



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

MAESTRÍA EN CIENCIA DE LOS ALIMENTOS

TESIS

**EFFECTO DEL PROCESAMIENTO POR EXTRUSIÓN SOBRE LAS  
PROPIEDADES ALIMENTARIAS DE POLVOS DE CLADODIOS  
MADUROS DE DOS ESPECIES DE NOPAL  
(*Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica*)**

**Para obtener el grado de  
Maestra en Ciencia de los Alimentos**

**PRESENTA**

I.AI. Denhy Jaquelinee Pérez Viveros

**Director**

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

**Codirector**

Dr. Luis Díaz Batalla

**Comité tutorial**

Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez

Dra. Heidi María Palma Rodríguez

Tulancingo de Bravo Hgo., México., septiembre 2023.



COORDINACION DE INVESTIGACION Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencia de los Alimentos  
Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: "*Efecto del procesamiento por extrusión sobre las propiedades alimentarias de polvos de cladodios maduros de dos especies de nopal (Opuntia cochenillifera Karst. y Opuntia ficus-indica)*", que desarrolla el estudiante Denhy Jaquelinee Pérez Viveros

Asistentes:

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

Dr. Luis Díaz Batalla

Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez

Dra. Heidi María Palma Rodríguez

Observaciones:

A. Revisión de Trabajo de Tesis

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por la estudiante, comunicando a la estudiante, Denhy Jaquelinee Pérez Viveros, oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. La estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que la estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 25 de septiembre de 2023

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

Dr. Luis Díaz Batalla

Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez

Dra. Heidi María Palma Rodríguez



El presente trabajo se realizó en los laboratorios de análisis especiales y microbiología del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; en el laboratorio de análisis especiales del área académica de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, bajo la dirección del Dr. Juan Pablo Hernández Uribe y el Dr. Luis Díaz Batalla. El proyecto fue apoyado por el Programa Nacional de Becas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CVU 1149247).

## **Dedicatoria**

El desarrollo y realización de esta tesis la puedo catalogar con toda seguridad, como una de las etapas más retadoras de mi vida, debido a que en muchos momentos se presentaron situaciones complejas, momentos agradables y muchos otros difíciles, es por ello que quiero dedicar este trabajo con mucho amor y gratitud:

A mis abuelitos Martha y Sotero que fueron las personas después de mis papás que más me han enseñado, gracias por todo el amor que me dieron y por siempre impulsarme a seguir adelante, los quiero mucho y los extraño.

A mi papá, por compartir y aprender de cada momento compartido, porque las conversaciones se volvieron anécdotas, los errores en enseñanzas, las vivencias en recuerdos, aunque el camino se volvió difícil, mi papá siempre encontró la manera de ayudarme y demostrarme su amor y apoyo en cada momento, por estar presente de diversas maneras en todos los momentos, por eso dedico a él esta tesis; la dedico como un acto de reconocimiento y amor por su esfuerzo y compromiso en mi vida y mis metas, por enseñarme que entre almas no existen distancias y que siempre estaremos conectados.

A mi mamá y mi hermana, por todo el apoyo que me han brindado, por su amor incondicional, lucha, dedicación y esfuerzo, por siempre alentarme a ir más allá y apoyarme en lograr las metas que me proponga. Gracias por todas las enseñanzas, por estar conmigo en cada paso que he dado y por ser esa mano que me ha levantado de muchas caídas. Gracias por ser el motor que me permite seguir día a día. Gracias por ser mis pilares de vida.

¡Este triunfo es de ustedes, los amo eternamente!

## **Agradecimientos**

A través de estas líneas quiero expresar mi más sincero agradecimiento a cada una de las personas que con su soporte científico y humano colaboraron en la realización de este trabajo.

En primer lugar, a mi director de tesis el Doctor Juan Pablo Hernández Uribe por su orientación, respaldo, comprensión, dedicación, solidaridad y empatía brindada, lo que me permitió tener un gran aprovechamiento durante esta etapa. Gracias por la confianza brindada, por su apoyo y entusiasmo que en todo momento me impulsaron a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles, sin su guía esta investigación no habría sido posible.

A mi codirector de tesis, el Doctor Luis Díaz Batalla por su inestimable respaldo, apoyo, dedicación, constancia y paciencia durante todo este proceso, por sus palabras de aliento cuando más las necesite las cuales me motivaron a perseverar y a nunca darme por vencida, por estar siempre ahí cuando las horas de trabajo se hacían confusas. Gracias por ser mi guía excepcional y mentor en esta grata experiencia profesional, por estar ahí de manera incondicional en los momentos buenos y malos que lo he necesitado.

Mi sincero agradecimiento al Doctor Ricardo Omar Navarro Cortez, la Doctora Heidi María Palma Rodríguez y el Doctor Apolonio Vargas Torres, por su tiempo, conocimientos, dirección, enseñanza apoyo y colaboración brindada en el desarrollo de este trabajo, además de permitirme trabajar en un ambiente cálido y alegre,

Así mismo, al Instituto de Ciencias Agropecuarias y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por brindarme la oportunidad de realizar los estudios de maestría y permitirme continuar con mi formación profesional.

Y, por último, gracias a mi Alma Mater, la Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, por el acceso a las instalaciones y equipos para llevar a cabo un proyecto que hoy se ve concretado.

A todos y cada uno de ustedes.... ¡Mil gracias!

# Contenido

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>1</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>2</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>3</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>8</b>
2.1 Alimentación y salud en el mundo y en México .....	8
2.1.1 Dieta saludable sostenible .....	10
2.2 Alimentos funcionales .....	11
2.2.1 Compuestos antioxidantes en los alimentos .....	14
2.2.1.1 Fuentes de antioxidantes .....	17
2.2.2 Fibra dietética en los alimentos .....	19
2.2.2.1 Fibra dietética soluble .....	20
2.2.2.1.1 Efectos fisiológicos de la FDS .....	20
2.2.2.1.2 Componentes de la FDS .....	22
2.2.2.2 Fibra dietética insoluble .....	25
2.2.2.2.1 Efectos fisiológicos de la FDI .....	26
2.2.2.2.2 Componentes de la FDI .....	27
2.2.3 Tipos de procesamientos que modifican el contenido de fibra dietética .....	28
2.2.3.1 Tratamientos físicos .....	28
2.2.3.2 Tratamientos químicos .....	29
2.2.3.3 Tratamientos biológicos .....	29
2.2.3.4 Tratamientos térmicos .....	30
2.2.3.4.1 Extrusión como proceso térmico y su efecto sobre la fibra dietética .....	30
2.3 Alimentos funcionales ricos en fibra y antioxidantes .....	34
2.3.1 El nopal .....	35
2.3.2 Usos del nopal .....	36

2.3.3 El nopal como fuente de compuestos bioactivos .....	37
2.3.3.1 Propiedades nutraceuticas y efectos biologicos del nopal.....	39
<b>CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>42</b>
<b>CAPÍTULO 4. OBJETIVOS .....</b>	<b>43</b>
4.1 Objetivo general.....	43
4.2 Objetivos especificos .....	43
<b>CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>44</b>
5.1 Obtención de polvos de nopal.....	44
5.2 Extrusión de polvos de nopal .....	45
5.3 Análisis químico proximal.....	47
5.4 Fibra dietética .....	47
5.5 Análisis fisicoquímico .....	47
5.5.1 pH.....	47
5.5.2 Densidad aparente .....	47
5.5.3 Capacidad de absorción de aceite .....	47
5.5.4 Capacidad de absorción de agua .....	48
5.5.5 Índice de solubilidad en agua.....	48
5.5.6 Sólidos solubles totales .....	48
5.5.7 Color.....	48
5.5.8 Viscosidad .....	49
5.6 Extracción de compuestos bioactivos .....	49
5.6.1 Preparación de extractos .....	49
5.6.2 Cuantificación de fenoles totales .....	49
5.6.3 Cuantificación de flavonoides totales .....	49
5.6.4 Captación de radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH).....	50
5.7 Cuantificación de clorofila total.....	50
5.8 Análisis estadístico .....	50
<b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>51</b>
6.1 Evaluación de las propiedades alimentarias de los polvos crudos de nopal.	51
6.1.1 Rendimiento de obtención de los polvos.....	51
6.1.2 Caracterización químico proximal de polvos de nopal .....	52

6.1.3 Caracterización de fibra dietética de polvos de nopal .....	54
6.1.4 Caracterización fisicoquímica de polvos de nopal.....	54
6.1.5 Caracterización fitoquímica de polvos de nopal .....	59
6.2 Evaluación de las propiedades alimentarias de los polvos extruidos de nopal .....	62
6.2.1 Caracterización de fibra cruda y dietética de polvos extruidos de nopal	62
6.2.2 Caracterización fisicoquímica de polvos de nopal.....	66
6.2.3 Propiedades fitoquímicas de polvos de nopal .....	78
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>82</b>
<b>CAPÍTULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tipos de alimentos funcionales.....	12
<b>Tabla 2.</b> Fuentes de antioxidantes.....	17
<b>Tabla 3.</b> Modificación de FD por procesamiento por extrusión .....	32
<b>Tabla 4.</b> Efectos de los procesamientos de modificación de solubilidad en FD.....	34
<b>Tabla 5.</b> Composición nutricional por cada 100 g de porción de cladodios .....	37
<b>Tabla 6.</b> Tratamientos resultantes del diseño experimental .....	46
<b>Tabla 7.</b> Composición químico proximal de polvos crudos de nopal .....	52
<b>Tabla 8.</b> Composición de fibra dietética de polvos crudos de nopal.....	54
<b>Tabla 9.</b> Características fisicoquímicas de polvos crudos de nopal .....	55
<b>Tabla 10.</b> Propiedades fitoquímicas de polvos crudos de nopal .....	60
<b>Tabla 11.</b> Composición de fibra cruda y dietética de polvos extruidos de nopal.....	62
<b>Tabla 12.</b> Características fisicoquímicas de los polvos extruidos de nopal .....	67
<b>Tabla 13.</b> Características fisicoquímicas de polvos extruidos de nopal.....	72
<b>Tabla 14.</b> Caracterización de viscosidad de polvos extruidos de nopal .....	77
<b>Tabla 15.</b> Propiedades fitoquímicas de polvos extruidos de nopal.....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Consumo recomendado de alimentos .....	9
<b>Figura 2.</b> Enfermedades generadas por estrés oxidativo .....	15
<b>Figura 3.</b> Clasificaciones de antioxidantes .....	16
<b>Figura 4.</b> Efectos fisiológicos de la fibra dietética soluble .....	21
<b>Figura 5.</b> Efectos fisiológicos de la fibra dietética insoluble .....	26
<b>Figura 6.</b> Diagrama general de la metodología.....	44
<b>Figura 7.</b> Representación esquemática de las zonas de barril de un extrusor .....	46
<b>Figura 8.</b> Rendimiento de obtención de polvos crudos en nopal .....	51
<b>Figura 9.</b> Viscosidad de polvos crudos de nopal .....	59
<b>Figura 10.</b> Extruidos de <i>Opuntia cochenillifera</i> Karst. y <i>Opuntia ficus-indica</i> .....	70
<b>Figura 11.</b> Viscosidad de polvos extruidos .....	77

## ABREVIATURAS

AGCC	Ácidos Grasos de Cadena Corta
ANOVA	Análisis de varianza
CAA	Capacidad de Absorción de Agua
CAAc	Capacidad de Absorción de Aceite
CCR	Cáncer Colorrectal
cps	Centipoise
D.E.	Desviación Estándar
EAG	Equivalente de Ácido Ascórbico
Ec	Ecuación
EII	Enfermedad Inflamatoria Intestinal
ELN	Extracto Libre de Nitrógeno
ENT	Enfermedades No Transmisibles
EQ	Equivalentes
FAO	Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FD	Fibra Dietética
FDI	Fibra Dietética Insoluble
FDS	Fibra Dietética Soluble
FOS	Fructooligosacáridos
GalA	Ácido Galacturónico
GOS	Galactooligosacáridos
IE	Índice de Expansión
ISA	Índice de Solubilidad en Agua
LDL-C	Lipoproteínas de baja densidad
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
NOM	Norma Oficial Mexicana
QE	Quercetina
rpm	Revoluciones por Minuto
RS	Almidón Resistente
RVA	Visco Analizador Rápido
SII	Síndrome Intestinal

# Efecto del Procesamiento por Extrusión Sobre las Propiedades Alimentarias de Polvos de Cladodios Maduros de Dos Especies de Nopal (*Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica*)

Pérez-Viveros, D.J.<sup>1</sup> Díaz-Batalla, L.<sup>2</sup> Navarro-Cortez, R.O.<sup>1</sup> Palma-Rodríguez, H.M.<sup>1</sup> Hernández-Uribe, J.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Avenida Universidad Km 1 s/n, 43600, Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México.

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, Domicilio Conocido s/n, 42660, Tepatepec, Francisco I. Madero, Hidalgo, México.

## RESUMEN

Las enfermedades no transmisibles (ENT) son la causa de millones de muertes en el mundo en donde la dieta es uno de los principales factores de riesgo [1], es por ello que se han desarrollado patrones alimentarios saludables y sostenibles, en los que se incluye el concepto de alimentos funcionales [2], y en particular el consumo de fibra soluble, de gran interés por sus efectos fisiológicos [3], y cuyo comportamiento puede cambiar durante el procesamiento térmico, como por ejemplo los cambios inducidos durante la cocción por extrusión. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del procesamiento por extrusión sobre las propiedades alimentarias de polvos de cladodios maduros de dos especies de nopal (*Opuntia cochenillifera* Karst. (OC) y *Opuntia ficus-indica* (OF)). Se utilizaron cladodios de más de 70 días en ambas especies, los polvos, se procesaron por extrusión a tres temperaturas (120, 140 y 160 °C) y dos contenidos de humedad (20 y 26%), los polvos crudos y extruidos fueron caracterizadas por métodos químicos, fisicoquímicos, fitoquímicos. Los resultados obtenidos muestran que los polvos crudos de OC tuvieron el mayor contenido de cenizas (29.27%), extracto etéreo (1.28%), fibra dietética insoluble (36.91%), pH (5.15) y capacidad de absorción de aceite (2.75 g/g), en comparación a OF, en relación a los polvos extruidos los tratamientos causaron una disminución en el contenido de fibra cruda, fibra insoluble, capacidad de absorción de aceite y agua, viscosidad y compuestos bioactivos (fenoles, flavonoides, DPPH y clorofila total), por otro lado, se presentó un incremento en el contenido de fibra soluble, fibra dietética total, pH, diferencia total de color y solubilidad en agua, esto debido al efecto de la temperatura y humedad, este comportamiento se atribuye a la ruptura de enlaces glucosídicos y a la reordenación estructural derivado del procesamiento por extrusión. De acuerdo a los resultados obtenidos, OC es una materia prima con gran potencial funcional, para incrementar el consumo de fibra, además de que el procesamiento por extrusión es una tecnología que muestra cambios significativos en las propiedades alimentarias de cladodios maduros de nopal. No obstante, se requieren futuros estudios para la posible generación de alimentos potencialmente funcionales.

*Palabras claves: enfermedades no transmisibles, dietas sustentables sostenibles, alimentos funcionales, fibra, extrusión*

## Referencias:

- [1] *Global Nutrition Report. (2022). The state of global nutrition. Bristol, UK: Development Initiatives.*
- [2] Topolska, K., Florkiewicz, A., & Filipiak-Florkiewicz, A. (2021). *Functional food-consumer motivations and expectations. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(10), 5327.*
- [3] Bader UI Ain, H., Saeed, F., Arshad, M. U., Ahmad, N., Nasir, M. A., Amir, R. M., Kausar, R., & Niaz, B. (2018). *Modification of barley dietary fiber through chemical treatments in combination with thermal treatment to improve its bioactive properties. International Journal of Food Properties, 21(1), 2491-2499.*

# Effect of Extrusion Processing on the Alimentary Properties of Powders from Mature Cladodes of Two Nopal Species (*Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica*)

Pérez-Viveros, D.J.<sup>1</sup> Díaz-Batalla, L.<sup>2</sup> Navarro-Cortez, R.O.<sup>1</sup> Palma-Rodríguez, H.M.<sup>1</sup>  
Hernández-Urbe, J.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Avenida Universidad Km 1 s/n Exhacienda Aquetzalpa, 43600, Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México.

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, Domicilio Conocido s/n, 42660, Tepatepec, Francisco I. Madero, Hidalgo, México.

## ABSTRACT

Non-communicable diseases (NCDs) are the cause of millions of deaths in the world, where diet is one of the main risk factors [1], which is why healthy and sustainable dietary patterns have been developed, including the concept of functional foods [2], and in particular the consumption of soluble fiber, of great interest due to its physiological effects [3], and whose behavior can change during thermal processing, such as the changes induced during extrusion cooking. The objective of the present study was to evaluate the effect of extrusion processing on the dietary properties of mature cladode powders from two cactus species (*Opuntia cochenillifera* Karst. (OC) and *Opuntia ficus-indica* (OF)). Cladodes older than 70 days of both species were used, the powders were processed by extrusion at three temperatures (120, 140 and 160 °C) and two moisture contents (20 and 26%), the raw and extruded powders were characterized by chemical, physicochemical and phytochemical methods. The results obtained show that the raw OC powders had the highest ash content (29.27%), ether extract (1.28%), insoluble dietary fiber (36.91%), pH (5.15) and oil absorption capacity (2.75 g/g), compared to OF, in relation to extruded powders the treatments caused a decrease in crude fiber content, insoluble fiber, oil and water absorption capacity, viscosity and bioactive compounds (phenols, flavonoids, DPPH and total chlorophyll), on the other hand, On the other hand, there was an increase in the content of soluble fiber, total dietary fiber, pH, total color difference and water solubility, due to the effect of temperature and humidity, this behavior is attributed to the rupture of glycosidic bonds and structural rearrangement derived from extrusion processing. According to the results obtained, OC is a raw material with great functional potential to increase fiber consumption, and extrusion processing is a technology that shows significant changes in the dietary properties of mature cactus cladodes. However, future studies are required for the possible generation of potentially functional foods.

*Keywords: non-communicable diseases, sustainable healthy diets, functional foods, fiber, extrusión cooking*

## References:

- [1] *Global Nutrition Report*. (2022). *The state of global nutrition*. Bristol, UK: Development Initiatives.
- [2] Topolska, K., Florkiewicz, A., & Filipiak-Florkiewicz, A. (2021). *Functional food-consumer motivations and expectations*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10), 5327.
- [3] Bader UI Ain, H., Saeed, F., Arshad, M. U., Ahmad, N., Nasir, M. A., Amir, R. M., Kausar, R., & Niaz, B. (2018). *Modification of barley dietary fiber through chemical treatments in combination with thermal treatment to improve its bioactive properties*. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 2491-2499.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Anualmente, las enfermedades no transmisibles (ENT) causan más de 41 millones de las muertes en el mundo y se estima que incrementarán a 52 millones en 2030, estableciéndose como uno de los principales problemas de salud a nivel mundial (OMS, 2022). La mala alimentación es uno de los principales factores de riesgo para la prevalencia y mortalidad de las ENT en el mundo (Branca *et al.*, 2019). Ante esta problemática de salud pública se ha propuesto un patrón dietético denominado dieta saludable sostenible que considera un consumo moderado de proteínas de origen animal, lácteos, sal, azúcar, grasas saturadas, y una mayor ingesta de cereales integrales, legumbres, frutos secos, frutas, verduras y fibra dietética (FAO, 2019; OMS, 2018; BDA, 2022). En este sentido se han descrito alimentos funcionales que coinciden con el patrón alimentario saludable, estos alimentos además de aportar nutrientes y energía, tienen un impacto benéfico a la salud cuando se consumen regularmente como parte de la dieta (FDA, 2020). Los atributos más importantes que los consumidores buscan en los alimentos funcionales son la fortificación con ingredientes como antioxidantes y fibra dietética (Baker *et al.*, 2022; Topolska *et al.*, 2021).

El consumo regular de fibra dietética y antioxidantes se asocia con una menor incidencia de enfermedades no transmisibles, debido a sus efectos beneficiosos para la salud, entre los que contempla que modula la microbiota, la motilidad intestinal y las actividades hipoglucemiantes e hipocolesterolémicas (AACC, 2000), sin embargo, en México, el consumo de fibra está por debajo del consumo promedio recomendado de 25 gramos al día (SSA, 2022).

El cladodio de nopal es un alimento rico en fibra dietética, es endémico de México, y la especie más investigada y consumida es *Opuntia ficus-indica*, mientras que la especie menos investigada es *Opuntia cochenillifera* Karst, sin embargo, presentan similitudes en su composición química (SADER, 2020; SIAP, 2021a). En el área de los alimentos, los cladodios de nopal son de gran interés, porque su transformación es técnicamente posible, por lo que puede procesarse para su conservación para diferentes propósitos (Martínez-Albino & Gordillo-Mejía, 2022).

No obstante, los procesos de modificación conllevan a cambios en las propiedades de los alimentos debido a que se modifican las propiedades fisicoquímicas, la composición

y estructura de polisacáridos como la fibra, además también las funciones bioactivas de las materias primas (Speroni *et al.*, 2020; Bader Ul-Ain *et al.*, 2018; Nagy *et al.*, 2020). Dentro de las tecnologías más utilizadas se encuentra la extrusión, debido a que es capaz de modificar el contenido de fibra dietética, debido a que aumenta la proporción de fibra soluble, provocando reacciones como la ruptura de la pared celular, la ruptura de enlaces de hidrógeno y posibilita la unión del agua a grupos hidroxilos libres (Navale *et al.*, 2016; Björck & Asp, 1983).

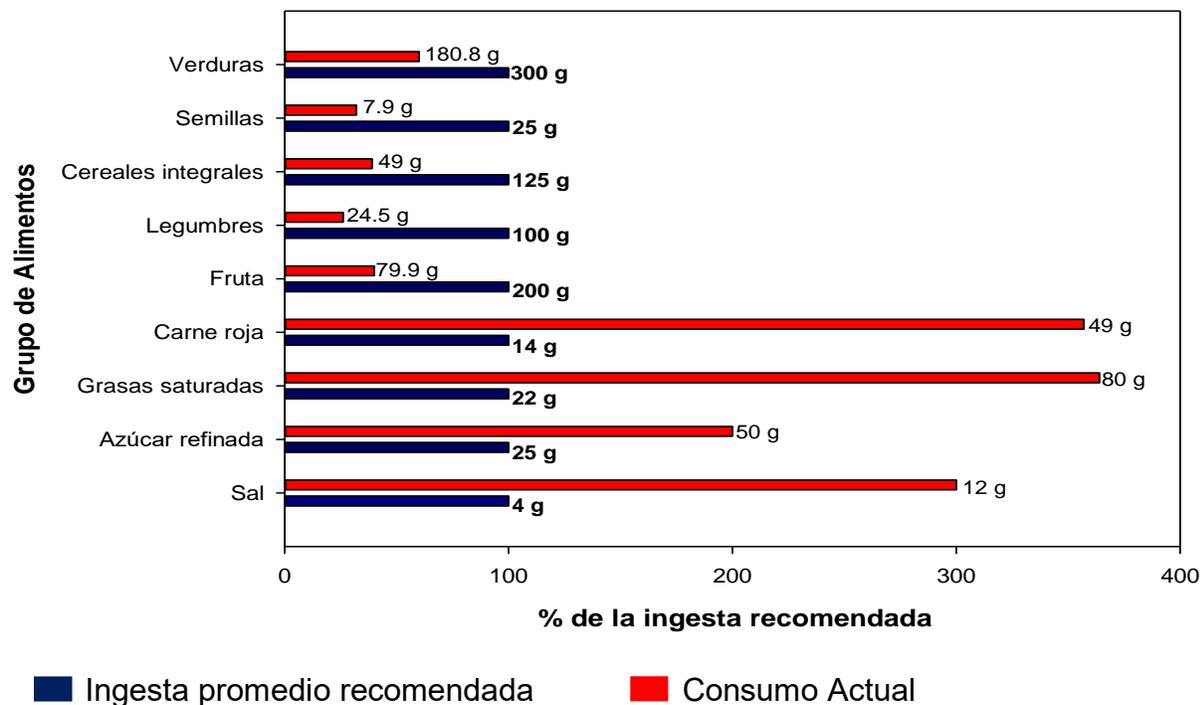
Es por ello que el objetivo de este estudio fue evaluar el impacto del procesamiento por extrusión, sobre las propiedades alimentarias de los cladodios maduros de nopal de la especie menos estudiada, consumida y aprovechada (*Opuntia cochenillifera* Karst.) y la especie más estudiada y consumida (*Opuntia ficus-indica*).

## CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Alimentación y salud en el mundo y en México

Las enfermedades no transmisibles (ENT) son afecciones asociadas a una progresión lenta y de larga duración, incluidas enfermedades cardiovasculares, cerebrovasculares, respiratorias crónicas, los diversos tipos de cáncer y la diabetes (Legesse *et al.*, 2022; Budreviciute *et al.*, 2020). Las ENT son la causa del 74% de las muertes anuales en el mundo (41 millones) y del 86% de las muertes prematuras en países de ingreso medio y bajo. Se estima que la incidencia de ENT incrementará a 52 millones en 2030, estableciéndose como uno de los principales problemas de salud a nivel mundial (OMS, 2022).

Los principales factores de riesgo para la prevalencia de las ENT son la inactividad física, y dietas poco saludables, lo que resulta en una población mundial con sobrepeso (1.8 millones) y obesidad (2.5 millones) (Kabir *et al.*, 2022; Stockwell *et al.*, 2021). En el año 2020, en el mundo 12.5 millones de personas murieron a causa de una mala alimentación, estas personas desarrollaron ENT. Se estima que un 40.8% desarrollaron enfermedades coronarias, 20.5% enfermedades cerebrovasculares, 26.4% diversos tipos de cáncer, 6.4% diabetes y 5.9% por enfermedades respiratorias crónicas (*Global Nutrition Report*, 2022). El desarrollo de estas patologías se correlaciona a dietas poco saludables debido a la alta ingesta de grupos de alimentos respecto a su promedio recomendado como grupos de alimentos con sal, azúcar refinada, grasas saturadas y carne roja, así como con una deficiencia en el consumo respecto al promedio recomendado de grupos de alimentos como las frutas, las legumbres, los cereales integrales, las semillas y las verduras, como se muestra en la Figura 1 (*Global Nutrition Report*, 2022; OMS, 2022; AHA, 2022).



**Figura 1.** Consumo recomendado de alimentos

**Fuente.** Elaboración propia con datos de *Global Nutrition Report, 2022*

La esperanza de vida promedio en México es de 75.1 años, lo que se considera bajo en comparación con el promedio mundial (81 años), México ocupa el segundo lugar de años potenciales de vida perdidos, mientras que el promedio mundial es de 199 muertes por cada 100,000 habitantes al año, en México se registran 366 muertes anuales (OCDE, 2021). En México en 2019, las principales causas de muerte por ENT fue la diabetes (48%), enfermedad renal crónica (34%), enfermedades cardiovasculares (41%), alcoholismo (27%), por factores de riesgo metabólicos (hiperglucemia, sobrepeso e hipertensión), conductuales y ambientales (GBD, 2019). Para el año 2021, 261 mil personas en México murieron por ENT, de las cuales se estima que el 43.72% fue por enfermedades cardiovasculares, 28.56% por diabetes, 16.96% por diversos tipos de cáncer y 10.74% por enfermedades respiratorias crónicas (INEGI, 2022a). En cuanto a la prevalencia de ENT en 2021 respecto a 2020, incrementó la obesidad (4.3%), los diversos tipos de cáncer (1.8%) y las enfermedades coronarias (9.3%), se estima que disminuyeron las enfermedades respiratorias crónicas (2.1%), la diabetes (0.1%), y el sobrepeso (3.1%) (ENSANUT, 2021). La prevalencia de las ENT en México se asocia a

la mala alimentación, ya que los alimentos mayormente consumidos son las bebidas endulzadas (90.7%), la carne no procesada (54.1%), los lácteos (46.5%), las botanas, dulces y postres (46.1%), las frutas (42.5%), los cereales dulces (35.5%), la comida chatarra y la comida típica mexicana frita (34.2%) (ENSANUT, 2021).

En el año 2021 en Hidalgo, 12 mil personas murieron a causa de las ENT, se estima que 46.1% por enfermedades cardíacas, 25.4% por diabetes, 17.7% por cáncer, 8.1% por enfermedades cerebrovasculares y 2.7% por enfermedades respiratorias crónicas (INEGI, 2022b). Los principales factores de riesgo para la prevalencia y mortalidad por ENT en Hidalgo son la mala alimentación (58.7%), la contaminación ambiental (6.3%) y el alto consumo de tabaco (19%) y alcohol (16%), originando altos índices de población con sobrepeso (45.9%) (GBD, 2019).

Por todo lo anterior puede establecerse que a nivel global, nacional y regional la mala alimentación basada en dietas con bajo valor nutrimental, es la causa más importante de riesgo asociado a la prevalencia y mortalidad por ENT en el mundo y que un cambio en el sistema alimentario global es necesario a fin de atender este importante problema de salud global.

### **2.1.1 Dieta saludable sostenible**

La mala alimentación es definida como un desequilibrio en la ingesta de energía y nutrientes que puede alterar las medidas, composiciones y funciones corporales, este desequilibrio es causado por una baja ingesta de fibra dietética, frutos naturales, hortalizas, granos integrales, productos derivados de la leche, semillas, pescado y grasas saludables como ácidos grasos omega 3, ácidos grasos poliinsaturados, y por una elevada ingesta de ácidos grasos trans, sodio, carnes rojas o procesadas, y bebidas azucaradas (OMS, 2019; GBD 2017). Estos patrones actuales de producción y consumo de alimentos, que definen la mala alimentación, ejercen una presión significativa sobre el uso de los recursos naturales, tierra, agua, atmósfera y biodiversidad y son responsables de hasta un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero (Harrison *et al.*, 2022).

