



Efecto del proceso de extrusión del nopal (*Opuntia ficus-indica*) sobre sus propiedades fisicoquímicas y metabolitos secundarios

Effect of the extrusion process of the nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) on its physicochemical properties and secondary metabolites

Cynthia M. González Borja¹, M. Galván Aguilar¹, Rosa E. Pérez Sánchez^{1*}, Héctor E. Martínez Flores¹, Daniel Val Arreola², Ruy Ortiz Rodríguez³

¹ Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

² Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

³ Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Historial

Manuscrito recibido: 28 de agosto de 2024

Manuscrito aceptado: 13 de mayo de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

*Autor para correspondencia

Rosa E. Pérez-Sánchez

rosa.perez@umich.mx

ORCID:

Resumen

El proceso de extrusión de nopal representa una alternativa para conservarlo sin alterar su contenido de antioxidantes y flavonoides. En este trabajo se evaluó la extrusión del nopal en base fresca (BF) y cocido al vapor (CocV) sobre sus propiedades fisicoquímicas y contenido de metabolitos secundarios. Se utilizaron 4.0 kg de nopal (*O. ficus-indica*), distribuido en cuatro tratamientos (T): T1 o testigo, T2 nopal BF, T3 nopal CocV, and T4 nopal extruido BF y T4, nopal extruido CocV. Los valores mayores con respecto a los tratamientos fueron: T1 para fibra cruda (28.8%), T2 para ceniza (4.4%), T3 para la proteína cruda (13.0), T4 para metabolitos secundarios (flavonoides, fenoles) y actividad antioxidante. Los resultados muestran que el proceso de extrusión modifica diferencialmente sus propiedades, así como el contenido de metabolitos y antioxidantes.

Palabras clave: Contenido nutricional, antioxidantes, procesamiento de alimento.

Abstract

The nopal (prickly pear cactus) extrusion process represents an alternative to preserve it without altering its antioxidant and flavonoid content. In this work, the extrusion of nopal on a fresh basis (BF) and steamed (CocV) was evaluated on its physicochemical properties and content of secondary metabolites. 4.0 kg of nopal (*O. ficus-indica*) was used, distributed in four treatments (T): T1 or control, T2 nopal BF; T3 CocV prickly pear; T3, BF and T4 extruded nopal, CocV extruded prickly pear. The highest values with respect to the treatments were: T1 for crude fiber (28.8%), T2 for ash (4.4%), T3 for crude protein (13.0), and T4 for secondary metabolites (flavonoids, phenols) and antioxidant activity. The results show that the extrusion process of nopal differentially modifies its properties, as well as the content of metabolites and antioxidants.

Keywords: Nutritional content, antioxidants, food processing.

Introducción

Desde la antigüedad, el nopal (*Opuntia* spp) ha sido importante en la cultura mexicana como parte de la gastronomía, agricultura, medicina, entre otras áreas. Esta cactácea es endémica de México (FAO, 2018; SADER, 2020), alcanzando en el país una producción de 872.3 miles de toneladas (SIAP, 2023). Las principales especies cultivadas son *O. ficus-indica*, *O. joconostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha* (Argentel-Martínez *et al.*, 2024). De dichas especies se exportaron 63,387 toneladas (SIAP, 2023).

El nopal puede ser utilizado en la alimentación humana y animal debido a sus propiedades antiinflamatorias, antioxidantes, prebióticas, hipoglucemiantes, e hipocolesterolémicas (Elshehy *et al.*, 2020; Ortiz *et al.*, 2022). Su impacto en la alimentación animal depende tanto de la disponibilidad de mano de obra, y su vida de anaquel (Ortiz *et al.*, 2022; Trindade *et al.*, 2023), por lo que diversos trabajos han evaluado alternativas y procesos que permitan conservar el nopal por más tiempo sin afectar sus propiedades (Osorio-Córdoba *et al.*, 2011; Ortiz *et al.*, 2022). El alto contenido de agua impide la conserva-

ción del nopal por largo tiempo después de su cosecha y, su bajo contenido de proteína implica la necesidad de enriquecerla con otros insumos, razón por la que se han implementado diversas técnicas de conservación (Pérez, 2021).

Uno de los procesos de conservación del nopal es la cocción al vapor, que mantiene su valor nutricional, la forma, consistencia, sabor y digestibilidad de la fibra (Achón *et al.*, 2018; Ortiz *et al.*, 2022). En cuanto al proceso de harinificación del nopal, este puede disminuir su digestibilidad y alterar sus componentes, lo que presenta una desventaja dentro de los procesos de conservación de esta cactácea (Elizondo, 2010).

Otras alternativas para la conservación de los alimentos son la peletización y la extrusión; para el primer caso, se compactan distintos ingredientes para formar “pellets” a través de presión, temperatura y humedad (Loor-Mendoza, 2016). Sin embargo, al someter al nopal a temperaturas mayores a 50 °C se pueden perder antioxidantes como los flavonoides (Pérez, 2021). La extrusión se aplica a los alimentos sensibles a altas temperaturas; e implica la cocción y presión del alimento por un corto periodo de tiempo; trae consigo ventajas tanto técnicas como de costo y calidad (Gutiérrez *et al.*, 2017). Con base en estos antecedentes, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto del proceso de extrusión del nopal en base fresca y cocido al vapor sobre sus propiedades fisicoquímicas y contenido de metabolitos secundarios.

