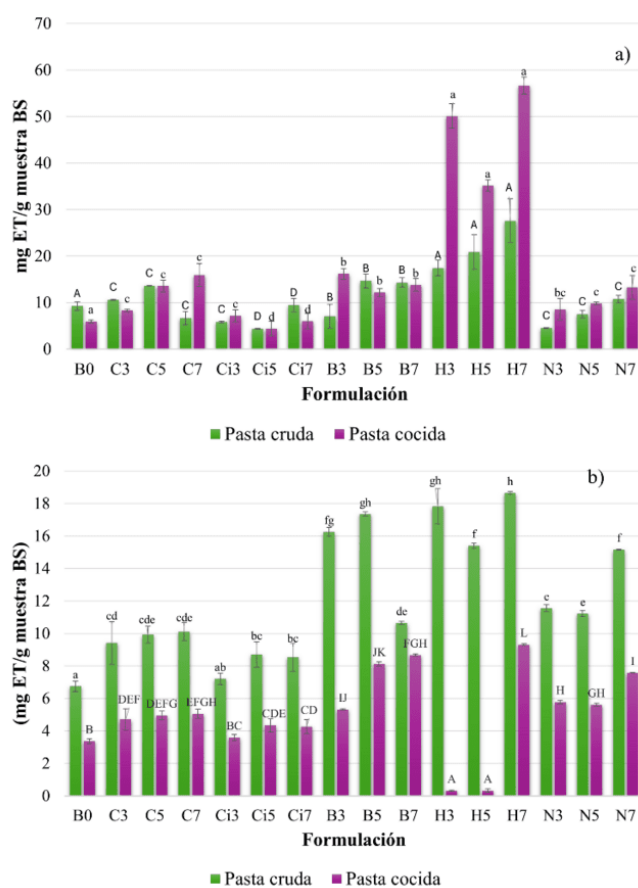
Figura 3: Contenido de compuestos fenólicos totales (mg EAG/100 g, base seca) en pastas crudas y cocidas elaboradas con 3, 5 y 7 % de sustitución por harinas de subproductos hortofrutícolas. Letras minúsculas indican diferencias significativas entre tratamientos en pasta cruda y letras mayúsculas en pasta cocida (ANOVA y prueba de Tukey, $p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Actividad antioxidante

La actividad antioxidante evaluada mediante DPPH• y ABTS•± (Figura 4) mostró diferencias significativas entre tipos de fibra, concentraciones y estado de cocción ($p < 0.05$). En ambos métodos, las pastas crudas presentaron valores superiores a las cocidas, lo que confirma la pérdida parcial de compuestos termosensibles durante el tratamiento térmico. Las formulaciones elaboradas con fibra de haba (H5–H7) exhibieron las mayores inhibiciones radicalarias, seguidas por las formulaciones con fibra de betabel y naranja; en contraste, las pastas fortificadas con col y coliflor mostraron los valores más bajos. El incremento en la concentración de fibra también produjo un aumento significativo en la capacidad antioxidante dentro de cada tipo de formulación.

Aunque la cocción redujo la actividad antioxidante en todos los tratamientos, se mantuvieron diferencias estadísticas entre fibras, destacando la formulación H7 como la de mayor actividad después de la cocción. Estos resultados son consistentes con estudios previos que reportan que la incorporación de subproductos vegetales incrementa la capacidad antioxidante de las pastas, aunque con pérdidas atribuibles al procesamiento térmico (Dziki, 2021; De Paula *et al.*, 2017). Asimismo, los patrones observados sugieren la contribución de antocianinas, betalaínas y flavonoides parcialmente termoestables, así como una posible liberación de compuestos fenólicos ligados durante la cocción (Alam *et al.*, 2013; Clifford *et al.*, 2015).



Figuras 4: Actividad antioxidante expresada como mg equivalentes de Trolox/g de muestra en pasta cruda y cocida: a) ensayo DPPH•; b) ensayo ABTS•±. Letras minúsculas indican diferencias significativas entre tratamientos en pasta cruda y letras mayúsculas en pasta cocida (ANOVA y Tukey, $p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Propiedades tecnológicas de cocción

El TOC osciló entre 15 y 20 min, siendo mayores en las formulaciones con betabel (B7) y coliflor (C17). Las PC variaron entre 4.70 y 19.32 %, con mayores valores en H3 y N7, mientras que el IAA varió entre 216.41 y 387.40 %, evidenciando diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$) (Tabla 2).

