

POTENCIAL FÍSICO Y QUÍMICO SUSTENTABLE DE LAS SEMILLAS DE TUNA PARA LA PRODUCCIÓN AGROINDUSTRIAL

Mónica de Jesús Álvarez Castillo

Innovación en Manejo de Recursos
Naturales, Colegio de Postgraduados,
Campus San Luis Potosí
<https://orcid.org/0000-0002-4121-9477>

Erich Dietmar Rössel Kipping

Innovación en Manejo de Recursos
Naturales, Colegio de Postgraduados,
Campus San Luis Potosí.
<https://orcid.org/0000-0001-7509-1101>

Laura Araceli López Martínez

Coordinación Académica Región Altiplano
Oeste de la Universidad Autónoma
de San Luis Potosí.
<https://orcid.org/0000-0002-5075-632X>

Ismael Hernández Ríos

Innovación en Manejo de Recursos
Naturales, Colegio de Postgraduados,
Campus San Luis Potosí
<https://orcid.org/0000-0002-4284-7416>

Gerardo Loera Alvarado

Innovación en Manejo de Recursos
Naturales, Colegio de Postgraduados,
Campus San Luis Potosí
<https://orcid.org/0000-0002-5339-3819>

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: México es el décimo país con mayor población en el mundo, lo que conlleva al desarrollo de agroindustrias que pueden generar gran cantidad de residuos. La tuna (*Opuntia* sp.) es uno de los frutos de importancia para este país, sin embargo, algunos subproductos como las semillas no se aprovechan completamente. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar el contenido de minerales y las características físicas como el tamaño, la forma, la granulometría y la fricción interna y externa de harina de semillas de cinco cultivares de tuna. Cada determinación (física y química) presentó resultados equivalentes a los procesos estandarizados en las harinas típicas, así como un contenido de minerales aptos para la utilización en productos alimenticios y no alimenticios.

Palabras clave: Harina, semillas, *Opuntia* sp., minerales.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial ha provocado un incremento en la demanda de alimentos, la cual supera en un 60 % la disponibilidad actual y con ello el uso descontrolado de los recursos naturales (Arce-Quesada, 2019). En 2020, México ocupó el décimo lugar poblacional, con 127.8 millones de habitantes (FAO, 2021), derivando de ello se han desarrollado industrias alimentarias para satisfacer las necesidades de los consumidores, lo que a la vez ha generado cantidades considerables de desechos y ocasionando, frecuentemente, problemas de contaminación (Fernández *et al.*, 2013).

En México, las industrias procesadoras de alimentos (frutas, hortalizas y cereales) producen aproximadamente 76 millones de toneladas de residuos al año (González-Sánchez *et al.*, 2015). Además de las pérdidas generadas durante la recolección, el almacenamiento, el transporte y/o el

procesamiento de las materias primas (Nasrin y Matin, 2017). La tuna (*Opuntia* spp) es un fruto de gran importancia para este país y en particular para la región del altiplano, ya que, en 2021 a nivel nacional la producción fue de 462,209.02 toneladas (SIAP, 2022). Sin embargo, el uso principal de este producto es el consumo directo de la pulpa o elaboración de distintos productos sin utilizar las semillas, a pesar de constituir hasta un 15 % de la pulpa y ser ricas en compuestos lipofílicos (Ramadan y Mörsel, 2003).

Por otra parte, la agroindustria busca aprovechar la totalidad de los recursos, por ejemplo, al terminar las Guerras Mundiales se atravesó por un periodo de escasez, esto impulsó a establecer programas de enriquecimiento de alimentos con toda clase de nutrientes esenciales. Por lo que la promoción del conocimiento físico y químico de la materia orgánica desarrolló la mejora y restauración de nutrientes durante los procesos de manipulación y transformación industrial. Por consecuencia se obtuvo la adición de minerales y vitaminas a los alimentos para fortificarlos debido a la necesidad de la industria (Serpa *et al.*, 2016).

Las semillas de tuna representan una alternativa de aprovechamiento mediante la aplicación de nuevos procesos agroindustriales y con ello obtener productos como biomateriales, minerales o elementos químicos renovables, ya que estos compuestos se pueden encontrar en la cáscara, la corteza, las semillas y el hollejo de distintas especies (Leyva-López *et al.*, 2020). Se ha realizado investigaciones para obtener este tipo de productos a partir de mezquite (*Prosopis glandulosa*), huizache (*Vachellia*), moringa (*Moringa oleífera*) y chamal (*Dioon edule*), en donde puede ser usadas las vainas verdes, las hojas, las flores y/o las semillas como alimentos nutritivos, materia prima para la industria de alimentos, aceites, medicinas,

fertilizante, cosméticos o tratamiento de aguas, entre otras (Velázquez-Zavala *et al.*, 2016; Carranza y Carrillo, 2017; Nogueira *et al.*, 2017).

De manera que, la elaboración de harina representa una posibilidad para la integración de material sólido en los procesamientos físicos, químicos o biológicos (León *et al.*, 2007). Es por ello que la industria de la molienda necesita producir distintos tipos de harinas adaptables a las necesidades, ya que las harinas son uno de los alimentos formulados más comercializados siguiendo el método de mezclado (Cortés-Gómez *et al.*, 2005).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar características físicas y el contenido de minerales de harinas de cinco cultivares de tunas *Opuntia* spp. (India bonita, Jumbo azul, Roja libertad, Everest y Ficus energy) para la producción agroindustrial y su posible uso como alimentos y biomateriales de tipo sintéticos y semi-sintéticos.

