



EFEECTO DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS TRADICIONALES SOBRE LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE Y CONTENIDO DE CAROTENOIDES DE NOPALITOS

EFFECT OF TRADITIONAL THERMAL TREATMENT ON THE ANTIOXIDANT ACTIVITY AND CAROTENOIDS CONTENT OF NOPALITOS

L. González-Cruz¹, J.B.E. Hernández-Castillo¹, J.M.S. Juárez-Goiz¹,
N.L. Flores-Martínez², A. Bernardino-Nicanor^{1*}

¹Tecnológico Nacional de México-Celaya. Antonio García Cubas Pte #600 esq. Av. Tecnológico. Celaya, Gto. México, C.P. 38010. A.P. 57.

²Universidad Politécnica de Guanajuato. Avenida Universidad Sur 1001. Comunidad Juan Alonso, Cortazar, Gto. C.P. 38483. México.

Recibido: 18 de enero de 2018; Aceptado: 15 de abril de 2018

Resumen

Se analizó el efecto del tiempo y temperatura del asado y freído de los *nopalitos*, sobre su actividad antioxidante, contenido de compuestos fenólicos y contenido de carotenoides por HPLC y espectroscopía UV-Vis. Los *nopalitos* fueron asados o freídos a tres temperaturas y seis periodos de tiempo. Los resultados indican que no existe correlación entre la actividad antioxidante y el contenido de carotenoides en los *nopalitos* asados y freídos. La máxima actividad antioxidante se encontró en los *nopalitos* asados a 125 °C por 30 min, condiciones en las cuales el contenido de carotenoides es uno de los más bajos (0.1 mg×g⁻¹). El mayor contenido de compuestos fenólicos se obtuvo en los *nopalitos* asados a 75 °C por 20 min. El asado y el freído modifican las características nutraceuticas de los *nopalitos*.

Keywords: *Opuntia ficus*, *nopalito*, nopal verdura, antioxidante, tratamiento térmico.

Abstract

The effect of the temperature and duration of thermal treatments of *nopalitos* on the carotenoid content, phenolic compound content and antioxidant activity was evaluated. The *nopalitos* were roasted or fried at three temperatures and six time intervals. HPLC and spectroscopic methods to evaluate the modification on the carotenoids, phenolic compounds content and antioxidant activity were used. No correlation between antioxidant activity and carotenoids content in *nopalitos*, either fried or roasted, was found. The highest antioxidant activity was found in roasted *nopalitos* (125 °C; 30 min), however at these conditions, the lowest concentration of carotenoid was obtained. The highest content of phenolic compounds was obtained from roasted *nopalitos* (75 °C; 20 min). Both thermal treatments, fried and roasted modified the nutraceutical characteristics of *nopalitos*.

Palabras clave: *Opuntia ficus*, *nopalito*, antioxidant activity, thermal treatment.

1 Introducción

La familia de las cactáceas está constituida por aproximadamente 130 géneros, que incluye cerca de 1500 especies, siendo *Opuntia ficus indica* la cactácea de mayor importancia económica en el mundo. En México, al cladodio joven se le conoce como nopal verdura o “*nopalito*” y es ampliamente utilizado en la alimentación humana, ya sea en forma directa como verdura o procesado (Saenz, 2000; Singh,

2003). El cladodio, es utilizado con fines medicinales por su efecto antiinflamatorio, hipoglucémico, como neuroprotector, inhibidor de úlceras estomacales y contra el asma (Galati y col., 2002a, 2002b; Kaur y col., 2012; Saenz, 2000). En la industria alimentaria, es utilizado como fuente de fibra, pectina y pigmentos (Ayadi y col., 2009; Bensadón y col., 2010; Cárdenas y col., 2008; Sreekanth y col., 2007), otro de los usos dados al cladodio es como forraje (Wanderley y col., 2002).

* Corresponding author. E-mail: aurea.bernardino@itcelaya.edu.mx
Tel. (461)-611-75-75, Fax (461)-611-75-75
doi: 10.24275/uam/fiz/dcbi/revmexingquim/2018v17n3/Gonzalez
issn-e: 2395-8472

Se ha demostrado que la composición química de los *nopalitos* varía de acuerdo a su estado de desarrollo, observándose que el contenido de proteína, carbohidratos y vitamina C disminuyen al incrementar el estado de desarrollo del cladodio llegando a 0.48%, 2.43% y 23.11 mg×100g⁻¹ (base húmeda) respectivamente, mientras que, el contenido de fibra y cenizas incrementa al avanzar el estado de desarrollo del cladodio alcanzando valores de 1.06% y 1.60% (base húmeda) respectivamente. Sin duda, la principal característica del nopal es su alto contenido de humedad, que en promedio es de 93% (Guzmán y Chávez, 2007), regulado por los compuestos mucilaginosos presentes en el cladodio que representan aproximadamente el 14% de su peso seco, así, el papel fisiológico de este polímero es, regular el contenido de agua celular durante tiempos prolongados de sequía y regular el flujo de calcio en la planta (Ginestra y col., 2009).

Como parte importante de la composición química de los *nopalitos* se encuentran los pigmentos, los principales son la clorofila (Aguilar-Becerril y Peña-Valdivia, 2006) y los carotenoides (α -criptoxantina, β -caroteno y luteína), (Jaramillo-Flores y col., 2003). Estos compuestos muestran actividades antioxidantes e inmunomoduladoras, importantes en la prevención de enfermedades degenerativas, tales como enfermedades cardiovasculares, diabetes y diferentes tipos de cáncer, especialmente de próstata y tumores del tracto gastrointestinal (Strati y col., 2012). Ha sido demostrado que los carotenoides son eficientes antioxidantes ya que tienen la capacidad de atrapar dos de las especies reactivas del oxígeno, el oxígeno molecular (O₂) y los radicales peróxido, dado por el patrón de dobles enlaces conjugados en la cadena hidrocarbonada de polieno de los carotenoides, lo cual determina sus propiedades de absorción de luz e influye en su actividad antioxidante en el organismo (Stahl y Sies, 2003). Se ha demostrado que dicha actividad depende de la tensión de oxígeno presente en el sistema, a baja presión parcial de oxígeno en el organismo (como la que se encuentra en los tejidos bajo condiciones fisiológicas), el primer carotenoide que inhibe la oxidación, es el β -caroteno, sin embargo se ha observado que a presión de oxígeno, la actividad antioxidante del β -caroteno es seguida por un efecto pro-oxidante (Stahl y Sies, 2003). Por otra parte, la luteína, es el tercer carotenoide de mayor prevalencia en el suero humano con una concentración aproximada de 16 $\mu\text{g}\times\text{dL}^{-1}$, su presencia es de gran importancia en el tejido ocular, su consumo está relacionado inversamente al

riesgo de padecer desordenes oculares, incluyendo degeneración macular relacionada con la edad. Los grupos hidroxilo ubicados a cada lado de la molécula, es lo que distingue a la luteína de otros carotenoides (Alves-Rodrigues y Shao, 2004).