Materiales y métodos

Se recolectaron 4.0 kg de nopal (*O. ficus-indica*), de una parcela perteneciente a la Unidad Posta Zootécnica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), ubicada en el Municipio de Tarímbaro, Michoacán, el cual se encuentra a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar y ubicada en las coordenadas 19°19'N 101°10'O; aquí se cuenta con un clima templado, una temperatura promedio anual de 21 °C y humedad relativa de 62%, con lluvias en verano (INEGI, 2017).

La recolección de los cladodios se realizó en el período junio-julio del 2023 con una edad promedio de 3.5 meses. Una vez recolectados los cladodios, fueron llevados al Laboratorio de Investigación y Análisis de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología-UMSNH en donde fueron procesados a través de la técnica de extrusión tanto en base fresca (BF) como cocidos al vapor (CocV) a 100 °C por 4 minutos. Con

los 4.0 kg de nopal se conformaron cuatro tratamientos (T): T1 o Testigo (n= 1.0 kg), nopal en BF; T2 (n= 1.0 kg), Nopal CocV; T3 (n= 1.0 kg), extrusión de nopal en BF y T4 (n= 1.0 kg), extrusión de nopal CocV.

Para el proceso de extrusión del nopal se utilizó 1.0 kg de nopal en BF (T3) y 1.0 kg de nopal CocV (T4). Los cladodios de nopal para el T3 y T4 se cortaron en porciones de aprox. 2 cm³ para colocarlos en una licuadora (Oster-BLST4127) de uso doméstico y facilitar el molido. Una vez obtenida la pasta del nopal molido, esta se distribuyó en tres bandejas (45x33.5x6.4 cm) de aluminio desechables (Ekco®) de forma uniforme y con un espesor aproximado de 1 cm. Posteriormente, se colocaron en la deshidratadora (horno con ventilación forzada) con capacidad para 8.0 kg. La deshidratadora fue programada a 50 °C y a 20% de humedad.

Durante el proceso de deshidratación, la pasta de nopal se monitoreó cada 30 min hasta alcanzar una humedad de 35 a 37%, óptima para realizar el proceso de extrusión de acuerdo con las pruebas piloto previas. Una vez que se obtuvo la humedad ≤ 37% en la pasta de nopal se realizó el proceso de extrusión, utilizando para ello un molino manual de pellets específico para dicho proceso. Una vez obtenido el nopal extruido en BF, este se colocó nuevamente en las bandejas de aluminio y se llevaron nuevamente a la deshidratadora hasta alcanzar una humedad entre 10 y 12% (DOF: NMX-Y-098-SCFI-2018).

Para el proceso de extrusión del nopal CocV, primeramente, se preparó 1.0 kg de nopal en BF cortándolos en trozos de 2 cm³. Posteriormente, se sometieron a cocción a vapor a 100 °C por 4 min en una olla de uso doméstico (Vasconia®) con capacidad de 5 L, ello de acuerdo con la técnica establecida por Ortiz *et al.* (2022). Una vez transcurrido los 4 min de cocción, se molieron los fragmentos de nopal CocV en una licuadora de uso doméstico y se realizó el proceso de extrusión, al igual como se realizó con el nopal en BF.

Las variables evaluadas/tratamiento fueron: fibra cruda (FC), extracto etéreo (EE), proteína cruda (PC), extracto libre de nitrógeno (ELN), cenizas (Cen), flavonoides totales, fenoles totales y actividad antioxidante por captura del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo). Estas determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación y Análisis de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología- UMSNH.

Para todas las determinaciones del análisis químico proximal se utilizó una muestra de 2.0 g/tratamiento, a excepción de la determinación de PC en donde se usó una muestra de 0.7g/tratamiento. La fibra cruda se

determinó a través de una digestión con una solución ácida y posteriormente una alcalina, para finalmente calcinar el residuo (AOAC, 1998); en el caso de la determinación de PC, se determinó mediante el método Kjeldahl con factor de conversión de 6.25; para el EE se determinó mediante la metodología de la extracción con éter en un equipo Soxhlet; para Cen, su determinación fue mediante la incineración en mufla a 550 °C; el ELN se obtuvo por diferencia, restando a 100% los valores obtenidos de FC, PC, EE y Cen, lo anterior de acuerdo a los métodos del manual de la AOAC (1998).

Para el caso de la determinación de metabolitos secundarios (flavonoides totales, fenoles totales) y actividad antioxidante (DPPH), se preparó el extracto disolviendo 10.0 g de nopal en 100 mL de etanol 24 h después se filtró en total oscuridad para evitar la fotooxidación, para su posterior medición. Para la determinación de los fenoles totales se utilizó la metodología de Singleton *et al.*, (1999) y Taga *et al.*, (1984) con algunas modificaciones. Se añadieron 100 µL del extracto acuoso a un tubo con 100 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu (1 N) a esta mezcla se añadieron 2 mL de carbonato de sodio al 2% m/v, se agitó con un agitador magnético nuevamente y se conservó en la oscuridad durante 30 min. Posteriormente, determinó la absorbancia de las muestras a 750 nm usando un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, Perkin Elmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.). Se usaron soluciones de ácido gálico (Sigma-Aldrich®) entre 50 – 500 µg/mL para construir la curva de calibración. Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de extracto (mg EAG/g).