METODOLOGÍA

Para realizar la presente investigación, se colectaron frutos de cinco cultivares de tuna del género *Opuntia*; India bonita, Jumbo azul, Roja libertad, Everest y Ficus energy; durante los meses de mayo y junio de 2021, en el municipio de Villanueva, Zacatecas, México. Los frutos fueron cosechados de forma manual y colocados en cajas de plástico para ser transportados al laboratorio de energías alternas del Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México.

La fase experimental fue realizada de mayo de 2021 a enero de 2022, en el Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, Salinas S.L.P (22.63299° N, 101.71245° O) y en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en el laboratorio de alimentos (22.14372° N, 101.01694° O).

Las semillas fueron separadas del fruto mediante el método propuesto por Ramadan y Mörsel (2003), para ello, el pericarpio fue removido de forma manual, posteriormente, la pulpa del fruto fue colocada en un extractor (Osterizer®). Posteriormente, las semillas pasaron a un proceso de secado para remover el exceso de humedad en un horno (Blue M®. Island. Illinois. U.S.A) a una temperatura de 60 °C hasta obtener un peso constante en las muestras (Hassini *et al.*, 2015).

Se determinó el rendimiento de las semillas, para ello, el peso de los frutos de cada cultivar fue medido en una balanza digital (TCS®. China). Posteriormente, un fruto de cada cultivar fue cortado de forma longitudinal y colocado en una estufa de secado a temperatura de 105 °C durante 72 h. Finalmente, las muestras fueron pesadas para determinar el porcentaje de peso seco de las semillas (Ettalibi *et al.*, 2020).

Las dimensiones de las semillas fueron determinadas midiendo el largo, ancho y grosor de 20 semillas seleccionadas al azar de cada cultivar, con ayuda de un calibrador digital (vernier digital con 0.001 mm de precisión).

La harina de las semillas de cada cultivar fue elaborada mediante la molienda de las semillas, la cual fue realizada en tres fases; las dos primeras en un molino de granos con motor ajustado (Micron® México), con el fin de evitar el sobrecalentamiento de la harina y con ello la plastificación del aceite. La tercera fase fue realizada en molino de café (Krupps®, modelo GX410011) para reducir y homogeneizar el tamaño de partícula de la harina.

Una muestra de 100 g de harina de cada cultivar fue tamizada en un agitador (Ro-Tap®) durante 10 minutos. Se utilizó un juego de tamices (Alcón®, México) con diferente tamaño de malla (0.59 mm, 0.42 mm, 0.300 mm, 0.212 mm, 0.146 mm y 0.015 mm). Se

determinó la distribución de partículas en cada malla con base en el peso de la harina retenida en cada una respecto al peso inicial, realizando una curva de distribución de partículas de acuerdo con la metodología descrita por Rössel-Kipping *et al.* (2016).

La fricción interna $/\mu_i/$, fue determinada como el seno del ángulo de inclinación formada por el deslizamiento a través de un embudo de 100 g de semillas y harina de cada variedad de tuna, creando un cono con altura de 4 cm (cateto opuesto), posteriormente fue medido el radio de la base del cono (cateto adyacente) utilizando una regla milimétrica, para determinar el ángulo (Álvarez-Castillo *et al.*, 2016). Esta medición fue realizada con 10 repeticiones por variedad.

La fricción externa $/\mu_e/$ fue determinada con ayuda de un transportador y placas rectangulares de distintos materiales (aluminio, cerámica, vidrio, madera y plástico), los cuales fueron utilizados para el deslizamiento de 100 g de semillas y harinas de tuna. La inclinación de las placas fue aumentada gradualmente hasta que las semillas se deslizaran por completo, en cuyo momento el ángulo de inclinación fue medido (Álvarez-Castillo *et al.*, 2016). Esta operación fue repetida 10 veces para cada variedad con cada uno de los materiales para validar el ángulo de inclinación con la siguiente ecuación.

$$\mu_e = \tan\beta$$

donde: la fricción externa (μ_e) está determinada por la $\tan\beta$.

Para determinar la forma y el tamaño de las partículas, fueron seleccionadas muestras al azar de cada malla, se tomaron imágenes digitales con ayuda de un microscopio digital (Novatech®). En las imágenes se midieron el largo, ancho, área y perímetro, mediante

la delimitación manual de las partículas en el software ImageJ® (de libre distribución) (Igathinathane *et al.*, 2009). Las imágenes fueron calibradas con ayuda de papel milimétrico.

Se determinó el contenido calcio (Ca), hierro (Fe), magnesio (Mg), sodio (Na), fósforo (P), potasio (K), manganeso (Mn), zinc (Zn) y cobre (Cu) mediante el método analítico de Espectrometría de masa de plasma acoplado Inductivamente, -ICP- MS descrito por Kastenmayer (1997).

Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza y comparación de medias por el método de Tukey ($\alpha=0.05$) de las variables físicas (dimensiones, fricción interna, fricción externa) de acuerdo con un diseño completamente al azar, en el caso de fricción externa con arreglo factorial. Los datos fueron procesados en el software estadístico Info Stat/L®. Mientras que los datos de los minerales fueron analizados con ayuda del Software Thermo Scientific™ Qtegra™.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El peso fresco de los frutos osciló entre 190.39 y 125.35 g, donde el cultivar ‘Jumbo azul’ fue el de mayor peso, mientras que el cultivar ‘Ficus energy’ fue el de menor peso. El peso seco de los frutos fue de 33.24 a 18.73 g, el cultivar ‘Jumbo azul’ fue el de mayor peso y el cultivar ‘Roja libertad’ con un peso menor. Sin embargo, en el rendimiento de semillas por fruto se encontró en un rango de 9.62 a 16.13 %, para los cultivares ‘Ficus energy’ e ‘India bonita’, respectivamente (Cuadro 1). Los cultivares analizados presentaron mayor rendimiento de semillas respecto a los valores reportados por Cerezal y Duarte (2005); 6.30 % del peso seco y 15.50 % de la pulpa.

La pérdida de humedad de las semillas se obtuvo en los primeros 500 minutos, después del tiempo la curva se mantiene constante en cada todos los cultivares analizados (Figura 1).

Cultivar	Peso por fruto (g)	Peso fruto seco (g)	Rendimiento de semillas (%)
Jumbo azul	190.39	33.24	12.28
Roja libertad	145.51	18.73	14.90
India bonita	115.02	19.34	16.13
Everest	153.16	26.08	13.07
Ficus energy	125.35	21.41	9.62

Cuadro 1. Rendimiento peso seco en fruto y semillas.

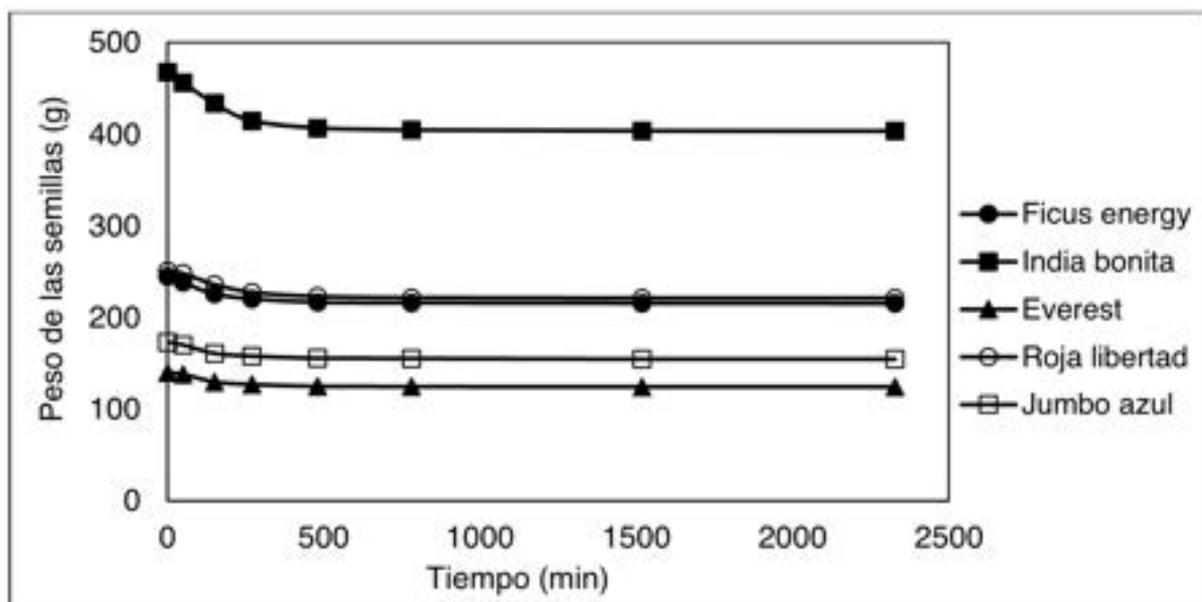


Figura 1: Curva de secado de semillas de cinco cultivares de tuna (*Opuntia* spp.) a 60 °C.

Cultivar	Largo (mm)	Ancho (mm)	Grosor (mm)
India bonita	4.43 ± 0.33 ^{ab*}	4.05 ± 0.31 ^a	1.16 ± 0.12 ^b
Ficus energy	4.1 ± 0.40 ^b	3.5 ± 0.35 ^{bc}	2.0 ± 0.39 ^a
Jumbo azul	3.4 ± 0.30 ^c	3.2 ± 0.22 ^c	1.7 ± 0.13 ^b
Everest	4.2 ± 0.43 ^b	3.6 ± 0.29 ^b	1.8 ± 0.17 ^{ab}
Roja libertad	4.6 ± 0.30 ^a	3.9 ± 0.27 ^a	2.0 ± 0.24 ^a
Promedio	4.15	3.65	1.73

Cuadro 2. Dimensiones de las semillas de cinco cultivares de tuna (*Opuntia* spp.).

Las semillas de tuna contienen gran cantidad de humedad al ser extraídas (Nassa, 2008; Chougui *et al.*, 2013). En consecuencia, al secar un material orgánico permite el manejo adecuado para la transformación y/o procesos industriales (Rössel-Kipping *et al.*, 2012).

Las dimensiones promedio de las semillas de tuna de los cultivares estudiados fueron 4.15 mm de largo, 3.65 mm de ancho y 1.73 mm de grosor. De acuerdo con el análisis de varianza, las dimensiones de las semillas de los cinco cultivares presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$), destacando el cultivar 'Roja libertad' (4.60 mm de largo, 3.90 mm de ancho y 2.00 mm grosor). En contraste, las semillas del 'Jumbo azul' presentaron un tamaño de 3.40 mm de largo, 3.20 mm de ancho y 1.70 mm de grosor (Cuadro 2).