El aumento en la absorción de agua y en el TOC se asocia a la mayor capacidad de hinchamiento y retención hídrica de las fibras solubles y pectinas presentes en los residuos, en concordancia con Foschia *et al.*, (2013).

Tabla 2: Parámetros de cocción, parámetros de color, espesor y textura de las pastas funcionales.

Subproducto	L*	a*	b*	Espesor [mm]	Dureza [N]	Adhesividad [N·s]	TOC [min]	PC [g / 100 g, bs]	IAA [%]
B0	64.08 ± 1.50 ^a	-0.20 ± 0.09 ^e	15.70 ± 3.78 ^b	1.06 ± 0.03 ^{bc}	0.61 ± 0.37 ^{cd}	3.82 ± 1.42 ^b	15	7.56 ± 0.78 ^c	306.31 ± 8.33 ^b
C3	55.24 ± 3.30 ^a	-0.40 ± 0.03 ^e	26.28 ± 1.58 ^a	1.12 ± 0.04 ^{bc}	0.32 ± 0.18 ^d	2.44 ± 0.85 ^{ab}	15	8.38 ± 0.50 ^{bc}	284.48 ± 4.95 ^b
C5	51.44 ± 1.71 ^b	-0.32 ± 0.03 ^e	21.96 ± 4.10 ^a	1.11 ± 0.07 ^{bc}	0.53 ± 0.23 ^{cd}	3.18 ± 1.00 ^{ab}	20	8.74 ± 0.24 ^{bc}	340.26 ± 28.26 ^b
C7	57.49 ± 0.63 ^b	-0.16 ± 0.07 ^e	20.81 ± 2.5 ^a	1.10 ± 0.03 ^{bc}	0.98 ± 0.44 ^{ab}	4.56 ± 1.18 ^a	20	15.82 ± 0.23 ^{ab}	352.82 ± 23.46 ^b
Ci3	57.49 ± 0.63 ^a	0.18 ± 0.02 ^e	27.53 ± 4.81 ^a	1.18 ± 0.08 ^{bc}	0.71 ± 0.33 ^d	4.83 ± 1.29 ^b	15	15.36 ± 0.56 ^c	331.39 ± 3.11 ^{ab}
Ci5	56.12 ± 3.67 ^a	0.07 ± 0.03 ^e	17.36 ± 3.41 ^b	1.10 ± 0.10 ^{ab}	0.45 ± 0.13 ^{bcd}	3.10 ± 0.74 ^{ab}	20	17.36 ± 1.20 ^c	387.40 ± 8.22 ^{ab}
Ci7	45.69 ± 0.26 ^c	1.51 ± 0.16 ^c	20.75 ± 0.90 ^a	1.12 ± 0.08 ^{ab}	0.33 ± 0.09 ^{abc}	2.28 ± 0.72 ^a	20	14.12 ± 0.89 ^{bc}	343.56 ± 7.71 ^{ab}
B3	43.69 ± 4.63 ^c	1.31 ± 0.12 ^c	13.79 ± 1.75 ^b	1.16 ± 0.64 ^{ab}	1.12 ± 0.16 ^{abcd}	5.17 ± 0.74 ^b	15	10.63 ± 1.93 ^{bc}	306.68 ± 13.10 ^{ab}
B5	37.30 ± 1.24 ^d	1.42 ± 0.09 ^c	17.22 ± 3.05 ^b	1.11 ± 0.05 ^{ab}	0.45 ± 0.12 ^{abcd}	3.49 ± 0.45 ^{ab}	20	13.84 ± 0.83 ^{bc}	319.84 ± 26.5 ^b
B7	38.64 ± 2.05 ^c	1.43 ± 0.39 ^c	13.56 ± 1.64 ^b	1.12 ± 0.06 ^{ab}	0.52 ± 0.09 ^{ab}	3.72 ± 0.54 ^a	20	15.20 ± 0.77 ^{ab}	387.40 ± 8.22 ^b
H3	47.11 ± 1.09 ^b	1.95 ± 0.11 ^c	15.32 ± 0.84 ^b	1.16 ± 0.07 ^{ab}	0.63 ± 0.21 ^{abc}	3.92 ± 1.23 ^b	15	19.32 ± 0.03 ^{bc}	320.51 ± 2.44 ^{ab}
H5	49.30 ± 0.80 ^b	1.07 ± 0.28 ^d	9.58 ± 1.18 ^c	1.07 ± 0.02 ^{ab}	0.29 ± 0.11 ^{ab}	2.64 ± 0.59 ^a	20	4.70 ± 0.95 ^{bc}	309.32 ± 2.86 ^b
H7	53.08 ± 7.53 ^b	1.15 ± 0.17 ^c	8.90 ± 1.18 ^c	1.13 ± 0.02 ^a	0.57 ± 0.16 ^a	4.07 ± 1.10 ^a	20	10.46 ± 0.99 ^c	320.24 ± 7.40 ^a
N3	56.63 ± 1.28 ^a	4.83 ± 0.44 ^b	26.08 ± 2.25 ^a	1.03 ± 0.05 ^{bc}	0.39 ± 0.10 ^{bcd}	2.94 ± 0.58 ^b	15	11.61 ± 2.27 ^{bc}	346.94 ± 5.48 ^{ab}
N5	48.25 ± 1.88 ^b	6.33 ± 0.75 ^a	19.45 ± 1.85 ^b	1.07 ± 0.03 ^{ab}	0.60 ± 0.20 ^{abc}	3.56 ± 0.66 ^{ab}	20	11.87 ± 0.76 ^{bc}	216.41 ± 8.48 ^b
N7	50.83 ± 0.36 ^b	6.91 ± 0.25 ^a	22.25 ± 0.60 ^a	1.16 ± 0.05 ^c	0.96 ± 0.34 ^{ab}	4.32 ± 1.13 ^a	20	16.41 ± 2.52 ^a	298.56 ± 2.91 ^b

Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA y Tukey, $p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia

3.6 Color y textura

Los parámetros de color CIE Lab* (Tabla 2) mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) respecto al control. Los valores de L* oscilaron entre 37.30 y 64.08, observándose una reducción significativa de la luminosidad en las formulaciones con betabel y naranja en comparación con B0. Asimismo, las pastas enriquecidas con betabel y naranja exhibieron incrementos en los valores de a* y b*, reflejando tonalidades rojizas y anaranjadas más intensas, mientras que las formulaciones con col y coliflor presentaron cambios más moderados en los parámetros cromáticos.

La dureza osciló entre 8.50 y 16.80 N, observándose mayores valores en las formulaciones H7, C7 y N7. La adhesividad varió entre 2.28 y 5.17 N·s, sin diferencias drásticas respecto al control. Estos valores se encuentran dentro del intervalo reportado para pastas enriquecidas (Granito *et al.*, 2003).

3.7 Evaluación sensorial

El panel de 50 panelistas no entrenados calificó las pastas entre 3.3 y 4.5 puntos en la escala hedónica de 5 (Figura 5). Las muestras con cáscara de naranja obtuvieron la mejor aceptación general (4.2 ± 0.5), seguidas por las de betabel (3.9 ± 0.4).

Los atributos de color y sabor fueron determinantes en la preferencia del consumidor, quienes describieron los productos como “agradables” y “de sabor natural”. Los tratamientos con col y coliflor fueron aceptados moderadamente debido a su color pálido y aroma vegetal pronunciado.

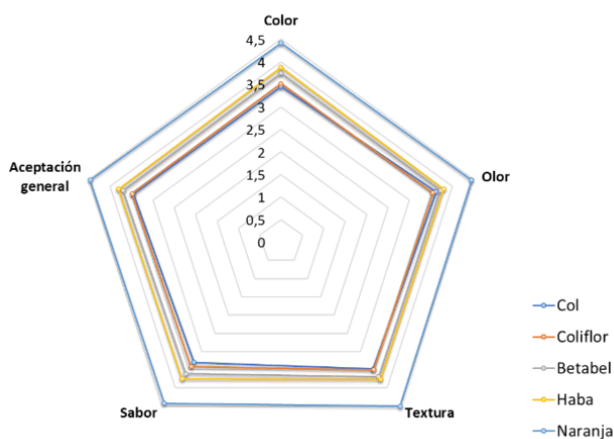


Figura 5: Perfil de aceptación sensorial (escala hedónica de 5 puntos) de pastas con 5 % de sustitución por harinas de subproductos hortofrutícolas y control (B0).

Fuente: Elaboración propia.

3. Conclusiones

El presente estudio confirma que los residuos hortofrutícolas representan una alternativa viable y sostenible para el desarrollo de pastas funcionales. La incorporación de harinas de cáscara de naranja y betabel incrementó significativamente ($p < 0.05$) el contenido de compuestos fenólicos totales y la capacidad antioxidante, manteniendo un desempeño tecnológico y sensorial adecuado.