La cuantificación de flavonoides se realizó mediante la metodología de Dewanto *et al.*, (2002). Se añadieron 1400 µL del extracto, 600 µL MeOH y 600 µL de cloruro de aluminio, se dejó en reposo por 30 min y la cuantificación se realizó en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.). Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de quercetina por gramo de extracto (mg EQ/g). La curva de calibración fue construida usando quercetina (Sigma-Aldrich®) a 0–30 µg.

La determinación del porcentaje de inhibición de DPPH se basó en el método descrito por Brand-Williams (1995). Para ello, se diluyó el reactivo 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH) con CH₃OH a una concentración de 6×10^{-5} M. Para la cuantificación se incorporaron 100 µL de extracto y 1900 µL de solución de DPPH en un tubo de ensayo a temperatura ambiente y en oscuridad durante 15 minutos para su posterior medición a una absorbancia de 515 nm en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, Perkin_Elmer, Inc., Waltham, MA,

EE. UU.). Los resultados se expresaron en porcentaje de inhibición del radical DPPH.

La información recabada se analizó a través de ANOVA y las diferencias entre tratamientos se estimaron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un $\alpha < 0.05$ (Littell *et al.*, 1998). El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + T_i + e_{ij}$$

Donde:

y_{ij} = Variable respuesta: Fibra, Cenizas, Proteína, Extracto Etéreo, ELN, Flavonoides, Polifenoles, actividad antioxidante (DPPH).

μ = Promedio general

T_i = Efecto fijo del Tratamiento con iésimo Tratamiento= T1, T2, T3, T4.

e_{ij} = Error aleatorio asociado a cada observación ($\sim NID = 0, \sigma^2 e$).

Resultados

Análisis fisicoquímico del nopal (*O. ficus-indica*) de acuerdo con el tratamiento

Los resultados del análisis fisicoquímico del nopal determinaron efectos significativos del tratamiento sobre FC, PC, ELN y cenizas. No obstante, para el EE no hubo efecto de tratamiento ($p > 0.05$). En este sentido, el porcentaje de FC fue mayor en T1 (nopal en BF) (28.8±2.1%) respecto a T2 (nopal CocV), T3 (nopal extruido en BF) y T4 (nopal extruido CocV); mientras que los valores menores de fibra se observaron en T4 (3.4±1.2%) (**Tabla 1**).

En relación al contenido de PC (%) (**Tabla 1**), se observó diferencias significativas entre tratamientos; el nopal extruido en BF mostró un mayor porcentaje (13.0±0.3%) respecto al resto de los tratamientos analizados. Sin embargo, los tratamientos T2 y T4 no observaron diferencias con relación a la PC (9.0%), pero, dicho porcentaje fue mayor al T1 (7.0±0.5%) (**Tabla 1**).

En cuanto a los resultados del EE (**Tabla 1**), los valores encontrados fueron similares estadísticamente en los cuatro tratamientos analizados: entre 3.1 y 4.4%. Mientras que para el ELN, el T3 (63.0±1.4%) y T4 (74.1±1.4%) mostraron los promedios mayores en esta variable, con respecto a T1 y T2; siendo los promedios de T3 y T4 diferentes entre sí (**Tabla 1**). En el caso de cenizas, el T1 fue el que mayor ($p < 0.05$) porcentaje presentó (16.2±0.2%) en comparación con el resto de los tratamientos analizados. En cuanto a T2 y T3, estos

Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para las variables del análisis fisicoquímico del nopal de acuerdo con el tratamiento.

Variable	NOPAL			EXTRUSION DE NOPAL		
	BF (T1)	CocV (T2)	±E.E.	BF (T3)	CocV (T4)	±E.E.
	Media	Media		Media	Media	
FC (%)	28.8 ^a	13.2 ^b	2.1	7.5 ^c	3.4 ^d	1.2
PC (%)	7.0 ^a	9.2 ^b	0.5	13.0 ^c	9.0 ^b	0.3
EE (%)	3.4	4.4	1.0	3.1	3.6	0.6
ELN (%)	44.7 ^a	59.8 ^b	2.4	63.0 ^b	74.1 ^c	1.4
Cenizas (%)	16.2 ^a	13.5 ^b	0.2	13.5 ^b	12.8 ^c	0.1

EE=Error estándar; PC=Proteína cruda; EE=Extracto etéreo; ELN=Extracto libre de nitrógeno; BF=Base fresca; CocV=Cocido al vapor. Literales a,b,c,d indican diferencias significativas entre tratamientos (filas) (p<0.05).

mostraron valores de ceniza comparables (p>0.05) entre sí (13.5±0.2), pero mayores al T4 (12.8±0.1%).