Las dietas saludables sostenibles son un estilo de alimentación que impulsa todas las áreas de la salud y un mejor estilo de vida de las personas; al disminuir el impacto al

medio ambiente; este estilo de alimentación es de fácil alcance, inocuos e igualitario, además de ser ampliamente aceptado (FAO, 2019). Una dieta saludable sostenible considera un consumo moderado de proteínas de origen animal y lácteos, además de minimizar el consumo de sal, azúcar, grasas saturadas, grupos de alimentos de alto índice glicémico y alta densidad calórica, minimizar el uso de hormonas en la producción de alimentos y el uso de plásticos en envases, reducir la pérdida y desperdicios de alimentos, y aumentar el consumo de cereales integrales, legumbres, frutos secos, frutas y verduras, grupos de alimentos de bajo índice glicémico, baja densidad calórica, altos en fibra dietética y antioxidantes (FAO, 2019; OMS, 2020; BDA, 2022).

De acuerdo con estudios epidemiológicos, una dieta saludable reduce significativamente la incidencia, la prevalencia y la mortalidad por ENT, como consecuencia, la mayoría de los países han implementado políticas nutricionales que adoptan pautas de alimentación saludable con alimentos funcionales, campañas de información, impuestos a los alimentos o reformulación de alimentos (Kris-Etherton *et al.*, 2022; Doro & Réquillart, 2020). Por lo tanto, se ha generado un gran interés tanto tecnológico, alimentario y de salud por parte de los consumidores y fabricantes al buscar alimentos funcionales de calidad nutricional en vitaminas, probióticos, minerales, antioxidantes y fibras dietéticas, para el bienestar humano y el crecimiento económico sostenible (Rahim *et al.*, 2021; Küster & Vila, 2017). En este sentido, actualmente existe un creciente interés por los investigadores y consumidores a nivel mundial en conocer los beneficios potenciales a la salud, la obtención o mejora de alimentos funcionales.

## **2.2 Alimentos funcionales**

El concepto de alimentos funcionales se empleó en Japón por primera ocasión en el año 1980, sin embargo, no se ha establecido una definición que sea admitida a nivel mundial sobre este concepto (Baker *et al.*, 2022). De acuerdo con la FDA, (2020), los alimentos funcionales generalmente se refieren a alimentos que proporciona nutrientes y energía para la salud más allá de la nutrición básica, además de modificar favorablemente una o más funciones específicas del organismo, brindando un beneficio a respuestas fisiológicas específicas y poder reducir el riesgo de enfermedades no transmisibles.

Los alimentos funcionales son aquellos que contienen de forma natural minerales, vitaminas, ácidos grasos, fibra dietética, antioxidantes, de igual forma los alimentos que se les ha adicionado o mejorado con sustancias bioactivas como antioxidantes, probióticos, prebióticos, simbióticos, y los alimentos que se les ha reemplazado un componente, o una combinación de los alimentos anteriores (Butnariu & Sarac, 2019). Los alimentos funcionales desempeñan características fisiológicas como la optimización de los procesos metabólicos y la actividad fisiológica de los órganos, al ser inmunomoduladores, antivirales, antibacterianos, antifúngicos, antioxidantes, anticancerígenos, antiinflamatorios y neuro protectores (Farzana *et al.*, 2022).

Existe una variedad de alimentos funcionales que actualmente se encuentran disponibles en el mercado para el consumo humano, que confieren beneficios a la salud, algunos ejemplos se encuentran en la Tabla 1.

Entre las características de los alimentos funcionales que son particularmente importantes para los consumidores son el sabor, el aroma, la textura, el método de procesamiento, los empaques reciclables, los precios accesibles, las etiquetas con información de salud y la adición de ingredientes naturales. Sin embargo, la característica más importante es el enriquecimiento con ingredientes como los antioxidantes y la fibra dietética (Baker *et al.*, 2022; Topolska *et al.*, 2021).

**Tabla 1.** Tipos de alimentos funcionales

<b>Alimento Funcional</b>	<b>Componente Bioactivo</b>	<b>Beneficio a la salud</b>	<b>Referencia</b>
Margarinas Fortificadas	Fitoesteroles		
<i>Psyllium</i>	Fibra Soluble		
Soja	Proteína	Reducción de colesterol total y LDL	
Productos con avena integral	$\beta$ -glucano		Hasler, 2002
Ajo	Compuestos organosulfurados		
Bebidas con arándano	Proantocianidinas	Reducción de infecciones del tracto urinario	

Pescado	Ácidos grasos Omega 3	Reducción de triglicéridos	
Espinacas, col	Luteína/zeaxantina	Reducción del riesgo de degeneración macular	
Tomates	Lycopeno	Reducción del riesgo de cáncer de próstata	
Productos lácteos fermentados	Probióticos	Mejora la salud gastrointestinal	
Café	Cafeína, ácidos clorogénicos	Acción estimulante, asociado con una disminución del riesgo de diabetes y enfermedades cardiovascular	Konstantinidi & Koutelidakis, 2019
Té verde	Catequinas	Reducción de riesgo de diferentes tipos de cáncer	
Cúrcuma	Curcuminoides	Mejora la funcionalidad cardiovascular, reduce la proliferación de células cancerosas	
Granada	Taninos, catequinas, epicatequina, quercetina, antocianinas y procianidinas	Disminuye los niveles de glucosa, reducción del estrés oxidativo y la peroxidación lipídica	
Leche fortificada	Ácido fólico, zinc, fósforo, ácidos grasos omega-3, calcio, Vitamina A	Reduce el riesgo de osteomalacia y osteoporosis, ayudan a reducir el riesgo de enfermedad cardiovascular	Gul <i>et al.</i> , 2016
Cereal fortificado	Fibra Dietética	Reduce el riesgo de ciertos cánceres y enfermedades cardíacas, el colesterol y el estreñimiento, aumentan el control de la glucemia	
Yogurt fortificado	Calcio, vitamina A y D	Previene la osteoporosis, mayor absorción de calcio y favorece la función visual	

LDL: Lipoproteína de baja densidad

### 2.2.1 Compuestos antioxidantes en los alimentos

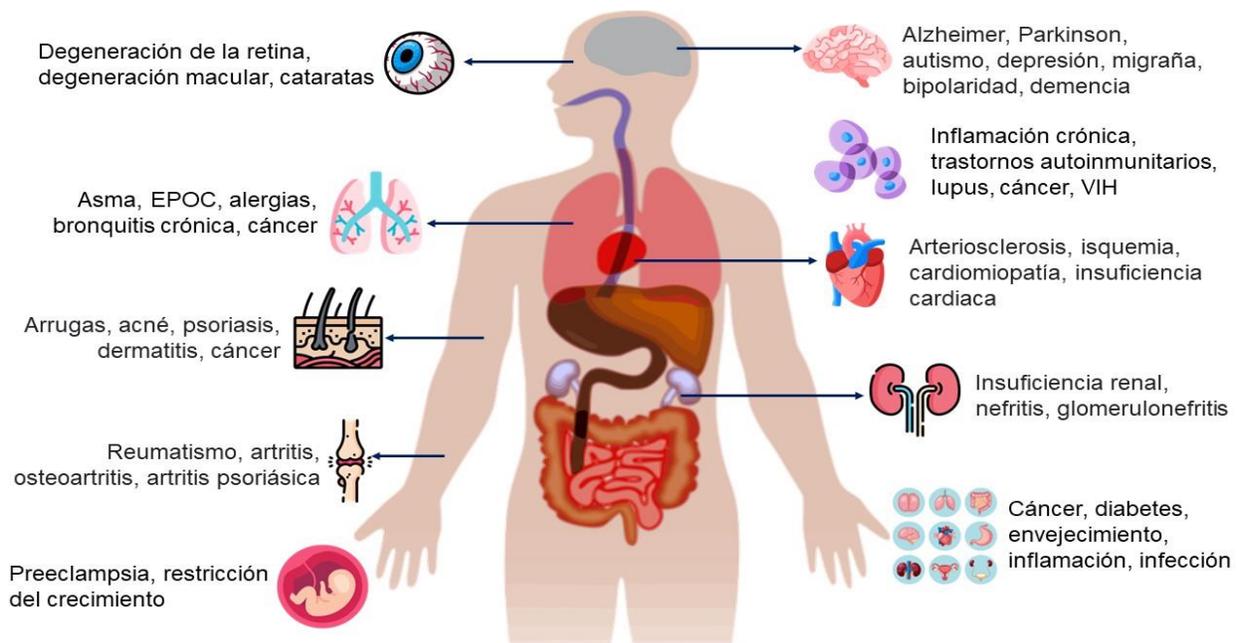
Los antioxidantes son compuestos bioactivos con alto valor nutrimental que están presentes en los alimentos y generan un impacto bioactivo en el ser humano, promoviendo efectos benéficos a la salud (Martirosyan *et al.*, 2022), los antioxidantes mayormente presentes en los alimentos funcionales son los tocoferoles, el ácido ascórbico, el licopeno, el resveratrol, la epigallocatequina, la curcumina, la oleuropeína, el sulforafano, la quercetina, el ácido elágico, las antocianinas, los b-glucanos y otras biomoléculas (flavonoides y los polifenoles) (Konstantinidi & Koutelidakis, 2019). El consumo de los antioxidantes presentes en los alimentos funcionales ha recibido una mayor atención por parte de los consumidores e investigadores debido a que la ingesta de antioxidantes, ayuda a mejorar la prevención de ENT como el cáncer, las enfermedades neurológicas y cardiovasculares, debido a que los antioxidantes protegen al organismo de los radicales libres producidos por el estrés oxidativo como factor principal (Banwo *et al.*, 2021; Xuan Hoan *et al.*, 2021; Valenzuela *et al.*, 2003).

Los antioxidantes son compuestos que neutralizan a los radicales libres, especies reactivas de oxígeno (ROS) y especies reactivas de nitrógeno (RNS), inhibiendo, previniendo o retrasando el daño oxidativo celular (Halliwell, 2007). Los radicales libres son átomos, grupos de átomos o moléculas capaces de existir con electrones desapareados, inestables y reactivos en sus orbitas atómicas (Kurutas, 2015). Al tener uno o más electrones desapareados, pueden intercambiar o recibir electrones, por tanto, su capacidad de reacción como oxidantes o reductores es mayor (Lobo *et al.*, 2010).

Los radicales libres generan subproductos que son las ROS y RNS (Kıran *et al.*, 2023). Las ROS son moléculas que tienen oxígeno con una reactividad química diferente, se consideran como metabolitos de oxígeno que tienen una capacidad oxidante alta, incluyen especies radicales (superóxido e hidroxilo) y no radicales (peróxido de hidrógeno, oxígeno singulete y ácido hipocloroso). (Kotha *et al.*, 2022; Kurutas, 2015; Carvajal-Carvajal, 2019). Las RNS son moléculas que tienen un nitrógeno con diferente reactividad química, con actividad oxidante, y tienen especies radicales (óxido nítrico) y no radicales (peroxinitrito, trióxido de dinitrógeno, tetraóxido de dinitrógeno, ácido nitroso) (Kotha *et al.*, 2022; Kurutas, 2015; Carvajal-Carvajal, 2019). Los ROS y RNS son generados en varios sistemas a nivel subcelular en las mitocondrias, lisosomas,

peroxisomas, membrana, y en el citoplasma. Las ROS y RNS pueden dañar las proteínas, lípidos y el ADN (Parcheta *et al.*, 2021). Cuando las ROS y RNS se producen en exceso por la exposición al medio ambiente, las reacciones bioquímicas normales, insuficiente actividad física, contaminación ambiental, tabaquismo, alcoholismo y una mala alimentación y la capacidad antioxidante de los mecanismos de defensa celular es insuficiente, se induce la generación de estrés oxidativo (Parcheta *et al.*, 2021; Neha *et al.*, 2019; Shebis *et al.*, 2013).

El estrés oxidativo es el desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS) y su eliminación por parte de las defensas celulares antioxidantes (RNS) (Sarangerajan *et al.*, 2017). El estrés oxidativo ocasiona diversas enfermedades como se muestra en la Figura 2 (Kiran *et al.*, 2023; Neha *et al.*, 2019; Hernández Espinosa *et al.*, 2019).



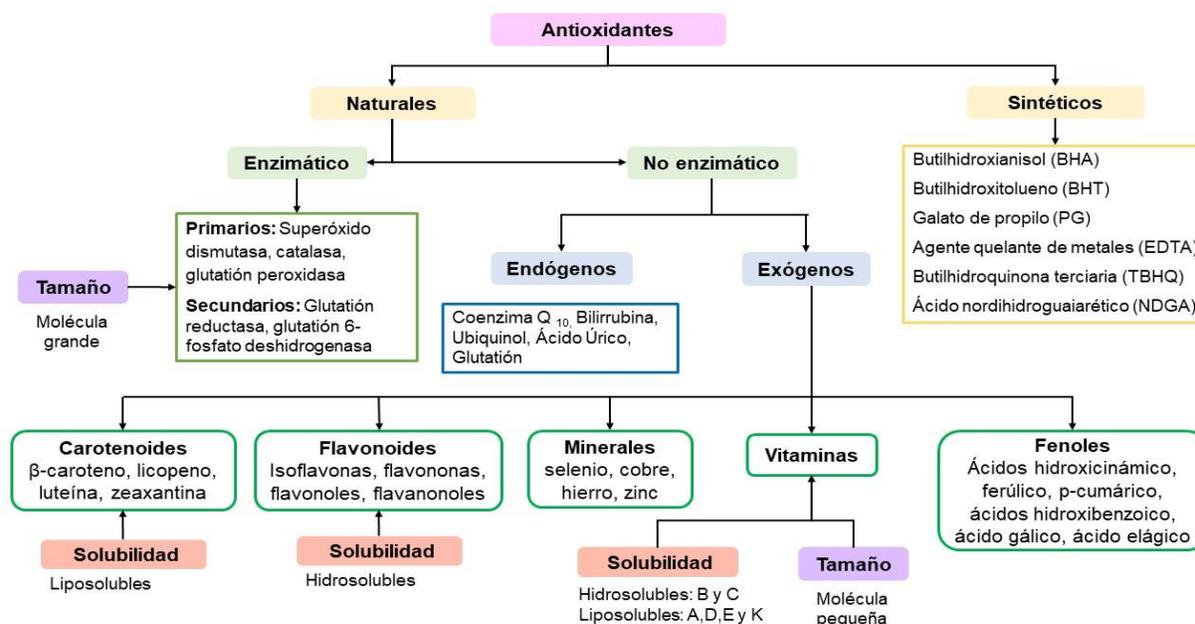
**Figura 2.** Enfermedades generadas por estrés oxidativo

**Fuente:** Elaboración propia con datos de Kiran *et al.*, 2023; Neha *et al.*, 2019; Hernández Espinosa *et al.*, 2019.

El estrés oxidativo puede ser neutralizado mejorando las defensas celulares con antioxidantes (Stoia & Oancea, 2022; Rasheed & Abdul-Azeez, 2019), los antioxidantes se pueden clasificar en grupos básicos (naturales y sintéticos) fuentes de obtención

(endógenos y exógenos), actividad (enzimático y no enzimático), solubilidad (hidrosolubles y liposolubles) y tamaño (moléculas pequeñas y moléculas grandes) (Stoia & Oancea, 2022; Rasheed & Abdul-Azeez, 2019; Sharifi-Rad *et al.*, 2020; Zehiroglu & Ozturk Sarikaya, 2019), como se muestra en la Figura 3.

Los antioxidantes tienen tres mecanismos de acción, la transferencia de átomos de hidrógeno, la transferencia de un solo electrón y la quelación de metales (Kotha *et al.*, 2022). La actividad de los antioxidantes se genera por tres vías: la prevención de la formación de radicales libres y sus especies reactivas, interrumpir las reacciones de oxidación por radicales e inactivar los productos de reacción de radicales libres y los derivados de radicales (Kotha *et al.*, 2022; Tanabe *et al.*, 2022).



**Figura 3.** Clasificaciones de antioxidantes

**Fuente:** Elaboración propia con datos de Stoia & Oancea, 2022; Rasheed & Abdul-Azeez, 2019; Sharifi-Rad *et al.*, 2020; Zehiroglu & Ozturk Sarikaya, 2019

Ante el incremento de enfermedades en la población mundial, la tendencia de alimentación está dirigida en el uso de antioxidantes, debido a la correlación entre la alimentación y la ingesta de alimentos con alto contenido de antioxidantes. Actualmente en la industria de los alimentos, los antioxidantes naturales son una alternativa de gran

interés para la sustitución de antioxidantes sintéticos, por su fácil acceso y bajo costo, es por ello que existe un creciente interés por estudiar el potencial de nuevas fuentes de antioxidantes.

### 2.2.1.1 Fuentes de antioxidantes

Los antioxidantes están presentes en diversas frutas y verduras, ejemplos ellos se muestran en la Tabla 2. Existen frutas y verduras que tienen una mayor concentración de antioxidantes debido a las diferencias en los compuestos fitoquímicos que contengan, ya que varían en estructura y función de un alimento a otro, aunado a las diferencias en el cultivo, madurez, postcosecha y procesamiento de los alimentos (Jideani *et al.*, 2021).

**Tabla 2.** Fuentes de antioxidantes

<b>Fuente</b>	<b>Clase</b>	<b>Subclase</b>	<b>Ejemplo</b>	<b>Referencia</b>
Manzana	Triterpenoide Flavonoides	Esteroles	Campesterol	van Breda & de Kok, 2018
		Antocianinas	$\beta$ -sitosterol	
		Flavanoles	Cianidina	
		Flavonoles	Delfinidina	
		Dehidrocalconas	Catequina Quercetina	
Plátano	Ácidos fenólicos Flavonoides Lignanós Triterpenoides	Ácidos hidroxibenzoicos	Ácido gálico Catequina	van Breda & de Kok, 2018; de Pascual- Teresa <i>et al.</i> , 2000
		Flavanoles	Epicatequina	
		Flavonoles	Epigallocatequina	
		Esteroles	Miricetina	
			Pinoresinol Campesterol	
Frutos rojos	Ácidos fenólicos Flavonoides Estilbenoides	Ácidos hidroxibenzoicos	Ácido gálico Catequina	van Breda & de Kok, 2018; Kaur & Kapoor, 2001
		Flavanoles	Quercetina	
		Flavonoles	Kaempferol	
		Antocianinas	cianidina	
			delfinidina	
			Resveratrol Pterostilbeno Piceatannol	

Granada	Ácido fenólico Triterpenoides	Ácidos hidroxibenzoicos Esteroles	Ácido gálico Ácido elágico Campesterol	
Espárragos	Triterpenoides	Esteroles	Campesterol β-sitosterol	
Espinaca	Triterpenoides Tetrapenoides	Terpenos Fenólicos Carotenoides	Vitamina E α-caroteno β-caroteno Licopeno	van Breda & de Kok, 2018
Cebolla	Triterpenoides Compuestos de azufre Flavonoides Lignanós	Esteroles Tiosulfínatos Flavonoles	Alicina Cianidina Delfinidina Quercetina kaempferol Pinoresinol	
Nopal	Acido fenólico, Terpenos Flavonoides	Esteroles Fenólicos	Quercetina Kaempferol Lisorhamnetina Dihidroflavonoles Flavanonas Flavanonoles	Chavez- Santoscoy <i>et</i> <i>al.</i> , 2009

Los antioxidantes que están presentes en las frutas y verduras incluyen metabolitos primarios (Vitamina B, aminoácidos proteicos y no proteicos, los ácidos grasos y los ácidos orgánicos) y secundarios (terpenoides, fenólicos, polifenoles, alcaloides) (Arias *et al.*, 2022).

Las investigaciones afirman que el consumo de alimentos como frutas y verduras, aportan antioxidantes, con lo cual incrementa la capacidad de contrarrestar el estrés oxidativo generado por dietas ricas en grasas y carbohidratos. No obstante, otro componente de las frutas y verduras, es la fibra dietética que ha sido asociada con efectos benéficos a la salud, entre estos efectos se considera la modulación de la microbiota, la motilidad intestinal y la actividad hipoglucemiante e hipocolesterolémica (AACC, 2000). Por lo que, existe interés de incrementar el consumo de alimentos con compuestos bioactivos, con el propósito de disminuir problemas de salud ocasionados con la mala alimentación.

### 2.2.2 Fibra dietética en los alimentos

La fibra dietética (FD) hace referencia a las partes comestibles de las plantas que, por su naturaleza química, son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado humano y que pueden o no ser fermentadas en el intestino grueso (AACC,2000). La ingesta diaria recomendada de fibra dietética a nivel mundial es de 30 a 38 gramos para los hombres y de 21 a 25 gramos para las mujeres, esta ingesta depende de la edad y el consumo de energía de las personas (AHA, 2022; UCSF, 2019). En México la ingesta de fibra dietética es baja, los adolescentes hombres consumen 23.7 gramos y las mujeres 21.2 gramos, en adultos el consumo de fibra es de 20.2 gramos en hombres y 17.9 gramos en mujeres (SSA, 2022; ENSANUT, 2021).

Una mayor ingesta de fibra dietética (FD) se asocia con un bajo impacto en el desarrollo de enfermedades no transmisibles y metabólicas, como la diabetes mellitus, las enfermedades coronarias, el cáncer de colorrectal y cáncer de mama, la hipertensión arterial sistémica, las dislipidemias, la motilidad intestinal, y la obesidad, al reducir la concentración de glucosa y colesterol en la sangre mediante la unión de ácidos biliares y glucosa, además de influir en la fisiología del tracto gastrointestinal al mejorar la sensación de saciedad por la disminución del vaciamiento gástrico, altera la actividad de las enzimas digestivas, favorece el desarrollo de bacterias entéricas al producir ácidos grasos de cadena corta por su efecto prebiótico e incrementa la biomasa microbiana saludable en el colon (Baker *et al.*, 2022; Ioniță-Mîndrican *et al.*, 2022; Ibrahim & Menkovska, 2022).

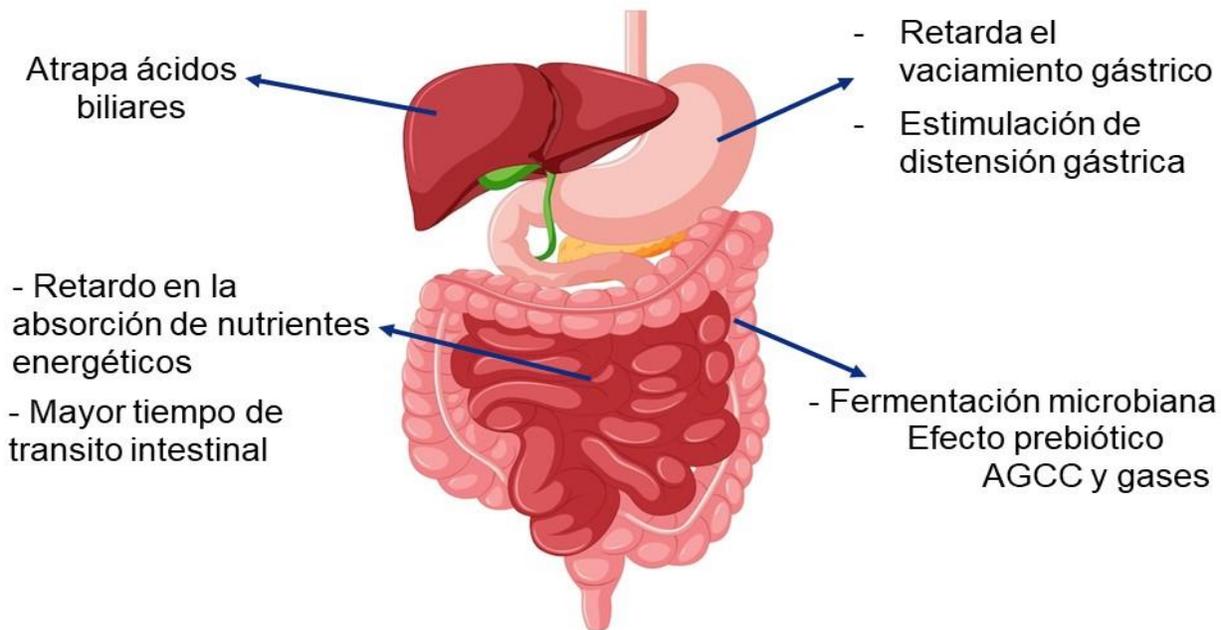
Por otra parte, la fibra dietética ha sido clasificada bajo diferentes criterios, según la fuente de obtención, su solubilidad en agua, su fermentabilidad y reología. De estos criterios de clasificación, la solubilidad es la mayormente aceptada, de tal forma que puede ser clasificada como fibra soluble y fibra insoluble (Williams *et al.*, 2019). Actualmente se utilizan ensayos analíticos por métodos enzimáticos-gravimétricos oficiales de la *Association of Analytical Communities (AOAC)* para determinar la fibra dietética total (985.29, 992.16) y su fracción soluble e insoluble (993.19, 991.42 y 991.43) (AOAC, 2009). Químicamente, como fibra dietaria, puede considerarse a la celulosa, la hemicelulosa, la lignina, la pectina, los mucilagos, las gomas, los fructooligosacáridos (FOS), los galactooligosacáridos (GOS), el almidón resistente y la inulina (EFSA, 2010).

### 2.2.2.1 Fibra dietética soluble

La fibra dietética soluble (FDS) se define como aquella fibra que tiene la capacidad de disolverse en agua o en simuladores con tampones y enzimas presentes en el sistema humano (Jr & W, 2016). Las fibras solubles incluyen a oligosacáridos como la pectina, los mucilagos, las gomas, los fructo-oligosacáridos (FOS), los galacto-oligosacáridos (GOS), la inulina y el almidón resistente. La FDS posee propiedades fisicoquímicas (solubilidad, fermentabilidad y viscosidad) que le confieren características que relaciona su mecanismo de acción en el organismo con efectos benéficos a la salud (Abreu Y Abreu *et al.*, 2021; Williams *et al.*, 2019). El mecanismo de acción de las FDS en la microbiota intestinal humana, es que al no ser degradadas por las enzimas digestivas en el estómago, ingresan al colon a través del intestino delgado en donde las bacterias la fermentan con producción de ácidos grasos de cadena corta y degradan (Guan *et al.*, 2021). El efecto de las FDS sobre la microbiota intestinal es principalmente la proporción de fuente de carbono y energía, debido a su efecto prebiótico, al aumentar las bacterias benéficas y mejorando su ambiente (Tap *et al.*, 2015).

#### 2.2.2.1.1 Efectos fisiológicos de la FDS

Las fibras dietéticas solubles tienen importantes efectos fisiológicos en la salud humana (Figura 4). Debido a su solubilidad en agua y viscosidad, son capaces de formar geles con alta viscosidad retardando el vaciamiento gástrico, estimula la distensión gástrica, aumenta la excreción de ácidos biliares, retarda la absorción de nutrientes energéticos (hidratos de carbono y grasas) de los alimentos en el sistema digestivo humano, propiciando el control del apetito, mejora la resistencia a la insulina y disminuye la grasa corporal, contribuyendo a la reducción de la obesidad, la diabetes, la hipertensión arterial sistémica y las dislipidemias (Guan *et al.*, 2021; Salleh *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2008).



**Figura 4.** Efectos fisiológicos de la fibra dietética soluble

**Fuente:** Elaboración propia con datos de Guan *et al.*, 2021; Salleh *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2008

La fermentabilidad de las FDS contribuye como sustrato, es decir, tiene un efecto prebiótico, al reducir el pH en el intestino grueso y favorecer el crecimiento de bacterias benéficas (bifidobacterias y lactobacilos), los prebióticos son ingredientes fermentados selectivamente que generan cambios específicos en la composición y/o actividad de la microbiota, confiriendo así uno o varios beneficios sobre la salud del huésped (O'Grady *et al.*, 2019; Gibson *et al.*, 2017)

La fermentabilidad de la fibra dietética soluble está directamente relacionada con su efecto sobre la función intestinal, en la masa fecal, la frecuencia de las deposiciones, el mantenimiento del pH colónico, aumento de volumen del intestino grueso, y la recuperación de energía a partir de alimentos no digeribles (Mudgil, 2017). Los productos finales de la fermentación de FDS son los ácidos grasos de cadena corta (AGCC), principalmente acetato (60%), propionato (20%), butirato (20%) y gases (hidrógeno, metano y dióxido de carbono) (Silva *et al.*, 2020; Tiishetso Maswanganye *et al.*, 2021).

La formación de AGCC ayuda a mejorar la laxación y la regularidad al aumentar el volumen y el peso de las heces por la retención de agua y cantidad de bacterias, la mejor absorción de nutrientes y minerales al aumentar la absorción de calcio, magnesio, zinc y

hierro, disminuir la glucosa e insulina en la sangre al estimular la liberación de insulina pancreática y afectar el control hepático de la degradación del glucógeno, mejorar los niveles de colesterol en la sangre al suprimir la síntesis de colesterol en el hígado y reducir los niveles séricos de colesterol de lipoproteínas de baja densidad (LDL), mejorar la función inmune al aumentar la barrera de la mucosa colónica (Barber *et al.*, 2020; Davani-Davari *et al.*, 2019; Dahl *et al.*, 2017; Slavin, 2013), brindando a la salud la prevención de afecciones gastrointestinales que incluyen irritabilidad, síndrome intestinal (SII), enfermedad inflamatoria intestinal (EII), diverticulosis, estreñimiento, incontinencia fecal y cáncer colorrectal (CCR) (Slavin *et al.*, 2009, McRorie & McKeown, 2017).