Investigaciones recientes han demostrado, que el procesamiento e inclusive el almacenamiento, aun cuando sea bajo condiciones controladas, genera cambios en la composición química de los *nopalitos*, los cuales en algunos casos, pueden ser favorables, principalmente al tratarse de compuestos nutraceuticos como son los compuestos fenólicos y carotenoides, repercutiendo en propiedades como la actividad antioxidante, antihipertensiva e incluso sobre la hipoglucémica (Guevara y col., 2001; Jaramillo-Flores y col., 2003, Osorio-Córdoba y col., 2011). Sin embargo, aun cuando los *nopalitos* son altamente consumidos en México, pocos son los estudios que se han enfocado al efecto de los tratamientos térmicos tradicionales a los que son sometidos para su consumo, sobre los carotenoides, compuestos fenólicos y por ende a su actividad antioxidante, por esta razón el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del freído y el asado sobre la actividad antioxidante, contenido de compuestos fenólicos y composición de carotenoides de los *nopalitos*.

2 Materiales y métodos

2.1 Material vegetal

Los *nopalitos* (*Opuntia ficus indica*), fueron colectados de Otumba municipio del Estado de México, en forma manual, seleccionados con un tamaño promedio de 20 cm de largo para contar con un estado de madurez homogéneo (Guzmán y Chávez, 2007; Jaramillo-Flores y col., 2003). Las muestras fueron almacenadas en bolsas de polietileno en lotes de aproximadamente 1.2 Kg por no más de una semana a 4 °C hasta su tratamiento y análisis. El acondicionamiento de los *nopalitos*, frescos y aquellos que fueron freídos consistió en remover las espinas y trocearlos en cubos de 1 cm de lado, mezclándolos para asegurar su completa homogeneización, mientras que a los *nopalitos* que fueron asados, sólo se les removieron las espinas, utilizando el *nopalito* completo.

2.2 Tratamientos térmicos

2.2.1 Freído

El tratamiento de freído se inició con la eliminación del mucílago del *nopalito*, para lo cual, los cubos se sometieron a un pre-tratamiento térmico con agua (95 °C; 20 min), se retiraron, se escurrieron y se secaron con una toalla de papel para eliminar el exceso de humedad, se colocaron en 350 mL de aceite vegetal (marca Cristal, México), previamente acondicionado a la temperatura del tratamiento (75, 100 o 125 °C), se mantuvieron en el aceite a diferentes tiempos (5, 10, 15, 20, 25 o 30 min). Las muestras fueron designadas NTTF (*nopalitos* tratados térmicamente freídos).

2.2.2 Asado

Los *nopalitos* fueron colocados en una placa de calentamiento acondicionada a la temperatura de tratamiento (75, 100 o 125 °C), manteniéndolas en constante movimiento durante el tiempo del tratamiento (5, 10, 15, 20, 25 o 30 min). Las muestras fueron designadas NTTA (*nopalitos* tratados térmicamente asados). Para todos los tratamientos, se consideró la pérdida de peso, por lo cual para la muestras de los NTTF y NTTA, se utilizaron 6 g de muestra para cada una de las determinaciones, mientras que para el nopal fresco, la cantidad utilizada fue de 10 g.

2.3 Determinación de Compuestos Fenólicos Totales (CFT)

Los compuestos fenólicos totales de los *nopalitos* fueron cuantificados usando el método de Folin-Ciocalteu modificado por Cardador-Martínez y col. 2011. La muestra (6.0 g) fue macerada con Celite® y 45 mL de metanol al 80%, se filtró al vacío, el residuo se re-extrajo dos veces con la misma cantidad de metanol y el filtrado se centrifugó a 4000 rpm durante 20 min, el sobrenadante fue diluido con metanol al 10%, una alícuota de la muestra diluida (100 µL) fue mezclada con 0.75 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu (diluido previamente en agua 1:10) (Hycel of México SA de CV, México), se dejó reposar por 5 min a temperatura ambiente y se neutralizó la reacción con 0.3 mL de disolución de carbonato de sodio (20%), la absorbancia fue medida a 760 nm después de 2 h de incubación a temperatura ambiente. La cuantificación se realizó con base a una curva estándar de ácido gálico (Sigma-Aldrich, St.Louis, MO, USA).

Los resultados fueron expresados como equivalentes de ácido gálico (GAE) en $\text{mg} \times \text{g}^{-1}$ de muestra.

2.4 Extracción de carotenoides

6 g de muestra fueron macerados con Celite® y 45 mL de acetona fría (4 °C), se filtró al vacío y el residuo resultante fue re-extraído dos veces más con acetona fría. Los compuestos extraídos con la acetona fueron transferidos a éter de petróleo en un embudo de separación, adicionando agua bidestilada. La fase agua-acetona se eliminó y se adicionó otra porción del extracto de acetona, esta operación se repitió hasta que todo el extracto fue transferido al éter de petróleo. La fase de éter se lavó cuatro veces con agua para remover por completo la acetona presente. El agua residual que permaneció en la fase de éter se eliminó con sulfato de sodio anhidro. El extracto se concentró a sequedad con nitrógeno de alta pureza (99.99%) (Jaramillo-Flores y col., 2003).

2.5 Efecto del tratamiento térmico sobre la extractabilidad de los carotenoides

Los carotenoides fueron cuantificados utilizando el extracto previamente obtenido, por medio de Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) Modelo Varian 920-LC, con un detector UV-Vis, controlado por el Software Varian Galaxie™ Chromatography, equipado con una columna Synchronis C18 250 X 4.6 mm ID (Thermo Scientific USA), se utilizó un sistema de disolventes acetonitrilo:metanol:tetrahidrofurano (58:35:7) a una velocidad de $1 \text{ mL} \times \text{min}^{-1}$ por 35 min. Las disoluciones inyectadas fueron 20 µL de extracto de carotenoides en 5 mL de acetona, la detección se realizó a 450 nm. La cuantificación se realizó utilizando estándares externos de β -caroteno y luteína (Jaramillo-Flores y col., 2003).

2.6 Determinación de la actividad antioxidante

La determinación de la actividad antioxidante fue realizada utilizando la técnica espectrofotométrica establecida por Brand-Williams y col. 1995. 6.0 g de muestra fueron macerados con Celite® y 45 mL de metanol al 80%, filtrando al vacío, el residuo se re-extrajo dos veces con la misma cantidad de metanol. El filtrado se centrifugó a 4000 rpm durante 20 min (Hermle Z200A, Germany), 0.1 mL del sobrenadante,

se colocaron con 3.9 mL de DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA), la muestra se dejó reposar en la oscuridad durante 30 min, pasado el tiempo se midió la absorbancia a 515 nm en un espectrofotómetro (Thermo Fisher Scientific

Inc. Waltham, MA, USA), utilizando metanol al 80% como control, la actividad antioxidante se calculó como el porcentaje de inhibición en las muestras con relación al control, con la siguiente fórmula:

$$\text{Actividad antioxidante(\%)} = \left[\frac{\text{Absorbancia}_{\text{control},515\text{nm}} - \text{Absorbancia}_{\text{muestra},515\text{nm}}}{\text{Absorbancia}_{\text{control},515\text{nm}}} \right] * 100$$

2.7 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental trifactorial ($2 \times 3 \times 7$) con distribución completamente al azar, donde los factores fueron; el tipo de tratamiento (2), temperatura del tratamiento (3) y tiempo de tratamiento (7 niveles, incluyendo el control). Todos los análisis se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como la media \pm la desviación estándar, el análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias fueron realizados con una prueba de Tukey a $p \leq 0.05$. Para el análisis de datos se utilizó el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., Carry, NC, USA) v. 8.0.