Metabolitos secundarios del nopal de acuerdo con el tratamiento

Con respecto a los resultados de metabolitos secundarios se encontró efecto de tratamiento sobre flavo-

noides totales (p<0.0001), fenoles totales (p<0.0001) y porcentaje de inhibición de DPPH (p<0.0001). El mayor contenido se encontró en T3 y T4 (2.22 y 2.63 mg EQ/g, respectivamente), ello en comparación con T1 y T2 (**Figura 1**), mismos que presentan contenidos similares entre sí (p>0.05). En el caso de los fenoles, los cuatro tratamientos analizados presentaron valores diferentes entre sí (p<0.05), siendo el de nopal CocV el que mostró la mayor concentración (4.62 mg EAG/g) de fenoles, seguido por el Nopal BF, observando el menor contenido los dos tratamientos de extrusión tanto el BF como en nopal CocV (**Figura 1**).

En cuanto al porcentaje de inhibición de DPPH, los valores del nopal extruido en BF (T3) y CocV (T4) fueron iguales entre sí (p>0.05) (21.6 y 23.2%) y mayores (p<0.05) a los obtenidos en el nopal en BF (T1) y CocV (T2): 12.2 y 5.8%, respectivamente (**Figura 2**).

Discusión

El proceso de extrusión del nopal modifica fisicoquímicamente las propiedades de esta cactácea. Al respecto, la FC observó una disminución con el tratamiento de CocV (T2), con el Nopal extruido BF y el Nopal extruido CocV. Es posible que los porcentajes de FC de los

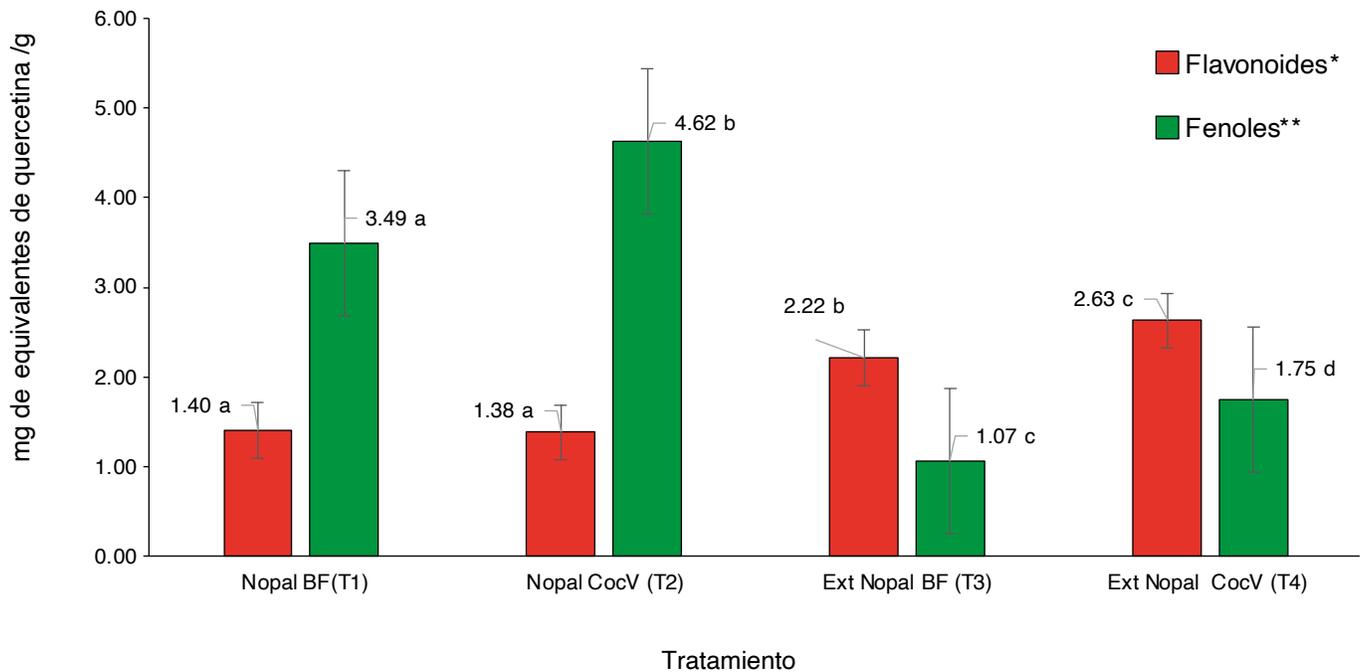


Figura 1. Contenido de fenoles y flavonoides totales del nopal (*O. ficus-indica*) de acuerdo con el tratamiento. Las barras representan la media ±EE del contenido de fenoles/flavonoides en EQ/g.

Ext= Extruido; BF= Base fresca; CocV= Cocido al vapor *EQ/g; **=EAG/g.

Literales a, b, c, d, indican diferencias (p<0.05) entre promedios de acuerdo a tratamiento y metabolito.