#### 2.2.2.1.2 Componentes de la FDS

La pectina es un polisacárido aniónico que se localiza en la pared celular de las plantas, consta principalmente (70%) de residuos de ácido D-galacturónico (GalA) unidos por enlaces  $\alpha$ -1,4 y puede contener azúcares neutros como arabinosa, ramnosa y galactosa, dependiendo de la fuente (Singhal & Swami Hulle, 2022; Sundar Raj *et al.*, 2012). Actualmente, las principales fuentes de aislamiento de pectina son la cáscara de diversos cítricos, la pulpa de mango, el café, la guayaba, la manzana, la papaya, el plátano, la carambola, la piña, la fresa, la zanahoria, el tamarindo y remolacha azucarera, y es extraída por métodos químicos y enzimáticos (Würfel *et al.*, 2021). La pectina se usa en la industria alimentaria como agente gelificante, estabilizante, emulsionante y espesante (Chandel *et al.*, 2022). Las investigaciones demuestran que la pectina desacelera el vaciamiento gástrico, reduce la absorción de glucosa y colesterol en sangre, aumenta el volumen de heces fecales, generando beneficios a la salud en el control de peso y los diversos tipos de cáncer, así como, en la reducción de prevalencia de la obesidad y la diabetes (Blanco-Pérez *et al.*, 2021; Zdunek *et al.*, 2021). La pectina se considera un prebiótico al no ser hidrolizada por la saliva humana o el ácido gástrico por enzimas, y actúa como fuente de carbono para el crecimiento, desarrollo y proporción de las bacterias (*Firmicutes* y *Bacteroidetes*) en la microbiota intestinal (Chandel *et al.*, 2022; Blanco-Pérez *et al.*, 2021; Rodríguez Robledo & Castro Vázquez, 2020).

El mucilago es una sustancia altamente viscosa producida por casi todas las plantas y algunos microorganismos (Calle *et al.*, 2021). Es un polisacárido altamente ramificado

de cadena lineal de ácido D-galacturónico (GalA) unidos por enlaces  $\beta$ -1,4 y L-ramnosa unidos por enlaces  $\alpha$ -1,2, con una cadena lateral de trisacáridos D-galactosa unidos por enlace de  $\beta$ -1,6 L-ramnosa (Guevara-Arausa *et al.*, 2012). La mayoría de las plantas contienen mucílago, principalmente en la cubierta de la semilla y algunas en la piel de la fruta (Waghmare *et al.*, 2022). Solo algunos mucilagos están autorizados por la FDA, como el aloe vera (*Aloe barbadensis Miller*), la linaza, la semilla de berros, los nopales, las semillas de albahaca, el membrillo y la chía (Dybka-Stępień *et al.*, 2021). Actualmente, el mucilago se usa como espesante o emulsionante natural en la nutrición humana, película o recubrimiento comestible en aplicaciones de envasado de alimentos, debido a sus propiedades elásticas que le permiten formar una gran red molecular (Tosif *et al.*, 2021). El mucilago de nopal se usa como micro y nano encapsulador, emulsionante, espesante, gelificante, estabilizante y superplastificante natural (Waghmare *et al.*, 2022). Los beneficios a la salud del mucilago es su efecto de motilidad gastrointestinal, la reducción de lípidos y glucosa en la sangre (Kassem *et al.*, 2021). Estos efectos benéficos a la salud se pueden atribuir a las propiedades reológicas (viscosidad e hinchamiento), que generan un efecto prebiótico en la microbiota intestinal al aumentar (35%) los ácidos grasos de cadena corta (Dybka-Stępień *et al.*, 2021; Du Toit *et al.*, 2019).

Las gomas son polisacáridos altamente ramificados que forman geles, se unen al agua y otros materiales orgánicos, están formadas por un esqueleto de galactosa unido por enlace  $\beta$ -1,3 y  $\beta$ -1,6 a cadenas laterales de arabinosa, ácido glucurónico, ácido metilglucurónico o galactosa (Soliman, 2019). Las gomas se extraen por métodos de exudado como la goma arábiga que se extrae de los árboles de acacia, las gomas de mucílago como el *psyllium* que se proviene de la especie *Plantago ovata* (hierba cultivada en la India) y las gomas microbianas como la goma guar que se extrae de la semilla de la planta *Cyamopsis tetragonoloba* y la goma xantana que se obtiene de la fermentación bacteriana de almidones (Guan *et al.*, 2021; Sworn, 2021). En la industria alimentaria se usa como sustituto de grasa, espesante, emulsificador y estabilizador en pan, lácteos y bebidas, elaboración de bebidas en polvo, salsas, aderezos, vinagretas, helados, y productos cárnicos (Aires da Silva *et al.*, 2021). Los beneficios a la salud de las gomas es producir sensación de saciedad, retrasar la absorción de nutrientes, reducir el índice

glicémico, reduce los niveles de lípidos en la sangre (Hamdani *et al.*, 2019). Estos beneficios a la salud se atribuyen a que son resistentes a la hidrólisis de las enzimas digestivas, pero a su efecto prebiótico por la fermentación en el intestino grueso (Soliman, 2019).

Los fructo-oligosacáridos (FOS), también conocidos como oligofruktosa u oligofruktano, se desempeñan como componentes de almacenamiento en muchas especies de plantas (de Oliveira *et al.*, 2011), están formado por una cadena lineal de D-fructosa unidas por enlaces  $\beta$ -2,1 a un D-glucosilo unida a una molécula de fructosa por enlace  $\alpha$ -2,1 (Gonçalves *et al.*, 2022). Los FOS se encuentra en alimentos como plátanos, ajos, cebollas, tomates, trigo, espárragos, alcachofas, puerros, miel, centeno, azúcar morena, cebada, cerveza, lechuga, remolacha, manzanas, avena, etc. (Sabater-Molina *et al.*, 2009). Los FOS son un prebiótico utilizado como suplemento para mejorar la salud humana y animal, también se utiliza como edulcorante bajo en calorías en alimentos para mejorar sus propiedades organolépticas (Martins *et al.*, 2019). Diversos estudios han demostrado las propiedades funcionales de los fructooligosacáridos (FOS), como la reducción de niveles de colesterol y glucosa en la sangre, la reducción de la presión arterial, la mejora de la absorción de calcio y magnesio e inhibir la producción de la enzima reductasa que puede causar cáncer. En el tracto digestivo humano, los FOS no se digieren, y cuando ingresan al intestino grueso, promueven favorablemente el crecimiento y fortalecimiento de bacterias específica, es decir, tiene efectos prebióticos (Rahim *et al.*, 2021; Roupar *et al.*, 2022).

Los galactooligosacáridos (GOS) están compuestos por fracciones de galactosa con enlace  $\beta$ -1,2,  $\beta$ -1,3,  $\beta$ -1,4 o  $\beta$ -1,6 a galactosa o glucosa en el extremo reductor, su estructura química varía según la longitud de la cadena, la ramificación y los enlaces glucosídicos, se derivan principalmente de la leche (Böger *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2018). Los GOS son utilizados como prebiótico en alimentos para bebés y otros productos lácteos, así como en bebidas funcionales. (Dekker & Daamen, 2011). Los GOS son resistentes a los ácidos gástricos y enzimas de la saliva y digestivas, lo que genera su efecto prebiótico y modula la microbiota intestinal (Gänzle, 2011).

La inulina, según la longitud de la cadena, se clasifica en oligosacáridos o polisacáridos y pertenece al subgrupo de los fructanos. Está compuesta por subunidades de D-

fructosilo unidas por enlaces  $\beta$ -2,1, la molécula suele terminar con un grupo D-glucosilo unido por enlace  $\alpha$ -1,2 (Mensink *et al.*, 2015). La inulina se encuentra en alimentos como alcachofas, ajo, raíz de espárragos, salvia, raíz de diente de león, cebollas, puerros, plátanos, trigo, centeno y cebada (Mudannayake *et al.*, 2022). La inulina se utiliza como sustituto de azúcar e ingrediente dietético en el desarrollo de nuevos alimentos simbióticos, solo o en combinación con otros fructooligosacáridos, y mejorar las propiedades sensoriales (Abed *et al.*, 2016). La inulina actúa como una fibra prebiótica al alterar la composición y población del microbiota intestinal, produciendo AGCC y reduciendo el pH del colon, genera beneficios a la salud, como reducir el contenido calórico, la glucosa y lípidos séricos en la sangre, estimular el sistema inmunitario, proteger la mucosa colónica de la carcinogénesis, (Mudannayake *et al.*, 2022; Teferra, 2021).

El almidón resistente (RS) se puede definir como la fracción de almidón no digerido después de 120 min (Magallanes-Cruz *et al.*, 2017). El almidón resistente se puede encontrar en el pan, cereales, plátanos, cereales, pasta, arroz, legumbres y papas (Patterson *et al.*, 2020). El almidón resistente tiene baja capacidad de retención de agua, pequeño tamaño de partícula y sabor suave, se usa en productos horneados, pastas y bebidas, proporciona mejores propiedades de textura (Sharma *et al.*, 2008). Los almidones resistentes tienen un efecto benéfico en el funcionamiento del tracto gastrointestinal, la microflora intestinal, reduce el índice glucémico y los niveles de colesterol en sangre, además ayuda a controlar la diabetes (Wanikar & Kowal, 2022). El almidón resistente no se digiere en el intestino delgado y se transporta sin cambios al intestino grueso, donde los microorganismos residentes lo fermentan, formando ácidos grasos de cadena corta (Bojarczuk *et al.*, 2022).

#### 2.2.2.2 Fibra dietética insoluble

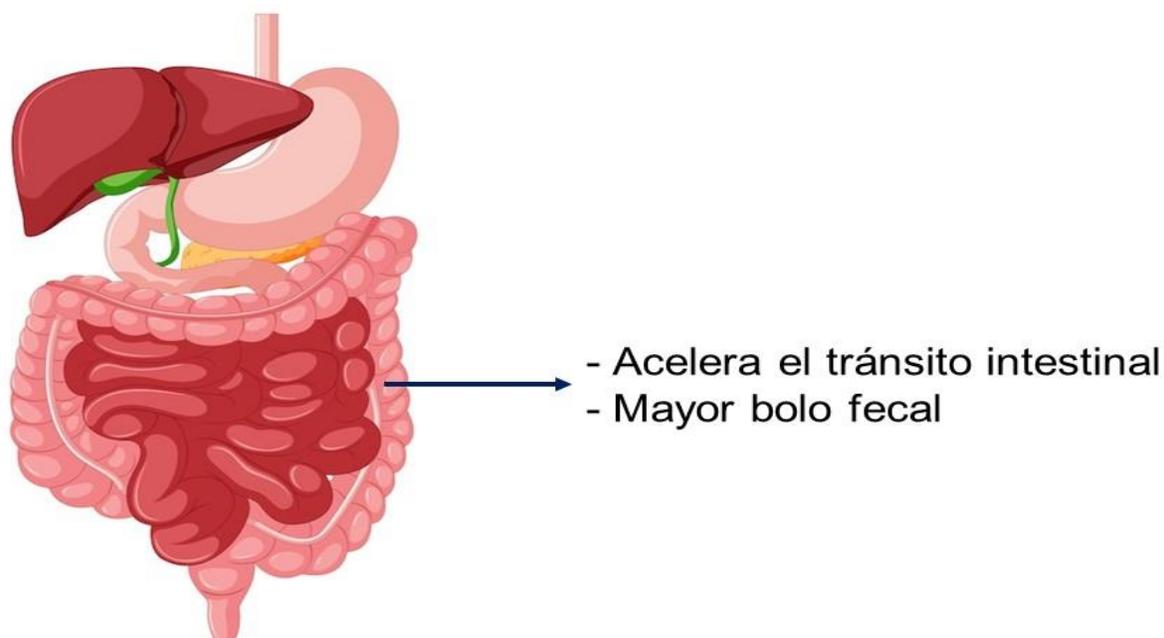
La fibra dietética insoluble (FDI) se define como la fibra que no se puede disolver en agua y que permanece intacta al no ser fermentada en el intestino grueso (Kshirsagar *et al.*, 2020). Las fibras insolubles incluyen oligosacáridos como la celulosa y la hemicelulosa y compuestos polifenólicos como la lignina.

Las propiedades fisicoquímicas (absorción y adición) de la fibra dietética insoluble le confiere características que relaciona sus mecanismos de acción en el organismo con efectos benéficos a la salud (Guan *et al.*, 2021). El mecanismo de acción es que, al pasar a través del sistema digestivo, las FDI pasan intactas y únicamente absorben y adhieren líquidos a otros materiales (Ioniță-Mîndrican *et al.*, 2022; Guan *et al.*, 2021).

#### 2.2.2.2.1 Efectos fisiológicos de la FDI

Las fibras dietéticas insolubles tienen importantes efectos fisiológicos en la salud humana (Figura 5). El efecto de las FDI en el organismo humano es desacelerar el tiempo del tránsito intestinal, aumentar el volumen de las heces fecales, retrasar la absorción de glucosa y equilibrar el pH en el sistema digestivo (Slavin *et al.*, 2009).

Las fibras dietéticas insolubles tienen importantes efectos fisiológicos en la salud humana, actúan como laxante al acelerar el tránsito intestinal, reducen el riesgo de afecciones colorrectales, como hemorroides y diverticulitis y previenen el cáncer colorrectal (Ioniță-Mîndrican *et al.*, 2022; Abreu Y Abreu *et al.*, 2021; Slavin *et al.*, 2009).



**Figura 5.** Efectos fisiológicos de la fibra dietética insoluble

**Fuente:** Elaboración propia con datos de Ioniță-Mîndrican *et al.*, 2022; Abreu Y Abreu *et al.*, 2021; Slavin *et al.*, 2009

#### 2.2.2.2.2 Componentes de la FDI

La celulosa es componente estructural de las paredes celulares (33%) de las plantas, es un polisacárido de cadena lineal de varios cientos de unidades de D-glucosa unidos por enlaces  $\beta$ -1,4. (Aziz *et al.*, 2022; Evans, 2020). Las fuentes de extracción de la celulosa son las frutas, legumbres, cereales integrales, frutos secos, semillas, la piel y pulpa de vegetales (Pesic, 2021). La celulosa se usa como encapsulante de antimicrobianos y antioxidantes naturales, estabilizador, emulsionante, espesante y mejorador de propiedades organolépticas de alimentos (Liu *et al.*, 2021). Los beneficios a la salud en el consumo de celulosa es la prevención de estreñimiento, la reducción en el tiempo de eliminación de los carcinógenos potenciales, la disminución de colesterol y la protección contra la enfermedad diverticular (Marcel Moshi *et al.*, 2019). Estos beneficios a la salud se producen dado que el cuerpo humano es incapaz de digerirla y transita por los intestinos hasta llegar al colon de manera intacta y ser expulsada en forma de desecho (Fischer *et al.*, 2020).

Las hemicelulosas son la segunda clase más abundante de polisacáridos después de la celulosa, están formadas por un conjunto heterogéneo que de polisacáridos que incluye D-xilosa, D-manosa, D-galactosa, L-arabinosa, D-galactosa y ácidos D-glucurónicos unidos por enlaces  $\beta$ -1,4 (Huang *et al.*, 2021; Dhingra *et al.*, 2012). Las principales fuentes de extracción de la hemicelulosa son las maderas duras y blandas, el salvado, los cereales integrales, los granos, la mostaza y la col de Bruselas (Huang *et al.*, 2021). La hemicelulosa es utilizada como membrana comestible (empaques) de alimentos, debido a que son biodegradables en el medio ambiente, y protegen a los productos contra impactos del entorno externo (Zhao *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2020). La hemicelulosa tiene efectos benéficos a la salud al reducir el tiempo intestinal, controlar el estreñimiento, menor ingesta de alimentos al provocar una sensación de saciedad. Estos efectos a la salud son debido a que no se digiere en el intestino delgado humano, aunque sí se desdoblán parcialmente en el colon (Doma-Bhutia & Ganapathy, 2020).

La lignina otorga rigidez estructural a las plantas, es un biopolímero que se deriva principalmente de tres unidades fenilpropano básicas: alcohol p-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico. La estructura de la lignina depende del método de

extracción, así como de la materia prima de origen (Zhang y Naebe, 2021; Borges-Gomes *et al.*, 2020). La lignina se puede obtener de diversas fuentes como la madera, el bagazo de caña de azúcar y los residuos de cereales integrales (Haghdan *et al.*, 2016; Borges-Gomes *et al.*, 2020). En la industria alimentaria, se utiliza como agente antioxidante, antibacteriano y biodegradable, además de utilizarse en los empaques (Tao *et al.*, 2020; Bhat *et al.*, 2020). La lignina tiene beneficios a la salud como la prevención de obesidad, diabetes, trombosis, infecciones virales y cáncer. Estos beneficios para la salud se deben a sus propiedades antioxidantes, y a no ser digerida ni absorbida en el sistema digestivo (Fischer *et al.*, 2020; Marcel Moshi *et al.*, 2019; Mahmood *et al.*, 2018; Vinardell & Mitjans, 2017).

### **2.2.3 Tipos de procesamientos que modifican el contenido de fibra dietética**

La fibra dietética ha generado un gran interés por los efectos benéficos a la salud, se ha encontrado que la fibra dietética soluble tiene propiedades fisicoquímicas que confiere efectos biológicos significativos en comparación a la fibra dietética insoluble. Se utilizan procesamientos de modificación en fibra dietética para promover el creciente interés por el desarrollo de alimentos funcionales (Speroni *et al.*, 2020; Bader UI-Ain *et al.*, 2019). Los procesamientos de modificación en fibra dietética incluyen los tratamientos físicos, los tratamientos químicos, los tratamientos biológicos y los tratamientos térmicos.

#### **2.2.3.1 Tratamientos físicos**

Los tratamientos físicos incluyen procesos como la molienda normal, superfina, ultrafina, por bolas y por ultracentrífuga (Bader UI-Ain *et al.*, 2019). Los tratamientos físicos son los más comunes, rentables y de fácil utilización, además que no dañan al medio ambiente debido a su nula generación de residuos (Bender *et al.*, 2020). La velocidad y el tiempo de molienda son las variables más importantes que influyen en el tratamiento físico (Ramachandraiah & Chin, 2016). Los tratamientos físicos rompen el enlace glucosídico de las FD, reducen el tamaño de partícula y aumenta las propiedades de hidratación, disolución, dispersión y adsorción, lo que a su vez conduce a una

redistribución de la composición de la fracción insoluble a la soluble (Liu *et al.*, 2016; Kuljarachanan *et al.*, 2019).

### 2.2.3.2 Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos incluyen procesos ácidos y alcalinos, como los métodos más importantes para modificar la FD debido al cambio en las propiedades estructurales de la FD y modificación en el pH, generando así, la solubilización la fibra dietética (Iqbal *et al.*, 2022; Bader UI Ain *et al.*, 2018). Los tratamientos químicos presentan ventajas por ser simples al utilizar solventes para realizar este tratamiento, además de su bajo costo, sin embargo, dentro de sus desventajas son el generar residuos de los solventes que se utilizan y dañar el medio ambiente, aunado a que este tratamiento destruye la estructura química, y, en consecuencia, se afectan las características fisicoquímicas y fisiológicas de la FDS (Wang *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2017). La proporción de ácidos, la temperatura y el tiempo de reacción son las variables más importantes para mejorar de forma efectiva el incremento de FDS (Amirtham *et al.*, 2022). El principio del tratamiento químico es que los ácidos reducen la cristalinidad de la celulosa y son capaces de romper los puentes de hidrógeno en cadenas moleculares simples (Feng *et al.*, 2017).

### 2.2.3.3 Tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos incluyen procesos como la fermentación enzimática y la fermentación microbiana, este tratamiento no daña al medio ambiente al no generar residuos (Amirtham *et al.*, 2022). La fermentación enzimática utiliza principalmente xilanasas, celulosa y lignina oxidasa, mientras que, la fermentación microbiana utiliza ácidos orgánicos y enzimas que son producidas por microorganismos de forma natural, para reducir el contenido de FDI e incrementar la fibra soluble (Spotti y Campanella, 2020). La fermentación enzimática y microbiana tiene ventajas al ser considerado un tratamiento de alta eficiencia, con condiciones no complejas para su utilización, no generan residuos lo que beneficia al medio ambiente, sin embargo, ambos procesos son complicados en obtener las mejores condiciones de temperatura y pH para llevarlo a cabo, y el tiempo prolongado para obtener resultados (Jagelaviciute *et al.*, 2022). Las

fermentaciones enzimáticas y microbiológicas pueden degradar las paredes celulares y mejorar la composición fisicoquímica y fisiológica de los sustratos utilizados (Liu *et al.*, 2021).

#### 2.2.3.4 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos incluyen procesos como la esterilización, el hervido, la fritura, el calentamiento por microondas y al vacío, el asado, la ebullición, el escaldado, ultra presión, y la extrusión (García-Amezquita *et al.*, 2020). Los tratamientos térmicos presentan ventajas al ser seguros, de bajo costo y mantienen el valor nutritivo de las materias primas, inactiva los anti nutrientes, mejoran propiedades organolépticas, y no genera residuos lo que beneficia al medio ambiente, sin embargo, presenta desventajas como formar compuestos no deseados como la acrilamida y las materias primas pierden frescura (van Boekel *et al.*, 2010). El tiempo y la temperatura son las variables más importantes que influyen en los tratamientos térmicos (Dong *et al.*, 2019). La FDS se genera por el rompimiento de los enlaces glucosídicos, lo que da lugar a la formación cadenas más cortas y simples, con estructuras menos ramificadas (Bader UI Ain *et al.*, 2018).

##### 2.2.3.4.1 Extrusión como proceso térmico y su efecto sobre la fibra dietética

En la industria alimentaria, uno de los procesos térmicos que se utiliza es la extrusión, proceso en el cual los ingredientes mezclados se moldean a través de pequeños orificios llamados troqueles para dar forma al material, denominado extruido (Launay y Lisch, 1983; Berk, 2009). La extrusión es una tecnología cada vez más estudiada y utilizada, debido a las propiedades que ofrece e incluso ha remplazado a otras técnicas tradicionales de procesamiento como el horneado y la fritura. La extrusión utiliza ingredientes provenientes de productos y subproductos de la industria alimentaria, además es un proceso continuo, de altas temperaturas, altas presiones, de corta duración, que reduce la oxidación de lípidos, contaminación microbiana y anti nutrientes, garantiza el valor nutricional y es altamente eficiente al combinar varias operaciones unitarias, como mezclado, amasado, formado, cortado y cocción (Cotacallapa-Sucapuca *et al.*, 2021; Hernández-Nava *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2019; Leonard *et al.*, 2019; Rashid *et*

*al.*, 2015; Dubey & Bhattacharya, 2014; Asare *et al.*, 2012). Los extrusores de alimentos se clasifican térmicamente como formadoras o cocedoras, y geoméricamente como monohusillo (un solo tornillo) o de doble tornillo (Ajita, 2018). En el procesamiento por extrusión, el tipo de extrusor, la velocidad de tornillo, el contenido de humedad del material, la temperatura del proceso, la velocidad de alimentación y el tipo de materia prima, son las variables más importantes para su funcionamiento (Chang & Ng, 2011). La extrusión ocasiona reacciones como la ruptura de pared celular, rompimiento puentes de hidrogeno, y posibilita la unión del agua con los hidroxilos libres, dando resultado propiedades funcionales y reológicas modificadas (Hernández-Nava *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2007; Vasanthan *et al.*, 2002). Por otra parte, la extrusión es capaz de modificar la fibra dietética, ya que se ha reportado que puede incrementar la fracción de fibra soluble, el incremento de FDS se produce por el cizallamiento, en donde se generan cambios en la estructura química al romperse los enlaces glucosídicos y se producen modificaciones en el tamaño de las partículas y se forman fibras de bajo peso molecular (Navale *et al.*, 2016; Björck & Asp, 1983). En la Tabla 3, se presentan algunas investigaciones realizadas por procesamiento por extrusión en materia primas con fibra dietética y las modificaciones en las propiedades alimentarias después del proceso.

Los diferentes tratamientos utilizados en el procesamiento para la modificación de la fibra dietética, generan cambios en las propiedades alimentarias de las materias primas que se utilizan, ya que ocasionan cambios en la composición (fibra dietética total, soluble e insoluble), estructura (tamaño de partícula, densidad aparente), propiedades fisicoquímicas (la capacidad de hinchamiento, la capacidad de absorción de agua, la capacidad de absorción de aceite, el índice de solubilidad en agua, viscosidad) y en la funcionalidad bioactiva (capacidad antioxidante) (Nagy *et al.*, 2020; Bader UI Ain *et al.*, 2019). En la Tabla 4, se muestran los cambios generados en los diversos tratamientos y sus efectos sobre las propiedades alimentarias de algunas materias primas.

**Tabla 3.** Modificación de FD por procesamiento por extrusión

<b>Material</b>	<b>Tipo de extrusor</b>	<b>Factores (Humedad, temperatura, velocidad de tornillo)</b>	<b>Cambios generados</b>	<b>Referencia</b>
Harinas de garbanzo-arroz (30:70)	Doble tornillo	17%, 140°C, 500 rpm	Aumento del 209% en FDS con respecto al control	Ciudad-Mulero <i>et al.</i> , 2022
Harina de cebada y orujo de zanahoria	Doble tornillo	14, 17 y 20%, 170°C, 160 rpm	FDS aumentó de 7.63 a 9.27% FDI disminuyó de 5.24 a 3.71 %	Lotfi Shirazi <i>et al.</i> , 2020
Semillas de lupino ( <i>Lupinus angustifolius</i> )	Doble tornillo	35 y 46%, 100 y 140°C, 300 y 400 rpm	FDS aumento de 9.03 a 90.28 g/kg FDI disminuyo de 898.91 a 828.85 g/kg ISA aumento 4.02-4.47% frente a 5.37-9.64% CAA disminuyo 3.84-3,88 a 3.15-3.73 g/g	Zhong <i>et al.</i> , 2019
Harinas de amaranto y linaza con sémola de maíz	Doble tornillo	22%, 120°C, 272 rpm	FDS aumento 0.6-1.6 a 1.2-1.9% FDI disminuyo 8.9-12.6 a 6.6-11.7% altos valores de CAA e ISA Baja viscosidad	Tobias-Espinoza <i>et al.</i> , 2019
Harina de arroz	Doble tornillo	74:26 p/p, 110°C, 150 rpm	FDT aumento Gránulos de almidón disminuyo	Liu <i>et al.</i> , 2018
Salvado de trigo	Doble tornillo	20, 23 y 26%, 90, 110 y 130°C, 200, 300 y 400 rpm	FDS aumento el 53.5% FDI disminuyó 49.4% ISA aumento un 12%	Rashid <i>et al.</i> , 2015
Orujo de durazno y harina de arroz	Doble tornillo	13.5%, 120°C, 400 rpm	FDS aumento 0.29-2.60 a 1.39-2.57 FDI disminuyo 0.89-5.35 a 2.73-5.06	Sarkar & Choudhury, 2014

Residuo de soja	Doble tornillo	31%, 115°C, 180 rpm	FDS aumentó de 2.05 a 12.65% FDI disminuyó de 60.82 a 50.39%	Jing & Chi, 2013
Salvado de avena ( <i>Avena nuda L.</i> )	Doble tornillo	10, 20 Y 30%, 100, 120, 140 y 160°C, 150 rpm	FDS aumento de 8.9 a 9.5-14.2 g/100 g La CAA aumento de 1.45 a 2.02 ml Viscosidad aumentó	Zhang <i>et al.</i> , 2011

FDT: Fibra dietética total

FDS: Fibra dietética soluble

FDI: Fibra dietética insoluble

ISA: Índice de solubilidad de agua

CAA: Capacidad de absorción de agua

rpm: revoluciones por minuto

**Tabla 4.** Efectos de los procesamientos de modificación de solubilidad en FD

<b>Tratamiento</b>	<b>Materia prima</b>	<b>Efecto sobre las propiedades alimentarias</b>	<b>Referencias</b>
Químico	Agave	FDS aumento, CAA disminuyo por la acetilación y alquilación	Thamarai Selvi <i>et al.</i> , 2023
Biológico – Térmico – Físico	Salvado de maíz	FDS aumento significativamente, mejoro CAA, CAAC, y la actividad antioxidante, disminución la FDI y el peso molecular	Li <i>et al.</i> , 2022
Térmico	Cáscara de pomelo	Incremento de FDS y reducción de FDI, mejoro CAA, CAAC, CAG, disminuyo la viscosidad	Xie <i>et al.</i> , 2022
Biológico	Salvado de arroz	FDS aumento y FDI disminuyo, mejoró significativamente CAA, CAAC, CH, CAC, CAG, disminuyo la viscosidad	Liu <i>et al.</i> , 2021
Biológico – Físico	Orujo de rosa	FDS aumento y FDI disminuyo, mejoró significativamente CAA, CAAC, CH, CAG, CAC	He <i>et al.</i> , 2020
Físico	Cascara de naranja	Disminución del tamaño de partícula, aumento de FDS y disminución de FDI, aumento de densidad aparente, mejoro la CAG	Liu <i>et al.</i> , 2016

FDS: Fibra dietética soluble; FDI: Fibra dietética insoluble; CAA: capacidad de absorción de agua; CAAC: capacidad de absorción de aceite; CH: capacidad de hinchamiento; ISA: índice de solubilidad en agua; CAG: capacidad de absorción de glucosa; CAC: capacidad de absorción de colesterol

### 2.3. Alimentos funcionales ricos en fibra y antioxidantes

Los alimentos ricos en fibra y compuestos antioxidantes se encuentran de forma natural en los cereales integrales (el arroz integral, la avena, la quinoa, el centeno, el salvado, el trigo integral), frutas (las manzanas, los aguacates, los plátanos, las peras, las fresas, las naranjas, las mandarinas, los higos secos, las frambuesas, las ciruelas), legumbres (las lentejas, los frijoles, los garbanzos), semillas (las nueces,

las semillas de girasol, las semillas de chía, las semillas de sésamo, las semillas de linaza, las almendras, los pistaches, los cacahuetes y las pecanas, los dátiles), verduras (las alcachofas, el edamame, las acelgas, las zanahorias, las espinacas, los champiñones, la remolacha, el brócoli, la calabaza, los espárrago, la coliflor) (FAO, 2021; SSA, 2022). Aunado al grupo de verduras, en México encontramos al nopal, que es una fuente rica en fibra, vitaminas, clorofila, minerales, compuestos bioactivos, que por su versatilidad en la gastronomía es una de las verduras mayormente consumidas (IMSS, 2018).