3 Resultados y discusión

3.1 Contenido de Compuestos Fenólicos Totales (CFT)

El análisis estadístico, mostró que existen diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$), en el contenido de compuestos fenólicos de los *nopalitos* frescos (NF) con respecto a los

NTTA y NTTF (Tabla 1). Los NTTA presentaron valores que se encuentran dentro del intervalo de 407.4 ± 35.6 a 1650.1 ± 24.6 $\text{mg} \times \text{g}^{-1}$ de muestra fresca, algunos superiores a los obtenidos para los NF (540.4 ± 44.5 $\text{mg} \times \text{g}^{-1}$ de muestra fresca), y por arriba del 60% de dicho valor con el tratamiento de asado 75°C , 15 o 20 min, lo cual indica que este proceso favoreció la liberación de compuestos fenólicos enlazados, debido a la ruptura de los constituyentes celulares, aunado a que la transferencia de calor en este proceso se lleva a cabo de manera paulatina, provocando la formación de compuestos fenólicos por interconversión no enzimática entre moléculas fenólicas (Que y col., 2008).

Por otra parte, al incrementar la temperatura del tratamiento se observó disminución del contenido de compuestos fenólicos, lo cual es debido a la degradación térmica y oxidativa de dichos compuestos como consecuencia del incremento de la intensidad del tratamiento térmico (Wojdyło y col., 2009; Pérez-Alonso y col., 2015). En ambos tratamientos térmicos (asado y freído) se pudo observar, que no existe una tendencia definida al incrementar el tiempo, lo cual indica que durante el proceso se generan reacciones químicas que llevan a favorecer la síntesis, liberación o bien la degradación de compuestos fenólicos.

Tabla 1. Contenido de compuestos fenólicos totales de NF, NTTA y NTTF ($\text{mg GAE} \times \text{g}^{-1}$ de *nopalito*).

Tratamiento	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Tiempo del tratamiento térmico (min)						
		0	5	10	15	20	25	30
Asado	75	540.4 ± 24.5^d	604.2 ± 12.6^d	600.6 ± 37.2^d	1323.9 ± 27.3^b	1650.1 ± 24.6^a	868.4 ± 30.1^c	818.3 ± 24.6^c
	100	540.4 ± 24.5^e	853.8 ± 23.0^c	1294.8 ± 98.5^a	$755.4 \pm 38.3^{c,d}$	$657.0 \pm 16.4^{d,e}$	$640.6 \pm 16.4^{d,e}$	1094.4 ± 71.1^b
	125	540.4 ± 24.5^d	807.4 ± 24.6^c	1178.2 ± 97.5^a	791.9 ± 46.5^c	407.4 ± 25.6^e	$482.1 \pm 27.3^{d,e}$	952.2 ± 27.3^b
Freído	75	540.4 ± 24.5^a	174.3 ± 4.9^c	142.5 ± 1.9^c	185.4 ± 11.3^c	280.0 ± 18.6^b	322.9 ± 8.5^b	310.0 ± 14.7^b
	100	540.4 ± 24.5^a	$270.0 \pm 8.6^{c,d}$	$250.3 \pm 7.1^{c,d}$	241.4 ± 17.2^d	343.8 ± 23.8^b	$312.6 \pm 18.9^{b,c}$	360.3 ± 23.0^b
	125	540.4 ± 24.5^a	163.6 ± 10.4^d	175.8 ± 1.4^d	$197.4 \pm 3.3^{c,d}$	$235.2 \pm 12.6^{b,c}$	266.9 ± 5.5^b	$247.2 \pm 7.1^{b,c}$

NF-*nopalito* fresco, NTTA *nopalito* tratado térmicamente asado y NTTF *nopalito* tratado térmicamente freído. El contenido de compuestos fenólicos totales a los 0 min representa al *nopalito* fresco. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$). Los valores son la media \pm desviación estándar de tres repeticiones.

Los NTTF presentaron valores que se encuentran en el intervalo de 142.5 ± 1.9 a $360.3 \pm 23.0 \text{ mg} \times \text{g}^{-1}$ de muestra fresca (Tabla 1), menor contenido de compuestos fenólicos que los NF, lo cual podría ser debido a que este proceso involucró dos tratamientos térmicos, uno con agua a ebullición y la inmersión en aceite, provocando que algunos compuestos fenólicos sufrieran degradación oxidativa o térmica y disminución de la actividad de la primera enzima (fenilalanina amonioliasa o PAL), involucrada en el metabolismo de los fenilpropanoides (Hahlbrock y Scheel, 1989; Wojdylo y col., 2009).

En ambos tratamientos térmicos (asado y freído) se pudo observar, que no existe una tendencia definida al incrementar el tiempo, lo cual indica que durante el proceso se generan reacciones químicas que llevan a favorecer la síntesis, liberación o bien la degradación de compuestos fenólicos.

El contenido de compuestos fenólicos de los NF, NTTA y NTTF analizados en el presente trabajo, es superior al reportado para *Opuntia-ficus indica* f. *inermis* y *Opuntia-ficus indica* f. *Amylocea* (Ayadi y col., 2009), lo cual podría ser debido a la diferencia de variedades, estado de desarrollo, época, hora y zona geográfica de cosecha, ya que se ha demostrado que éstos son algunos de los factores externos que pueden alterar la composición química de los cladodios (Guzman y Chávez, 2007, Ruiz-Espinoza y col., 2008), principalmente, el contenido de compuestos fenólicos (Bensadón y Hervert-Hernández, 2010).

Por otra parte, considerando los resultados reportados para nopales tratados tanto por liofilización como para la obtención de extractos etanólicos de *Opuntia ficus indica* var. *Saboten* (Jeong-Chae y col., 2002), se corrobora que el tratamiento al que se someten los cladodios, influye directamente en el contenido de compuestos fenólicos, indicando que los tratamientos térmicos utilizados en el presente trabajo favorecieron la extracción de compuestos fenólicos como betalainas (β cianinas y β xantinas) y flavonoides (quercetina y mirisetina), así como vitaminas (Jeong-Chae y col., 2002) por lo que se obtuvieron

valores superiores a los reportados para *Opuntia ficus indica* var. *Saboten*. Se ha reportado que los frutos del nopal (tuna verde y tuna roja), presentan valores menores (Bensadón y Hervert-Hernández, 2010) a los obtenidos para los NF, NTTA y NTTF analizadas en el presente trabajo. Mientras que la piel y semillas de tunas de diferentes cultivares (montesa, cristalina, esmeralda y pelón liso) mostraron menor contenido de compuestos fenólicos (Cardador-Martínez y col., 2011) que los obtenidos para los *nopalitos* frescos, asados y freídos.

El contenido de compuestos fenólicos presentes en los NF, NTTA y NTTF es superior al reportado para otros productos vegetales tratados térmicamente como *Erythrina americana* Miller fresca y secada por convección (Bernardino-Nicanor y col., 2016), extractos metanólicos y etanólicos de plantas utilizadas en medicina tradicional china (*Rhus chinensis* Mill., *Aristolochia mollissima* Hance), extractos metanólicos de frutas y verduras como Kiwi, naranja, espinaca, lechuga china y tomate (Cai y col., 2004), así como bagazo de manzana del cajú (Felix y col., 2018).