Estos resultados evidencian que la valorización de subproductos vegetales permite mejorar el perfil funcional de alimentos tradicionales sin comprometer su calidad, contribuyendo al aprovechamiento integral de recursos agroindustriales bajo un enfoque de bioeconomía circular.

Futuras investigaciones deberán abordar la biodisponibilidad de los compuestos fenólicos, su estabilidad durante el almacenamiento y la optimización de parámetros de procesamiento para facilitar su escalamiento industrial.

Agradecimientos

López-García, López-Medina, Morachis-Valdez y Saucedo-Vence agradecen SECIHTI por la beca posdoctoral otorgada. Heredia-García agradece al COMECyT por la beca para profesorado recibida en el marco del programa “Investigadoras e Investigadores COMECyT-EDOMEX”.

5. Referencias

- Alam, M. N., Bristi, N. J., Rafiqzaman, M. (2013). Review on in vivo and in vitro methods evaluation of antioxidant activity. *Saudi Pharmaceutical Journal* 21(2), 143–152. DOI: 10.1016/j.jsps.2012.05.002
- AOAC (1997). *Official methods of analysis* (16th ed.). Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.
- Baenas, N., García-Viguera, C., Moreno, D. A. (2019). Elicitation: a tool for enriching the bioactive composition of foods. *Molecules* 24(10), 1823. DOI: 10.3390/molecules24101823
- Bavaro, A. R., De Bellis, P., Linsalata, V., Rucci, S., Predieri, S., Cianciabella, M., Tamburino, R., Cardinali, A. (2025). Valorization of artichoke bracts in pasta enrichment: impact on nutritional, technological, antioxidant, and sensory properties. *Antioxidants (Basel)* 14(4), 475. DOI: 10.3390/antiox14040475
- Benítez, V., Mollá, E., Martín-Cabrejas, M. A., Aguilera, Y., López-Andréu, F. J., Esteban, R. M. (2020). Valorization of by-products from Brassica crops: nutritional and functional potential. *Trends in Food Science & Technology* 99, 77–91. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.02.024
- Bianchi, F., Tolve, R., Rainero, G., Bordiga, M., Brennan, C. S., Simonato, B. (2021). Technological, nutritional and sensory properties of pasta fortified with agro-industrial by-products: a review. *International Journal of Food Science and Technology* 56(9), 4356–4366. DOI: 10.1111/ijfs.15168
- Carvalho, F., Lahlou, R. A., Silva, L. R. (2025). Exploring bioactive compounds from fruit and vegetable by-products with potential for food and nutraceutical applications. *Foods* 14(22), 3884. DOI: 10.3390/foods14223884
- Castro-Muñoz, R., González-Valdez, J., Ahmad, M. Z. (2022). Circular economy approach for the valorization of food waste into value-added ingredients and biopolymers. *Food and Bioprocess Processing* 131, 1–14. DOI: 10.1016/j.fbp.2022.02.001
- CEDRSSA (2019). *Desperdicio de alimentos en México: retos y oportunidades*. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, Ciudad de México.
- Cerdá, E., Khalilova, A. (2016). From linear to circular economy: paving the road to sustainable development. *Technological Forecasting and Social Change* 112, 174–182. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.10.014
- Cheok, C. Y., Adzahan, N. M., Rahman, R. A., Zain, N. A. M. (2018). Current trends of tropical fruit waste utilization. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 58(3), 335–361. DOI: 10.1080/10408398.2016.1164119
- Clifford, T., Howatson, G., West, D. J., Stevenson, E. J. (2015). The potential benefits of red beetroot supplementation in health and disease. *Nutrients* 7(4), 2801–2822. DOI: 10.3390/nu7042801
- Crizel, T. M., Rios, A. O., Alves, V., Flôres, S. H. (2015). Effects of orange by-product fiber incorporation on the functional and technological properties of pasta. *Food Science and Technology* 35(3), 546–551.