Las dimensiones encontradas en el presente estudio coinciden con los valores reportados por Reyes-Agüero *et al.*, (2005), quienes sugieren que el ancho promedio de las semillas de tuna es de 3.40 mm y 4.00 mm de largo. Estas dimensiones cobran relevancia para los procesos de almacenamiento mediante tolvas u otros procesos agroindustriales, ya que sería posible evitar las pérdidas de material o energía mediante el establecimiento de parámetros homogéneos en la maquinaria utilizada Rössel-Kipping *et al.*, 2013.

Se encontró diferencia estadística en la fricción interna de las semillas de los cinco cultivares evaluados ($p < 0.05$), donde las semillas del cultivar 'Everets' presentaron mayor coeficiente de fricción interna con una oscilación de 0.94 a 0.80 μ_i . Sin embargo, en el caso de la harina de las semillas no se encontró diferencia estadística en el coeficiente de fricción interna ($p > 0.05$), con variaciones de 0.76 a 0.72 μ_i (Cuadro 3).

El coeficiente de fricción interna está determinado por el tamaño y la forma de las partículas (Teunou *et al.*, 1999). De acuerdo

con Herle y Gudehus (1999) al rodar las partículas en el proceso de formación de pila, los granos grandes tienden a superar esfuerzos más altos. La fricción interna de harina de semillas de tuna es similar a la del almidón de papa 0.74 μ_i (Peleg *et al.*, 1973), pero mayores a la harina de garbanzo la cual es de 0.68 μ_i (Emami y Tabil, 2008).

De acuerdo con el análisis de varianza ($p < 0.05$), las harinas de las semillas de los cinco cultivares de tuna presentaron mayor coeficiente de fricción externa sobre la placa de madera, con valores entre 0.97 y 0.82. En contraste, el menor coeficiente de fricción externa se encontró sobre la placa de vidrio, el cual osciló de 0.72 a 0.57 / μ_e / (Cuadro 4). La fricción externa de harina de semilla de tuna en aluminio es similar a la reportada para harina de mijo de huerta sobre este material ($f = 34.99$) (Subramanian y Viswanathan, 2007), sin embargo, estos valores son dependientes de la humedad y del estado del material biológico (Singh y Goswami, 1996).

La mayor retención de partículas se concentró en las mallas de 0.59 y 0.45 mm; en la malla 0.59 más del 60 % de la harina de las semillas de los cultivares 'Roja libertad', 'India bonita' y 'Everest' fue retenido, mientras que la harina de los cultivares 'Jumbo azul' y 'Ficus energy' presentaron una retención mayor al 55 % en la malla 0.45 (Figura 2).

De acuerdo con el análisis del tamizado, en el tamiz # 30 (0.59 mm) se observó una mayor fracción retenida, la norma NMX-F-007-1982 establece que la granulometría de partículas para harina de panificación es 10 % de retención en tamiz #120, es decir el 90 % de las partículas deben pasar por este tamiz para cumplir con la norma, por lo tanto, la granulometría de la harina de semillas de tuna no cumplió con este estándar.

Por otro lado, la norma AOAC 965.22 para harina de maíz sin germen establece que el 95

Cultivar	Semillas (μ_s)	Harina (μ_f)
Everest	0.94 ^{a*}	0.72
Roja libertad	0.85 ^b	0.74
Ficus energy	0.84 ^b	0.73
Jumbo azul	0.82 ^b	0.76
India bonita	0.80 ^b	0.72

Cuadro 3. Fricción interna de las semillas y harinas de tuna (*Opuntia sp.*).

Material	Coeficiente de fricción externa μ_e				
	Jumbo azul	Roja libertad	India bonita	Everest	Ficus energy
Madera	0.87±0.04 ^{a*}	0.92±0.05 ^a	0.82±0.04 ^a	0.97±0.04 ^a	0.92±0.06 ^a
Plástico	0.87±0.04 ^a	0.87±0.06 ^a	0.83±0.05 ^a	0.89±0.05 ^b	0.79±0.04 ^b
Cerámica	0.67±0.04 ^c	0.78±0.03 ^b	0.68±0.05 ^c	0.82±0.07 ^c	0.56±0.02 ^d
Aluminio	0.72±0.03 ^b	0.73±0.02 ^{bc}	0.72±0.07 ^b	0.71±0.04 ^d	0.61±0.06 ^{cd}
Vidrio	0.67±0.04 ^{bc}	0.69±0.04 ^c	0.57±0.06 ^d	0.72±0.06 ^d	0.62±0.04 ^c

Cuadro 4. Coeficiente de Fricción externa de harina de semillas de cinco cultivares de tuna (*Opuntia sp.*) en diferente material.