El contenido de compuestos fenólicos de los NF, NTTA y NTTF analizados en el presente trabajo, es inferior al reportado para pimientos dulces frescos y deshidratados (Vega-Gálvez y col., 2009), así como para flores y hojas de *B. kockiana*, *C. surattensis*, *B. purpurea* (Chew y col., 2011). Se ha reportado que existe correlación entre la actividad antioxidante y el contenido de compuestos fenólicos (Cai y col., 2004), lo cual también fue observado en el presente trabajo, ya que los NTTF fueron los que presentaron los valores más bajos tanto de actividad antioxidante como de compuestos fenólicos.

3.2 Efecto del tratamiento térmico sobre la extractabilidad de los carotenoides

El contenido de carotenoides en los NF, determinados por HPLC es de $0.7 \text{ mg} \times \text{g}^{-1}$ en base húmeda, de los cuales el 14.3% es β caroteno y el 85.7% es de luteína (Tablas 2 y 3),

Tabla 2. Contenido de β -caroteno de NF, NTTA y NTTF ($\text{mg} \times \text{g}^{-1}$ *nopalito*, base húmeda).

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo del tratamiento térmico (min)						
		0	5	10	15	20	25	30
Asado	75	0.1 ± 0.0^c	1.3 ± 0.1^b	2.3 ± 0.2^a	2.2 ± 0.1^a	1.1 ± 0.1^b	2.3 ± 0.1^a	1.1 ± 0.1^b
	100	0.1 ± 0.0^f	$1.5 \pm 0.0^{b,c}$	1.6 ± 0.1^b	$1.4 \pm 0.0^{c,d}$	0.8 ± 0.0^e	2.9 ± 0.1^a	1.2 ± 0.1^d
	125	0.1 ± 0.0^d	1.2 ± 0.1^b	$1.1 \pm 0.1^{b,c}$	0.9 ± 0.0^c	2.5 ± 0.1^a	$1.1 \pm 0.0^{b,c}$	0.1 ± 0.0^d
Freído	75	0.1 ± 0.0^e	0.6 ± 0.0^d	2.2 ± 0.0^a	1.2 ± 0.1^c	$2.0 \pm 0.2^{a,b}$	1.0 ± 0.0^c	1.9 ± 0.0^b
	100	0.1 ± 0.0^f	3.1 ± 0.0^a	2.8 ± 0.2^b	2.5 ± 0.0^c	2.5 ± 0.0^c	1.3 ± 0.0^e	2.2 ± 0.0^d
	125	0.1 ± 0.0^c	2.0 ± 0.0^a	1.2 ± 0.1^b	ND	ND	ND	ND

NF-*nopalito* fresco, NTTA *nopalito* tratado térmicamente asado y NTTF *nopalito* tratado térmicamente freído. El contenido de β caroteno a los 0 min representa al *nopalito* fresco. ND. No detectado. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$). Los valores son la media \pm desviación estándar de tres repeticiones.

el contenido de β -caroteno y luteína es mayor al contenido reportado por Jaramillo-Flores y col. (2003), lo cual podría ser debido a la diferencia de variedades, grado de madurez, hora, época y zona geográfica de cosecha, así como el método de análisis (Guzmán y Chávez, 2007; Ruiz-Espinoza y col., 2008; Jaramillo-Flores y col., 2003). Los resultados mostraron un comportamiento aleatorio, con respecto al efecto de la temperatura, tiempo y tipo de tratamiento térmico sobre la extracción de los carotenoides (Tabla 2 y 3), sin embargo, ambos tratamientos (asado y freído), provocaron un incremento de la extracción de los carotenoides, con respecto a los NF (con excepción de los NTTF 125 °C por más de 11 min), lo cual es un indicio de que la temperatura del tratamiento favorece la ruptura de complejos proteína-carotenoide, disminución de la interacción mucílago-carotenoide y ruptura de tejidos, favoreciendo con ello la extracción de los carotenoides (Khachik y col., 1992; Chadler y Schwartz 1998; Jaramillo-Flores y col., 2003). Por otra parte, el comportamiento aleatorio podría ser debido a la presencia del mucílago, ya que se ha demostrado, que las variaciones en la concentración del mucílago modifican sus características no Newtonianas, al incrementarse su pseudoplasticidad; en adición, la temperatura modifica los parámetros reológicos del mucílago, los cuales están asociados a efectos de deslizamiento (Medina-Torres y col., 2000; Medina-Torres y col., 2013) lo cual favorece la extracción de los carotenoides. Sin embargo, la presencia de la pectina y fibra soluble provocan la disminución de la biodisponibilidad del β -caroteno y por ende de los carotenoides (Jaramillo-Flores y col., 2003), razones a las cuales se les atribuye el comportamiento aleatorio.

La mayor extracción de carotenoides se logró en los NTTF a 100 °C durante 5 min (18.7 mg \times g⁻¹ en base húmeda), con un 82.8% de luteína y 17.2% de β -caroteno (Tablas 2 y 3). La alta extracción que se logró en este tratamiento es atribuida al tratamiento en agua a

ebullición que se realizó previo al freído, lo cual permitió la eliminación de la mayor proporción de mucílago, con lo que se evitó la formación de las interacciones entre polisacáridos y carotenoides (Jaramillo-Flores y col., 2003).

Los resultados obtenidos con los NTTA y NTTF difieren con lo reportado por Jaramillo-Flores y col. 2003, quien reporta un incremento de la extracción de los carotenoides directamente proporcional al incrementar la temperatura del tratamiento, estas diferencias podrían ser debidas principalmente a la temperatura, tipo y tiempo del tratamiento térmico utilizado, ya que estos factores influyen en la modificación de la estructura celular y por ende la extracción de los carotenoides (Jaramillo-Flores y col., 2003).

Los NTTA y NTTF presentaron mayor concentración de β -caroteno que la naranja, toronja roja, maíz, espinaca, uva roja, col, lechuga, papaya, frijol verde (Alves-Rodrigues y Shao, 2004) y tomate fresco y enlatado (D'Evoli y col., 2013).

La importancia de los resultados obtenidos en los análisis realizados, radica en la capacidad del β -caroteno de inhibir la síntesis del colesterol y con ello incrementar la degradación de las lipoproteínas de baja densidad, mientras que la luteína es asociada con la disminución de los desórdenes cardiovasculares (Strati y col., 2012).

Los NF, NTTA y NTTF, presentaron mayor concentración de luteína que de β -caroteno (Tablas 2 y 3), lo cual podría ser debido a la interferencia del mucílago en la determinación del β -caroteno, ya que este pigmento puede formar complejos con algunos componentes del mucílago, principalmente pectina que se encuentra en los *nopalitos* en una concentración de 10% aproximadamente, lo que provoca la baja concentración detectada en los *nopalitos* (Rock y Swendseid, 1992), aunado a que la luteína ha mostrado ser más estable a la degradación en comparación a sus homólogos de carotenoides hidrocarbonados cuando son

Tabla 3. Contenido de luteína de NF, NTTA y NTTF (mg \times g⁻¹ nopalito, base húmeda).