- Codex Alimentarius Commission (1997). Principles and guidelines for the establishment and application of microbiological criteria related to foods (CAC/GL 21-1997). Joint FAO/WHO Food Standards Programme.
- Drabińska, N., Ciska, E., Szmatowicz, B., Krupa-Kozak, U. (2018). Broccoli by-products improve the nutraceutical potential of gluten-free mini sponge cakes. *Food Chemistry* 267, 170–177. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.08.119
- Das, S., Samantaray, S., Sahoo, A. K. (2024). Bioactive potential of Brassica by-products: a comprehensive review. *Journal of Food Biochemistry* 48(2), e14362. DOI: 10.1111/jfbc.14362
- Dziki, D. (2021). Current trends in enrichment of wheat pasta: quality, nutritional and functional properties. *Processes* 9(8), 1280. DOI: 10.3390/pr9081280
- Doniec, A., Krawczyk, M., Kowalska, H. (2022). Bioavailability of glucosinolates and their breakdown products from Brassica vegetables. *Food Chemistry* 372, 131218. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.131218
- FAO (2018). *The state of world fisheries and aquaculture 2018*. FAO, Rome, Italy.
- Feumba, D. R., Ashwini, R., Chinyere, U. (2026). Valorization of citrus peel for functional food applications: a review. *Food Chemistry Advances* 4, 100226. DOI: 10.1016/j.focha.2024.100226
- Fellows, P. J. (2017). Evaporation and distillation. In: *Food processing technology* (4th ed.). Woodhead Publishing, pp. 623–658. DOI: 10.1016/B978-0-08-100522-4.00013-4
- Foschia, M., Peressini, D., Sensidoni, A., Brennan, C. S. (2013). The effects of dietary fibre addition on the quality of common cereal products. *Journal of Cereal Science* 58(2), 216–227. DOI: 10.1016/j.jcs.2013.05.010
- Gao, X., Ohlander, M., Jeppsson, N., Björk, L., Trajkovski, V. (2002). Changes in antioxidant effects and their relationship to phytonutrients in fruits of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) during maturation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48, 1485–1490. DOI: 10.1021/jf991072g
- Gazza, L., Taddei, F., Pucci, L. (2022). Enrichment of pasta with functional ingredients: technological and nutritional aspects. *Foods* 11(7), 976. DOI: 10.3390/foods11070976
- International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF) (2018). *Microorganisms in Foods 7: Microbiological Testing in Food Safety Management* (2nd ed.). Springer, New York. DOI: 10.1007/978-3-319-68460-4
- Khan, M. I., Giridhar, P. (2016). Plant betalains: chemistry and biochemistry. *Phytochemistry* 117, 267–295. DOI: 10.1016/j.phytochem.2015.12.007
- Krenz, L. M. M., Grebenteuch, S., Zocher, K., Rohn, S., Pleissner, D. (2024). Valorization of faba bean (*Vicia faba*) by-products. *Biomass Conversion and Biorefinery* 14, 26663–26680. DOI: 10.1007/s13399-023-03779-9
- Księżak, J., Kołodziejczyk, M. (2023). Valorization of broad bean (*Vicia faba*) by-products: a review of nutritional and technological potential. *Food Reviews International* 39(2), 192–213. DOI: 10.1080/87559129.2021.1883582
- López-García, G., Baeza-Jiménez, R., García-Galindo, H. S., Dublán-García, O., López-Martínez, L. X. (2018). Cooking treatments effect on bioactive compounds and antioxidant activity of quintonil (*Amaranthus hybridus*). *CyTA – Journal of Food* 6(1), 707–714. DOI: 10.1080/19476337.2018.1475422
- Modena, D., Cecchini, C., Silvestri, R. (2003). Technological and sensory evaluation of pasta enriched with vegetable flours. *Cereal Chemistry* 80(2), 180–184. DOI: 10.1094/CCHEM.2003.80.2.180
- Nayak, B., Liu, R. H., Tang, J. (2015). Effect of processing on phenolic antioxidants of fruits, vegetables, and grains: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 55(7), 887–918. DOI: 10.1080/10408398.2011.654142
- Papoutsis, K., Pristijono, P., Golding, J. B., Stathopoulos, C. E., Bowyer, M. C., Scarlett, C. J., Vuong, Q. V. (2018). Screening the effect of ultrasound-assisted extraction parameters on hesperidin and phenolic acids of aqueous citrus pomace extracts. *Food Bioscience* 21, 20–26. DOI: 10.1016/j.fbio.2017.11.001
- Secretaría de Salud (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-092-SSA1-1994. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa. *Diario Oficial de la Federación*, México.
- Secretaría de Salud (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-111-SSA1-1994. Método para la cuenta de mohos y levaduras. *Diario Oficial de la Federación*, México.
- Secretaría de Salud (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-113-SSA1-1994. Método para la determinación de coliformes totales. *Diario Oficial de la Federación*, México.
- UNEP (2024). Food waste index report 2024: think eat save: tracking progress to halve global food waste. United Nations Environment Programme.
- Wallace, T. C., Slavin, M., Frankenfeld, C. L. (2021). Systematic review of anthocyanins and their health benefits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 61(13), 2142–2166. DOI: 10.1080/10408398.2020.1774739