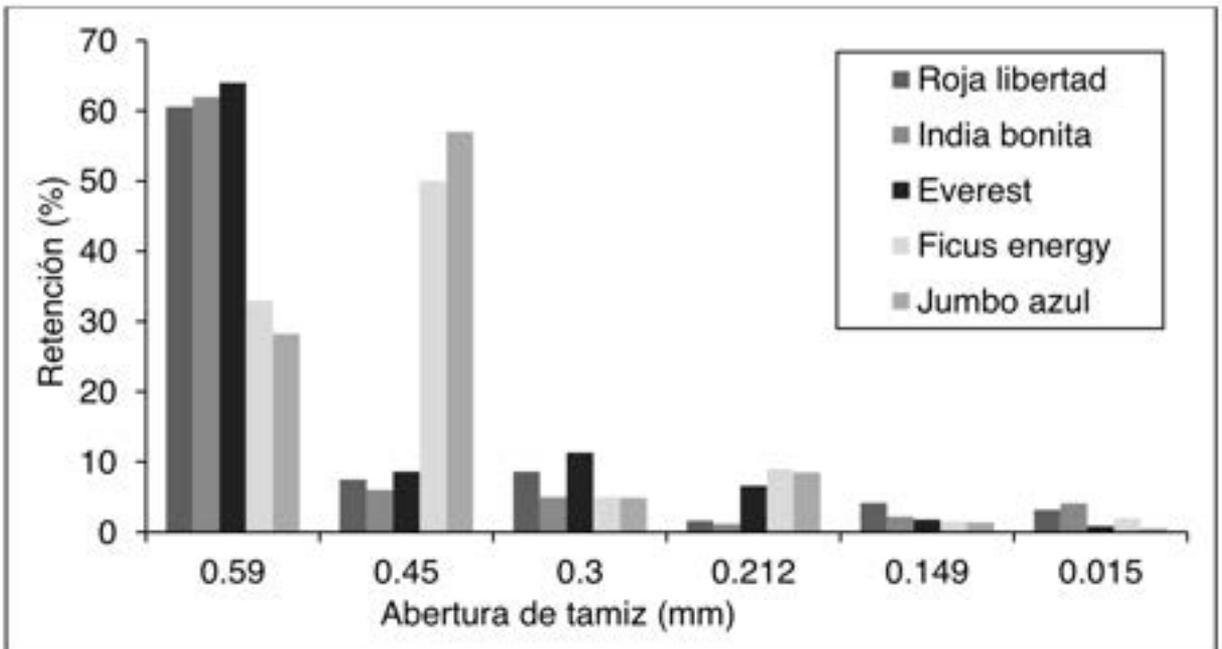


Figura 2: Distribución de las partículas de harina de semillas de tuna obtenidas en el tamizado.

% o más deberá pasar por un tamiz de 0.85 mm, 45 % o más deberá pasar por un tamiz de 0.71 mm y 25 % o menos deberá pasar por un tamiz de 0.210 mm, considerando la granulometría obtenida de las harinas de las semillas de tuna, éstas pueden ser utilizadas para procesos similares a la harina de maíz sin germen. Por lo tanto, las harinas con partículas gruesas retenidas en tamiz de 0.59, 0.42 y 0.300 mm son aptas para elaborar productos crujientes.

Las propiedades geométricas de las partículas de harina de semillas de tuna no fueron homogéneas en cada tamiz (Cuadro 5). Rössel-Kipping (2015) señalan que la heterogeneidad de las partículas es causada por el esfuerzo que sufren las semillas al rompimiento durante la molienda. Las partículas de las harinas estudiadas

presentaron características de un polígono irregular (Figura 3), por lo que no pueden ser evaluadas únicamente con base en el diámetro de tamiz, ya que la diferencia de formas genera errores en las mediciones con respecto a las partículas retenidas en los tamices (McGuire *et al.*, 2022).

El contenido de calcio (Ca) de las semillas de los cultivares de tuna estudiados osciló entre 4.80 y 11.56 mg g⁻¹. Respecto al hierro (Fe) éste se encontró entre 4 y 40 mg g⁻¹. La concentración de magnesio (Mg) fue de 43 a 55.75 mg g⁻¹. Los niveles de sodio (Na) encontrados en las variedades de semillas de tuna fue de 12.32 a 17 mg g⁻¹, el fósforo (P) de 69.17 a 110.67 mg g⁻¹, para el potasio (K) 96 a 145 mg g⁻¹, manganeso (Mn) 2.17 a 5 mg g⁻¹, zinc (Zn) 1.5 a 2 mg g⁻¹ y cobre (Cu) 0.53 a 1.38 mg g⁻¹.

Cultivar	Propiedad	Abertura de tamiz (mm)					
		0.59	0.42	0.300	0.212	0.149	0.015
Everest	Ancho (mm)	1.384	0.464	0.412	0.197	0.227	0.085
	Largo (mm)	1.951	0.805	0.513	0.295	0.311	0.188
	Área (mm ²)	2.136	0.253	0.161	0.055	0.047	0.013
	Perímetro (mm)	5.636	2.067	1.539	0.926	0.893	0.482
Ficus energy	Ancho (mm)	0.844	0.563	0.572	0.291	0.341	0.284
	Largo (mm)	1.008	1.485	0.737	0.312	0.383	0.314
	Área (mm ²)	0.882	0.818	0.442	0.086	0.001	0.058
	Perímetro (mm)	3.957	3.891	3.478	1.151	0.341	0.996
India bonita	Ancho (mm)	1.176	0.447	0.595	0.49	0.415	0.244
	Largo (mm)	1.947	1.404	0.542	0.553	0.63	0.364
	Área (mm ²)	1.982	0.6	0.254	0.17	0.191	0.079
	Perímetro (mm)	5.915	3.608	1.987	1.831	2.26	1.161
Jumbo azul	Ancho (mm)	1.564	0.563	0.406	0.25	0.287	0.176
	Largo (mm)	2.587	0.831	0.467	0.536	0.315	0.195
	Área (mm ²)	2.038	0.417	0.217	0.038	0.061	0.006
	Perímetro (mm)	6.088	2.69	2.026	0.827	0.93	0.32
Roja libertad	Ancho (mm)	0.998	0.555	0.404	0.114	0.291	0.067
	Largo (mm)	2.512	0.986	0.587	0.323	0.299	0.114
	Área (mm ²)	2.038	0.417	0.217	0.038	0.061	0.006
	Perímetro (mm)	6.088	2.69	2.026	0.827	0.93	0.32

Cuadro 5. Propiedades geométricas de las partículas de harina de semillas de tuna (*Opuntia sp.*).