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo del tratamiento térmico (min)						
		0	5	10	15	20	25	30
Asado	75	0.6 \pm 0.0 ^d	8.6 \pm 0.4 ^b	8.6 \pm 0.1 ^b	9.5 \pm 0.3 ^b	12.9 \pm 1.1 ^a	12.6 \pm 1.2 ^a	5.1 \pm 0.5 ^c
	100	0.6 \pm 0.0 ^e	6.6 \pm 0.6 ^c	9.1 \pm 0.5 ^b	6.5 \pm 0.0 ^c	3.7 \pm 0.3 ^d	14.2 \pm 0.9 ^a	4.0 \pm 0.4 ^d
	125	0.6 \pm 0.0 ^c	10.3 \pm 0.5 ^a	10.4 \pm 0.4 ^a	3.6 \pm 0.3 ^b	3.7 \pm 0.2 ^b	0.5 \pm 0.0 ^c	0.1 \pm 0.0 ^c
Freído	75	0.6 \pm 0.0 ^f	3.0 \pm 0.0 ^e	11.4 \pm 0.0 ^a	8.5 \pm 0.0 ^c	9.7 \pm 0.7 ^b	5.1 \pm 0.4 ^d	10.2 \pm 0.4 ^b
	100	0.6 \pm 0.0 ^d	15.5 \pm 0.1 ^a	6.2 \pm 0.6 ^c	9.8 \pm 0.8 ^b	10.5 \pm 1.0 ^b	2.1 \pm 0.1 ^d	10.7 \pm 0.8 ^b
	125	0.6 \pm 0.0 ^c	8.3 \pm 0.0 ^a	5.9 \pm 0.1 ^b	ND	ND	ND	ND

NF-*nopalito* fresco, NTTA *nopalito* tratado térmicamente asado y NTTF *nopalito* tratado térmicamente freído. El contenido de luteína a los 0 min representa al *nopalito* fresco. ND. No detectado. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas (P \leq 0.05). Los valores son la media \pm desviación estándar de tres repeticiones.

tratados térmicamente (Henry y col., 1998; Updike y Schwartz, 2003).

Se observó un incremento de la concentración de luteína en los NTTA y NTTF a diferentes tiempos y temperaturas del tratamiento con respecto a los NF, excepto los NTTA a 125 °C durante 25 o 30 min donde la concentración de luteína es menor a la de los NF y NTTF a 125 °C durante 15, 20, 25 o 30 min, donde no se detectó presencia del pigmento (Tabla 3). Este comportamiento podría ser debido a las altas temperaturas y tiempos prolongados de estos tratamientos térmicos, que generan cambios en los isómeros de luteína incrementando la presencia de isómeros Cis, los cuales no pudieron ser cuantificados mediante la metodología utilizada en el presente trabajo, dicho comportamiento ha sido demostrado en alimentos tratados térmicamente como el maíz, espinaca, chícharos y brócoli (Updike y Schwartz, 2003).

El incremento de la concentración de luteína en las muestras tratadas térmicamente es debida principalmente al incremento en su extracción provocada por la ruptura de la matriz de los *nopalitos*, disminución de los sólidos solubles (principalmente en las muestras freídas) e inactivación de enzimas oxidantes de carotenoides (Updike y Schwartz, 2003), así como la desnaturalización de proteínas y subsecuente rompimiento de los enlaces con el pigmento (D'Evoli y col., 2013).

Los NTTA y NTTF presentaron mayor contenido de luteína que la naranja, tomates, papaya, toronja roja, frijol verde, zanahoria, lechuga (Alves-Rodrigues y Shao, 2004) y productos enlatados como espinacas, col, brocoli, maíz (Updike y Schwartz, 2003), tomate (D'Evoli y col., 2013).

3.3 Actividad antioxidante

La mayor actividad antioxidante fue obtenida para los NTTA, la cual aumenta al incrementar el tiempo y

la temperatura del tratamiento, siendo los NTTA a 125 °C durante 30 min., la muestra con mayor actividad antioxidante.

De acuerdo al ANOVA ($P \leq 0.05$), existen diferencias estadísticamente significativas entre la actividad antioxidante exhibida por los NF, con respecto a los NTTF y NTTA, lo cual indica que, la actividad antioxidante es influida por el tiempo, temperatura y forma de transmitir el calor, durante el tratamiento térmico utilizado en el procesamiento de los *nopalitos* (Tabla 4). La influencia de la temperatura sobre la estabilidad de la actividad antioxidante, ya ha sido reportada por diferentes autores (Pérez-Alonso y col., 2015).

El proceso de asado provocó un incremento del valor de la actividad antioxidante de hasta 2.7 veces con relación al valor obtenido para los NF, alcanzando un máximo en la actividad antioxidante del 30% (NTTA, 125 °C; 30 min) y un mínimo de 10.3% (NTTA, 75 °C; 5 min), sólo 0.4% por debajo de la actividad antioxidante obtenida para los NF. Este comportamiento, indica que el tratamiento de asado incrementa la extracción de los compuestos responsables de la actividad antioxidante que se encuentran presentes en los *nopalitos*, tales como carotenoides, compuestos fenólicos, flavonoides, ácido ascórbico y tocoferoles (El-Mostafa y col., 2014; Jaramillo-Flores y col., 2003), debido a la ruptura de los complejos carotenoide-compuestos (Khachik y col., 1992; Jaramillo-Flores y col., 2003), así como a la ruptura de tejidos, lo que permite una mayor penetración de disolventes orgánicos y por ende la liberación de una mayor concentración de compuestos con actividad antioxidante (Chadler y Schwartz, 1998; Jaramillo-Flores y col., 2003). En adición, el asado de los *nopalitos* podría haber generado y acumulado productos derivados de la reacción de Maillard, los cuales tienen grados variables de actividad antioxidante (Vega-Gálvez y col., 2009; Wojdyło y col., 2009) que contribuyeron al incremento en los valores de la actividad antioxidante.

Tabla 4. Actividad antioxidante de NF, NTTA y NTTF (%).

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo del tratamiento térmico (min)						
		0	5	10	15	20	25	30
Asado	75	10.7±0.8 ^c	10.3±0.6 ^c	10.6±0.2 ^c	10.6±0.4 ^c	10.6±0.7 ^c	15.1±0.5 ^b	18.5±0.6 ^a
	100	10.7±0.8 ^d	16.3±0.5 ^b	17.5±0.7 ^b	17.9±0.6 ^b	21.2±1.1 ^a	20.9±0.4 ^a	13.8±0.1 ^c
	125	10.7±0.8 ^e	12.6±0.6 ^e	16.9±1.5 ^d	22.2±1.8 ^{b,c}	21.0±1.0 ^c	25.8±1.3 ^b	29.9±1.8 ^a
Freído	75	10.7±0.8 ^a	1.7±0.1 ^d	2.3±0.1 ^{c,d}	3.0±0.3 ^c	3.0±0.2 ^c	5.7±0.3 ^b	11.1±0.6 ^a
	100	10.7±0.8 ^a	4.7±0.3 ^d	5.9±0.3 ^{c,d}	5.2±0.1 ^d	6.6±0.1 ^c	8.0±0.2 ^b	7.9±0.8 ^b
	125	10.7±0.8 ^{c,d}	8.8±0.2 ^d	13.0±0.1 ^b	15.9±0.3 ^a	17.4±1.0 ^a	16.0±1.5 ^a	12.1±0.1 ^{b,c}

NF-*nopalito* fresco, NTTA *nopalito* tratado térmicamente asado y NTTF *nopalito* tratado térmicamente freído. La actividad antioxidante a los 0 min representa al *nopalito* fresco. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$). Los valores son la media±desviación estándar de tres repeticiones.