Por lo antes mencionado, el nopal ha generado un gran interés, debido a que cumple con las dos características que buscan los consumidores en los alimentos funcionales, contenido de antioxidantes y la fibra.

### 2.3.1 El nopal

Los nopales pertenecen al reino vegetal, a la familia de las cactáceas y al género *Opuntia*, se reproducen en climas áridos y semiáridos debido a su capacidad para prosperar durante el calor extremo, la sequía severa y los suelos de mala calidad. Los nopales se encuentran ampliamente distribuidos, principalmente en México, América Latina, Sudáfrica y el área del Mediterráneo (Hernández-Becerra *et al.*, 2022; Du Toit *et al.*, 2020; Corona-Cervantes *et al.*, 2022). El género *Opuntia* cuenta con alrededor de 200 especies en el mundo. En México es considerado un producto endémico al localizarse 101 especies. Los nopales se reconocen en tres categorías, nopal forrajero, nopal tuna y nopal verdura (Hernández-Becerra *et al.*, 2022; SADER, 2020; SIAP, 2021b). En México el nopal verdura se localiza en estados como Estado de México, Morelos, Puebla e Hidalgo. La producción de nopal verdura en México es de 891 mil 821 toneladas, es la verdura más consumida con un consumo per cápita de 6.4 kilogramos (SADER, 2019; SIAP, 2019; SADER, 2020). En México las especies mayormente cultivadas de nopal verdura son *Opuntia albicarpa*, *Opuntia ficus-indica*, *Opuntia robusta* y *Opuntia cochenillifera*, siendo *Opuntia ficus-indica* la especie más consumida e investigada y *Opuntia cochenillifera* el menos aprovechado e investigado (Majure *et al.*, 2017).

Los principales componentes de los nopales son los frutos, las flores y las hojas que son llamados los cladodios (Amari *et al.*, 2020). Los cladodios son de forma ovalada o alargada, con una longitud que oscila entre los 30 a 60 cm, dependiendo del agua disponible que tenga en su crecimiento, tienen espinas grandes y algunas más pequeñas que protegen a los cladodios del reflejo de la luz, la deshidratación y la depredación de los insectos (Humphries *et al.*, 2022).

### **2.3.2 Usos del nopal**

Los cladodios de nopal se emplean en la medicina tradicional mexicana en estado sólido y en extractos para combatir las enfermedades hipoglucémicas, la reducción de peso y para reducir los niveles de los triglicéridos séricos en la sangre, además para el tratamiento de quemaduras, heridas, edemas, reumatismo, y como antiinflamatorios y antivirales (Hernández-Becerra *et al.*, 2022; El-Mostafa *et al.*, 2014). En la industria textil, se han desarrollado telas vegetales a base de nopal, para la elaboración de diferentes prendas de vestir, recubrimiento de muebles y en la industria automotriz como vestiduras (INFOBAE, 2019). En la nutrición animal, los cladodios maduros (más de 30 días), se emplea para alimentar ganado caprino, bovino, ovino y porcino, así como aves de corral y conejos, como fuente alternativa de forraje muy útil en tiempos de sequía (SADER, 2020; SIAP, 2019; INIFAP, 2008; Rodríguez-García *et al.*, 2007).

En el área alimentaria los cladodios de nopal resultan de gran interés, dado que es tecnológicamente posible su transformación y puede ser económicamente viable y rentable, los cladodios de nopal son modificados por métodos físicos, químicos y biotecnológicos (Martínez-Albino & Gordillo-Mejía, 2022). Los métodos físicos utilizan la temperatura para transformar y conservar los cladodios de nopal, incluyen procesos de modificación como la esterilización, el congelamiento, secado, la deshidratación, la extrusión, y las tecnologías emergentes como pulsos eléctricos, y la alta presión, siendo la deshidratación el más usado en la industria del procesamiento de modificación del nopal, al obtener polvos (Martínez-Albino & Gordillo-Mejía, 2022; Ekechukwu, 1999). Los polvos del nopal pueden usarse para elaborar tortillas, snacks, productos de panadería, suplementos alimenticios. Los

métodos químicos utilizan conservadores, acidificantes o aditivos como el azúcar, la sal, se obtienen productos como nopales en salmuera o escabeche, salsas, dulces, edulcorantes. Los métodos bioquímicos comprenden la fermentación ácida y láctica, para obtener jugos y bebidas (Martínez-Albino & Gordillo-Mejía, 2022; Saenz *et al.*, 2022)

En México, los cladodios se consumen regularmente en su primera etapa de desarrollo (12 a 20 días) cuando se considera joven y fresco, en diversos platillos típicos (Hernández-Urbiola *et al.*, 2011; Kudanga & Aruwa, 2021; Saenz *et al.*, 2022). Debido a su alto contenido de humedad, los cladodios de nopal tienen corta vida de anaquel, por lo que se han propuesto diversas tecnologías de preservación, siendo la obtención de polvos la más utilizada (Contreras- Padilla *et al.*, 2012; Torres-Ponce *et al.*, 2015).

### 2.3.3 El nopal como fuente de compuestos bioactivos

Los cladodios son un alimento con alto contenido de fibra dietética, vitaminas, minerales, compuestos fitoquímicos, clorofila, aminoácidos entre esenciales y no esenciales (Gomes *et al.*, 2018; Rivera Cañón *et al.*, 2021; Perucini-Avendaño *et al.*, 2021). Los cladodios de la especie más investigada y consumida (*Opuntia ficus-indica*) y la especie menos investigada y aprovechada (*Opuntia cochenillifera* Karst.) muestra similitudes en su composición química (Tabla 5).

**Tabla 5.** Composición nutricional por cada 100 g de porción de cladodios

<b>Compuesto</b>	<i>Opuntia ficus-indica</i> (IMSS, 2019; Bautista-Justo <i>et al.</i> , 2010)	<i>Opuntia cochenillifera</i> Karst. (USDA, 2018)
<b>Agua (g)</b>	93.78 - 94.12	93.7 - 94.5
<b>Calorías (kcal)</b>	10.25	16
<b>Carbohidratos (g)</b>	3.25	3.33
<b>Azúcares totales (g)</b>	0.99 - 1.02	1.15
<b>Proteína (g)</b>	1.16 - 1.32	1.02 - 1.58
<b>Lípidos (g)</b>	0.09 - 0.17	0.05 - 0.13
<b>Fibra dietética total (g)</b>	1.19 - 2.23	2 - 2.6
<b>Cenizas (g)</b>	0.81 - 1.14	0.9 - 1.4

<b>Calcio (mg)</b>	95 - 141	118 - 211
<b>Hierro (mg)</b>	0.51	0.35 - 0.85
<b>Magnesio (mg)</b>	44.72	45 - 61
<b>Fósforo (mg)</b>	13.76	14 - 19
<b>Potasio (mg)</b>	221	170 - 300
<b>Sodio (mg)</b>	18	18 - 25
<b>Zinc (mg)</b>	0.21	0.17 - 0.31
<b>Cobre (mg)</b>	0.04	0.032 - 0.067
<b>Manganeso</b>	0.40	0.38 - 0.54
<b>Selenio (µg)</b>	0.6	0.7
<b>Ácido ascórbico (mg)</b>	8	4.4 -17.6
<b>Tiamina (mg)</b>	0.01	0.009 - 0.016
<b>Riboflavina (mg)</b>	0.03	0.038 - 0.046
<b>Niacina (mg)</b>	0.35	0.23 - 0.59
<b>Ácido pantoténico</b>	0.15	0.13 - 0.18
<b>Vitamina B6</b>	0.06	0.044 - 0.096
<b>Vitamina A</b>	19.78	23
<b>Beta-caroteno</b>	215	51 - 477
<b>Isoleucina (g)</b>	0.06	0.05
<b>Leucina (g)</b>	0.08	0.07
<b>Lisina (g)</b>	0.07	0.06
<b>Metionina (g)</b>	0.01	0.02
<b>Fenilalanina (g)</b>	0.09	0.05
<b>Treonina (g)</b>	0.08	0.03
<b>Valina (g)</b>	0.07	0.06

---

mg: miligramo      g: gramo      kcal: kilocalorías      µg: microgramo

Culturalmente la especie *Opuntia ficus-indica* ha sido la más investigada y consumida por su contenido de fibra dietética, dejando a un lado a *Opuntia cochenillifera* Karst., cuando ambas especies no presentan diferencias significativas en el contenido de la composición alimentaria de manera general (IMSS, 2019; Bautista-Justo *et al.*, 2010; USDA, 2018).

La composición en las propiedades alimentarias de los cladodios depende de los factores del suelo, las condiciones climáticas, la temporada de crecimiento, la especie y la edad del cladodio (FAO, 2023; CONABIO, 2020). Los cladodios jóvenes suelen presentar altos contenidos de humedad, mientras que, al madurar, el contenido de humedad disminuye. Otro compuesto que disminuye es el contenido

de proteína y fibra soluble, mientras, que el contenido de carbohidratos simples, minerales en ceniza, azúcares totales, fibra insoluble y aminoácidos (histidina, leucina, fenilalanina, treonina, isoleucina y lisina), aumenta (Hernández-Urbiola *et al.*, 2011; Figueroa-Pérez *et al.*, 2018; Vargas-Solano *et al.*, 2022). Es importante señalar, la presencia de anti nutrientes presentes en los cladodios maduros, oxalatos, taninos y fitatos, principalmente (Dubeux *et al.*, 2021; Reda & Atsbha, 2019). Un compuesto poco estimado son los metabolitos secundarios, que está determinado por varios factores, entre ellos la edad, la variedad y la nutrición del suelo (Hernández-Becerra *et al.*, 2022)

### 2.3.3.1 Propiedades nutraceuticas y efectos biológicos del nopal

Los metabolitos secundarios, se definen como pequeñas moléculas orgánicas producidas por un organismo que no son esenciales para su crecimiento, desarrollo y reproducción, tienen alto potencial antioxidante y son una herramienta clave para atenuar el daño por estrés oxidativo que causa diversas enfermedades crónicas (Twaij & Hasan, 2022; Sharifi-Rad *et al.*, 2020). Los metabolitos secundarios, incluyen a los fenoles, terpenos, esteroides, alcaloides y flavonoides (Pang *et al.*, 2021). Actualmente, existe un gran interés en los nopales, debido a que se ha reportado que en el genotipo *Opuntia ficus indica* se produce quercetina, kaempferol, isorhamnetina, dihidroflavonoles, flavanonas y flavanoles (Chavez-Santoscoy *et al.*, 2009), y son ricos en compuestos polifenólicos y ácidos fenólicos. Los ácidos fenólicos y flavonoides presentes en los cladodios son el ácido ferúlico, ácido protocatecúico, ácido cumárico, ácido gálico, quercetina 3-metil éter, narcisina, isorhamnetina, rutina y apigenina (Castañeda-Arriaga *et al.*, 2021). Los cladodios de la especie *Opuntia cochenillifera* Karst., posee metabolitos secundarios similares a los de *Opuntia ficus- indica*, ácido gálico, ácido ferúlico, ácido clorogénico, ácido cumárico, ácido siríngico, ácido neoclorogénico, sin embargo, existe escasa información del contenido de sus compuestos bioactivos (Fabela-Illescas *et al.*, 2022). La presencia de estos compuestos depende de su genotipo y estado de madurez (Burret *et al.*, 1982).

Los cladodios se consideran como un producto con alto valor nutrimental, así como una fuente de antioxidantes y compuestos activos con actividad antiulcerogénico, anticancerígeno, neuroprotector y hepatoprotector (Castañeda-Arriaga *et al.*, 2021). Es por ello que se han realizado investigaciones para conocer los efectos biológicos de los cladodios. Ranaivo *et al.*, (2022), usaron pan con alto contenido de fibra dietética de nopal, en 45 personas de 18 a 70 años con riesgos cardiometabólicos, y evaluaron los impactos en la composición y funcionalidad del microbiota intestinal, observaron, disminución de colesterol total, colesterol LDL, insulina y modificó significativamente la composición de la microbiota intestinal. Sánchez-Tapia *et al.*, (2017), alimentaron a ratas Wistar macho de 6 semanas de edad con nopal (*Opuntia ficus indica*) durante 7 meses, observaron que el consumo de nopal modifica la microbiota intestinal mejorando la integridad del epitelio intestinal y reduciendo los niveles de colesterol y glucosa en sangre. Moran-Ramos *et al.*, (2017), alimentaron a ratas macho Sprague-Dawley por 6 semanas, con dietas formuladas para proporcionar 4% de fibra dietética de nopal (*Opuntia ficus indica*), y observaron, reducción en la inflamación intestinal y estrés oxidativo, además de cambios en la adiposidad, hipertrofia adipocitaria y niveles de triglicéridos hepáticos por dietas altas en calorías, lo que produjo modificaciones en la fisiología intestinal, en la composición de la microbiota intestinal al aumentar los SCFA y disminuir la betaína sérica. López-Romero *et al.*, (2014), evaluaron el índice glucémico y el efecto del nopal (*Opuntia ficus indica*) sobre la glucemia postprandial tras el consumo de dos desayunos diferentes en pacientes del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición, se observó que, el nopal tiene bajos índices glucémicos, insulínicos y podría recomendarse a pacientes con diabetes tipo 2, debido a que tuvo efectos anti hiperglucémicos y anti hiperinsulinémicos y previno los picos postprandiales de glucosa en sangre, además, aumentó la actividad antioxidante en tanto en personas sanas como en pacientes con diabetes tipo 2.

Por lo antes mencionado, el ritmo acelerado de la vida moderna con dietas poco saludables, tienen como resultado el desarrollo de enfermedades no transmisibles a nivel mundial, nacional y regional, por lo que se ha propuesto un patrón de alimentación con dietas saludables sustentables, aunado al creciente interés por

parte de los consumidores sobre los aspectos nutricionales de los alimentos que consumen, por el vínculo entre la alimentación y la salud, esta combinación ha generado un creciente interés en los alimentos funcionales por su efecto benéfico y nutricional a la salud, esta tendencia mundial en el consumo de alimentos funcionales acentúa el interés en productos con fortificación de ingredientes como los antioxidantes y la fibra. El valor nutricional de la fibra se ha relacionado principalmente en la fracción soluble, al brindar efectos fisiológicos benéficos a la salud, una fuente con alto contenido en fibra es el nopal el cual es un producto endémico de México y es altamente consumido por su versatilidad en la gastronomía y fácil de procesar, sin embargo, no todas las especies de nopal han sido estudiadas y procesadas como es el caso de *Opuntia cochenillifera* Karst., así como en un estado maduro de los cladodios, en este sentido, el procesamiento por extrusión es una tecnología que modifica las propiedades de la fibra, generando el interés de la industria de los alimentos.

## CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la alimentación es uno de los principales factores de riesgo asociados a la creciente prevalencia y mortalidad por enfermedades no transmisibles en México y el mundo. Los riegos alimentarios de mayor impacto en la mortalidad y prevalencia de ENT son dietas altas en sodio, en azúcares, en grasas saturadas y en calorías, y bajas en fibra dietética, antioxidantes, índice glucémico y contenido de ácidos grasos saturados, por lo que se ha propuesto la integración de alimentos a la dieta que contribuyan a reducir este impacto. Se ha realizado una búsqueda de alimentos que contribuyen a estos cambios en la dieta, con importantes estrategias dirigidas a prevenir la incidencia de ENT. El nopal es un alimento que, por sus propiedades, específicamente el contenido de fibra dietética, ha sido descrito como un alimento funcional, específicamente *Opuntia ficus-indica* es la especie mejor descrita y sus propiedades han sido reconocidas, sin embargo, la biodiversidad en México permite la disponibilidad de otras especies y variedades de nopal poco conocidas y utilizadas en la dieta, una de estas especies es *Opuntia cochenillifera* Karst. La descripción de las propiedades de estos alimentos puede ofrecer alternativas en el fortalecimiento de la dieta y un mejor uso de recursos biológicos regionales. Debido a esto, el presente trabajo aborda la caracterización de cladodios maduros de dos especies de nopal (*Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica*) y evaluar el efecto del procesamiento por extrusión sobre sus propiedades alimentarias.

## CAPÍTULO 4. OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo general

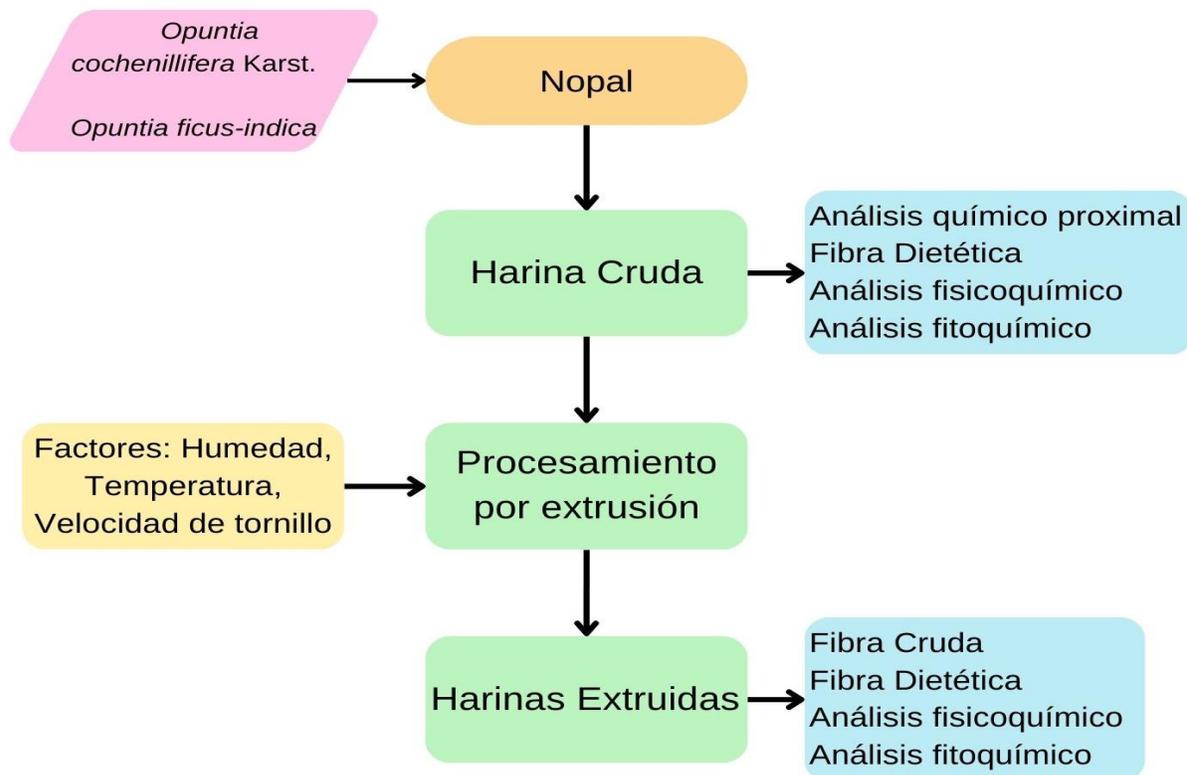
- ♥ Evaluar el efecto del procesamiento por extrusión sobre las propiedades alimentarias de polvos de cladodios maduros de dos especies de nopal (*Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica*)

### 4.2 Objetivos específicos

- ♥ Caracterizar los polvos crudos de cladodios maduros de *Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica* por métodos químicos, fisicoquímicos y fitoquímicos
- ♥ Procesar por extrusión los polvos de cladodios maduros de *Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica* considerando las variables de humedad, temperatura y velocidad del tornillo
- ♥ Caracterizar los polvos extruidos de *Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica* por métodos químicos, fisicoquímicos y fitoquímicos
- ♥ Analizar los resultados obtenidos de los polvos extruidos y estimar el efecto del procesamiento por extrusión sobre las propiedades alimentarias con respecto a los polvos crudos de cladodios maduros de *Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica*

## CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 6 se muestra un diagrama general de la metodología.



**Figura 6.** Diagrama general de la metodología

**Fuente:** Elaboración propia

### 5.1 Obtención de polvos de nopal

Los cladodios maduros (más de 70 días desde su brote) de nopal de la especie *Opuntia cochenillifera* Karst. (OC) fueron cosechados manualmente en el municipio de Tulancingo de Bravo, en el estado de Hidalgo, México (20°05'09" latitud norte, 98°21'48" longitud oeste, 2157 m s. n. m.), mientras que el nopal de la especie *Opuntia ficus-indica* (OF) fue cosechado en el campo experimental de Agro-Hidalgo ubicado en el municipio de Tlahuelilpan, en el estado de Hidalgo, México (20°07'47" latitud norte, 99°13'43" longitud oeste, 2040 m s. n. m.). Los cladodios de ambas especies fueron lavados con agua destilada y desinfectados con hipoclorito de sodio al 10% para eliminar microorganismos de acuerdo al método de Contreras-Padilla

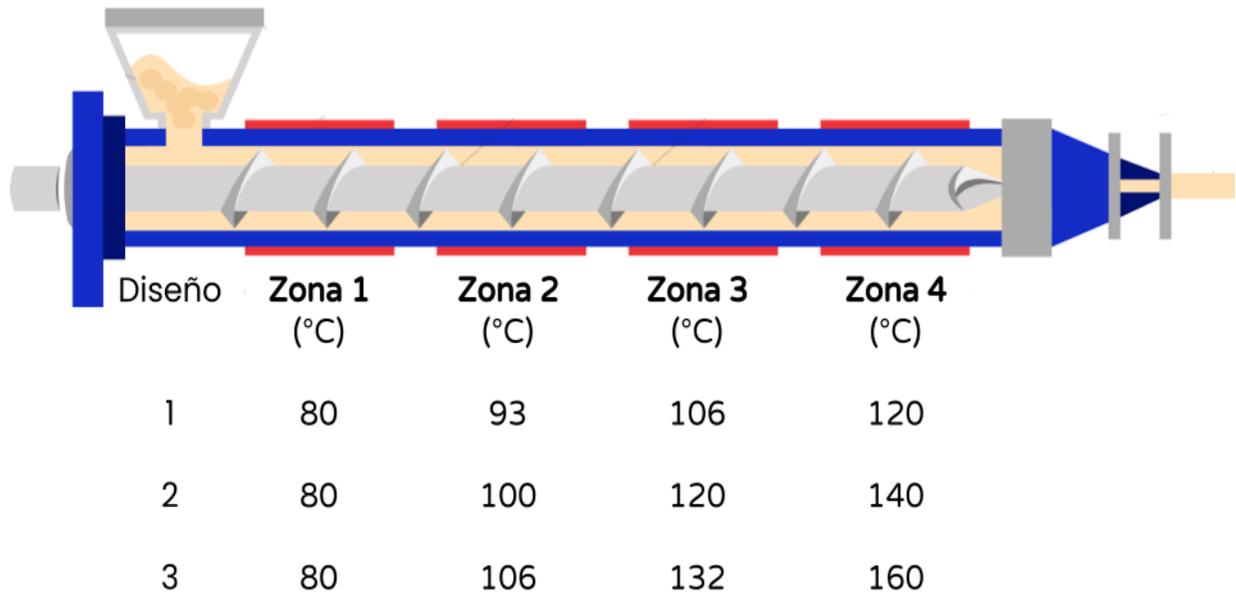
*et al.*, (2012), se les removió las espinas manualmente y fueron cortados en cuadros de 7mm x 7mm, para ser deshidratados en horno de convección a 50 °C, durante 48 h. Las muestras deshidratadas de cada especie de nopal fueron sometidas a un proceso de molienda, en un molino de cuchillas (*Nutri Bullet*, 900W, Pro motor, CA, EE. UU.), posteriormente se tamizaron en malla #80. Ambos polvos se pesaron, para determinar rendimientos y se almacenaron en bolsas de polietileno con cierre hermético a temperatura ambiente y en oscuridad hasta su análisis y procesamiento.

## 5.2 Extrusión de polvos de nopal

Para el proceso de extrusión de los polvos de cladodios maduros de nopal se utilizó un diseño factorial 2x2x3, utilizando dos variedades de nopal, dos condiciones de humedad y tres temperaturas de extrusión (Tabla 6).

El polvo de nopal se procesó en un extrusor de un solo tornillo (*Brabender 19/25DN*, Duisburg, Alemania), provisto de un barril con estriado interno y 3 zonas de calentamiento independientes. Se utilizó un tornillo con una relación de compresión 3:1, a una velocidad de 180 rpm y una velocidad del alimentador de 30 rpm. Los materiales se acondicionaron a un contenido de humedad de 20% y 26%, se utilizó un matriz de salida circular con un orificio de 3 mm, la temperatura de la matriz de salida se varió de acuerdo al diseño experimental (120, 140 y 160 °C) en matriz de salida (Figura 7). Los materiales extruidos se enfriaron a temperatura ambiente, para después medir el índice de expansión (IE) utilizando la ecuación 1, posteriormente, una fracción del material extruido se sometió a molienda y tamizado en malla #80 para obtener los polvos de los extruidos, las cuales fueron almacenadas en bolsas de plástico a temperatura ambiente y en oscuridad hasta su análisis correspondiente.

$$IE = \frac{\text{Diámetro del producto extruido}}{\text{Diámetro del dado de salida}} \quad \text{Ecuación 1}$$



**Figura 7.** Representación esquemática de las zonas de barril de un extrusor  
**Modificado de:** [https://www.sulplast.com.br/pt\\_BR/tecnologia-e-processos/extrusao](https://www.sulplast.com.br/pt_BR/tecnologia-e-processos/extrusao)

De acuerdo al diseño experimental planteado 2x3, se obtendrán 12 tratamientos que serán nombrados de acuerdo a lo indicado en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Tratamientos resultantes del diseño experimental

Tratamiento	Temperatura (°C)	Humedad (%)
T1-OC	120	20
T1-OF		26
T2-OC	140	20
T2-OF		26
T3-OC	160	20
T3-OF		26
T4-OC	160	20
T4-OF		26
T5-OC	160	20
T5-OF		26
T6-OC	160	20
T6-OF		26

OC: *Opuntia cochenillifera* Karst.

OF: *Opuntia ficus-indica*

### **5.3 Análisis químico proximal**

La composición químico proximal de los polvos crudos (PC) y polvos extruidos (PE) de OC y OF se determinó siguiendo la metodología descrita por la *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC, 2000), para cuantificar humedad (930.15), proteína cruda (960.52), extracto etéreo (963.15), fibra cruda (962.09) y cenizas (923.03), respectivamente.

### **5.4 Fibra dietética**

La fibra dietética total, soluble e insoluble se determinó de acuerdo con métodos enzimático-gravimétricos, bajo los métodos 985.29, 993.19 y 991.42 (AOAC, 2012), con un kit de análisis de fibra dietética (*Megazyme K-TDFR, Wicklow, Irlanda*). Los resultados se expresaron en porcentaje

### **5.5 Análisis fisicoquímico**

En la caracterización fisicoquímica de los PC y PE se determinó el pH, la densidad aparente, la capacidad de absorción de aceite, la capacidad de absorción de agua, el índice de solubilidad en agua, los sólidos solubles totales, el color y la viscosidad.

#### **5.5.1 pH**

El pH se determinó basándose en el método 981.12 (AOAC, 2010), utilizando un potenciómetro (HANNA, HI 2211, México)

#### **5.5.2 Densidad aparente**

La densidad aparente (DA) se determinó siguiendo el método descrito por Amadou, (2017), expresando la densidad en kg/m<sup>3</sup>.

#### **5.5.3 Capacidad de absorción de aceite**

La capacidad de absorción de aceite (CAAc), se determinó siguiendo el método descrito por Brishti *et al.*, (2017), empleando la ecuación 2.

$$CAAc = \left( \frac{\textit{peso del sedimento}}{\textit{peso de la harina en base seca}} \right) \text{ Ecuación 2}$$

#### 5.5.4 Capacidad de absorción de agua

La capacidad de absorción de agua (CAA), se determinó siguiendo el método descrito por Brishti *et al.*, (2017), usando la ecuación 3.

$$CAA = \left( \frac{\textit{peso del sedimento}}{\textit{peso de la harina en base seca}} \right) \text{ Ecuación 3}$$

#### 5.5.5 Índice de solubilidad en agua

El índice de solubilidad en agua (ISA), se determinó siguiendo el método descrito por Wójtowicz & Mościcki (2014), utilizando la ecuación 4.

$$\%ISA = \left( \frac{\textit{peso de los sólidos disueltos en el sobrenadante}}{\textit{peso de la harina en base seca}} \right) \times 100 \text{ Ecuación 4}$$

#### 5.5.6 Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles totales (SST), se determinaron según el método 932.12 (AOAC, 1990), utilizando un refractómetro digital (Atago, PAL-3810, China) los resultados se expresaron en °Brix.