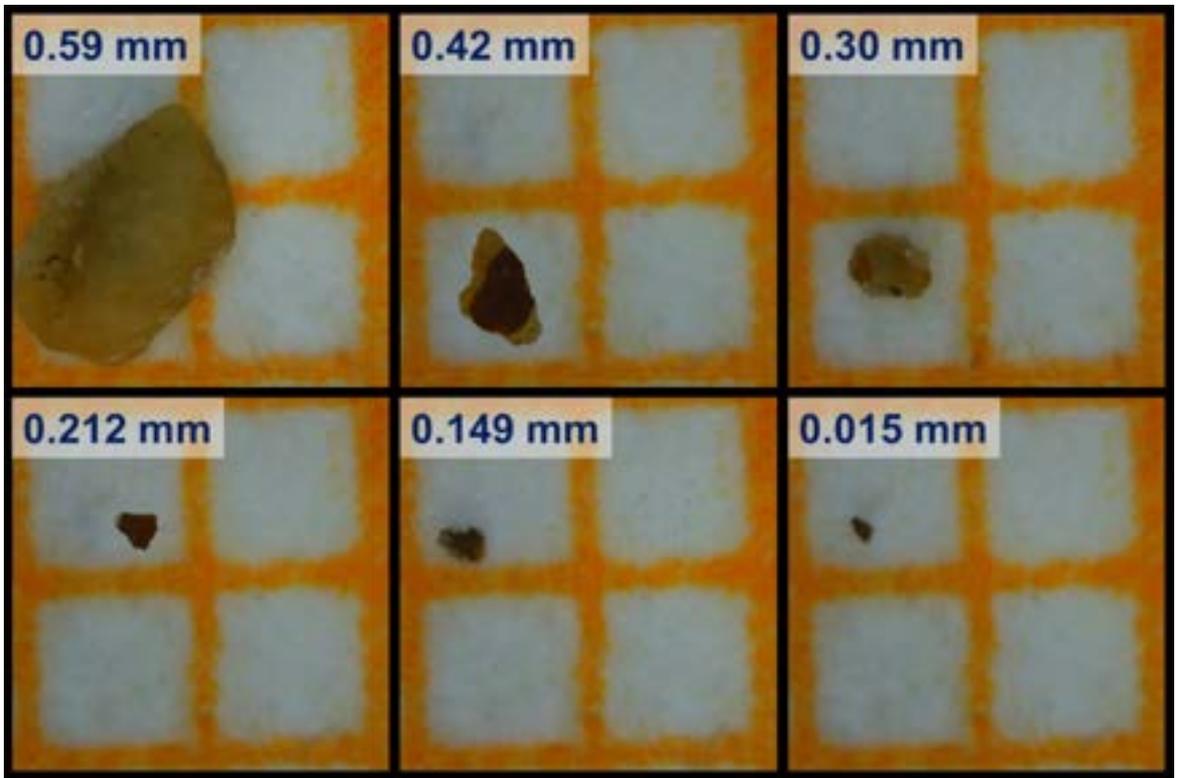


Figura 3: Microfotografía de partículas de harina de semillas de tuna 'Everest' en diferente abertura de tamiz.

Cultivar	Minerales (mg/g)								
	Ca	Fe	Mg	Na	P	K	Mn	Zn	Cu
Roja libertad	11.56	8.00	55.75	17.00	110.67	139.21	3.00	1.50	1.38
Jumbo azul	4.80	4.00	54.00	12.32	99.00	137.00	5.00	2.00	0.53
India bonita	10.85	30.00	45.18	16.00	88.00	145.00	2.24	1.60	1.00
Ficus energy	10.98	40.63	53.17	14.00	103.40	105.00	2.17	1.50	0.81
Everest	11.40	13.00	43.00	15.25	69.17	96.00	3.00	1.50	1.25

Cuadro 6. Minerales de las semillas de cinco cultivares de tuna (*Opuntia spp.*).

Las semillas de tuna tienen mayor concentración de Ca, P, Fe y Mn en comparación con el fruto completo, donde el contenido de P es de 20.82 a 23.62 mg/100 g, y Ca de 34.09 a 39.59 mg/100 g (Paucara-Candori y Castillo-Gutiérrez, 2021). Al-Juhaimi y Özcan (2013) encontraron que las semillas de tuna son ricas en Calcio, potasio, Magnesio y fósforo, lo que coincide con los resultados de esta investigación.

Las semillas de tuna son aptas para la extracción de minerales para el uso en diversos productos agroindustriales, ejemplo de ello son las harinas comerciales fortificadas con elementos como el hierro, fósforo, calcio, zinc entre otros (Muzzo, 2004), debido a que la adición o fortificación con minerales es una estrategia para prevenir enfermedades (Serpa *et al.*, 2016).