Los NTTF, mostraron valores más bajos que los obtenidos para los NTTA, lo cual podría ser debido a que el tratamiento de freído involucró dos procesos, el primero, con agua en ebullición, el cual tuvo como finalidad eliminar el mucílago del *nopalito* y con ello disminuir la formación de complejos entre éste polisacárido y los compuestos con actividad antioxidante (Jaramillo-Flores y col., 2003); el segundo fue el proceso de freído, el cual se realizó con aceite, y debido a que los carotenoides son compuestos lipofílicos (Stahl y col., 2003), una proporción de ellos pudo quedar inmersa en el aceite provocando la disminución de la actividad antioxidante. Por otra parte, se ha demostrado que el tratamiento en medio graso provoca que la superficie de los alimentos se cierre formando una corteza, producto de la deshidratación causada por la evaporación del agua, manteniendo atrapados los compuestos responsables de la actividad antioxidante, es decir disminuye su extracción (Pérez-Reyes y Sosa-Morales, 2013).

Los NTTF a 125 °C, por más de 10 min, presentaron un incremento en la actividad antioxidante con respecto a los NF, de hasta el 62%, mientras que a 75 °C y 100 °C, se observa un decremento de hasta 6.3 veces (freído, 75 °C; 5 min). Dicho comportamiento podría explicarse, ya que al parecer a altas temperaturas se logra mayor rompimiento de tejidos, y por ende mayor extracción de los compuestos responsables de la actividad antioxidante (Khachik y col., 1992; Chadler y Schwartz, 1998; Jaramillo-Flores y col., 2003).

El comportamiento de la actividad antioxidante con respecto al tiempo del tratamiento, es semejante para los NTTA y NNTF (Tabla 4), a temperaturas bajas (75 °C) se observa una relación directa entre la actividad antioxidante y el incremento del tiempo del tratamiento, mientras que a temperaturas altas (100 °C y 125 °C), se observa un comportamiento de campana, mostrando un punto máximo, el cual se encuentra entre 20 y 25 min de acuerdo a la temperatura y tratamiento utilizado. Lo cual indica que, a estas temperaturas, el incremento del tiempo del tratamiento favorece reacciones químicas y físicas que llevan al incremento en la extracción, así como generación de compuestos responsables de la actividad antioxidante, sin embargo, cuando los tiempos se prolongan se favorece la degradación de dichos compuestos.

Es importante mencionar que, ninguno de los tratamientos generó compuestos con actividad pro-oxidante, ya que los valores de la actividad antioxidante obtenidos para ambos tratamientos a diferentes temperaturas son positivos (Jaramillo-Flores y col., 2003).

Considerando los resultados obtenidos de los tratamientos realizados durante 30 min a diferentes temperaturas (Tabla 4), se observa un comportamiento semejante para ambos casos, a 75 °C se favorece la extracción de los compuestos responsables de la actividad antioxidante de la superficie de los *nopalitos* (Jaramillo-Flores y col., 2003), siendo 72% y 3.7% superior a los NF en los NTTA y NTTF respectivamente, mientras que a 100 °C

se observa un decremento de la actividad antioxidante, lo cual podría ser debido al proceso de degradación de los compuestos, principalmente carotenoides (Delgado-Vargas y col., 2000). Finalmente, a 125 °C se presenta un aumento de la actividad antioxidante debido al incremento de la extracción de los compuestos responsables de la actividad antioxidante que se encuentran en el interior de los *nopalitos*, lo cual podría ser provocado por el proceso de degradación del mucílago, disminución de la interacción carotenoide-proteína y ruptura de la matriz péctica (Khachik y col., 1992; Jaramillo-Flores y col., 2003; López-García y col., 2017), dicho incremento fue 2.7 y 1.3 veces la actividad antioxidante en los NTTA y NTTF respectivamente, en comparación con los NF.

El incremento en la actividad antioxidante provocado por el tratamiento térmico de los *nopalitos* también fue observado por Jaramillo-Flores y col. (2003) al someter *Opuntia ficus-indica* a tratamiento con agua a diferentes temperaturas, logrando obtener valores superiores a los reportados en el presente trabajo, lo cual podría dar un indicio de que el tratamiento térmico con agua favorece la extracción de los compuestos responsables de la actividad antioxidante, mientras que el proceso de asado sólo a altas temperaturas favorece dicha extracción, dicho comportamiento podría ser debido, a que en éste último proceso la transferencia de calor se realiza por conducción directa a la superficie del *nopalito* y poco a poco va penetrando la estructura, generando la formación interna de vapor de agua que reblandece el interior del *nopalito* (García, 2008; Pérez-Reyes y Sosa-Morales, 2013), sin embargo, la temperatura que se alcanza al interior no es suficiente como para generar un efecto fisicoquímico semejante al logrado cuando la muestra es tratada con agua a altas temperaturas.

Por otra parte, se ha observado que al someter los *nopalitos* a procesos tanto para la obtención de alimentos (mermeladas), como para la obtención de extractos, se provoca un incremento de la actividad antioxidante con respecto a los *nopalitos* frescos, debido al efecto de la temperatura, disolventes y procesos mecánicos utilizados (González-Cruz y col., 2012; Lee y col., 2002).

Los NF, NTTA y NTTF, mostraron menor actividad antioxidante que la reportada para *Opuntia ficus-indica* var. Atlixco y *Opuntia ficus-indica* var. Milpa Alta, dichas diferencias son atribuidas a la variedad utilizada, el estado de maduración de los cladodios analizados así como al método de análisis (Bensadón y Hervert-Hernández, 2010).

En comparación con los frutos del nopal, los NF, NTTA y NTTF, presentaron menor actividad antioxidante que la tuna verde y roja (Bensadón y Hervert-Hernández, 2010), lo cual podría ser debido a la alta concentración de betaninas e indicaxantinas, así como compuestos polifenólicos y en menor medida la vitamina C (contribuyendo en menos del 15% de la actividad antioxidante), presentes en el fruto, cuyo contenido varía de acuerdo al cultivar, estado de maduración, clima y ubicación geográfica de producción,

dichos compuestos, se ha demostrado que contribuyen a la actividad antioxidante de los frutos actuando de manera sinérgica (Butera y col., 2002; Galati y col., 2003). Sin embargo, los NTTA a 100 °C y 125 °C presentaron mayor actividad antioxidante que la piel de tunas maduras de los cultivares cristalina, montesa y pelón liso (Cardador-Martínez y col., 2011).

Por otra parte, la actividad antioxidante de los NF es 2 veces menor a la reportada para frutos como la fresa (Wojdyło y col., 2009) y extractos de capulín (Jiménez y col., 2011) sin embargo, la actividad antioxidante de las muestras asadas se encuentran dentro del intervalo reportado para las fresas secadas por liofilización, al vacío, por convección y microondas (Wojdyło y col., 2009), así como para orégano mexicano (Flores-Martínez y col., 2016).