#### 5.5.7 Color

El color se determinó de acuerdo al método descrito por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE-Lab, 2007). Se tomaron los valores con las coordenadas de luminosidad ( $L^*$ ), tendencia rojo/verde ( $a^*$ ) y tendencia azul/amarillo ( $b^*$ ) y los datos se expresaron como diferencia total de color ( $\Delta E^*$ ), utilizando la ecuación 5.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \text{ Ecuación 5}$$

Dónde:

$\Delta L^* = L^*$  de la PC –  $L^*$  del tratamiento

$\Delta a^* = a^*$  de la PC –  $a^*$  del tratamiento

$\Delta b^* = b^*$  de la PC –  $b^*$  del tratamiento

### **5.5.8 Viscosidad**

La viscosidad, se determinó con el *Rapid Visco Analyser* (RVA) de acuerdo a lo descrito por Young (2007) para hidrocoloides, se utilizó un intervalo de temperatura de 80 a 20°C por 70 minutos, a 160 rpm. Se construyó un perfil viscoamilográfico en un sistema dinámico, que determinó el valor de viscosidad final. Los resultados se expresaron en centipoise (cps).

## **5.6 Extracción de compuestos bioactivos**

### **5.6.1 Preparación de extractos**

La extracción de compuestos activos en los polvos crudos y extruidos de cada especie se realizó con etanol al 40% de acuerdo al método de Díaz-Batalla *et al.*, (2018a).

### **5.6.2 Cuantificación de fenoles totales**

La determinación del contenido de fenoles totales en los extractos se realizó según el método de Folin-Ciocalteu descrito por Singleton *et al.*, (1999). Las muestras se leyeron a una longitud de onda de 700 nm en un espectrofotómetro (*Genesys 10S, Thermo Scientific, MA, EE. UU.*). Se utilizó ácido gálico para la construcción de la curva estándar. Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de polvo (mg EAG/g) en peso seco.

### **5.6.3 Cuantificación de flavonoides totales**

Los flavonoides totales se evaluaron en los extractos siguiendo el método propuesto por Dowd (1959). Las muestras se leyeron a una longitud de onda de 430 nm en un espectrofotómetro (*Genesys 10S, Thermo Scientific, MA, EE. UU.*). Se utilizó quercetina para la construcción de la curva estándar. Los resultados se expresaron

como miligramos equivalentes de quercetina por gramo de polvo (mg EQ/g) en peso seco.

#### 5.6.4 Captación de radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH)

La captación de radicales DPPH se determinó en los extractos según lo descrito por Brand-Williams *et al.*, (1995). Las muestras se leyeron a una longitud de onda de 515 nm en un espectrofotómetro (*Genesys 10S, Thermo Scientific, MA, EE. UU.*). Se utilizó ácido ascórbico para la construcción de la curva estándar. Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido ascórbico por gramo de polvo (mg EAG/g) en peso seco.

#### 5.7 Cuantificación de clorofila total

La determinación de la clorofila total se evaluó por el método espectrofotométrico descrito por Lichtenthaler (1987) y basado en el método 942.04 (AOAC, 1970). Las muestras se leyeron a una longitud de onda de 663 nm y 646 nm en un espectrofotómetro (*Genesys 10S, Thermo Scientific, MA, EE. UU.*). Los resultados se expresaron en (mg/100g), utilizando la ecuación 6.

$$\text{Clorofila total} = ((8.05) \times (A 663)) + ((20.2) \times (A 646)) \text{ Ecuación 6}$$

Dónde: A663 Y A646 = absorbancia a 663 y 646 nm según corresponda

#### 5.8 Análisis estadístico

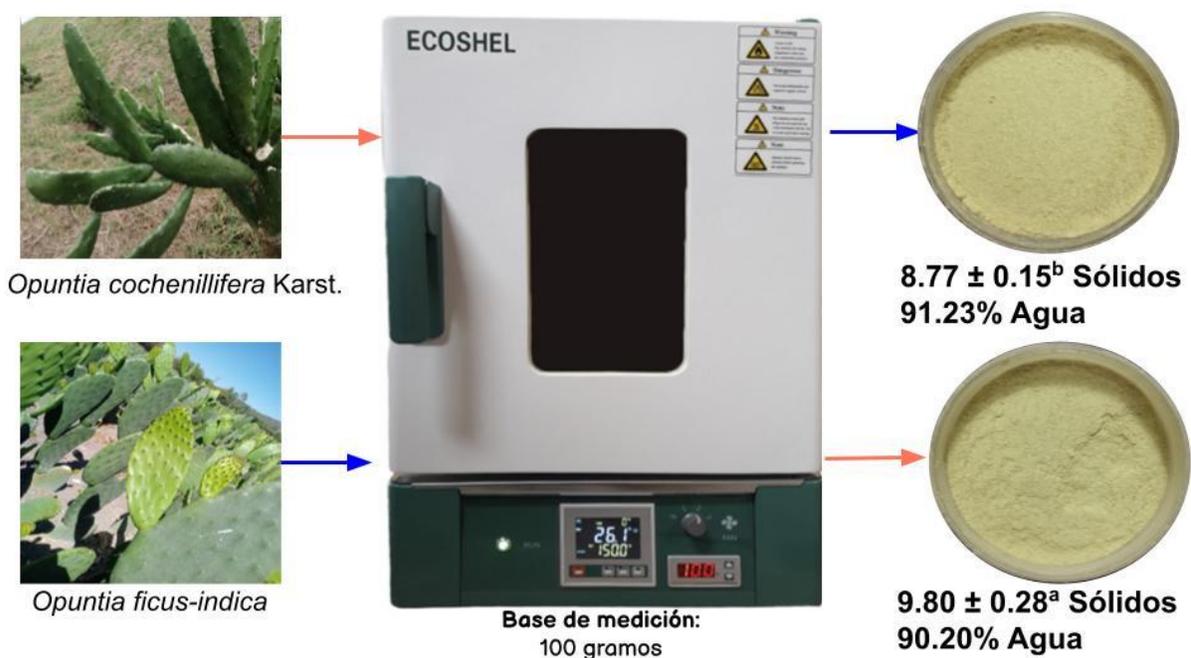
Para el análisis estadístico se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías utilizando el software IBM® SPSS *Statistics* versión 27.0, para encontrar diferencias entre los tratamientos se utilizó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey con un nivel de confianza del 95%. Los gráficos se construyeron utilizando los softwares *Statistica* versión 10.0 y *SigmaPlot* versión 14.5.

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Evaluación de las propiedades alimentarias de los polvos crudos de nopal

#### 6.1.1 Rendimiento de obtención de los polvos

En la Figura 8 se presenta el porcentaje de rendimiento de obtención de los polvos crudos (PC) de nopal en donde, se obtuvo un rendimiento de 9.8% para la PC de *Opuntia ficus-indica* (OF) y 8.77% para la PC de *Opuntia cochenillifera* Karst. (OC). Los rendimientos obtenidos en este trabajo, son similares a lo reportado por Escamilla-Ayala (2021) y Cachay-Morante *et al.*, (2022), en polvos de OF por deshidratación solar por 6 h (8.3%) y deshidratadas en estufa a 60 °C por 48 h (7.5%), respectivamente. Las variaciones en los porcentajes de rendimiento pueden atribuirse al contenido de agua, el genotipo, la pérdida de sólidos en el proceso de molienda y tamizado (Bolade, 2009).



**Figura 8.** Rendimiento de obtención de polvos crudos en nopal  
**Fuente:** Elaboración propia

### 6.1.2 Caracterización químico proximal de polvos de nopal

La caracterización químico proximal de los polvos crudos (PC) de nopal (OC y OF) se presenta en la Tabla 7. Se puede observar que el porcentaje de humedad fue de 5.51 y 6.47% para OC y OF, respectivamente, encontrándose dentro del intervalo reportado previamente por Rives Castillo *et al.*, (2021), Uriarte-Frías *et al.*, (2021) y Guevara-Arauz *et al.*, (2015), en polvos de OF, cuyos valores reportados fueron de 5.12, 6.34 y 6.55%, respectivamente. Por otra parte, de acuerdo con la NOM-247-SSA1-2008, el contenido de humedad de los PC de nopal se considera adecuado para su almacenamiento y conservación, debido a que un contenido por debajo del 10% contribuye a disminuir la presencia de microorganismos, las diferencias en los valores de humedad obtenidos en este estudio pueden deberse a las condiciones de procesamiento durante el secado (FAO, 2006), no obstante se ha reportado que el contenido de humedad también está influenciado por la disponibilidad de agua durante el cultivo y el genotipo analizado (Maki-Díaz *et al.*, 2015). Cabe mencionar que no se realizó la trazabilidad de los cladodios de nopal utilizados en este estudio.

**Tabla 7.** Composición químico proximal de polvos crudos de nopal

	<i>Opuntia cochenillifera</i> Karst.	<i>Opuntia ficus-indica</i>
<b>Humedad (%)</b>	5.51 ± 0.05 <sup>a</sup>	6.47 ± 0.05 <sup>b</sup>
<b>Proteína cruda* (%)</b>	6.88 ± 0.05 <sup>b</sup>	7.83 ± 0.03 <sup>a</sup>
<b>Extracto etéreo* (%)</b>	1.28 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.22 ± 0.03 <sup>b</sup>
<b>Cenizas* (%)</b>	29.27 ± 0.05 <sup>a</sup>	22.75 ± 0.03 <sup>b</sup>
<b>Fibra cruda* (%)</b>	12.58 ± 0.06 <sup>b</sup>	12.89 ± 0.02 <sup>a</sup>
<b>ELN* (%)</b>	49.99 ± 0.15 <sup>b</sup>	55.31 ± 0.03 <sup>a</sup>
<b>Calorías* (kcal/100g)</b>	238.96 ± 0.46 <sup>b</sup>	263.52 ± 0.20 <sup>a</sup>

ELN: Extracto Libre de Nitrógeno

\*Base seca

<sup>a,b,c</sup> Indican diferencias significativas entre especies de acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ )

Media ± D.E (n=3)

En cuanto al contenido de proteína, los PC mostraron diferencias estadísticas significativas, debido a que los valores obtenidos fueron de 6.88 y 7.83% para OC y OF, respectivamente. Estos valores son similares a los reportados previamente por Nabil *et al.*, (2020), quienes obtuvieron valores de proteína de 8.76% para PC de OF, por su parte, Fabela-Illescas *et al.*, (2022) reportaron un contenido de proteína de 6.44 % para PC de OC. Estos autores mencionan que el contenido de proteína puede estar relacionado con el genotipo, mientras que otros autores lo atribuyen a la edad del cladodio y las condiciones climáticas (Mounir *et al.*, 2020). Los resultados obtenidos en el contenido de extracto etéreo muestran que los PC de nopal (OC y OF) tuvieron el 1.2%, que está dentro de lo reportado (1.15 y 1.50%) en PC de OF (Rodiles-López *et al.*, 2019 y Albergamo *et al.*, 2022). Las diferencias en el contenido de extracto etéreo podrían atribuirse al genotipo analizado, además de que otros autores lo han atribuido a la madurez de los cladodios, ya que este parámetro disminuye conforme madura el nopal (Contreras-Padilla *et al.*, 2012). Por otra parte, el contenido de cenizas en el PC de OC (29.27%) fue superior al PC de OF (22.75%), los datos obtenidos en el contenido de ceniza de los PC en este estudio, se encuentran dentro del intervalo reportado por Guevara-Arauz *et al.*, (2015) y Samia El-Safy, (2013) con 19.9 y 27%, respectivamente, en PC de OF. Autores han atribuido el alto contenido de cenizas en los PC de nopal, a la edad y madurez del cladodio, el cual se relaciona directamente a un alto contenido de minerales como magnesio, calcio y fósforo (Chávez-Sifontes & Domine, 2013). En cuanto al contenido de fibra cruda los PC de nopal mostraron diferencias estadísticas significativas, debido a que el PC de OF (12.89%), presentó un mayor contenido que el PC de OC (12.58%). Los datos obtenidos en este estudio son similares a lo reportado por autores en PC de OF con un intervalo de 12.07 a 14.31% (Diego-Zarate *et al.*, 2021; Rives-Castillo *et al.*, 2021). De acuerdo con Torres-Ponce *et al.*, (2015) el nopal es una buena fuente de fibra debido a que su contenido de fibra cruda oscila de 12 a 18% en peso seco. Las diferencias que se observaron en los datos de este estudio con los reportes previos de diversos autores en PC de nopal pueden atribuirse a la especie analizada, otros autores hacen referencia a factores como las condiciones de desarrollo del nopal y su estado de madurez de

los cladodios (FAO, 2018; Contreras-Padilla *et al.*, 2012), debido a que gran parte de los autores trabajan con cladodios jóvenes, mientras que los resultados en el presente estudio corresponden a cladodios maduros de más de 70 días.

### 6.1.3 Caracterización de fibra dietética de polvos de nopal

En la Tabla 8 se muestran los datos obtenidos de la caracterización de fibra dietética total, soluble e insoluble. En relación al contenido de fibra dietética de los PC de nopal, se observaron diferencias estadísticamente significativas en la fracción soluble, insoluble y total en ambas especies. El PC de OC presentó la mayor cantidad de fibra insoluble y total. Los datos obtenidos en este estudio son inferiores (9.7 y 10% en fibra soluble e insoluble, respectivamente) a lo reportado previamente por Mendoza-Ávila *et al.*, (2020) en PC de OF con cladodios maduros, sin embargo, son superiores (1.49 y 16.92% en fibra soluble e insoluble, respectivamente) a lo reportado por Fabela-Illescas *et al.*, (2022) en PC de cladodios maduros de OC. Las diferencias que se observaron en este estudio con lo reportado por los autores podrían atribuirse al genotipo analizado y al estado de madurez de la materia prima (Williams *et al.*, 2019).

**Tabla 8.** Composición de fibra dietética de polvos crudos de nopal

	<i>Opuntia cochenillifera</i> Karst.	<i>Opuntia ficus-indica</i>
<b>Fibra Dietética Total*</b> (%)	41.90 ± 0.01 <sup>a</sup>	38.82 ± 0.01 <sup>b</sup>
<b>Fibra Dietética Soluble*</b> (%)	4.99 ± 0.01 <sup>b</sup>	5.84 ± 0.01 <sup>a</sup>
<b>Fibra Dietética Insoluble*</b> (%)	36.91 ± 0.01 <sup>a</sup>	32.98 ± 0.01 <sup>b</sup>

\*Base seca

<sup>a,b,c</sup> Indican diferencias significativas entre especies de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

Media ± D.E (n=3)

### 6.1.4 Caracterización fisicoquímica de polvos de nopal

En la Tabla 9 se muestran las características fisicoquímicas de los polvos crudos de nopal. En relación al pH de los polvos crudos de nopal se observó que las especies

OC y OF presentaron diferencias estadísticas significativas, el pH (5.15) del PC de OC fue más alto que el PC de OF (5.06). Los valores de pH obtenidos en este estudio, se encuentran dentro de los valores reportados (4-7) para muestras de polvos de OC y (5.5) para muestras de polvos de OF, por otros autores (Sáenz-Hernández, 2006; Nabil *et al.*, 2020; Castillo *et al.*, 2013). Las variaciones de pH en los PC, de acuerdo con reportes previos, puede deberse a la especie, a la madurez de los cladodios y la zona de cultivo (Mounir *et al.*, 2020; Flores-Hernández *et al.*, 2004).

**Tabla 9.** Características fisicoquímicas de polvos crudos de nopal

	<i>Opuntia cochenillifera</i> Karst.	<i>Opuntia ficus-indica</i>
<b>pH</b>	5.15 ± 0.00 <sup>a</sup>	5.06 ± 0.00 <sup>b</sup>
<b>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	750 ± 0.01 <sup>b</sup>	800 ± 0.01 <sup>a</sup>
<b>Color L*</b>	77.4 ± 0.14 <sup>a</sup>	76.23 ± 0.05 <sup>b</sup>
<b>Color a*</b>	-14.13 ± 0.13 <sup>b</sup>	-5.16 ± 0.18 <sup>a</sup>
<b>Color b*</b>	24.53 ± 0.05 <sup>b</sup>	22.98 ± 0.15 <sup>a</sup>
<b>CAAc (g/g)</b>	2.75 ± 0.06 <sup>a</sup>	2.49 ± 0.04 <sup>b</sup>
<b>CAA (g/g)</b>	3.42 ± 0.12 <sup>b</sup>	4.75 ± 0.11 <sup>a</sup>
<b>ISA (%)</b>	19.79 ± 0.06 <sup>b</sup>	20.40 ± 0.06 <sup>a</sup>
<b>Sólidos solubles totales** (°Brix)</b>	4.19 ± 0.05 <sup>b</sup>	5.63 ± 0.06 <sup>a</sup>
<b>Viscosidad (cp)</b>	35.00 ± 2.00 <sup>b</sup>	45.5 ± 1.50 <sup>a</sup>

\*\* Base seca

L\*: Luminosidad a\*: Tendencia rojo/verde b\*: Tendencia azul/amarillo

<sup>a,b,c</sup> Indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

Media ± D.E. (n=3)

En cuanto a la densidad aparente (DA), los PC presentaron diferencias estadísticamente significativas con 750 y 800 kg/m<sup>3</sup> para OC y OF, respectivamente. Los resultados de DA obtenidos en este trabajo son similares a los obtenidos (800 kg/m<sup>3</sup>) en PC de OF (Reda & Atsbha, (2019), harina de frijol con intervalos de 690-710 kg/m<sup>3</sup> (Blandón-Navarro & Larios-López (2019), y en harina de trigo con valores de 500-800 kg/m<sup>3</sup> (FAO, 2006), estas diferencias pueden estar relacionadas con el

tamaño y forma de las partículas y contenido de humedad (Ramírez-Balboa *et al.*, 2023).

Dentro del parámetro de color, se observó que la tendencia de color de los PC de OC (77.4 L\*, -14.13 a\*, 24.53 b\*) fue mayor que el PC de OF (76.23, -5.16 a\*, 22.98 b\*), los datos obtenidos muestran una variación en la tendencia de color a lo reportado en PC de OC por Fabela-Illescas *et al.*, (2022) (67.62 L\*, -3.47 a\*, 18.20 b\*) y en PC de OF con diferentes procesos de secado por López-Cervantes *et al.*, (2011) (71.86-73.75 L\*, -9.59 a -6.28 a\*, 23.13 - 26.75 b\*), estas diferencias en la tendencia de color de los PC puede atribuirse a las condiciones de secado que ocasiona la degradación de la clorofila (Niroula *et al.*, 2019).

En relación a la capacidad de absorción de aceite (CAAc) de los PC se obtuvieron diferencias estadísticas significativas (2.75 para OC y 2.49 para OF). La CAAc de los PC de este estudio son similares a lo reportado por otros autores en PC de OF con 1.45-2.43 g/g (Reda & Atsbha, 2019; Nassar, 2008), harinas crudas de plátano con 2.10-2.64 g/g (Alarcón García *et al.*, 2013) y harinas crudas de papa dulce con 0.9-0.97 g/g (Chikpah *et al.*, 2020), estas comparaciones se pueden realizar al ser harinas crudas provenientes de materias vegetales, las diferencias en la CAAc en los PC pueden deberse fracción de fibra insoluble presente, ya que su estructura química permite retener aceite o grasa y esta influenciada por las propiedades de la superficie, el volumen total de poros y la naturaleza hidrófoba de las partículas en la fibra (Naumann *et al.*, 2021; Huang & Ma, 2016; Raghavendra *et al.*, 2006). De acuerdo a los datos obtenidos en este estudio, los polvos crudos de ambas especies pueden ser potencialmente funcionales debido a su CAAc, ya que este parámetro se atribuye al atrapamiento de lípidos y nos puede dar una idea del comportamiento fisiológico.

En cuanto a la capacidad de absorción de agua (CAA), el PC de OF (4.75 g/g) fue mayor a lo obtenido en el PC de OC (3.42 g/g), mostrando diferencias estadísticamente significativas. Los valores de CAA de estos polvos son superiores a los reportados en PC de OF cosechados en diferentes meses con un intervalo de 0.31-1.66 g/g (Du Toit *et al.*, 2019), sin embargo, los PC es este estudio mostraron valores menores de CAA en comparación a los valores (6.48 a 14.44 g/g) reportados

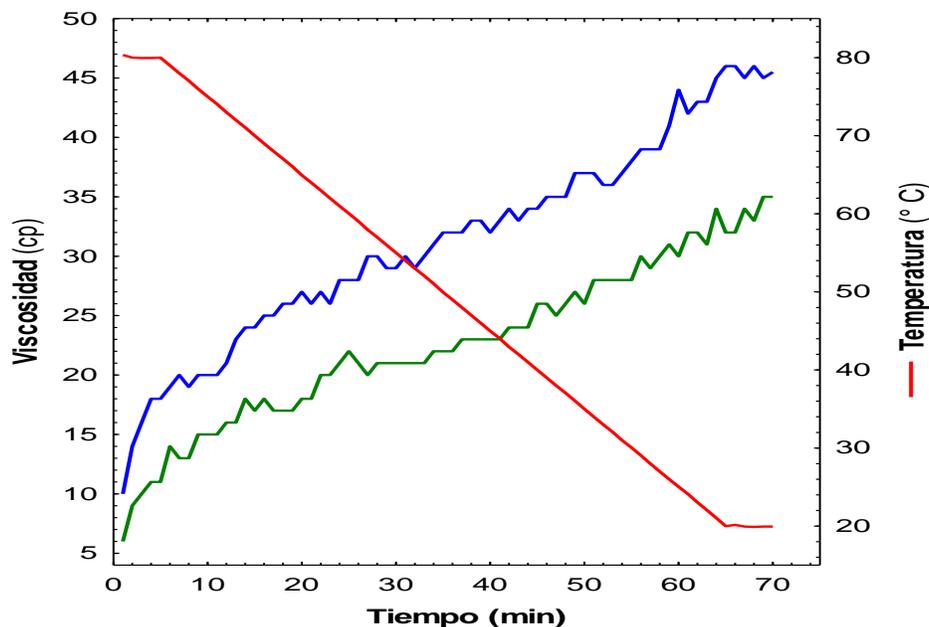
en PC de OF deshidratada a diferentes temperaturas (López-Cervantes *et al.*, 2011). Los autores previamente mencionados hacen referencia a que las diferencias en los valores de CAA en los PC pueden deberse a las condiciones de secado, la fuente de fibra, el procesamiento de molienda y los poros formados por la fibra insoluble que retienen el agua (Du Toit *et al.*, 2019; López-Cervantes *et al.*, 2011; Naumann *et al.*, 2021). La capacidad de absorción de agua es un parámetro importante, representa la capacidad de la fibra para formar un gel y se relaciona con el comportamiento fisiológico, por lo cual, debido a los resultados obtenidos los polvos crudos de ambas especies pueden ser consideradas como funcionales.

En relación al índice de solubilidad en agua (ISA) de los polvos, existen diferencias estadísticamente significativas, el PC de OC (19.79%) obtuvo un menor porcentaje de ISA en comparación al PC de OF (20.40%). El ISA encontrado en los PC de OC de este estudio son superiores a lo reportado anteriormente en PC de OC por Fabela-Illescas *et al.*, (2022) quienes obtuvieron 5.4%, mientras que los PC de OF son inferiores a lo reportado (24.98%) por Anchondo-Trejo *et al.*, (2020) en PC de OF, estas diferencias pueden ser atribuidas a la fracción soluble presente en los polvos de nopal, además al proceso de obtención (Ayadi *et al.*, 2009), por los datos obtenidos la presencia de la fracción soluble y de acuerdo a los efectos fisiológicos reportados por diversos autores, los polvos pueden ser consideradas como materias primas funcionales y dar una visión general de cómo podría ser su funcionamiento fisiológico, a nivel de tracto gastrointestinal.

Así mismo, el contenido de sólidos solubles totales (SST) de los PC de OF (5.63 °Brix) fue superior a OC (4.19 °Brix). Los datos obtenidos para los PC en este estudio son inferiores a lo reportado previamente en PC de OF con 5.59 °Brix (Barazarte *et al.*, 2017) en cladodios de 1 a 4 meses de edad, las diferencias en el contenido de SST en los PC pueden relacionarse a la edad del cladodio y a la zona de cultivo (Mounir *et al.*, 2020 y Flores-Hernández *et al.*, 2004).

En lo que respecta a la viscosidad de los PC (Figura 9), se puede observar que la viscosidad aumentó conforme disminuyó la temperatura. Además de que el PC de OF presentó un perfil de viscosidad mayor que el del PC de OC, dónde la viscosidad final fue de 43.33 cp para OF y de 35.67 cp para OC. La diferencia en los valores

de viscosidad puede estar relacionado con el contenido más alto de fibra soluble que se obtuvo en el PC de OF. Debido a que se ha reportado que la fibra soluble es el componente principal del mucilago del nopal y juega un papel importante en el desarrollo de viscosidad en algunos materiales y principal causa de la viscosidad, su composición en contenido de fibra soluble varían en respuesta a factores como, la especie de *Opuntia*, la edad del cladodio ya que al madurar disminuye la fracción soluble e incrementa la insoluble, así como factores de estrés como la temperatura del aire, tipo y pH del suelo (Luna-Zapién *et al.*, 2023; FAO, 2023; Vargas-Solano *et al.*, 2022). Los datos obtenidos de viscosidad para el PC, son inferiores a los reportados previamente por autores en harina de arroz con 3521 cp (Kaur *et al.*, 2016), así como en polvos con alto contenido de fibra obtenidas de piña (100 cp) guayaba (200 cp) y guanábana (100 cp) (Ramírez & Pacheco de Delahaye, 2009). Sin embargo, la diferencia entre los valores de viscosidad reportados por los autores antes mencionados y los obtenidos en este trabajo, radican en el hecho de que el mucilago de nopal, es un hidrocoloide no gelificante, pero si tiene la capacidad para modificar la viscosidad de sistemas acuosos que son formados con él, dicho en otras palabras, se comporta como un espesante (Du Toit, 2018), debido a que el mucilago es una molécula cargada eléctricamente y cuando entra en contacto con el agua, los átomos de hidrogeno se separan dejando abiertos los grupos cargados negativamente a lo largo de la cadena, esto lleva a que la molécula de mucilago se repela a sí misma, haciendo que se desenrolle y se estire, incrementando la viscosidad (Medina-Torres *et al.*, 2003). Por otro lado, también se ha reportado que los iones positivos reducen la viscosidad de las soluciones acuosas de mucilago (Medina-Torres, 2000) y en este sentido los PC de ambas especies presentaron un alto contenido de cenizas que se relaciona con minerales como Ca, Mg, Zn, K, entre otros (Medina-Torres, 2000).



- *Opuntia ficus-indica*
- *Opuntia cochenillifera* Karst.
- Temperatura (° C)

**Figura 9.** Viscosidad de polvos crudos de nopal  
**Fuente:** Elaboración propia

### 6.1.5 Caracterización fitoquímica de polvos de nopal

En la Tabla 10 se muestran los valores de compuestos fenólicos totales, flavonoides totales, captación de radical libre DPPH y clorofila total. El contenido de compuestos fenólicos totales de los polvos crudos (PC) fue de 4.56 para OC y 22.98 EAG/g para OF mostrando diferencias estadísticas significativas. Estos resultados son similares (4.0 mg EAG/g) a los reportados por Cruz de la Cruz *et al.*, (2021) para PC de OC, al igual que, los obtenidos (4.45 a 32.6 mg EAG/g) por Figueroa-Pérez *et al.*, (2018); Uriarte-Frías *et al.*, (2021) y Medina-Torres *et al.*, (2011) en PC de OF. Estas diferencias podrían estar atribuidas a la especie, estado de madurez, diferentes condiciones climáticas y la cinética de secado para la obtención de los polvos (Apodaca-Pérez *et al.*, 2016).

**Tabla 10.** Propiedades fitoquímicas de polvos crudos de nopal

	<i>Opuntia cochenillifera</i> Karst.	<i>Opuntia ficus- indica</i>
<b>Compuestos fenólicos totales*</b> (mg EAG/g)	4.56 ± 0.06 <sup>b</sup>	22.98 ± 0.05 <sup>a</sup>
<b>Flavonoides totales*</b> (mg EQ/g)	0.23 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.68 ± 0.01 <sup>a</sup>
<b>Captación de radical DPPH*</b> (mg AA/g)	1.39 ± 0.07 <sup>b</sup>	3.91 ± 0.08 <sup>a</sup>
<b>Clorofila total*</b> (mg/100 g)	3.92 ± 0.01 <sup>b</sup>	5.84 ± 0.04 <sup>a</sup>

\*Base seca

<sup>a,b,c</sup> Indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ )

Media ± D.E. (n=3)

En relación al contenido de flavonoides totales, los PC de OF (0.68 mg EQ/g) son superiores a los PC de OC (0.23 mg EQ/g). Los datos obtenidos en el contenido de fenoles totales de los PC, son inferiores a los valores de 1.05 y 3.02 mg EQ/g reportado previamente por Alves *et al.*, (2017) en PC de OC y OF respectivamente en condiciones de secado similares (55°C - 72 h) al de este estudio, estas diferencias en el contenido de flavonoides totales en los PC podrían estar relacionadas con la composición de las especies, la variabilidad genética, las condiciones edafoclimáticas y las condiciones en el procesamiento de secado, debido a la degradación de los compuestos flavonoides (Santos-Zea *et al.*, 2011).