De acuerdo con la tabla nutricional suiza, el grano entero de trigo debe aportar 0.97 mg/100 g de Mn, 340 mg/100 g de P, 33 mg/100 g Ca y 2.6 mg/100 g Zinc, en este sentido la harina de semillas de tuna tiene

un aporte menor. Sin embargo, los minerales de las semillas de tuna pueden orientarse a la fortificación de productos sintéticos o semi-sintéticos mediante la sustitución de algunos elementos, como el Fe en las harinas de trigo o el Ca en harinas de maíz nixtamalizado.

CONCLUSIONES

Las características físicas y el contenido de minerales en las harinas de semillas de tuna, son aptas para los procesos de transformación, almacenamiento, dosificación y selección. Por lo que, a través de los datos obtenidos en cada análisis, las harinas tienen potencial para la fortificación de alimentos y la transformación agroindustrial como biomaterial, alimento funcional, sintético o semi-sintético.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por el apoyo brindado, así mismo al Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí y Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

REFERENCIAS

- Álvarez-Castillo, M. de J., Rössel Kipping, E. D., López-Martínez, L. A., Ortiz-Laurel, H. y Amante-Orozco, A. (2021). **Potential of the physical and chemical characteristics of prickly pear (*Opuntia albicarpa* Scheinvar var. Villanueva) seeds in agroindustrial processes.** *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i10.1834>
- Arce-Quesada, S. (2019). **La innovación agroindustrial: Componentes, tendencias y acciones.** *E-Agronegocios*, 6(1), 25-37. <https://doi.org/10.18845/rea.v6i1.4938>
- Al-Juhaimi, F. y Özcan, M. M. (2013). **Determination of some mineral contents of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) seed flours.** *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(5), 3659-3663. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2817-4>
- Carranza A.C. y Carrillo I.M.L. (2017). **Perfil nutrimental de diferentes tejidos y frutos de la palma chamal (*Dioon edule*).** *Acta Universitaria*, 27(2), 3-9. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1208>
- Cerezal, P. y Duarte G. (2005). **Some characteristics of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.) harvested in the Andean altiplane of region 2 of Chile.** *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 7(1), 34-60. Recuperado de: <https://jpacd.net/jpacd/article/view/286>
- Chougui, N., Tamendjari, A., Hamidj, W., Hallal, S., Barras, A., Richard, T. y Larbat, R. (2013). **Oil composition and characterisation of phenolic compounds of *Opuntia ficus-indica* seeds.** *Food Chemistry*. 139(1): 796-803. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.054>
- Cortés-Gómez, A., San Martín-Martínez, E., Martínez-Bustos, F., & Vázquez-Carrillo, G. M. (2005). **Tortillas of Blue Maize (*Zea mays* L.) Prepared by a Fractionated Process of Nixtamalization: Analysis Using Response Surface Methodology.** *Journal of Food Engineering*. 66(1):273-281. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.03.018>

- Emami, S. y Tabil, T. G. (2008). **Friction and compression characteristics of chickpean flour and components**. *Power Tecnology*, 182(1), 119-126. <https://doi.org/10.1016/J.powtec.2006.12.021>
- Ettalibi, F., Elmahdaoui H., Amzil J., Gadhi C. & Harrak H. (2020). **Drying impact on physicochemical and biochemical criteria of prickly pear fruit peels of three varieties of *Opuntia* spp.** *Materials Today: Proceedings* 27 (2020): 3243–3248.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2020). México en una mirada. Disponible en <https://www.fao.org/mexico/fao-en-mexico/mexico-en-una-mirada/es/> (Fecha de consulta: 15-03-2022).
- Fernández, T. M., da Silva, J. A., Andrade da Silva, A. H., de Oliveira Cavalheiro, J. M., y da Conceicao, M. L. (2013). **Flour production from shrimp by-products and sensory evaluation of flour-based products**. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*. 48(8):962-967. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000800022>
- González-Sánchez, M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., & Yañez-Ocampo, G. (2015). **Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia**. *Revista Argentina de Microbiología*. 47(1):229–235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- Hassini, L., Bettaieb E., Desmorieux H., Sandoval Torres S. y Touil A. (2015). **Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear sedes**. *Industrial Crops and Products*. 67 (2015): 457–465.
- Herle, I. y Gudehus, G. (1999). **Determination the parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies**. *Mechanics of cohesive-Frictional Materials*, 4(1): 61–486. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199909\)4:5%3C461::AID-CFM71%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199909)4:5%3C461::AID-CFM71%3E3.0.CO;2-P)
- Igathinathane, C., Pordesimo L.O. & Batchelor W.D. (2009). **Major orthogonal dimensions measurement of food grains by machine vision using ImageJ**. *Food Research International* 42 (2009): 76–84.
- Kastenmayer, P. (1997). **Análisis de minerales y elementos traza en alimentos**. En Producción y manejo de datos de composición química de alimentos en nutrición (1.ª ed., p. Capítulo 20). Saturnino de Pablo, Santiago Chile: FAO. Recuperado de <https://www.fao.org/3/ah833s/AH833S00.html>
- León, A. E., Rosell, C. M., Gómez Pallarés, M., Brites, C., Haros, M., Trigo, M. J., Pedroza Islas, R., Pérez Sira, E. E., Gularte, M. A., Igrejas, G., Collar, C., Repo-Carrasco, R., Cortez, G., Onofre Montes, R., Quispe Villalpando, L., Ramos Calderón, I., Puppo, M. C., Gularte, M. A., Pérez, G. T., y Benedito Mengod, C. (2007). **De tales harinas, tales panes. Granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica**. *ISEKI-Food*. <https://digital.csic.es/handle/10261/17118>
- Leyva-López, N., Lizarraga-Velázquez, C. E., Hernández, C. y Sánchez-Gutiérrez, E. Y. (2020). **Exploitation of Agro-Industrial Waste as Potential Source of Bioactive Compounds for Aquaculture**. *Foods*, 9(7):843. <https://doi.org/10.3390/foods9070843>
- Mcguire, C., Siliveru, K., Ambrose, K., y Alavi, S. (2022). **Food Powder Flow in Extrusion: Role of Particle Size and Composition**. *Processes*, 10(1):178. <https://doi.org/10.3390/pr10010178>
- Muzzo. B. (2004). **Fortificación de harina de trigo en América Latina y Región del Caribe**. *Revista Chilena de Nutrición*, 31(3):336-347. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182004000300009>
- Nasrin, T. A. A. y Matin, M. A. (2017). **Valorization of vegetable wastes. In Food Processing By-Products and Their Utilization**; Anal, A.K., Ed.; John Wiley & Sons Ltd.: Hoboken, NJ, USA; pp. 53–88. <https://doi.org/10.1002/9781118432921.ch4>
- Nassar, A.G. (2008). **Chemical composition and functional properties of prickly pear (*Opuntia ficus indica*) seeds flour and protein concentrate**. *World Journal Dairy Food Science*, 3(1):11–16. Recuperado de: [https://www.idosi.org/wjdfs/wjdfs3\(1\)/2.pdf](https://www.idosi.org/wjdfs/wjdfs3(1)/2.pdf)
- Nogueira, R.S., Sales, J. A., Pereira, V. S., Castelo-Branco, D. de S. C. M., Cordeiro, R. de A., de Souza Sampaio, C. M., de Araújo Neto Paiva, M., Santos, J. B. F. dos, Sidrim, J. J. C., y Rocha, M. F. G. (2017). **Research advances on the multiple uses of Moringa oleifera: A sustainable alternative for socially neglected population**. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 10(7), 621–630. <https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2017.07.002>
- Paucara-Candori, C.M., & Castillo-Gutiérrez, C. M. (2021). **Caracterización física y química de la tuna (*Opuntia ficus indica*) en el municipio de Luribay, La Paz – Bolivia**. *Revista Estudiantil AGRO-VET*, 5(1):5-12. Recuperado de: <http://agv.agro.umsa.bo/index.php/AGV/article/view/45>