Las diferencias antes mencionadas en la capacidad antioxidante de los *nopalitos* con respecto a otras fuentes vegetales, es de esperarse si se considera que la actividad antioxidante, es el resultado del poder antioxidante sinérgico de vitaminas, polifenoles, antocianinas, carotenoides y otros compuestos con capacidad antioxidante (Bensadón y Hervert-Hernández, 2010; Jiménez y col., 2011), por lo que al tratarse de especies e inclusive variedades diferentes también su composición química es diferente y por ende sus propiedades nutricionales.

3.4 Efecto de las condiciones de los tratamientos térmicos

Los resultados del análisis de varianza mostraron que la temperatura tiene una mayor contribución a las modificaciones en la concentración de los carotenoides (β -caroteno y luteína), sobre éste parámetro, el tipo de tratamiento (asado o freído) no tiene efecto significativo; sin embargo, para la concentración de compuestos fenólicos y la actividad antioxidante se observó que el tipo de tratamiento térmico (asado o freído) es el que mayor influencia presenta sobre éstos parámetros.

Conclusiones

El tipo, tiempo y temperatura del tratamiento térmico, influyen sobre la actividad antioxidante, contenido de compuestos fenólicos y extracción de los carotenoides presentes en los *nopalitos*. El proceso de asado y freído incrementan la extracción de los carotenoides, siendo el asado (125 °C; 30 min), el tratamiento térmico que favorece la actividad antioxidante de los *nopalitos*, mientras que freído a 100 °C; 5 min es el proceso más adecuado para retener la mayor cantidad de carotenoides (3.1 mg \times g⁻¹ β -caroteno y 15.5 mg \times g⁻¹ luteína). Los compuestos fenólicos tienen mayor influencia sobre la actividad antioxidante de los NTTA y NTTF que los carotenoides presentes en los mismos.

Agradecimientos

Los autores del artículo agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo económico otorgado para el desarrollo de los proyectos con clave 5726.16-P y 5938.16-P.A-P.

Referencias

- Aguilar-Becerril, G., Peña-Valdivia, C.B. (2006). Alteraciones fisiológicas provocadas por sequía en nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Revista Fitotecnia Mexicana* 29, 231-237.
- Alves-Rodrigues, A., Shao, A. (2004). The science behind lutein. *Toxicology Letters* 150, 57-83. doi:10.1016/j.toxlet.2003.10.031
- Ayadi, M.A., Abdelmaksoud, W., Ennouri, M., Attia, H. (2009). Cladodes from *Opuntia ficus indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Industrial Crops and Products* 30, 40-47. doi:10.1016/j.indcrop.2009.01.003
- Bensadón, S., Hervert-Hernández, D., Sáyago-Ayerdi, S.G., Goñi, I. (2010). By-products of *Opuntia ficus-indica* as a source of antioxidant dietary fiber. *Plant Food for Human Nutrition* 65, 210-216. doi:10.1007/s11130-010-0176-2
- Bernardino-Nicanor, A., Montañez-Soto, J.L., Vivar-Vera, M.A., Juárez-Goiz J.M., Acosta-García, G., González-Cruz, L. (2016). Effect of drying on the antioxidant capacity and concentration of phenolic compounds in different parts of the *Erythrina americana* tree. *BioResources* 11, 9741-9755. doi:10.15376/biores.11.4.9741-9755
- Butera, D., Tesoriere, L., Di Gaudio, F., Bongiorno, A., Allegra, M., Pintaudi, A.M., Khoen, K., Livrea, M.A. (2002). Antioxidant activities of Sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: betanin and indicaxanthin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 6895-6901. doi:10.1021/jf025696p
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E., Berset, C. (1995). Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT- Food Science and Technology* 28, 25-30. doi:10.1016/S0023-6438(95)80008-5
- Cai, Y., Luo, Q., Sun, M., Corke, H. (2004). Antioxidant activity and phenolic compounds of 112 traditional Chinese medicinal plants associated with anticancer. *Life Sciences* 74, 2157-2184. doi:10.1016/j.lfs.2003.09.047

- Cárdenas, A., Goycoolea, F.M., Rinaudo, M. (2008). On the gelling behaviour of 'nopal' (*Opuntia ficus indica*) low methoxyl pectin. *Carbohydrate Polymers* 73, 212-222. doi:10.1016/j.carbpol.2007.11.017
- Cardador-Martínez, A., Jiménez-Martínez, C., Sandoval, G. (2011). Revalorization of cactus pear (*Opuntia* spp.) wastes as a source of antioxidants. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 31, 782-788. doi: 10.1590/S0101-20612011000300036
- Chandler, L.A., Schwartz, S.J. (1988). Isomerization and losses of trans- β carotene in sweet potatoes as affected by processing treatments. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 36, 129-133. doi:10.1021/jf00079a033
- Chew, Y.L., Chan, E.W.L., Tan, P.L., Lim, Y.Y., Stanslas, J., Goh, J.K. (2011). Assessment of phytochemical content, polyphenolic composition, antioxidant and antibacterial activities of Leguminosae medicinal plants in Peninsular Malaysia. *BMC Complementary and Alternative Medicine* 11, 12. doi: 10.1186/1472-6882-11-12
- Delgado-Vargas, F., Jiménez, A.R., Paredes-López, O. (2000). Natural pigments: carotenoids, anthocyanins, and betalains—characteristics, biosynthesis, processing, and stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 40, 173-289. doi: 10.1080/10408690091189257
- D'Evoli, L., Ginevra, L.B., Massimo, L. (2013). Influence of heat treatments on carotenoid content of cherry tomatoes. *Journal Foods* 2, 352-363. doi:10.3390/foods2030352
- El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbij, M., Cherkaoui-Malki, M. (2014). Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules* 19, 14879-14901. doi: 10.3390/molecules190914879
- Felix, A.C.S., Alvarez, L.D.G., Santana, R.A., Valasques-Junior, G.L., Bezerra, M.D.A., de Oliveira-Neto, N.M., de Oliveira, L.E., de Oliveira, F.A.A., Franco, M., do Nascimento, J.B.B. (2018). Application of experimental designs for evaluate the total phenolics content and antioxidant activity of cashew apple bagasse. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 17, 165-175.
- Flores-Martínez, H., León-Campos, C., Estarrón-Espinosa, M., Orozco-Ávila, I. (2016). Optimización del proceso de extracción de sustancias antioxidantes a partir del orégano mexicano (*Lippia graveolens* HBK) utilizando la metodología de superficie de respuesta (MSR). *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 15, 773-785.
- Galati, E.M., Tripodo, M.M., Trovato, A., Miceli, N., Monforte, M.T. (2002a). Biological effect of *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. (*Cactaceae*) waste matter: Note I: diuretic activity. *Journal of Ethnopharmacology* 79, 17-21. doi:10.1016/S0378-8741(01)00337-3
- Galati, E.M., Pergolizzi, S., Miceli, N., Monforte, M.T., Tripodo, M.M. (2002b). Study on the increment of the production of gastric mucus in rats treated with *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. cladodes. *Journal of Ethnopharmacology* 83, 229-233. doi:10.1016/S0378-8741(02)00243-X
- Galati, E.M., Mondello, M.R., Giuffrida, D., Dugo, G., Miceli, N., Pergolizzi, S., Taviano, M.F. (2003). Chemical characterization and biological effects of Sicilian *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. fruit juice: antioxidant and antiulcerogenic activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51, 4903-4908. doi: 10.1021/jf030123d
- García, A.C. (2008). Técnicas de cocción saludables aplicables a la alimentación mediterránea. *Anales de la Real Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental* 21, 171-180.
- Ginestra, G., Parker, M.L., Bennett, R.N., Robertson, J., Mandalari, G., Narbad, A., Lo Curto, R.B., Bisignano, G., Faulds, C.B., Waldron, K.W. (2009). Anatomical, chemical, and biochemical characterization of cladodes from prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57, 10323-10330. doi: 10.1021/jf9022096
- González-Cruz, L., Filardo-Kerstupp, S., Bello-Pérez, L.A., Güemes-Vera, N., Bernardino-Nicanor, A. (2012). Carotenoid content, antioxidant activity and sensory evaluation of low-calorie nopal (*Opuntia-ficus indica*) marmalade. *Journal of Food Processing and Preservation* 36, 267-275. doi: 10.1111/j.1745-4549.2011.00589.x
- Guevara, J.C., Yahia, E.M., De La Fuente, E.B. (2001). Modified atmosphere packaging of prickly pear cactus stems (*Opuntia* spp.). *LWT- Food Science and Technology* 34, 445-451. doi:10.1006/food.2001.0787
- Guzmán Loayza, D., Chávez, J. (2007). Estudio bromatológico del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para el consumo humano. *Revista de la Sociedad Química del Perú* 73, 41-45.
- Hahlbrock, K., Scheel, D. (1989). Physiology and molecular biology of phenylpropanoid metabolism. *Annual review of plant biology* 40, 347-369.
- Henry, L.K., Catignani, G.L., Schwartz, S.J. (1998). Oxidative degradation kinetics of lycopene, lutein, and 9-cis and all-trans, β -carotene. *Journal of the American Oil Chemists Society* 75, 823-829. doi: 10.1007/s11746-998-0232-3
- Jaramillo-Flores, M.E., González-Cruz, L., Cornejo-Mazon, M., Dorantes-Alvarez, L., Gutierrez-Lopez, G.F., Hernandez-Sanchez, H. (2003). Effect of thermal treatment on the antioxidant activity and