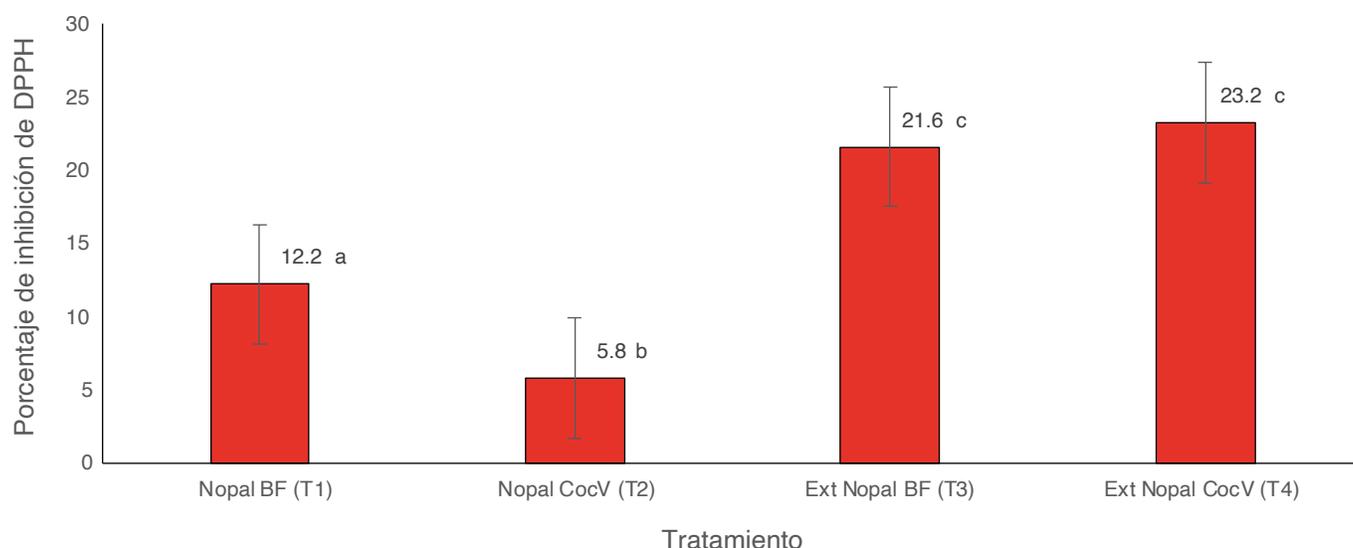


Figura 2. Porcentaje de inhibición de DPPH en el nopal (*O. ficus-indica*) de acuerdo con el tratamiento. Las barras representan las medias \pm EE de los porcentajes calculados

Ext=Extruido; BF=Base fresca; CocV=Cocido al vapor

Literales a, b, c indican diferencias ($p < 0.05$) entre promedios de acuerdo al tratamiento y metabolito

tratamientos analizados en esta investigación, específicamente los extruidos, presentaran bajos contenidos de FC debido a que altas temperaturas (cocción a vapor a 100 °C y/o deshidratación a 50 °C) promueven la ruptura de los componentes de la fibra, lo que puede ocasionar que se obtengan valores menores (González, 2002). Sin embargo, los valores de FC de T1 y T2 son menores a lo reportado por Ahumada (2021), quien también sometió a CocV a los cladodios y reportó 19.0% de FC y 31.5% de FC en nopal en BF (Testigo) aún y cuando en ambas investigaciones la edad de los cladodios utilizados fue similar (≥ 90 días de edad) y provenían del mismo sitio de cultivo.

Asimismo, cabe la posibilidad que las diferencias de FC del nopal estén asociadas a la época del año en la que se realizó la recolección de los cladodios. Al respecto, Pérez-Sánchez *et al.* (2015) reporta valores de FC en cladodios de 90 días de 31.7 y 18.6% para la época de estiaje y de lluvias, respectivamente. Por lo que, no solo el proceso de extrusión y la CocV afectaría los valores de FC del nopal, sino que también, la época del año en la que se recolectan y procesan los cladodios de nopal.

Otro componente químico del nopal que mostró diferencias entre el proceso de extrusión y la CocV fue la PC. Al respecto, Ortiz *et al.*, (2022), reporta mayor porcentaje de PC (17.6%) en el nopal CocV *versus* nopal BF (14.3%); fenómeno similar a los observado en esta investigación; sin embargo, los contenidos de PC fueron menores a los reportados por estos autores.