- Peleg, M., Mannheim, C. H., & Passy N. (1973). **Flow properties of some food powders.** *Journal of Food Science*, 38 (6): 959–964. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1973.tb02124.x>
- Ramadan, M.F y Mörsel, J. F. (2003). **Oil cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.).** *Food Chemistry* 82 (2003) 339–345.
- Reyes-Agüero, J. A., Rivera, J. R. y Flores, J. L. (2005). **Variación morfológica de “Opuntia” (“Cactaceae”) en relación con su domesticación en la altiplanicie meridional de México.** *Interiencia*, 30(1), 476-484. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33910706>
- Rössel-Kipping, E. D. Ortiz-Laurel, H., Méndez-Gallegos, S. y Amante-Orozco, A. (2012). **Fundamentos del secado solar de productos vegetales teoría cum praxi.** Colegio de postgraduados. México. 143 p.
- Rössel-Kipping, E. D. Ortiz Laurel, H. y Talavera Magaña D. (2013). **Logística rural: transporte, transborde, almacenamiento.** Colegio de postgraduados. México. 188 p.
- Rössel-Kipping, E. D., Durán García. H.M., & Ortiz Laurel, H. (2015). *Técnicas de procesos agrícolas I: sistema del procesamiento de corte reducción de tamaños.* Colegio de postgraduados. México. 261 p.
- Rössel-Kipping, E. D., Ortiz Laurel, H., & Durán García. H. M. (2016). **Técnicas de procesos agrícolas II: dosificar, mezclar, cribar.** Colegio de postgraduados. México. 291 p.
- Serpa G., A. M., Vélez Acosta, L. M., Barajas Gamboa, J. A., Castro Herazo, C. I. y Zuluaga Gallego, R. (2016). **Compuestos de hierro para la fortificación de alimentos: El desarrollo de una estrategia nutricional indispensable para países en vía de desarrollo. – Una revisión.** *Acta Agronómica*, 65(4), 340-353. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n4.50327>
- SIAP (Sistema de información agroalimentaria y pesquera). (2022). Cierres de producción agrícola. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Fecha de consulta: 25-04-2022).
- Singh, K. K. y Goswami, T. K. (1996). **Physical Properties of Cumin Seed.** *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64(1), 93 – 98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.09.026>
- Subramanian, S. y Viswanathan R. (2007). **Bulk density and friction coefficients of selected minor millet grains and flours.** *Journal of food Engineering*, 81(1), 118-126. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.09.026>
- Teunou, E., Fitzpatrick, J. y Synnott, E. C. (1999). **Characterisation of food powder flowability.** *Journal of Food Engineering*, 39(1), 31-37. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00140-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00140-X)
- Velázquez-Zavala, M., Peón-Escalante, I. E., Zepeda-Bautista, R., Jiménez-Arellanes, M. A. (2016). **Moringa (*Moringa oleifera* Lam.): Potential uses in agriculture, industry and medicine.** *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 22(2), 95-116. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.07.018>