- content of carotenoids and phenolic compounds of cactus pear cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food Science and Technology International* 9, 271-278. doi:10.1177/108201303036093
- Jeong-Chae, L., Hank-Ryul, K., Ju, K., Yong-Suk, J. (2002). Antioxidant Property of an ethanol extract of the stem of *Opuntia ficus-indica* var. Saboten. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 6490-6496. doi: 10.1021/jf020388c.
- Jimenez, M., Castillo, I., Azuara, E., Beristain, C.I. (2011). Antioxidant and antimicrobial of capulin (*Prunus serotina subsp capulin*) extracts. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 10, 29-37.
- Kaur, M., Kaur, A., Sharma, R. (2012). Pharmacological actions of *Opuntia ficus indica*: A review. *Journal of Applied Pharmaceutical Science* 02, 15-18. doi:10.7324/JAPS.2012.2703
- Khachik, F., Goli, M.B., Beecher, G.R., Holden, J., Lusby, W.R., Tenorio, M.D., Barrera, M.R. (1992). Effect of food preparation on qualitative and quantitative distribution of major carotenoid constituents of tomatoes and several green vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 40, 390-398. doi: 10.1021/jf00015a006
- Lee, J.C., Kim, H.R., Kim, J., Jang, Y.S. (2002). Antioxidant property of an ethanol extract of the stem of *Opuntia ficus-indica* var. saboten. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 6490-6496. doi: 10.1021/jf020388c
- López-García, F., Jiménez-Martínez, C., Guzmán-Lucero, D., Maciel-Cerda, A., Delgado-Macuil, R., Cbrero-Palomino, D., Terrés-Rojas, E., Arzate-Vázquez, I. (2017). Physical and chemical characterization of a biopolymer film made with corn starch and nopal xocónostle (*Opuntia joconostle*) mucilage. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 16, 147-158.
- Medina-Torres, L., Brito de la Fuente, E., Torrestiana-Sánchez, B., Katthain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocolloids* 14, 417-424. doi: 10.1016/S0268-005X(00)00015-1.
- Que, F., Mao, L., Fang, X., Wu, T. (2008). Comparison of hot air-drying and freeze-drying on the physicochemical properties and antioxidant activities of pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) flours. *International Journal of Food Science and Technology* 43, 1195-1201. doi: 10.1111/j.1365-2621.2007.01590.x
- Rock, C.L., Swendseid, M.E. (1992). Plasma β -carotene response in human after meals supplemented with dietary pectin. *The American Journal of Clinical Nutrition* 55, 96-99.
- Ruiz-Espinoza, F.H., Alvarado-Mendoza, J.F., Murillo-Amador, B., García-Hernández, J.L., Pargas-Lara, R., Duarte-Osuna, D.O., Beltrán-Morales, F.A., Fenech-Larios, L. (2008). Rendimiento y crecimiento de nopalitas de cultivares de nopal (*Opuntia ficus-indica*) bajo diferentes densidades de plantación. *Journal of PACD* 10, 22-35.
- Saenz C. 2000. Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environments* 46, 209-225. doi:10.1006/jare.2000.0676
- Singh, G. (2003). General Review of *Opuntias* in India. *Journal of the Professional Association for Catus*, 30-46.
- Sreekanth, D., Arunasree, M.K., Roy, K.R., Reddy, T.C., Reddy, G.V., Reddanna, P. (2007). Betanin a betacyanin pigment purified from fruits of *Opuntia ficus-indica* induces apoptosis in human chronic myeloid leukemia cell line-K562. *Phytomedicine* 14, 739-746. doi: 10.1016/j.phymed.2007.03.017
- Stahl, W., Sies, H. (2003). Antioxidant activity of carotenoids. *Molecular Aspects of Medicine* 24, 345-351. doi:10.1016/S0098-2997(03)00030-X
- Strati, I.F., Sinanoglou, V.J., Kora, L., Miniadis-Meimaroglou, S., Oreopoulou, V. (2012). Carotenoids from foods of plant, animal and marine origin: an efficient HPLC-DAD separation method. *Foods* 1, 52-65. doi:10.3390/foods1010052
- Updike, A.A., Schwartz, S.J. (2003). Thermal processing of vegetables increases cis isomers of lutein and zeaxanthin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51, 6184-6190. doi: 10.1021/jf030350f
- Vega-Gálvez, A., Di, Scala. K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., Perez-Won, M. (2009). Effect of air-drying temperature on physicochemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. Hungarian). *Food Chemistry* 117, 647-653. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.04.066
- Wanderley, W.L., Ferreira, M.D.A., Andrade, D.D., Vêras, A.S.C., Farias, I., Lima, L.E., Dias, A.D.A. (2002). Palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill) em substituição à silagem de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) na alimentação de vacas leiteiras. *Revista Brasileira de Zootecnia* 31, 273-281.
- Wojdyło, A., Figiel, A., Oszmiański, J. (2009). Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57, 1337-1343. doi: 10.1021/jf802507j