En cuanto al proceso de extrusión del nopal, la PC fue mayor en el nopal extruido en BF (T3) en comparación con el nopal extruido CocV (T4). Pérez-Sánchez *et al.*, (2015), reporta porcentajes de PC en el nopal en BF mayores ($p < 0.05$) en cladodios jóvenes en comparación con los adultos (4.4 y 8.3%, respectivamente) y, de acuerdo con la época del año, existe un cambio de PC, siendo mayor ($p < 0.05$) en época de lluvias (4.4 y 5.9% para época de estiaje y época de lluvia respectivamente). Kulmyrzaev *et al.*, (2000) reportan que carbohidratos como la sacarosa, la lactosa, la glucosa y el glicerol estabilizan las proteínas contra la desnaturalización térmica. Damodaran (2017) también mencionó que el procesamiento a presión, a diferencia del procesamiento térmico, no daña los aminoácidos esenciales, el color ni el sabor natural; por lo tanto, procesar alimentos con alta presión hidrostática puede resultar ventajoso para ciertos alimentos. Ramírez-Moreno *et al.*, (2013) estableció que, cuando se someten los cladodios a agua a temperatura ≥ 90 °C durante 20 min se incrementa la PC, puesto que la temperatura de cocción puede contribuir a romper algunas de las atracción e hidrofóbicas, enlaces de hidrógeno o enlaces electrostáticos y provocar que las proteínas se unan con otros compuestos químicos como carbohidratos, lípidos, compuestos de fibra, entre otros. Así, cuando se aplica calor, se rompen los enlaces entre la proteína y otros compuestos químicos, lo que provoca que la proteína se libere y, por ello, se cuantifica mayor cantidad de proteína.

Generalmente, las proteínas presentes en los alimentos se desnaturalizan en un rango de temperatura de 40 a 80 °C, a presión atmosférica; sin embargo, el contenido de agua facilita enormemente la desnaturalización térmica de estas (Damodaran, 2017). Lo anterior podría explicar el mayor porcentaje de PC en el nopal extruido BF, puesto que en este proceso la temperatura máxima utilizada fue de 50 °C, mientras que en la extrusión de nopal CocV fue primeramente cocción a vapor a 100 °C y posteriormente deshidratación a 50 °C. No obstante, existen pocas investigaciones sobre el efecto de la cocción sobre el contenido nutricional del nopal, sin embargo, la cocción (microondas o freír) de hongos *Amanita zambiana* provoca aumento de PC, posiblemente esto pudiera estar relacionado con la hidrólisis enzimática de proteínas insolubles (Reid *et al.*, 2016).

En cuanto a los valores de cenizas (Cen), Ortiz *et al.* (2022) reportan valores de 27.8 y 20.9% en nopal en BF y nopal CocV, valores superiores a los encontrados en esta investigación; sin embargo, coinciden en un mayor porcentaje en el nopal en BF vs CocV. Moreno *et al.*, (2015), también reportó dicho efecto al someter a la papa de la variedad Puca Shungo a procesos térmicos. Dicha disminución puede atribuirse a la filtración de los minerales solubles hacia el agua de cocción durante un proceso térmico acuoso (Ahmed *et al.*, 2013).

En lo referente a los metabolitos secundarios, en la presente investigación se pudo observar que los valores de flavonoides son similares por los reportados por Guevara-Figueroa *et al.*, (2010), Pérez (2021) y Manzanarez-Tenorio *et al.* (2022) en el nopal en BF, quienes indican valores de 2.0, 1.7 y 3.1 mg EQ/g, respectivamente. No obstante, la posible disminución se debe al proceso de deshidratación con aire caliente, mismo que provoca su degradación (Márquez *et al.*, 2003). Sin embargo, el aumento de los flavonoides en el extruido de nopal (T3 y T4) puede deberse a que la compresión mecánica durante la extrusión puede romper las paredes celulares de las plantas y liberar los compuestos encapsulados (Navarro-Valdez *et al.*, 2020), lo que podría permitir que los flavonoides que estaban atrapados en las células sean liberados y se vuelvan más disponibles para su medición.

Para el caso de los fenoles totales, los valores obtenidos concuerdan con lo reportado por Ramírez-Moreno *et al.* (2013), quienes encontraron valores similares a los de la presente investigación. Estos investigadores observaron valores en MS de 3.7 y 5.7 mg EAG/g para nopales de 30 días de edad liofilizado y cocido, respectivamente. Además, de acuerdo con Manzanarez-Tenorio *et al.*

(2022), reportó valores de fenoles en nopal morado y verde de 2.3 y 2.1 mg EAG/g, respectivamente. Lo que pudiera sugerir que las concentraciones de este metabolito secundario están determinadas no solo por el tratamiento térmico, sino también, por la edad y la variedad del nopal que se trate. Por ejemplo, la deshidratación del nopal mediante la aplicación de calor provocar que el contenido de fenoles disminuya considerablemente (Martínez-Soto *et al.*, 2015).

Finalmente, respecto a los resultados del porcentaje de inhibición de DPPH, se observó que dichos porcentajes fueron mayores en los extruidos de nopal en BF y CocV vs nopal BF y nopal CocV; pero, menores a los reportados por Figueroa-Pérez *et al.* (2018): 46.1 y 48.1%, para nopal verdura viejo (30 días) y joven (12 días de edad), respectivamente, mientras que Pérez (2021), reporta valores de inhibición de 40.5 y 45.7% en nopal forrajero de 90 días de edad, deshidratado a 50 °C y liofilizado, respectivamente.

La disminución o posibles variaciones de la actividad antioxidante en el nopal puede deberse a diversos factores tales como: la deshidratación mediante aire caliente (Karam *et al.*, 2016), variedad y madurez de los cladodios, temperatura, textura y grosor de los cladodios; además, presencia de oxígeno e incluso, la técnica de extracción de los antioxidantes (Kamiloglu *et al.*, 2016).