En cuanto a la captación del radical libre DPPH, los PC de OF presentaron una mayor captación (3.90 mg EAA/g) en comparación a OC (1.38 mg EAA/g), los datos obtenidos en este estudio son superiores a lo reportado por Díaz-Batalla *et al.*, (2019) en una mezcla de harinas crudas de mezquite con maíz (2.82 mg EAA/g), sin embargo, son inferiores a lo reportado en harina cruda de mesocarpio, semilla, integral e integral fermentada de vaina de mezquite en un intervalo de 8.9-14.1 mg EAA/g (Díaz-Batalla *et al.*, 2022), estas comparación se puede realizar al ser harinas vegetales. Las diferencias que se observan en los datos de este estudio pueden atribuirse al genotipo, la zona de cultivo, el estado de madurez y la manipulación post cosecha del nopal (Manzanarez-Tenorio *et al.*, 2022).

El contenido de clorofila total de los PC fue de 3.92 mg/100g para OC y 5.84 mg/100g para OF, los PC mostraron diferencias estadísticas significativas. Los

valores obtenidos en este estudio son similares a lo reportado por Soquetta *et al.*, (2016), quienes cuantificaron un contenido de clorofila total de 2.02 a 12.13 mg/100g en PC de piel y bagazo de kiwi, sin embargo, son inferiores a los valores reportados por Devi *et al.*, (2022) en polvos de flor, tallo y hoja de brócoli (921.55-1816.03 mg/100g), no se encontraron reportes de cuantificación de clorofila en polvos de nopal, sin embargo, los datos obtenidos en este estudio pueden ser comparables con polvos de materias primas que son considerados como fuentes alimentarias de alto contenido de clorofila total. Las variaciones en los datos de este estudio con lo reportado por diversos autores pueden depender de los parámetros y condiciones del procesamiento de secado, debido a la inestabilidad de la clorofila por la degradación que sufre por causa de la temperatura, oxígeno, luz y pH (Diego-Zarate *et al.*, 2021).

En el análisis fitoquímico, los PC de OF muestran los valores más altos en compuestos fenólicos totales, compuestos flavonoides totales, captación del radical libre DPPH\* y clorofila total en comparación al PC de OC. En resumen y de acuerdo a la caracterización químico proximal, fibra dietética, fisicoquímica y fitoquímica la especie *Opuntia cochenillifera* Karst. es una fuente alternativa de gran viabilidad con gran potencial en la industria de los alimentos para la generación de alimentos funcionales por ser un polvo funcional, así mismo no ser considerada una especie de desecho agrícola.

## 6.2 Evaluación de las propiedades alimentarias de los polvos extruidos de nopal

### 6.2.1 Caracterización de fibra cruda y dietética de polvos extruidos de nopal

La caracterización de fibra cruda y dietética de los polvos extruidos (PE) de nopal se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Composición de fibra cruda y dietética de polvos extruidos de nopal

	Fibra Cruda* (%)	Fibra Dietética Soluble* (%)	Fibra Dietética Insoluble* (%)	Fibra Dietética Total* (%)
<b>PC-OC</b>	12.58 ± 0.06 <sup>b,A</sup>	4.99 ± 0.04 <sup>b,G</sup>	36.91 ± 0.03 <sup>a,A</sup>	41.90 ± 0.04 <sup>a,F</sup>
<b>T1-OC</b>	12.26 ± 0.05 <sup>a,B</sup>	9.22 ± 0.04 <sup>D</sup>	33.08 ± 0.03 <sup>a,F</sup>	42.30 ± 0.04 <sup>a,E</sup>
<b>T2-OC</b>	12.36 ± 0.03 <sup>a,B</sup>	6.82 ± 0.03 <sup>a,F</sup>	33.75 ± 0.02 <sup>a,E</sup>	40.57 ± 0.03 <sup>a,G</sup>
<b>T3-OC</b>	11.94 ± 0.03 <sup>a,C</sup>	9.74 ± 0.04 <sup>a,C</sup>	34.83 ± 0.04 <sup>a,C</sup>	44.57 ± 0.02 <sup>a,A</sup>
<b>T4-OC</b>	12.07 ± 0.03 <sup>a,C</sup>	7.30 ± 0.03 <sup>a,E</sup>	36.42 ± 0.03 <sup>a,B</sup>	43.72 ± 0.03 <sup>a,C</sup>
<b>T5-OC</b>	11.71 ± 0.07 <sup>a,D</sup>	10.38 ± 0.03 <sup>a,A</sup>	33.97 ± 0.04 <sup>a,D</sup>	44.35 ± 0.04 <sup>a,B</sup>
<b>T6-OC</b>	11.94 ± 0.04 <sup>a,C</sup>	9.79 ± 0.02 <sup>a,B</sup>	33.11 ± 0.02 <sup>b,F</sup>	42.90 ± 0.04 <sup>a,D</sup>
<b>PC-OF</b>	12.89 ± 0.02 <sup>a,A</sup>	5.84 ± 0.03 <sup>a,F</sup>	32.98 ± 0.04 <sup>b,C</sup>	38.82 ± 0.03 <sup>b,E</sup>
<b>T1-OF</b>	11.21 ± 0.05 <sup>b,C</sup>	6.24 ± 0.04 <sup>b,E</sup>	31.97 ± 0.02 <sup>b,F</sup>	38.21 ± 0.04 <sup>b,F</sup>
<b>T2-OF</b>	11.39 ± 0.07 <sup>b,B</sup>	5.48 ± 0.03 <sup>b,G</sup>	32.30 ± 0.02 <sup>b,E</sup>	37.78 ± 0.02 <sup>b,G</sup>
<b>T3-OF</b>	10.96 ± 0.04 <sup>b,D</sup>	8.42 ± 0.02 <sup>b,B</sup>	30.88 ± 0.03 <sup>b,G</sup>	39.30 ± 0.03 <sup>b,C</sup>
<b>T4-OF</b>	11.18 ± 0.03 <sup>b,C</sup>	6.48 ± 0.03 <sup>b,D</sup>	32.52 ± 0.02 <sup>b,D</sup>	39.00 ± 0.03 <sup>b,D</sup>
<b>T5-OF</b>	10.84 ± 0.07 <sup>b,D</sup>	9.08 ± 0.02 <sup>b,A</sup>	33.86 ± 0.04 <sup>b,A</sup>	42.94 ± 0.02 <sup>b,A</sup>
<b>T6-OF</b>	10.93 ± 0.04 <sup>b,D</sup>	7.05 ± 0.04 <sup>b,C</sup>	33.31 ± 0.03 <sup>a,B</sup>	40.36 ± 0.04 <sup>b,B</sup>

PC: Polvo crudo T1: 120-20 T2: 120-26 T3:140-20 T4:140-26 T5:160-20

T6:160-26 OC: *Opuntia cochenillifera* Karst. OF: *Opuntia ficus-indica*

\*Base seca

Media ± D.E. (n=3)

<sup>a,b,c</sup> Indican diferencias significativas entre especies de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

<sup>A,B,C</sup> Indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

El contenido de fibra cruda de los PE presentó diferencias estadísticas significativas entre especies y tratamientos, así como una disminución con respecto al PC de la

misma especie en ambos genotipos analizados. En los PE de OC se observó que, en los tratamientos T1, T3 y T5 (120, 140 y 160 °C, respectivamente con 20% de humedad) y en T2, T4 y T6 (120, 140 y 160 °C, respectivamente con 26% de humedad), el contenido de fibra cruda disminuye conforme la temperatura de extrusión aumentó, en comparación con el polvo crudo, no obstante, se puede apreciar que en los tratamientos T4 y T6 no se presentaron diferencias estadísticas significativas. Por su parte, en los PE de OF se puede observar que en los tratamientos T3 y T5 la disminución en el contenido de fibra cruda no fue estadísticamente significativa, en cuanto a los tratamientos T2, T4 y T6 se observó que al aumentar la temperatura de extrusión el contenido de fibra cruda disminuye. El comportamiento que se observa por efecto de la temperatura en la disminución de fibra cruda en los polvos extruidos de nopal, puede estar asociado al efecto causado por la temperatura sobre la estructura de la fibra, reduciendo la longitud de cadena y el peso molecular, este efecto es notable en tratamientos térmicos más intensos, debido a un cambio de la fracción insoluble a soluble (Omohimi *et al.*, 2013). Mientras que, en ambas especies de manera general se observó que en los tratamientos donde el contenido de humedad fue del 26% la disminución de fibra cruda fue menor que en aquellos donde el contenido de humedad fue del 20%, este comportamiento está asociado a la influencia que tiene la humedad, debido a que se ha reportado que a contenidos de humedad por encima del 25% disminuye el cizallamiento dentro del extrusor, debido al alto vapor de agua que se genera, ocasionando un efecto lubricante (Akdogan, 1999; Šárka *et al.*, 2021). Los datos obtenidos en este estudio son superiores a lo reportado por Sobota *et al.*, (2010) en extruidos de maíz y salvado de trigo (1.09 - 2.89%), estas diferencias pueden ser atribuidas de acuerdo al autor a las condiciones de temperatura, humedad y cizallamiento del procesamiento por extrusión, así como el contenido de fibra presente en la materia prima a procesar. Este parámetro es importante evaluar debido a que la fibra cruda es un parámetro de calidad de alimentos de origen vegetal partiendo de la parte menos digerible de la materia prima analizada (Mölle, 2014).

Por otra parte, en lo que respecta a la fibra soluble se presentaron diferencias estadísticas significativas en ambas especies de nopal y entre los tratamientos, además de que hubo un incremento con respecto a los PC. En los PE de OC y OF se observó que conforme se incrementó la temperatura de extrusión aumentó significativamente el contenido de fibra soluble, esto sin importar el contenido de humedad que se utilizó, sin embargo, cuando se usó un contenido de humedad del 20% los valores obtenidos de fibra soluble fueron menores que los obtenidos con una humedad del 26%. Por otro lado, en ambas muestras (OC y OF) el tratamiento T5 presentó mayores contenidos de fibra soluble. El efecto de la temperatura sobre el incremento en el contenido de fibra soluble puede ser atribuido a que, elevadas temperaturas en combinación con el esfuerzo mecánico, provoca una conversión de la fibra dietética insoluble, debido a una mayor ruptura de enlaces glucosídicos de los polisacáridos de alto peso molecular, en el caso de los polvos de nopal se asocia a cambios en la estructura de la celulosa, generando fragmentos más pequeños y de bajo peso molecular que son mayormente solubles, así como, a la alteración de los enlaces covalentes y no covalentes entre las macromoléculas como los carbohidratos y proteínas asociadas a la fibra, que por su bajo peso molecular son contabilizados como fibra soluble (Khanpit *et al.*, 2022; Sandrin *et al.*, 2019; Rashid *et al.*, 2015). Por otra parte, el efecto del contenido de humedad sobre el aumento de fibra soluble, podría estar relacionado con el hecho de que a bajos contenidos de humedad se genera un mayor cizallamiento de la materia prima durante el procesamiento por extrusión (Akdogan, 1999). Los datos obtenidos en este estudio se encuentran en el intervalo reportado por Naumann *et al.*, (2021) (6.5-37.7%) en extruidos de semillas de lupino, sin embargo, son inferiores a lo reportado en extruidos de mezclas de amaranto, semilla de lino y sémola de maíz con un intervalo de 1.6-1.2% (Tobias-Espinoza *et al.*, 2019), estas diferencias pueden ser atribuidas a factores del procesamiento por extrusión como el contenido de humedad, la temperatura y de la velocidad del tornillo (Redgwell *et al.*, 2011), así como a la propia naturaleza de la materia prima que se procesó. De forma general se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los PC y los PE de ambas especies, por lo que, el procesamiento por extrusión tiene un efecto en los

polvos de cladodios maduros de nopal, aumentando el contenido de fibra soluble desde temperaturas bajas hasta condiciones de temperaturas severas, aunado a que el contenido de humedad también tiene un papel importante en el incremento de fibra soluble. La determinación de fibra dietética en su fracción soluble es un parámetro importante de evaluar para tener una noción del porcentaje presente en nuestra materia prima procesada, debido a la importancia de los efectos fisiológicos que se le atribuyen como la ralentización de vaciamiento gástrico, la absorción de glucosa, sales biliares y lípidos (Guan *et al.*, 2021). De acuerdo al *Codex Alimentarius* un alimento es considerado como alto en fibra si contiene 6 gramos de fibra/100 gramos por lo que los polvos extruidos de ambas especies pueden ser consideradas altas en fibra, así mismo como potencial alimento funcional.

Con respecto a la fracción insoluble de la fibra dietética se obtuvieron diferencias significativas entre especies y tratamientos en ambos genotipos analizados. El contenido de fibra insoluble de los PE de OC fue menor con respecto al PC de OC, así mismo se observó que, los tratamientos T3 y T4 (140 °C con 20 y 26% de humedad respectivamente) presentaron el mayor contenido de fibra insoluble, mientras que, los tratamientos T5 y T6 (160 °C con 20 y 26% de humedad respectivamente) se presentaron los contenidos más bajos de FDI. Con un 26% de humedad el contenido de fibra insoluble es mayor, este efecto puede ser atribuido a una menor fricción del material durante el procesamiento de extrusión asociado a la influencia de altos contenidos humedad (Akdogan, 1999). Por otra parte, en los PE de OF se observó que los tratamientos T1 al T4 tuvieron un comportamiento similar al de los PE de OC. No obstante, los tratamientos T5 y T6 tuvieron un comportamiento contrario (mayor contenido de FDI) a los PE de OC. Este comportamiento puede ser atribuido a que, en condiciones de temperaturas altas de extrusión, se alteran o modifican componentes como la fibra y proteína presente en la materia prima, formando compuestos que son indigeribles por las enzimas (Singh *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2022), esto coincide con el hecho de que el PC de OF tuvo un mayor contenido de fibra cruda y proteína. Por otro lado, en ambas especies se observó que a contenidos de humedad del 26% el contenido de fibra dietética insolubles es mayor que en contenidos de humedad del 20%, este efecto

es atribuido a que a medida que aumenta el contenido de humedad, se produce un efecto lubricante, lo que incide en la reducción de la fricción entre la materia prima, el tornillo y el cilindro durante el procesamiento por extrusión (Huang *et al.*, 2022). Los datos obtenidos en este estudio son inferiores a lo reportado por García-Méndez, (2011) en snacks de residuos de limón (43.90 a 55.30%) y a los de Al-Subhi, (2020) en extruidos de soya desgrasada, espinacas y sémola de maíz (10.1 a 10.4%), las diferencias pueden ser atribuidas a la materia prima procesada y las condiciones en el procesamiento por extrusión (Redgwell *et al.*, 2011). De manera general se visualizó una reducción de la fracción insoluble de la fibra dietética, por lo que las condiciones de extrusión produjeron un cambio significativo en la fracción de FDI. La determinación de fibra dietética en la fracción insoluble es de suma importancia para tener una noción del porcentaje modificado, aunado a la influencia de los efectos fisiológicos a esta fracción (Slavin, 2013).

En la caracterización de fibra cruda y dietética en los PE se observó que las condiciones de extrusión utilizadas modificaron significativamente el contenido de fibra cruda y la fracción insoluble de fibra dietética, generando, un mayor contenido de fibra dietética soluble en polvos de cladodios maduros en las dos especies de nopal, por lo que, esta tecnología es una gran alternativa para aportar un valor agregado a los polvos procedentes de materias primas que no son consideradas como alimentos por la población en general, aunado a que podrían ser considerados como alimentos funcionales debido a un alto contenido de fibra dietética soluble con el propósito de mejorar la ingesta de fibra dietética en la alimentación e impactar positivamente en la disminución de las enfermedades no transmisibles por los efectos fisiológicos que se han atribuido a esta fracción.

### **6.2.2 Caracterización fisicoquímica de polvos de nopal**

En la Tabla 12 se muestran los valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica de los polvos extruidos, correspondientes a, el índice de expansión, pH, densidad aparente, diferencia total de color de los polvos extruidos.

**Tabla 12.** Características fisicoquímicas de los polvos extruidos de nopal

	IE	pH	DA (kg/m <sup>3</sup> )	ΔE*
<b>PC-OC</b>	N/D	5.15 ± 0.00 <sup>a,E</sup>	760 ± 0.01 <sup>b,A</sup>	N/D
<b>T1-OC</b>	0.96 ± 0.02 <sup>b,A</sup>	5.30 ± 0.00 <sup>a,AB</sup>	650 ± 0.05 <sup>a,B</sup>	19.31 ± 0.07 <sup>b,E</sup>
<b>T2-OC</b>	0.95 ± 0.01 <sup>b,A</sup>	5.28 ± 0.01 <sup>a,BC</sup>	600 ± 0.01 <sup>a,B</sup>	18.64 ± 0.06 <sup>b,F</sup>
<b>T3-OC</b>	0.98 ± 0.01 <sup>b,A</sup>	5.32 ± 0.01 <sup>a,A</sup>	590 ± 0.02 <sup>a,BC</sup>	23.90 ± 0.06 <sup>b,C</sup>
<b>T4-OC</b>	0.95 ± 0.01 <sup>b,A</sup>	5.26 ± 0.00 <sup>a,D</sup>	500 ± 0.03 <sup>a,CD</sup>	21.08 ± 0.05 <sup>b,D</sup>
<b>T5-OC</b>	0.95 ± 0.01 <sup>b,A</sup>	5.29 ± 0.00 <sup>a,BC</sup>	400 ± 0.03 <sup>a,D</sup>	25.18 ± 0.05 <sup>b,A</sup>
<b>T6-OC</b>	0.88 ± 0.01 <sup>b,B</sup>	5.27 ± 0.01 <sup>a,CD</sup>	400 ± 0.03 <sup>a,D</sup>	24.53 ± 0.06 <sup>b,B</sup>
<b>PC-OF</b>	N/D	5.06 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	800 ± 0.01 <sup>a,A</sup>	N/D
<b>T1-OF</b>	1.10 ± 0.03 <sup>a,BC</sup>	5.17 ± 0.00 <sup>b,AB</sup>	630 ± 0.03 <sup>a,B</sup>	20.08 ± 0.09 <sup>a,D</sup>
<b>T2-OF</b>	1.06 ± 0.01 <sup>a,C</sup>	5.15 ± 0.00 <sup>b,BC</sup>	590 ± 0.02 <sup>a,B</sup>	19.98 ± 0.11 <sup>a,D</sup>
<b>T3-OF</b>	1.27 ± 0.01 <sup>a,A</sup>	5.15 ± 0.00 <sup>b,BC</sup>	590 ± 0.03 <sup>a,B</sup>	20.87 ± 0.09 <sup>b,B</sup>
<b>T4-OF</b>	1.25 ± 0.03 <sup>a,A</sup>	5.17 ± 0.01 <sup>b,AB</sup>	460 ± 0.05 <sup>a,C</sup>	19.96 ± 0.08 <sup>b,D</sup>
<b>T5-OF</b>	1.27 ± 0.02 <sup>a,A</sup>	5.18 ± 0.01 <sup>b,A</sup>	390 ± 0.04 <sup>a,C</sup>	21.75 ± 0.07 <sup>b,A</sup>
<b>T6-OF</b>	1.15 ± 0.01 <sup>a,B</sup>	5.14 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	390 ± 0.05 <sup>a,C</sup>	20.66 ± 0.11 <sup>b,C</sup>

IE: Índice de expansión

DA: Densidad aparente

ΔE\*: Diferencia total de color CIELAB N/D: No Determinado PC: Polvo cruda

T1: 120-20 T2: 120-26 T3:140-20 T4:140-26 T5:160-20 T6:160-26

OC: *Opuntia cochenillifera* Karst.

OF: *Opuntia ficus-indica*

\*\*Base seca Media ± D.E. (n=3)

<sup>a,b,c</sup> Indican diferencias significativas entre especies de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

<sup>A,B,C</sup> Indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

En lo que respecta a los valores obtenidos del índice de expansión (IE), se puede observar que, existe diferencias estadísticas significativas, entre las especies analizadas, siendo los extruidos de OF las que presentaron los valores más altos del IE. Por otro lado, los valores de IE de los extruidos de OC, obtenidos con los tratamientos T1 a T5 no mostraron diferencias estadísticas significativas (p≥0.05), mientras que, los extruidos obtenidos con T6 presentaron el valor de IE más bajo. En lo que respecta a los valores de IE de los extruidos obtenidos con OF si se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, además de que, se observa que las condiciones de humedad también fueron un factor

determinante en el IE, debido a que los extruidos obtenidos con un 26% de humedad (T2, T4 y T6) presentaron los IE más bajos. Este efecto puede ser debido a que, se ha reportado que a humedades superiores a 25%, utilizada en los polvos disminuye la fricción del material con el tornillo del extrusor, por tanto, disminuye el crecimiento y colapso de las burbujas de vapor que se forman durante este procesamiento, aunado a que las fibras son capaces de ligar el agua presente en la matriz (Moraru & Kokini, 2003). En cuanto al efecto generado por la temperatura de extrusión se ha atribuido a que al pasar la temperatura crítica o excesiva el IE disminuye al existir un ablandamiento y degradación estructural excesiva que impide al material soportar la presión de vapor y por lo tanto se colapsa (Moraru & Kokini, 2003; Liu *et al.*, 2000). Los resultados de IE obtenidos en este estudio, son similares a lo reportado previamente en snacks elaborados con maíz morado, quinoa blanca y kiwicha con un intervalo del IE de 1.04 a 2.23 (Valderrama-Amasifuen *et al.*, 2021), sin embargo, son bajos en comparación a snacks elaborados con soya desgrasada, arroz integral germinado y fibra de cáscara de mango con un IE de 2.14 a 3.18 (Korkerd *et al.*, 2016). Las diferencias en lo obtenido en este estudio con lo reportado previamente por diversos autores pueden deberse a la naturaleza de la materia prima procesada, las condiciones en las que se realizó el proceso de extrusión, así como al contenido de fibra en los productos extruidos, ya que al disminuir el contenido de FDI la expansión se reduce debido a la ruptura en la pared celular antes de la máxima expansión de las burbujas, formando poros incompletos (Robin *et al.*, 2012; Moraru & Kokini, 2003; Liu *et al.*, 2000). Los extruidos con alto contenido en fibra suelen ser compactos, duros y no crujientes (Moraru & Kokini, 2003).

En relación al pH, los PE de OC presentaron los valores más altos (5.26 a 5.32) en comparación a los PE de OF (5.14 a 5.18), por lo tanto, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, al igual que, entre los PE de ambas especies. Por otro lado, también se observó que en los PE tanto de OC y OF el pH incrementó con respecto a su PC, este comportamiento puede ser atribuido al reordenamiento de las macromoléculas y a la reducción de anti nutrientes como los oxalatos de calcio, taninos y fitatos, debido al proceso de

extrusión (Ruiz-Gutiérrez *et al.*, 2018; Bredie *et al.*, 2002; Chai & Liebman 2005). Los datos obtenidos de pH en los PE de este estudio se encuentran por debajo de lo reportado (6.1-6.74) por Navarro-Cortez *et al.*, (2016) en muestras extrudidas de harina de calabaza y maíz. Se observó que, hubo diferencias estadísticas significativas en el pH entre las muestras de PC y PE de nopal para OC y OF, por lo que, hubo una modificación del pH por efecto del procesamiento por extrusión en polvos de cladodios maduros de nopal. El pH es un parámetro importante debido a la influencia que puede tener en el sistema digestivo, ya que se ha reportado que los alimentos de baja acidez (valores de pH por encima de 4.6) contribuyen al equilibrio de la microbiota intestinal (Firrman *et al.*, 2022).

Por otro lado, los valores de densidad aparente (DA) de los PE no presentaron diferencias estadísticas significativas entre especies, pero si entre tratamientos. En cuanto a los PE de OC se observa que los valores de DA disminuyen conforme se incrementó la temperatura, mientras que en los tratamientos (T2, T4 y T6) donde se utilizó un porcentaje de humedad del 26%, la disminución de los valores de DA, fue mayor que en los tratamientos (T1, T3 y T5) donde se usó un 20% de humedad. En cuanto a los PE de OF se observa un comportamiento similar a los PE de OC.

Resultados similares a los obtenidos en los PE fueron reportados previamente por Altan *et al.*, (2008) en harinas extrudidas de cebada (260-1070 kg/m<sup>3</sup>), en contraste a lo reportado por Wani *et al.*, (2021) quien reporto valores superiores en mezclas extrudidas de fenogreco, avena, chícharo, harina de arroz y maíz (230 kg/m<sup>3</sup>) y los reportados también por Hernández-Nava *et al.*, (2011) en mezclas extrudidas de lenteja-plátano (170-540 kg/m<sup>3</sup>). La DA en los PE es inversamente proporcional al IE, y se ha reportado que la FDI aumenta la DA, mientras que la FDS reduce la DA y el IE (Valenzuela-Lagarda *et al.*, 2016; Robin *et al.*, 2012). Los PE de nopal de ambas especies (OC y OF) presentan diferencias estadísticamente significativas en comparación a los PC de su especie, por lo que el procesamiento por extrusión presenta un efecto significativo, así mismo el contenido de humedad de la materia prima durante el procesamiento por extrusión no presentó una influencia significativa en dichos parámetros. La DA es una propiedad de suma importancia debido a que nos permite conocer la relación entre el volumen y el peso seco,

incluyendo la presencia o ausencia de porosidad en la materia prima (Wang *et al.*, 2022; Ordoñez *et al.*, 2012).



**Figura 10.** Extruidos de *Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica*  
OC: *Opuntia cochenillifera* Karst.      OF: *Opuntia ficus-indica*  
**Fuente:** Elaboración propia

En relación a la diferencia total de color ( $\Delta E^*$ ) de los PE de nopal, estas presentaron diferencias estadísticamente significativas entre especies y tratamientos. Una mejor apreciación de los cambios de color por efecto de los tratamientos, pueden observarse en la Figura 10. Los PE de OC, presentaron un mayor incremento en  $\Delta E^*$ , conforme se incrementó la temperatura de extrusión, mientras que los PE de OF presentaron la menor diferencia total de color. Por otro lado, se observó que, el contenido de humedad utilizado también fue un factor significativo, ya que la diferencia total de color fue menor en aquellos tratamientos (T2, T4 y T6) donde se usó un 26% de humedad. Este efecto se ha relacionado a que con contenidos de humedad por arriba del 25%, la humedad funciona como una barrera de protección para disminuir la degradación de compuestos termolábiles (Lei *et al.*, 2008). En cuanto al efecto generado por la temperatura de extrusión se atribuye a la degradación generada por las altas temperaturas en los compuestos termolábiles

(Gat & Ananthanarayan, 2016). Los datos obtenidos en  $\Delta E^*$  de los PE de este estudio presentan una similitud a lo reportado por Jozinović *et al.*, (2017) en extrusiones de maíz con cáñamo (3.25-24.75), sin embargo, presentan una mayor diferencia en comparación a lo reportado por Kojić *et al.*, (2022) en snacks de harina de trigo enriquecida con betalaínas (10.15-17.06). El efecto de  $\Delta E^*$  por efecto de la temperatura pueden estar relacionados a los parámetros del procesamiento por extrusión, y la degradación de clorofila (Gat & Ananthanarayan, 2016). Respecto a  $\Delta E^*$  de los PE con respecto al PC de su especie, se observó que el procesamiento por extrusión tiene un efecto significativo en la degradación de materias primas con alto contenido de clorofila, al ser un procesamiento en donde se utilizan altas temperaturas. El color es un parámetro importante de evaluar debido a que es utilizado como control de calidad de los extruidos y los polvos para evaluar los cambios que sufre la materia prima durante el procesamiento por extrusión, aunado a ser una característica importante en los alimentos para determinar la aceptación o rechazo de los consumidores (Mjouny-Rosentrater 2011; Rampersad *et al.*, 2003). En la Tabla 13 se muestran los valores correspondientes a la capacidad de absorción de aceite, capacidad de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y sólidos solubles totales.