En general, el efecto del proceso de extrusión de los alimentos sobre los metabolitos secundarios y la actividad antioxidante, pueden estar sujetos a múltiples factores, incluidos la naturaleza de los metabolitos, las condiciones específicas de extrusión y los componentes totales de los alimentos. En este sentido, los resultados obtenidos en esta investigación determinaron que el proceso de extrusión provocó una mayor medición de metabolitos secundarios y su efecto antioxidante.

Conclusión

El proceso de extrusión del nopal en BF mejora los contenidos de PC, FC y Cen, y disminuye el ELN, ello en comparación con el nopal extruido CocV. Sin embargo, el nopal extruido CocV, presenta mayores valores de metabolitos secundarios y acción antioxidante. Tomando en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo, se puede sugerir que la opción que representa mayor viabilidad para ser utilizado en la formulación de dietas es el nopal extruido BF, en donde el proceso de extrusión puede representar una alternativa para el uso del nopal y la conservación de este sin que pierda de manera importante sus propiedades antioxidantes.

Referencias

- Achón TM, González GP, Varela MG (2018). Criterios de armonía funcional entre gastronomía y salud: una visión desde la comunidad científica. *Nutrición Hospitalaria* 35:75-84. doi:10.20960/nh.2131.
- Ahmed FA, Ali RFM (2013). Bioactive compounds and antioxidant activity of fresh and processed white cauliflower. *BioMed Research International* 2013:1-9. doi:10.1155/2013/367819.
- Ahumada GJT (2021). Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) cocido a la dieta de cerdas post-parto sobre: perfil metabólico y consumo voluntario de alimento. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, p. 32.
- AOAC (1998). Official Method of Analysis. 15th Edition, Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
- Argentel-Martínez L, Peñuelas-Rubio O, Perales-Segovia C, González-Gaona E, García-Munguía AM, Leyva-Ponce JA (2024). Introducción al Cultivo del Nopal. En: González-Gaona E, Argentel-Martínez A, Perales-Aguilar L, Peñuelas-Rubio O, García-Munguía AM, De Lira-Ramos KV (Compiladores). El Nopal: Ecofisiología del Nopal en México. Editorial Pantanal. Mato Grosso – Brasil. doi:10.46420/9786585756211
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology* 28:25–30. doi:10.1016/S0023-6438(95)80008-5.
- Damodaran S, Parkin KL (2017). Fennema's Food Chemistry. *CRC Press*. 5:122. doi:10.1201/9781315372914.
- Dewanto V, Wu X., Adom KK, Liu RH (2002). Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50:3010–3014. doi:10.1021/jf0115589.
- DOF NMX (2018). Norma oficial Mexicana: NMX-Y-098-SCFI-2018. Alimentos para animales, determinación de humedad en alimentos balanceados e ingredientes mayores. Diario oficial de la federación. SEGOB. [En línea] https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541957&fecha=24/10/2018#gsc.tab
- Elizondo AE (2010). Evaluación del efecto de dietas formuladas con o sin harinas de origen animal en el rendimiento de pollos de engorde. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica. P. 17-18.
- Elshehy HR, El-Sayed SS, Abdel.Mawla EM, Agamy NF (2020). Nutritional Value of Cladodes and Fruits of Prickly Pears (*Opuntia ficus-indica*). *Alexandria Journal of Food Science and Technology* 17(1):17-25. doi:10.21608/ajfs.2020.105626
- FAO (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. pp 2-5.
- Figuroa-Pérez MG, Pérez-Ramírez IF, Paredes-López O, Mondragón-Jacobo C, Reynoso-Camacho R (2018). Phytochemical composition and in vitro analysis of nopal (*O. ficus-indica*) cladodes at different stages of maturity. *International Journal of Food Properties* 21:1728-1742. doi:10.1080/10942912.2016.1206126.
- González OYJ (2002). Contenido de fibra cruda y fibra dietética en mezclas de cereal- leguminosa sometidas a germinación y tratamiento térmico. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro, México. P.50-52.
- Guevara-Figueroa T, Jiménez-Islas HL, Reyes-Escogido ML, Mortensen AG, Laursen BB, Li-Wei W, León-Rodríguez A, Fomsgaard IN, De la Rosa AP (2010). Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia* spp.). *Journal of Food Composition and Analysis* 23:525-532. doi:10.1016/j.jfca.2009.12.003.
- Gutiérrez RAM, Arriola GE, Jacques FGE, Morales HN, Corona GRI, Guatemala MGM (2017). Caracterización fisicoquímica de un alimento extrusión tipo botana". *Encuentro Nacional de la AMIDIQ* 1-5. doi:10.36331/revista.v2i2.15
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010. Anuario Estadístico del Estado de Michoacán. P. 45-50.
- Kamiloglu S, Toydemir G, Boyacioglu D, Beekwilder J, Hall RD, Capanoglu E (2016). A review on the effect of drying on antioxidant potential of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 56(1):110-S129. doi:10.1080/10408398.2015.1045969
- Karam MC, Petit J, Zimmer D, Djantou EB, Scher J (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering* 188:32-49. doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.05.001.
- Kulmyrzaev A, Chanamai R, McClements D (2000). Influence of pH and CaCl₂ on the stability of dilute whey protein stabilized emulsions. *Food Research International* 33:15–20. doi:10.1016/S0963-9969(00)00018-1.
- Littell RC, Henry PR, Ammerman CB (1998). Statistical analysis of repeated measures data using 528 SAS procedures. *Journal of Animal Science* 76(4):1216-1231. doi:10.2527/1998.7641216x.
- Loor-Mendoza NE (2016). Fundamentos de los alimentos peletizados en la nutrición animal. *Dominio de las Ciencias* 592:323-333. doi:10.23857/dc.v2i4.257
- Manzanarez-Tenorio LE, Ruiz-Cruz S, Cira-Chávez LA, Estrada-Alvarado MI, Márquez-Ríos E, Toro-Sánchez CL, Suárez-Jiménez GM (2022). Caracterización fisicoquímica, actividad antioxidante y contenido de fenoles y flavonoides totales de nopal morado (*Opuntia gosseliniana*) en dos etapas de coloración. *Biotecnia* 24(3):101-106. doi:10.18633/biotecnia.v24i3.1662
- Márquez CCJ, Ciro VHJ, Rojano BA (2003). Efecto de un proceso de deshidratación con aire forzado en la composición química y nutricional de la mora de castilla (*Rubus glaucus*). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 56(1):1865-1876
- Martínez-Soto G, Celis-Fabián F, Hernández-Pérez T, Paredes-López O (2015). Effect of drying methods on the nutraceutical potential of cactus cladodes (*Opuntia* spp.). *International Journal of Food and Nutritional Science* 2(2):168-173. doi:10.15436/2377-0619.15.023
- Moreno C, Andrade MJ, Oña G, Llumiangua T, Concellón A (2015). Efecto de la cocción sobre la composición química y capacidad antioxidante de papas nativas del Ecuador. *Revista Científica*

Ecuatoriana 35:20–26.

Navarro-Valdez K, Capillo-Herrera N, Calixto-Cotos MR, Santisteban-Rojas OP (2020). Extracción y microencapsulación de compuestos antioxidantes de la semilla de *Oenocarpus bataua* Mart. *Scientia Agropecuaria* 639:547-554. doi:10.17268/sci.agropecu.2020.04.10

Ortiz RR, Ahumada GJT, Pérez SRE, García-Saucedo PA, Martínez-Flores HE, Val AD (2022). Evaluation of physicochemical changes of Nopal (*Opuntia ficus-indica*) at different steam cooking times. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 24:239-250. doi:10.56890/jpacd.v24i.436

Osorio-Córdoba J, Pelayo-Zaldívar C, Verde-Calvo JR, Ponce-Valadez M, Díaz de León-Sánchez F, Bosquez-Molina E, Rodríguez Huezo Ma.E (2011). Conservación de nopal verdura 'Milpa Alta' (*Opuntia ficus indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada. *Revista mexicana de ingeniería química* 10(1):93-104

Pérez SI (2021). Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, p. 116.

Pérez-Sánchez RE, Delgado-Sánchez Lauro A, García-Saucedo PA, Pulido J, Ortiz-Rodríguez R (2015). Caracterización, modelación morfológica y análisis proximales de *Opuntia ficus-indica* y *O. atropes* durante las épocas de estiaje y lluvias. *Nova Scientia* 7(15):133-152.

Ramírez-Moreno E, Córdoba-Díaz D, Sánchez-Mata M, Díez-

Marquez C, Goñi I (2013). Effect of boiling on nutritional, antioxidant and physicochemical characteristics in cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *LWT-Food Science and Technology* 560:296-302. doi:10.1016/j.lwt.2012.10.005

Reid T, Munyanyi M, Mduluzi T (2016). Effect of cooking and preservation on nutritional and phytochemical composition of the mushroom *Amanita zambiana*. *Food Science & Nutrition* 833:538-544. doi:10.1002/fsn3.428

SADER (2020). El nopal es un producto endémico de México en donde, además, se ha diversificado: de las 200 especies de nopales, 101 viven en nuestro país. [https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo-](https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo)

SIAP (2023). ¡Y el nopal ingreso en la dieta simbólica y real de los mexicanos! Cifras y datos sobre esta ancestral planta. <https://www.gob.mx/siap/articulos/y-el-nopal-ingreso-en-la-dieta-simbolica-y-real-de-los-mexicanos> [consultado el 13 de agosto de 2023].

Singleton VL, Orthofer R, Lamuela-Raventos RM (1999). Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods Enzymology* 299:152–178.

Taga MS, Miller EE, Pratt DE (1984). Chia seeds as a source of natural lipid antioxidants. *Journal of American Oil Chemists Society* 61:928-931.

Trindade S, Rouxinol MI, Agulheiro-Santos AC (2023). *Opuntia ficus-indica* L. fruits cold storage using different packaging materials. *Sustainability* 15(14). doi:10.3390/su151411334