**Tabla 13.** Características fisicoquímicas de polvos extruidos de nopal

	<b>CAAc</b> (g/g)	<b>CAA</b> (g/g)	<b>ISA</b> (%)	<b>SST**</b> (°Brix)
<b>PC-OC</b>	2.75 ± 0.06 <sup>a,A</sup>	3.42 ± 0.12 <sup>b,A</sup>	19.79 ± 0.06 <sup>b,G</sup>	4.19 ± 0.05 <sup>b,A</sup>
<b>T1-OC</b>	2.08 ± 0.01 <sup>a,A</sup>	2.45 ± 0.03 <sup>a,B</sup>	25.59 ± 0.07 <sup>b,E</sup>	3.10 ± 0.00 <sup>b,C</sup>
<b>T2-OC</b>	2.11 ± 0.03 <sup>a,A</sup>	2.48 ± 0.06 <sup>a,B</sup>	24.76 ± 0.05 <sup>b,F</sup>	3.41 ± 0.01 <sup>b,BC</sup>
<b>T3-OC</b>	1.99 ± 0.04 <sup>b,BC</sup>	2.29 ± 0.07 <sup>a,BCD</sup>	26.66 ± 0.06 <sup>b,C</sup>	3.69 ± 0.01 <sup>b,B</sup>
<b>T4-OC</b>	2.02 ± 0.04 <sup>b,BC</sup>	2.34 ± 0.04 <sup>a,BC</sup>	26.07 ± 0.02 <sup>b,D</sup>	3.52 ± 0.00 <sup>b,B</sup>
<b>T5-OC</b>	1.92 ± 0.04 <sup>b,C</sup>	2.10 ± 0.05 <sup>b,D</sup>	27.99 ± 0.06 <sup>b,A</sup>	4.36 ± 0.00 <sup>b,B</sup>
<b>T6-OC</b>	1.94 ± 0.01 <sup>b,C</sup>	2.17 ± 0.03 <sup>a,CD</sup>	27.27 ± 0.04 <sup>b,B</sup>	3.72 ± 0.01 <sup>b,B</sup>
<b>PC-OF</b>	2.49 ± 0.04 <sup>b,A</sup>	4.75 ± 0.11 <sup>a,A</sup>	20.40 ± 0.06 <sup>a,F</sup>	5.63 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
<b>T1-OF</b>	2.10 ± 0.04 <sup>a,B</sup>	2.40 ± 0.00 <sup>a,B</sup>	33.45 ± 0.05 <sup>a,C</sup>	4.34 ± 0.00 <sup>a,D</sup>
<b>T2-OF</b>	2.16 ± 0.01 <sup>a,B</sup>	2.41 ± 0.04 <sup>a,B</sup>	32.58 ± 0.01 <sup>a,D</sup>	4.19 ± 0.00 <sup>a,D</sup>
<b>T3-OF</b>	2.08 ± 0.08 <sup>a,B</sup>	2.36 ± 0.05 <sup>a,BC</sup>	33.57 ± 0.05 <sup>a,C</sup>	4.75 ± 0.00 <sup>a,C</sup>
<b>T4-OF</b>	2.10 ± 0.08 <sup>a,B</sup>	2.38 ± 0.08 <sup>a,B</sup>	32.14 ± 0.05 <sup>a,E</sup>	5.06 ± 0.01 <sup>a,B</sup>
<b>T5-OF</b>	2.02 ± 0.03 <sup>a,B</sup>	2.16 ± 0.04 <sup>a,C</sup>	34.34 ± 0.08 <sup>a,A</sup>	4.92 ± 0.01 <sup>a,BC</sup>
<b>T6-OF</b>	2.03 ± 0.04 <sup>a,B</sup>	2.22 ± 0.05 <sup>a,BC</sup>	33.78 ± 0.07 <sup>a,B</sup>	5.09 ± 0.00 <sup>a,B</sup>

CAAc: Capacidad de absorción de aceite CAA: Capacidad de absorción de agua  
ISA: Índice de solubilidad en agua SST\*\*: Sólidos solubles totales

PC: Polvo crudo T1: 120-20 T2: 120-26 T3:140-20 T4:140-26 T5:160-20  
T6:160-26 OC: *Opuntia cochenillifera* Karst. OF: *Opuntia ficus-indica*

Media ± D.E. (n=3)

<sup>a,b,c</sup> Indican diferencias significativas entre especies de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

<sup>A,B,C</sup> Indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

Respecto a la capacidad de absorción de aceite (CAAc) de los PE, de forma general se puede mencionar que se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, mientras que, al compararlas con el PC de su especie, se observó una disminución de la CAAc. Por su parte, en los tratamientos T1 y T2 de los PE de OC no se presentaron diferencias estadísticas significativas, cuando fueron comparadas con el PC, mientras que los tratamientos T3 al T6, se presentaron diferencias estadísticas y una disminución en los valores de CAAc por efecto de la temperatura de extrusión, sin embargo, en los PE de OF el comportamiento fue distinto, porque a pesar de que se observó una disminución

en los valores de CAAc en cada uno de los tratamientos, no se presentaron diferencias estadísticas significativas. Excepto al compararlas con el PC. El comportamiento observado en los PE de nopal puede atribuirse a que, a mayor temperatura, mayor degradación de fibra y se correlaciona a una menor disponibilidad de sitios lipofílicos (Villarroel *et al.*, 2018). Los datos obtenidos para la CAAc de los PE de OC y OF se encuentran dentro del intervalo reportado previamente por autores en extruidos de cáscara de soja con un intervalo de 1.11 a 3.9 g/g (Tabibloghmany *et al.*, 2020) y en harina extruida de caupí con una CAAc de 1.34 a 2.60 g/g (Kesselly *et al.*, 2023). Las diferencias en la CAAc obtenidas en este estudio en comparación a los reportes de otros autores, puede deberse a la reordenación estructural, tamaño y área superficial de los componentes por el procesamiento por extrusión, de acuerdo a la literatura se ha atribuido a que las FDI presentan mayor CAAc, mientras que a menor CAAc mayor presencia de FDS (Villarroel *et al.*, 2018; Naumann *et al.*, 2021). Se observó que el procesamiento por extrusión tiene un efecto en los PC de cladodios maduros. La CAAc es una propiedad que nos permite tener noción del valor de retención de las partículas de naturaleza hidrofóbica, que constituyen la fracción de la FDS y FDI presente en el polvo y que incide directamente en la función que puede cumplir en la fisiología intestinal (Vilcanqui *et al.*, 2018).

En cuanto a la capacidad de absorción de agua (CAA) se observó que el procesamiento por extrusión provocó una disminución significativa, en los valores de CAA (los PC presentaron valores de 2.75 y 2.49 para OC y OF, respectivamente) ya que los PE de OC y OF presentaron una disminución de la CAA a medida que se incrementó la temperatura de extrusión, sin embargo, el contenido de humedad no fue una variable significativa en la CAA. Este comportamiento puede ser atribuido a que se ha reportado que a mayor temperatura de extrusión, se incrementa la modificación de la estructura de la fibra, generando mayor cantidad de polímeros dañados y así mismo una menor cantidad de polímeros que pueden atrapar el agua (Naumann *et al.*, 2021), mientras que, también se ha reportado que el contenido de humedad, puede disminuir el cizallamiento dentro del extrusor, debido al alto vapor de agua que se genera, ayudando con esto a que las modificaciones que puede

sufrir la estructura de la fibra sea menor (Akdogan, 1999; Šárka *et al.*, 2021). Los datos obtenidos en los PE de nopal coinciden con los reportadas en extruidos de semilla de lupino con un intervalo en la CAA de 3.88-3.84 a 3.15-3.73 g/g (Zhong *et al.*, 2019), sin embargo, son inferiores a lo reportado por Pardhi *et al.*, (2019) en extruidos a partir de sémola de arroz integral (4.72-6.78 g/g) y Kesselly *et al.*, (2023) en extruidos de harina de caupí (3.9-4.6 g/g). Estas diferencias pueden ser atribuidas al cambio en la morfología de la fibra, la reducción en el tamaño de las partículas y una mayor solubilización de fibra (Tabibloghmany *et al.*, 2020). La CAA es un parámetro importante de evaluar para conocer las propiedades funcionales de los polvos, así mismo, su porosidad y retención de agua, y tener una noción general de su efecto fisiológico (Fu *et al.*, 2017; Moure *et al.*, 2006).

En lo que respecta al índice de solubilidad en agua (ISA), los PE presentaron diferencias estadísticas significativas entre OC y OF, además de que los valores obtenidos con cada uno de los tratamientos, fueron mayores que los obtenidos en el PC de su especie. Por otro lado, se observa que el índice de solubilidad es directamente proporcional al incremento de la temperatura en los PE de OC; además, el contenido de humedad, también fue un factor significativo, debido a que los tratamientos T1, T2 y T5 que corresponden a un contenido de humedad del 20%, los valores de ISA fueron más altos (25.59 -27.99%) que los valores de los tratamientos T2, T4 y T6 (24.76 - 27.27%) que corresponden a un 26% de humedad. En los PE de OF se presentó un comportamiento similar a los PE de OC, sin embargo, el efecto de la extrusión fue más drástico, debido a que los valores de ISA (32.14 - 34.34%) fueron más altos que el obtenido para su PC (20.40%) y que los obtenidos para el PE de OC (24.76 - 27.99%) y para el PC de OC (19.79%). El efecto ocasionado por la temperatura de extrusión puede atribuirse a que el procesamiento por extrusión daña significativamente las macromoléculas disminuyendo su peso molecular y por tanto incrementando el ISA, mientras que el efecto generado por la humedad se atribuye a que en altos contenidos de humedad el cizallamiento es menor y por ende el ISA es menor (Singha *et al.*, 2018). Los datos obtenidos en este estudio son superiores a lo reportado previamente en extruidos de linaza, amaranto y sémola de maíz con un intervalo de 0.45 a 0.5%

(Tobias-Espinoza *et al.*, 2019), extruidos de arroz y zanahoria con 2.49 a 5.2% (Yousf *et al.*, 2017) y extruidos de harina de arroz y frijol con un rango de 12.4 a 20% (Sharma *et al.*, 2017). Las diferencias encontradas ente lo reportado por diversos autores y los valores en este estudio podrían deberse a las condiciones del procesamiento por extrusión y la proporción de fibra presente en la materia prima (Yu *et al.*, 2017). El ISA es un parámetro de suma importancia para evaluar las moléculas solubles en los polvos, debido a que un alto contenido de ISA de un producto extruido indica una alta degradación molecular y mayor presencia de moléculas solubles, por otro lado, un bajo ISA en productos extruidos indica una baja presencia de moléculas solubles (Rashid *et al.*, 2015). Por tanto, los PE de nopal se podrían considerar funcionales debido a que se obtienen fracciones hidrosolubles de bajo peso molecular provenientes principalmente de la celulosa, que por su tipo de enlace ( $\beta$ ,1-4) no es digerida por las enzimas digestivas humanas (Khanpit *et al.*, 2022).

En cuanto a los sólidos solubles totales (SST), se observó una disminución (3.10 – 4.36%) de los SST en los PE de OC, cuando son comparadas con el PC (4.19 °Brix), aunado a esto y a pesar de que los valores en los PE disminuyeron, se observa que los valores obtenidos de SST aumentan con el incremento de la temperatura de extrusión y que los tratamientos T1, T3 y T5, donde el porcentaje de humedad fue del 20% fueron los que presentaron un mayor incremento (3-10 – 4.76 °Brix) de los SST, mientras que los tratamientos T2, T4 y T6, en los cuales se usó un 26% de humedad, los valores de SST tuvieron un menor incremento (3.41 – 3.72 °Brix).

Respecto a los PE de OF se obtuvo un comportamiento similar a los PE de OC, no obstante, el efecto de la extrusión fue más clara en OC, debido a que hubo una mayor diferencia entre los valores (3.10 – 4.76 °Brix) de los PE de OC y los obtenidos en los PE de OF (4.19 – 5.06 °Brix). Se ha reportado que en los procesos térmicos la concentración de SST aumenta conforme se incrementa la temperatura (Quezada-Moreno *et al.*, 2015), sin embargo, la disminución de SST en el procesamiento por extrusión en polvos de nopal puede atribuirse a la disminución de proteínas al ser desnaturalizadas por las altas temperaturas, así como la disminución de minerales por la reducción de calcio. Los SST es un parámetro

importante de evaluar, porque da una idea del contenido de azúcares presentes en los polvos, así como de la degradación de materiales orgánicos e inorgánicos los cuales son contabilizados en la determinación de SST (Li *et al.*, 2016; Brandt *et al.*, 2017; Kusumiyati *et al.*, 2020).

En cuanto a la viscosidad de los PE, los datos obtenidos en este estudio se presentan en la Tabla 14, en donde se observó que los PE de OC y OF presentaron una disminución de la viscosidad en comparación con los PC (Figura 11). Por otro lado, se puede observar que, en ambas especies, los tratamientos T1 y T4 (120 °C, 20% de humedad y 140 °C, 26% de humedad, respectivamente), presentaron un perfil de viscosidad similar, con valores de viscosidad mayor que los tratamientos T2, T3, T5 y T6. El comportamiento por efecto de la temperatura puede ser atribuido a que en altas temperaturas del procesamiento por extrusión se genera un cambio estructural de las fibras y por tanto ocasiona fibras de cadena corta, mientras que el efecto generado por el contenido de humedad se puede atribuir a que se ha reportado previamente en contenidos de humedad altos la CAA es mayor y por tanto están presente una mayor cantidad de grupos hidrofílicos (Redgwell *et al.*, 2011). Los datos obtenidos de los PE de ambas especies son inferiores a lo reportado previamente en extruidos de avena con 32.92 cp (Zhang *et al.*, 2011). Estas diferencias de acuerdo al autor pueden relacionarse a las condiciones de temperatura, cizallamiento, humedad y contenido de fibra presente en la materia prima (Zhang *et al.*, 2011). La disminución de la viscosidad, podría ser causada por la degradación de la estructura del mucilago, que es un heteropolisacárido de alto peso molecular ( $2.3 \times 10^4 - 4.6 \times 10^6$  Da) en otros polisacáridos de peso molecular comparativamente bajos, debido al proceso de extrusión (Wu *et al.*, 2010). Además de que también se ha reportado que las soluciones de mucilago muestran propiedades viscoelásticas típicas más que características físicas de un gel, lo cual también está relacionado con la concentración de mucilago, debido a que a bajas concentraciones el mucilago mostrara principalmente propiedades viscosas, en lugar de una clara tendencia a formar un gel. Por otro lado, también se ha reportado que la reducción de la viscosidad es más dependiente de la concentración de iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  que de la concentración de iones de  $\text{Na}^{+1}$  y  $\text{K}^{+1}$  (Medina-Torres, 2000).

**Tabla 14.** Caracterización de viscosidad de polvos extruidos de nopal

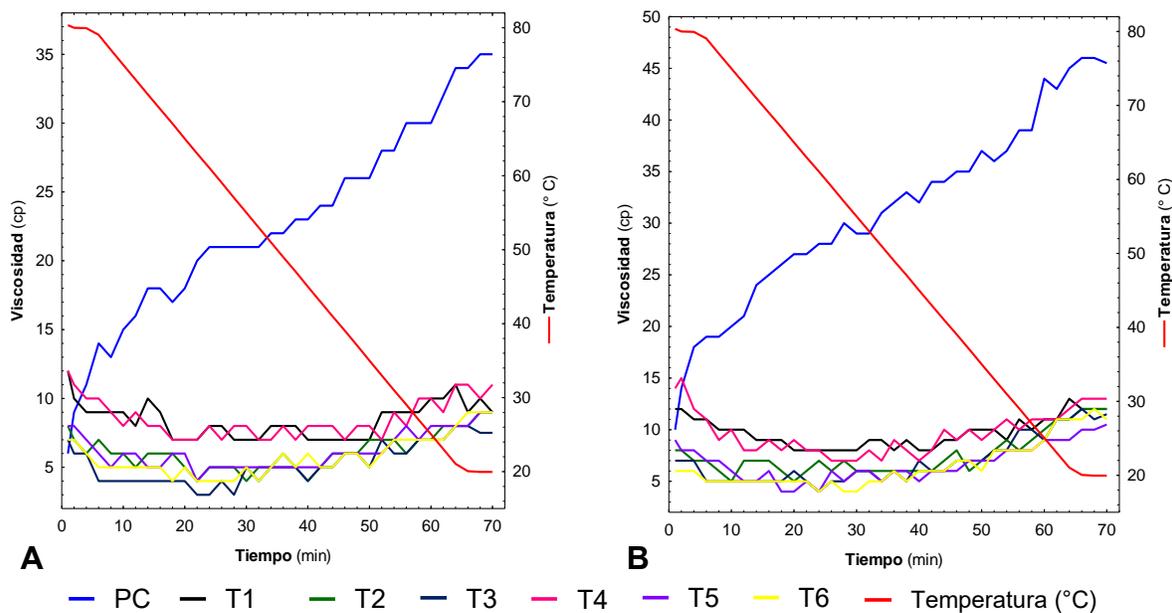
	Viscosidad (cp)	
	<i>Opuntia cochenillifera</i> Karst.	<i>Opuntia ficus-indica</i>
<b>PC</b>	35.00 ± 2.00 <sup>b,A</sup>	45.50 ± 1.50 <sup>a,A</sup>
<b>T1</b>	9.50 ± 0.50 <sup>a,BC</sup>	12.00 ± 1.00 <sup>a,BC</sup>
<b>T2</b>	8.50 ± 0.50 <sup>b,BC</sup>	12.00 ± 1.00 <sup>a,BC</sup>
<b>T3</b>	7.50 ± 0.50 <sup>b,C</sup>	11.50 ± 0.50 <sup>a,BC</sup>
<b>T4</b>	10.50 ± 0.50 <sup>a,B</sup>	13.00 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
<b>T5</b>	8.50 ± 0.50 <sup>a,BC</sup>	10.50 ± 0.50 <sup>a,C</sup>
<b>T6</b>	9.00 ± 0.00 <sup>a,BC</sup>	11.00 ± 1.00 <sup>a,BC</sup>

PC: Polvo crudo T1: 120-20 T2: 120-26 T3:140-20 T4:140-26

T5:160-20 T6:160-26

a,b,c Indican diferencias significativas entre especies de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

A,B,C Indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)



**A:** *Opuntia cochenillifera* Karst.

**B:** *Opuntia ficus-indica*

**Figura 11.** Viscosidad de polvos extruidos

**Fuente:** Elaboración propia

### 6.2.3 Propiedades fitoquímicas de polvos de nopal

En la Tabla 15 se muestran los datos obtenidos para la caracterización de las propiedades fitoquímicas de polvos de nopal.

**Tabla 15.** Propiedades fitoquímicas de polvos extruidos de nopal

	<b>Compuestos fenólicos totales*</b> (mg EAG/g)	<b>Flavonoides totales*</b> (mg EQ/g)	<b>Captación de radical DPPH*</b> (mg EAA/g)	<b>Clorofila total*</b> (mg/100 g)
<b>PC-OC</b>	4.56 ± 0.06 <sup>b,A</sup>	0.23 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	1.38 ± 0.07 <sup>b,A</sup>	3.92 ± 0.00 <sup>b,A</sup>
<b>T1-OC</b>	3.68 ± 0.05 <sup>b,D</sup>	0.20 ± 0.01 <sup>b,AB</sup>	1.27 ± 0.04 <sup>b,AB</sup>	1.39 ± 0.00 <sup>b,C</sup>
<b>T2-OC</b>	4.30 ± 0.08 <sup>b,B</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>b,A</sup>	1.38 ± 0.01 <sup>b,A</sup>	1.49 ± 0.04 <sup>b,B</sup>
<b>T3-OC</b>	3.54 ± 0.06 <sup>b,DE</sup>	0.18 ± 0.02 <sup>b,AB</sup>	1.23 ± 0.03 <sup>b,AB</sup>	1.23 ± 0.02 <sup>b,D</sup>
<b>T4-OC</b>	4.03 ± 0.02 <sup>b,C</sup>	0.20 ± 0.01 <sup>b,AB</sup>	1.29 ± 0.05 <sup>b,AB</sup>	1.46 ± 0.02 <sup>a,B</sup>
<b>T5-OC</b>	3.43 ± 0.02 <sup>b,E</sup>	0.16 ± 0.01 <sup>b,B</sup>	1.06 ± 0.06 <sup>b,C</sup>	0.99 ± 0.03 <sup>b,E</sup>
<b>T6-OC</b>	3.94 ± 0.08 <sup>b,C</sup>	0.16 ± 0.02 <sup>b,B</sup>	1.19 ± 0.07 <sup>b,BC</sup>	1.05 ± 0.01 <sup>b,E</sup>
<b>PC-OF</b>	22.98 ± 0.05 <sup>a,B</sup>	0.68 ± 0.01 <sup>a,A</sup>	3.90 ± 0.02 <sup>a,D</sup>	5.84 ± 0.04 <sup>a,A</sup>
<b>T1-OF</b>	18.76 ± 0.03 <sup>a,D</sup>	0.50 ± 0.03 <sup>a,B</sup>	3.69 ± 0.03 <sup>a,E</sup>	1.54 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
<b>T2-OF</b>	21.83 ± 0.07 <sup>a,C</sup>	0.63 ± 0.02 <sup>a,A</sup>	3.89 ± 0.05 <sup>a,D</sup>	1.59 ± 0.02 <sup>a,B</sup>
<b>T3-OF</b>	23.02 ± 0.08 <sup>a,B</sup>	0.68 ± 0.02 <sup>a,A</sup>	4.03 ± 0.03 <sup>a,C</sup>	1.53 ± 0.00 <sup>a,BC</sup>
<b>T4-OF</b>	23.42 ± 0.11 <sup>a,A</sup>	0.70 ± 0.03 <sup>a,A</sup>	4.21 ± 0.03 <sup>a,B</sup>	1.55 ± 0.03 <sup>a,B</sup>
<b>T5-OF</b>	15.61 ± 0.08 <sup>a,E</sup>	0.41 ± 0.06 <sup>a,B</sup>	3.49 ± 0.06 <sup>a,F</sup>	1.45 ± 0.01 <sup>a,CD</sup>
<b>T6-OF</b>	23.62 ± 0.23 <sup>a,A</sup>	0.73 ± 0.05 <sup>a,A</sup>	4.35 ± 0.05 <sup>a,A</sup>	1.44 ± 0.05 <sup>a,D</sup>

PC: Polvo crudo T1: 120-20 T2: 120-26 T3:140-20 T4:140-26 T5:160-20  
T6:160-26 OC: *Opuntia cochenillifera* Karst. OF: *Opuntia ficus-indica* \*Base seca  
Media ± D.E. (n=3)

<sup>a,b,c</sup> Indican diferencias significativas entre especies de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

<sup>A,B,C</sup> Indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05)

En relación a las propiedades fitoquímicas de los polvos se puede observar diferencias estadísticamente significativas entre especies, debido a que los PC de OC presentaron una menor cantidad de fenoles, flavonoides y clorofila (4.56 mg EAG/g, 0.23 mg EQ/g y 3.92 mg/100g, respectivamente), que las cantidades encontradas (22.98 mg EAG/g de fenoles, 0.69 mg EQ/g de flavonoides y 5.84 mg/100g) en los PC de OF. Por otra parte, se puede observar que el procesamiento

de extrusión, de forma general, produce una disminución de los compuestos fitoquímicos. En el caso de los PE de OC se observa que los tratamientos T1, T3 y T5 (120, 140 y 160 °C con 20% de humedad) presentaron una disminución tanto de fenoles (3.68 – 3.43 mg EAG/g), flavonoides (0.20 – 0.16 mg EQ/g) y clorofila (1.39 – 0.99 mg/100g) conforme aumenta la temperatura de extrusión, un comportamiento similar tuvo los tratamientos T2, T4 y T6, donde el contenido de fenoles (4.30 - 3.94 mg EAG/g), flavonoides (0.24 – 0.16 mg EQ/g) y clorofila (1.49 – 1.05 mg/10g), también disminuyó. El comportamiento generado por el efecto de la temperatura se puede asociar a la degradación de los compuestos termolábiles durante el procesamiento por extrusión por las altas temperaturas, mientras que el efecto causado por la influencia de la humedad se puede asociar a que en contenidos de humedad altos el vapor de agua funciona como una protección de los compuestos aunado a un menor cizallamiento (Šárka *et al.*, 2021).

En lo que respecta al PE de OF se presentó un comportamiento distinto, debido a que el contenido de fenoles (15.61 – 23.02 mg EAG/g), flavonoides (0.41 – 0.68 mg EQ/g) y clorofila (1.45 – 1.54 mg/100g), en los tratamientos T1, T3 y T5 (120, 140 y 160 °C con 20% de humedad), el tratamiento T3 siempre presentó los valores más altos de fenoles y flavonoides (23.62 mg EAG/g y 0.73 mg EQ/g) y T2 presentó el mayor contenido de clorofila (1.59 mg/100g). Este comportamiento observado podría atribuirse a una alteración en la matriz de la pared celular durante el procesamiento por extrusión por el tratamiento mecánico que sufre la materia prima y por ende se rompen los enlaces covalentes de los compuestos fenólicos y la pared celular en dónde se puede efectuar una liberación de los fitoquímicos (Samyó *et al.*, 2018 y Zhang *et al.*, 2018).

El contenido de fenoles totales de los PE son similares (0.30-10.06 mg EAG/g) a lo reportado por Jin *et al.*, (2020) y Korkerd *et al.*, (2016) en extrusión de salvado de trigo y extrusiones de harina de soja desgrasada, harina de arroz y fibra de cáscara de mango, respectivamente, sin embargo, son superiores a lo reportado por Delgado-Nieblas *et al.*, (2019) (1.3 mg EAG/g) en extruidos a partir de salvado de trigo, salvado de avena, sémola de maíz, malta en polvo y residuos de naranja. Las diferencias del contenido de compuestos fenólicos en los PE pueden estar

relacionadas a la degradación que se causa por las altas temperaturas durante el procesamiento por extrusión, aunado a la escasa presencia de fenoles en cladodios maduros (Šárka *et al.*, 2021; Pascoe-Ortiz *et al.*, 2019). Rathod & Annapure, (2017) reportan un mayor contenido de flavonoides totales en extruidos de polvo de lentejas y cascara de naranja (134.20-161.88 mg EQ/g), sin embargo, los datos obtenidos en los PE de este estudio se encuentran dentro del intervalo reportado previamente por Vargas-León *et al.*, (2022) en extruidos a base de maíz amarillo suplementados con polvo de orujo de manzana (0.0673 a 0.293 mg EQ/g). Estas diferencias pueden ser atribuidas a las condiciones del procesamiento por extrusión, la degradación o incremento en el contenido de flavonoides totales (Leonard *et al.*, 2020; Ortiz-Cruz *et al.*, 2020).

En lo que se refiere al contenido de clorofila, no se encontraron reportes del efecto de extrusión en polvos de nopal o harinas vegetales, sin embargo, los datos obtenidos en este estudio son inferiores a lo reportado previamente en extruidos de maíz enriquecidos con espirulina en donde se observó una disminución del 37% durante el procesamiento por extrusión (43.65-27.5 mg/100g; Tańska *et al.*, 2017), debido a que la degradación en los PE de OC oscilo entre 61.99 a 74.75% y en OF entre 72.77 a 75.34%, las diferencias que se observan en este estudio con otros autores puede atribuirse a la degradación de la clorofila en el procesamiento por extrusión debido a las altas temperaturas, así como al contenido de humedad que se utilizó durante al proceso (Kojić *et al.*, 2022). La cuantificación de clorofila total es importante al ser un compuesto bioactivo con beneficios fisiológicos para la salud debido a que se ha demostrado sus propiedades anticancerígenas y su influencia en el metabolismo humano al interactuar con los fluidos gastrointestinales y solubilizar micelas lipídicas (Viera *et al.*, 2022).

Por último, en la captación del radical libre DPPH, la cual está relacionada con la cantidad de compuestos fitoquímicos, se tuvo una menor captación del radical DPPH\* en los polvos de OC, que los encontrados en los polvos de OF, esto debido a que el PC de OF presentó una mayor cantidad de fenoles, flavonoides y clorofila, en lo que respecta al procesamiento de los PC de OC, las condiciones de extrusión causaron efectos significativos, únicamente en las condiciones de 160 °C con 20%

de humedad (T5). En cuanto a los PE de OF se observó que en los tratamientos T1 y T5 (120 y 160 °C con contenidos de humedad de 20%) la captación del radical DPPH\* aumentó (4.03 mg EAA/g). Este comportamiento está relacionado al efecto de liberación de compuestos fenólicos y flavonoides (Samyor *et al.*, 2018). No se encontraron reportes de extrusiones en polvo extruido de nopal, sin embargo los datos obtenidos en este estudio son inferiores a lo reportado por Díaz-Batalla *et al.*, (2018b) en harinas extruidas de semilla de mezquite (9.32 mg EAA/g), la variaciones observadas en la disminución de captación del radical DDPH en los PE puede deberse a la degradación de los compuestos bioactivos por el proceso de extrusión, mientras que el incremento en la captación del radical DPPH, puede ser atribuido a la liberación de compuestos bioactivos como fenoles y flavonoides (Delgado-Nieblas *et al.*, 2019). La determinación de captación del radical DDPH es de suma importancia para conocer el potencial antioxidante de los alimentos, debido a la relación con la presencia de compuestos bioactivos en la matriz alimentaria, aunado a la disminución de enfermedades, como la aterosclerosis, las enfermedades cardiovasculares, neurodegeneración y cáncer por la reducción del estrés oxidativo (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2022).

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

- ♥ Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación demostraron que *Opuntia cochenillifera* Karst. es una especie de gran potencial y con una gran similitud en la parte nutrimental, funcional y fitoquímica, a la especie *Opuntia ficus-indica*
- ♥ Los cladodios maduros de nopal son una fuente alterna de gran viabilidad para la generación de productos alimenticios que beneficien la salud de la sociedad y al aprovechamiento de los recursos naturales que la biodiversidad regional nos proporciona. El procesamiento por extrusión es un método efectivo para la modificación de fibra y de propiedades alimentarias de polvos de cladodios maduros de nopal de las dos especies analizadas. Lo anterior representa la incorporación de un elemento de la biodiversidad regional al sistema alimentario actual haciendo uso de tecnologías de procesamiento como la extrusión
- ♥ El contenido de humedad y temperatura de extrusión son factores de influencia durante el procesamiento para la modificación en la composición de fibra dietética, propiedades fisicoquímicas y funcionales en los polvos de nopal de ambas especies analizadas
- ♥ Los cladodios de nopal *Opuntia cochenillifera* Karst. y *Opuntia ficus-indica*, son una fuente importante de fibra dietética, por lo cual, estos polvos podrían tener un potencial importante como ingrediente en el desarrollo de productos funcionales, atendiendo a las necesidades de consumo de fibra de la población mexicana.

## CAPÍTULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AACC. (2000). Cereals & Grains Association. Cerealsgrains.org. <https://www.cerealsgrains.org/resources/definitions/Pages/DietaryFiber.aspx>
- Abed, S. M., Ali, A. H., Noman, A., Niazi, S., Ammar, A.-F., & Bakry, A. M. (2016). Inulin as Prebiotics and its Applications in Food Industry and Human Health; A Review. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 5(1), 88–97
- Abreu Y Abreu, A. T., Milke-García, M. P., Argüello-Arévalo, G. A., Calderón-de la Barca, A. M., Carmona-Sánchez, R. I., Consuelo-Sánchez, A., Coss-Adame, E., García-Cedillo, M. F., Hernández-Rosiles, V., Icaza-Chávez, M. E., Martínez-Medina, J. N., Morán-Ramos, S., Ochoa-Ortiz, E., Reyes-Apodaca, M., Rivera-Flores, R. L., Zamarripa-Dorsey, F., Zárate-Mondragón, F., & Vázquez-Frias, R. (2021). Dietary fiber and the microbiota: A narrative review by a group of experts from the Asociación Mexicana de Gastroenterología. *Revista de Gastroenterología de México (English Edition)*, 86(3), 287–304. <https://doi.org/10.1016/j.rgmxe.2021.02.002>
- AHA. (2022). Sound the fiber alarm! Most of us need more of it in our diet. *Www.heart.org*. <https://www.heart.org/en/news/2022/01/27/sound-the-fiber-alarm-most-of-us-need-more-of-it-in-our-diet>
- Aires da Silva, D., Melo Aires, G. C., & Silva Pena, R. (2021). Gums—characteristics and applications in the food industry. In *Innovation in the Food Sector Through the Valorization of Food and Agro-Food By-Products*. IntechOpen.
- Ajita, T. (2018). Extrusion cooking technology: An advance skill for manufacturing of extrudate food products. In *Extrusion of Metals, Polymers and Food Products*. InTech. doi: 10.5772/intechopen.73496
- Akdogan, H. (1999). High moisture food extrusion. *International Journal of Food Science & Technology*, 34(3), 195–207. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.1999.00256.x>
- Alarcón García, M. Á., López Vargas, J. H., & Restrepo Molina, D. A. (2013). Caracterización de la Funcionalidad Tecnológica de una Fuente Rica en Fibra Dietaria Obtenida a partir de Cáscara de Plátano. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 66(1), 6959–6968.
- Albergamo, A., Potortí, A. G., Di Bella, G., Amor, N. B., Lo Vecchio, G., Nava, V., Rando, R., Ben Mansour, H., & Lo Turco, V. (2022). Chemical Characterization of Different Products from the Tunisian *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(2), 155. <https://doi.org/10.3390/foods11020155>
- Al-Subhi, F. M. M. (2020). Using extrusion to prepare snacks food high nutrition value fortified with soybean and spinach for children. *Alexandria Science Exchange*

Journal An International Quarterly Journal of Science Agricultural Environments, 41(2), 205–213. <https://doi.org/10.21608/asejaiqsae.2020.94865>

- Altan, A., McCarthy, K. L., & Maskan, M. (2008). Extrusion cooking of barley flour and process parameter optimization by using response surface methodology: Extrusion cooking of barley flour and process parameter optimization. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(9), 1648–1659. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3262>
- Alves, F. A. L., Andrade, A. P. de, Bruno, R. de L. A., Silva, M. G. de V., Souza, M. de F. V. de, & Santos, D. C. dos. (2017). Seasonal variability of phenolic compounds and antioxidant activity in prickly pear cladodes of *Opuntia* and *Nopalea* genres. *Food Science and Technology*, 37(4), 536–543. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.19316>
- Amadou, I. (2017). Physico-functional and sensory properties of Cowpea flour based recipes (Akara) and enriched with sweet potato. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 7(4). <https://doi.org/10.15406/jnhfe.2017.07.00243>
- Amari, A., Alalwan, B., Eldirderi, M. M., Mnif, W., & Ben Rebah, F. (2020). Cactus material-based adsorbents for the removal of heavy metals and dyes: a review. *Materials Research Express*, 7(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5f32>
- Amirtham, D., ICAR-Indian Agricultural Research Institute, Dahuja, A., Kumar, P. R., Praveen, S., ICAR-Indian Agricultural Research Institute, Tamil Nadu Agricultural University, & ICAR-Indian Agricultural Research Institute. (2022). Modifying the functionalities of dietary fiber in foods by various processing methods. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 6(9), 203–210. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2022.v06i09.027>
- Anchondo-Trejo, C., Loya-Carrasco, J. A., Galicia-García, T., Estrada-Moreno, I., Mendoza-Duarte, M., Castellanos-Gallo, L., Márquez-Meléndez, R., Portillo-Arroyo, B., & Soto-Figueroa, C. (2020). Development of a Third Generation Snack of Rice Starch Enriched with Nopal Flour (*Opuntia ficus indica*). *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(1), 54. <https://doi.org/10.3390/molecules26010054>
- AOAC (1970) Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists. Arlington, Virginia DC (10th ed.). Washington, DC.
- AOAC (1990) Official Methods of Analysis. 15th Edition, Association of Official Analytical Chemist, Washington DC.
- AOAC (2000) Official Methods of Analysis. 17th Edition, The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, USA. Methods 925.10, 65.17, 974.24, 992.16.

- AOAC (2010) Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists. 18th Edition, Washington, DC.
- AOAC (2012) Official Method of Analysis: Association of Analytical Chemists. 19th Edition, Washington DC, 121-130.
- AOAC. (2009). Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC (17th ed.). Washington, DC.
- Apodaca-Pérez, J. M., Martínez-Miranda, M. de la L., Robles-Burgueño, M. del R., & Rodríguez Félix, A. (2017). Polifenoloxidasas, fenoles totales y oscurecimiento de nopal verdura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(3), 531–543. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i3.306>
- Arias, A., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2022). Exploring the potential of antioxidants from fruits and vegetables and strategies for their recovery. *Innovative Food Science & Emerging Technologies: IFSET: The Official Scientific Journal of the European Federation of Food Science and Technology*, 77(102974), 102974. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102974>
- Asare, E. K., Sefa-Dedeh, S., Afoakwa, E. O., Sakyi-Dawson, E., & Budu, A. S. (2012). Extrusion cooking of rice-groundnut-Cowpea mixtures - effects of extruder characteristics on nutritive value and physico-functional properties of extrudates using response surface methodology: Functional properties of rice-legume extrudates. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36(5), 465–476. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2011.00605.x>
- 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(1), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.01.003>
- Aziz, T., Farid, A., Haq, F., Kiran, M., Ullah, A., Zhang, K., Li, C., Ghazanfar, S., Sun, H., Ullah, R., Ali, A., Muzammal, M., Shah, M., Akhtar, N., Selim, S., Hagagy, N., Samy, M., & Al Jaouni, S. K. (2022). A review on the modification of cellulose and its applications. *Polymers*, 14(15), 3206. <https://doi.org/10.3390/polym14153206>
- Bader Ul Ain, H., Saeed, F., Ahmed, A., Asif Khan, M., Niaz, B., & Tufail, T. (2019). Improving the physicochemical properties of partially enhanced soluble dietary fiber through innovative techniques: A coherent review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(4), e13917. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13917>
- Bader Ul Ain, H., Saeed, F., Arshad, M. U., Ahmad, N., Nasir, M. A., Amir, R. M., Kausar, R., & Niaz, B. (2018). Modification of barley dietary fiber through chemical treatments in combination with thermal treatment to improve its bioactive properties. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 2491-2499. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1528454>

- Baker, M. T., Lu, P., Parrella, J. A., & Leggette, H. R. (2022). Consumer acceptance toward functional foods: A scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1217. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031217>
- Banwo, K., Olojede, A. O., Adesulu-Dahunsi, A. T., Verma, D. K., Thakur, M., Tripathy, S., Singh, S., Patel, A. R., Gupta, A. K., Aguilar, C. N., & Utama, G. L. (2021). Functional importance of bioactive compounds of foods with Potential Health Benefits: A review on recent trends. *Food Bioscience*, 43(101320), 101320. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101320>
- Barazarte, H., Terán, Y., D'Aubeterre, R., Pérez, L., Garmendia, C., Moreno, I., Rodríguez, E., Pacheco, D., Colmenares, C., & Sánchez-Urdaneta, A. B. (2017). Physical and chemical characteristics of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. cladodes. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 32(2477–9407), 175–186. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183043973>
- Barber, T. M., Kabisch, S., Pfeiffer, A. F. H., & Weickert, M. O. (2020). The health benefits of dietary fibre. *Nutrients*, 12(10), 3209. <https://doi.org/10.3390/nu12103209>
- Bautista-Justo, M., Pineda Torres, R. I., Camarena-Aguilar, E., Alanís- Guzmán, G., Da Mota, V. M., & Barboza- Corona, J. E. (2010). El Nopal fresco como fuente de fibra y calcio en panqués. *Acta Universitaria*, 20(3), 11–17. <https://doi.org/10.15174/au.2010.62>
- BDA. (2022). Sustainable Diets. [Bda.uk.com. https://www.bda.uk.com/food-health/your-health/sustainable-diets.html](https://www.bda.uk.com/food-health/your-health/sustainable-diets.html)
- Bender, A. B. B., Speroni, C. S., Moro, K. I. B., Morisso, F. D. P., dos Santos, D. R., da Silva, L. P., & Penna, N. G. (2020). Effects of micronization on dietary fiber composition, physicochemical properties, phenolic compounds, and antioxidant capacity of grape pomace and its dietary fiber concentrate. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 117(108652), 108652. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108652>
- Berk, Z. 2009. Chapter 15 – Extrusion. In *Food Process Engineering and Technology*, 333–350. San Diego: Academic Press
- Bhat, R., Ahmad, A., & Jõudu, I. (2020). Applications of Lignin in the Agri-Food Industry. In: Sharma, S., Kumar, A. (eds) *Lignin. Springer Series on Polymer and Composite Materials*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40663-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40663-9_10)
- Björck, I., & Asp, N.-G. (1983). The effects of extrusion cooking on nutritional value — A literature review. *Journal of Food Engineering*, 2(4), 281-308. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(83\)90016-x](https://doi.org/10.1016/0260-8774(83)90016-x)

- Blackwood, A. D., Salter, J., Dettmar, P. W., & Chaplin, M. F. (2000). Dietary fibre, physicochemical properties and their relationship to health. *The Journal of the Royal Society for the Promotion of Health*, 120(4), 242–247. <https://doi.org/10.1177/146642400012000412>
- Blanco-Pérez, F., Steigerwald, H., Schülke, S., Vieths, S., Toda, M., & Scheurer, S. (2021). The dietary fiber pectin: Health benefits and potential for the treatment of allergies by modulation of gut Microbiota. *Current Allergy and Asthma Reports*, 21(10), 43. <https://doi.org/10.1007/s11882-021-01020-z>
- Blandón Navarro, S. L., & Larios López, X. J. (2019). Evaluación de sustitución parcial de harina de trigo por harina de frijol *Phaseolus Vulgaris* en la formulación de tortas. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 9(1), 35–44. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v9i1.8995>
- Böger, M., van Leeuwen, S. S., Lammerts van Bueren, A., & Dijkhuizen, L. (2019). Structural identity of galactooligosaccharide molecules selectively utilized by single cultures of probiotic bacterial strains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(50), 13969–13977. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b05968>
- Bojarczuk, A., Skąpska, S., Mousavi Khaneghah, A., & Marszałek, K. (2022). Health benefits of resistant starch: A review of the literature. *Journal of Functional Foods*, 93(105094), 105094. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105094>
- Bolade, Mathew. (2009). Effect of flour production methods on the yield, physicochemical properties of maize flour and rheological characteristics of a maize-based non-fermented food. *African Journal of Food Science*. 3. 288-298.
- Borges Gomes, J. F., de Souza, R. E., Brito, E. O., & Costa Lelis, R. C. (2020). A review on lignin sources and uses. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*, 100–105. <https://doi.org/10.15406/jabb.2020.07.00222>
- Branca, F., Lartey, A., Oenema, S., Aguayo, V., Stordalen, G. A., Richardson, R., Arvelo, M., & Afshin, A. (2019). Transforming the food system to fight non-communicable diseases. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 364, 1296. <https://doi.org/10.1136/bmj.l296>
- Brandt, M. J., Johnson, K. M., Elphinston, A. J., & Ratnayaka, D. D. (2017). Specialized and advanced water treatment processes. In *Twort's Water Supply* (pp. 407–473). Elsevier.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/s0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/s0023-6438(95)80008-5)
- Bredie, W. L. P., Mottram, D. S., & Guy, R. C. E. (2002). Effect of temperature and pH on the generation of flavor volatiles in extrusion cooking of wheat flour. *Journal*

of Agricultural and Food Chemistry, 50(5), 1118–1125.  
<https://doi.org/10.1021/jf0111662>

- Brishti, F.H., Zarei, M., Muhammad, S.K.S., Ismail-Fitry, M.R., Shukri, R., & Saari, N. (2017). Evaluation of the functional properties of mung bean protein isolate for development of textured vegetable protein. *International Food Research Journal*, 24, 1595-1605.
- Budreviciute, A., Damiati, S., Sabir, D. K., Onder, K., Schuller-Goetzburg, P., Plakys, G., Katileviciute, A., Khoja, S., & Kodzius, R. (2020). Management and prevention strategies for non-communicable diseases (NCDs) and their risk factors. *Frontiers in Public Health*, 8, 574111.  
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.574111>
- Burret, F., Lebreton, P., & Voirin, B. (1982). Les aglycones flavoniques DE cactees: Distribution, signification. *Journal of Natural Products*, 45(6), 687–693.  
<https://doi.org/10.1021/np50024a006>
- Butnariu, M., & Sarac, I. (2019). Functional Food. *International Journal of Nutrition*, 3(3), 7–16. <https://doi.org/10.14302/issn.2379-7835.ijn-19-2615>
- Cachay-Morante, J., Chacpi-Vasquez, M., Castillo-Sebastian, G., & Huamani-Calle, D. (2022). Physicochemical characterization, bioactive compounds and antioxidant capacity of the juice and flour of secondary cladodes of *Opuntia ficus-indica*. *Agroindustrial Science*, 12(2), 191–198.  
<https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.02.09>
- Calle, J., Gasparre, N., Benavent-Gil, Y., & Rosell, C. M. (2021). Aroids as underexplored tubers with potential health benefits. *Advances in Food and Nutrition Research*, 97, 319–359. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.02.018>
- Capuano, E. (2017). The behavior of dietary fiber in the gastrointestinal tract determines its physiological effect. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(16), 3543–3564. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1180501>
- Carvajal-Carvajal, C. (2019). Especies reactivas del oxígeno: formación, función y estrés oxidativo. *Medicina legal de Costa Rica*, 36(1), 91–100. from [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1409-00152019000100091&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152019000100091&lng=en&tlng=es).
- Castañeda-Arriaga, R., Perez-Gonzalez, A., Marino, T., Russo, N., & Galano, A. (2021). Antioxidants into Nopal (*Opuntia ficus-indica*), important inhibitors of free radicals' formation. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 10(12), 2006.  
<https://doi.org/10.3390/antiox10122006>
- Castillo, S. F., Estrada, L., Margalef, M. I., & Tóffoli, S. L. (2013). Obtaining nopal flour to elaborate alfajores high in fiber. *Diaeta*, 31(142), 20-26. Recuperado de

[http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1852-73372013000100003&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-73372013000100003&lng=es&tlng=en).

- Chai, W., & Liebman, M. (2005). Effect of different cooking methods on vegetable oxalate content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(8), 3027–3030. <https://doi.org/10.1021/jf048128d>
- Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., & Gupta, A. (2022). Current advancements in pectin: Extraction, properties and multifunctional applications. *Foods* (Basel, Switzerland), 11(17), 2683. <https://doi.org/10.3390/foods11172683>
- Chang, Y. H., & Ng, P. K. W. (2011). Effects of extrusion process variables on quality properties of wheat-ginseng extrudates. *International Journal of Food Properties*, 14(4), 914–925. <https://doi.org/10.1080/10942910903491173>
- Chavez-Santoscoy, R. A., Gutierrez-Urbe, J. A., & Serna-Saldívar, S. O. (2009). Phenolic composition, antioxidant capacity and in vitro cancer cell cytotoxicity of nine prickly pear (*Opuntia* spp.) juices. *Plant Foods for Human Nutrition* (Dordrecht, Netherlands), 64(2), 146–152. <https://doi.org/10.1007/s11130-009-0117-0>
- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). LIGNINA, ESTRUCTURA Y APLICACIONES: MÉTODOS DE DESPOLIMERIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE DERIVADOS AROMÁTICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15-46.
- Chikpah, S. K., Korese, J. K., Hensel, O., & Sturm, B. (2020). Effect of sieve particle size and blend proportion on the quality properties of peeled and unpeeled orange fleshed sweet potato composite flours. *Foods* (Basel, Switzerland), 9(6), 740. <https://doi.org/10.3390/foods9060740>
- Ciudad-Mulero, M., Vega, E. N., García-Herrera, P., Pedrosa, M. M., Arribas, C., Berrios, J. D. J., Cámara, M., Fernández-Ruiz, V., & Morales, P. (2022). Extrusion cooking effect on carbohydrate fraction in novel gluten-free flours based on chickpea and rice. *Molecules* (Basel, Switzerland), 27(3), 1143. <https://doi.org/10.3390/molecules27031143>
- CONABIO. (2020). Nopales. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/nopales>
- Contreras-Padilla, M., Gutiérrez-Cortez, E., Valderrama-Bravo, M. D. C., Rojas-Molina, I., Espinosa-Arbeláez, D. G., Suárez-Vargas, R., & Rodríguez-García, M. E. (2012). Effects of drying process on the physicochemical properties of nopal cladodes at different maturity stages. *Plant Foods for Human Nutrition* (Dordrecht, Netherlands), 67(1), 44–49. <https://doi.org/10.1007/s11130-011-0265-x>

- Corona-Cervantes, K., Parra-Carriedo, A., Hernández-Quiroz, F., Martínez-Castro, N., Vélez-Ixta, J. M., Guajardo-López, D., García-Mena, J., & Hernández-Guerrero, C. (2022). Physical and dietary intervention with *Opuntia ficus-indica* (Nopal) in women with obesity improves health condition through gut Microbiota adjustment. *Nutrients*, 14(5), 1008. <https://doi.org/10.3390/nu14051008>
- Cotacallapa-Sucapuca, M., Vega, E. N., Maievas, H. A., Berrios, J. D. J., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., & Cámara, M. (2021). Extrusion process as an alternative to improve pulses products consumption. A review. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(5), 1096. <https://doi.org/10.3390/foods10051096>
- Cruz de la Cruz, L. L., García-Mateos, R., Ybarra-Moncada, M. C., & Corrales-García, J. (2021). Sweetened nopal flakes: a functional snack. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 94, 169–175. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2021.094.020>
- Dahl, W. J., Agro, N. C., Eliasson, Å. M., Mialki, K. L., Olivera, J. D., Rusch, C. T., & Young, C. N. (2017). Health benefits of fiber fermentation. *Journal of the American College of Nutrition*, 36(2), 127–136. <https://doi.org/10.1080/07315724.2016.1188737>
- Davani-Davari, D., Negahdaripour, M., Karimzadeh, I., Seifan, M., Mohkam, M., Masoumi, S. J., Berenjian, A., & Ghasemi, Y. (2019). Prebiotics: Definition, types, sources, mechanisms, and clinical applications. *Foods (Basel, Switzerland)*, 8(3), 92. <https://doi.org/10.3390/foods8030092>
- de Oliveira, A. J. B., Gonçalves, R. A. C., Chierrito, T. P. C., Dos Santos, M. M., de Souza, L. M., Gorin, P. A. J., Sasaki, G. L., & Iacomini, M. (2011). Structure and degree of polymerisation of fructooligosaccharides present in roots and leaves of *Stevia rebaudiana* (Bert.) Bertonii. *Food Chemistry*, 129(2), 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.057>
- de Pascual-Teresa, S., Santos-Buelga, C., & Rivas-Gonzalo, J. C. (2000). Quantitative analysis of flavan-3-ols in Spanish foodstuffs and beverages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(11), 5331–5337. <https://doi.org/10.1021/jf000549h>
- Dekker, P. & Daamen, C. (2011). ENZYMES EXOGENOUS TO MILK IN DAIRY TECHNOLOGY |  $\beta$ -d-galactosidase. In *Encyclopedia of Dairy Sciences* (pp. 276–283). Elsevier.
- Delgado-Nieblas, C., Ruiz-Beltrán, K., Sánchez-Lizárraga, J., Zazueta-Morales, J. de J., Aguilar-Palazuelos, E., Carrillo-López, A., Camacho-Hernández, I. L., & Quintero-Ramos, A. (2019). Effect of extrusion on physicochemical, nutritional and antioxidant properties of breakfast cereals produced from bran and dehydrated naranjita pomace. *CyTA - Journal of Food*, 17(1), 240–250. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1566276>

- Devi, M., Soekopitojo, S., Pratikto, H., Prasetya Wibawa, A., & Abdul Hamid, M. (2022). The effect of drying treatment on phytochemical content and antioxidant capacity of broccoli (*Brassica oleracea* L.) by using a cabinet dryer. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 1012(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1012/1/012035>
- Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H., & Patil, R. T. (2012). Dietary fibre in foods: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 255–266. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0365-5>
- Díaz Batalla, L. (2019). Valor nutrimental de harinas de vaina de mezquite (*Prosopis laevigata*) y efecto de su consumo en un alimento obtenido por extrusión sobre el desarrollo de dislipidemia en ratón C57BL/6J. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/2674>
- Díaz-Batalla, L., Aguilar Arteaga, K., Castro-Rosas, J., Falfán-Cortés, R. N., Téllez-Jurado, A., & Gómez-Aldapa, C. A. (2022). Diet based on *Prosopis laevigata* legume seed prevents dyslipidemia development in C57BL/6J mouse. *Legume Science*, 4(2). <https://doi.org/10.1002/leg3.109>
- Díaz-Batalla, L., Hernández-Uribe, J. P., Román-Gutiérrez, A. D., Cariño-Cortés, R., Castro-Rosas, J., Téllez-Jurado, A., & Gómez-Aldapa, C. A. (2018a). Chemical and nutritional characterization of raw and thermal-treated flours of Mesquite (*Prosopis laevigata*) pods and their residual brans. *CyTA - Journal of Food*, 16(1), 444–451. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1418433>
- Díaz-Batalla, L., Hernández-Uribe, J., Gutiérrez-Dorado, R., Téllez-Jurado, A., Castro-Rosas, J., Pérez-Cadena, R., & Gómez-Aldapa, C. (2018b). Nutritional characterization of *Prosopis laevigata* legume tree (mesquite) seed flour and the effect of extrusion cooking on its bioactive components. *Foods*, 7(8), 124. <https://doi.org/10.3390/foods7080124>
- Diego-Zarate, L. M., Méndez-Zamora, G., Rivera-De Alba, J. A., & Flores-Girón, E. (2021). Efecto del nopal (*Opuntia* spp) deshidratado en polvo en las propiedades fisicoquímicas, texturales y sensoriales de salchichas Viena. *Biotecnia*, 23(2), 89–95. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i2.1377>
- Dikeman, C. L., & Fahey, G. C. (2006). Viscosity as related to dietary fiber: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(8), 649–663. <https://doi.org/10.1080/10408390500511862>
- Doma-Bhutia, Y., & Ganapathy, V. (2020). Digestion and Absorption of Carbohydrate, Protein, and Fat. In M. Feldman, L. S. Friedman, & L. J. Brandt (Eds.), *Sleisenger and Fordtran's Gastrointestinal and Liver Disease* (11th ed., pp. 1636–1656). Elsevier.
- Dong, J.-L., Yang, M., Shen, R.-L., Zhai, Y.-F., Yu, X., & Wang, Z. (2019). Effects of thermal processing on the structural and functional properties of soluble dietary

fiber from whole grain oats. *Ciencia y Tecnología de Los Alimentos Internacional [Food Science and Technology International]*, 25(4), 282–294. <https://doi.org/10.1177/1082013218817705>

Doro, E., & Réquillart, V. (2020). Review of sustainable diets: are nutritional objectives and low-carbon-emission objectives compatible? *Review of Agricultural Food and Environmental Studies*, 101(1), 117–146. <https://doi.org/10.1007/s41130-020-00110-2>

Dowd, L. E. (1959). Spectrophotometric determination of quercetin. *Analytical Chemistry*, 31(7), 1184–1187. <https://doi.org/10.1021/ac60151a033>

Du Toit, L. (2018). Gelling properties of cactus pear mucilage-hydrocolloid combinations in a sugar-based confectionery. [University of the Free State].

Du Toit, A., De Wit, M., Fouché, H. J., Taljaard, M., Venter, S. L., & Hugo, A. (2019). Mucilage powder from cactus pears as functional ingredient: influence of cultivar and harvest month on the physicochemical and technological properties. *Journal of Food Science and Technology*, 56(5), 2404–2416. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03706-9>

Du Toit, A., de Wit, M., Fouché, H. J., Venter, S. L., & Hugo, A. (2020). Relationship between weather conditions and the physicochemical characteristics of cladodes and mucilage from two cactus pear species. *PloS One*, 15(8), e0237517. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237517>

Dubeux, J. C. B., Jr, Santos, M. V. F. dos, Cunha, M. V. da, Santos, D. C. dos, Souza, R. T. de A., Mello, A. C. L. de, & Souza, T. C. de. (2021). Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 275(114890), 114890. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>

Dubey, R. K., & Bhattacharya, S. (2014). Extrusion processing of foods. In *Conventional and Advanced Food Processing Technologies* (pp. 75–98). John Wiley & Sons, Ltd.

Dybka-Stępień, K., Otlewska, A., Gózdź, P., & Piotrowska, M. (2021). The renaissance of plant mucilage in health promotion and industrial applications: A review. *Nutrients*, 13(10), 3354. <https://doi.org/10.3390/nu13103354>

EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies (NDA). (2010). Scientific Opinion on Dietary Reference Values for carbohydrates and dietary fibre. *EFSA Journal*, 8(3). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1462>

Ekechukwu, O. V. (1999). Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 593–613. [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(98\)00092-2](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(98)00092-2)

- El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbj, M. S., Latruffe, N., Lizard, G., Nasser, B., & Cherkaoui-Malki, M. (2014). Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19(9), 14879–14901. <https://doi.org/10.3390/molecules190914879>
- ENSANUT. (2021). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición. ENCUESTAS. <https://ensanut.insp.mx/>
- Escamilla-Ayala, M. S. (2021). Elaboración de una pasta seca para sopas formulada con harina de nopal (*Opuntia ficus indica* var. blanco) [Universidad de Guanajuato]. <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/5278>
- Evans, C. E. L. (2020). Dietary fibre and cardiovascular health: a review of current evidence and policy. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 79(1), 61–67. <https://doi.org/10.1017/S0029665119000673>
- Fabela-Illescas, H. E., Castro-Mendoza, M. P., Montalvo-González, E., Anaya-Esparza, L. M., Vargas-Torres, A., Betanzos-Cabrera, G., & Hernandez-Uribe, J. P. (2022). Bioactive compounds identification and physicochemical characterization from *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck cladodes flour. *Biociencia*, 24(1), 46–54. <https://doi.org/10.18633/biociencia.v24i1.1519>
- FAO. (2006). Contenido de nutrientes en alimentos seleccionados. [Fao.org. https://www.fao.org/3/W0073S/w0073s1x.htm](http://www.fao.org/3/W0073S/w0073s1x.htm)
- FAO. (2018). ECOLOGIA DEL CULTIVO, MANEJO Y USOS DEL NOPAL. [Fao.org. https://www.fao.org/3/i7628es/l7628ES.pdf](https://www.fao.org/3/i7628es/l7628ES.pdf)
- FAO. (2019). Dietas Saludables Sostenibles: Principios Rectores. FAO and WHO.
- FAO. (2021). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: La fibra alimentaria, una aliada de nuestra salud. [Fao.org. https://www.fao.org/venezuela/noticias/detail-events/ar/c/1437783/](https://www.fao.org/venezuela/noticias/detail-events/ar/c/1437783/)
- FAO. (2023). Es hora de poner cactus en el menú. [Fao.org. https://www.fao.org/news/story/es/item/1070263/icode/](https://www.fao.org/news/story/es/item/1070263/icode/)
- Farzana, M., Shahriar, S., Jeba, F. R., Tabassum, T., Araf, Y., Ullah, M. A., Tasnim, J., Chakraborty, A., Naima, T. A., Marma, K. K. S., Rahaman, T. I., & Hosen, M. J. (2022). Functional food: complementary to fight against COVID-19. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 11(1), 33. <https://doi.org/10.1186/s43088-022-00217-z>
- FDA. (2020). Food labeling & nutrition. U.S. Food and Drug Administration; FDA. <https://www.fda.gov/food/food-labeling-nutrition>

- Feng, Z., Dou, W., Alaxi, S., Niu, Y., & Yu, L. (Lucy). (2017). Modified soluble dietary fiber from black bean coats with its rheological and bile acid binding properties. *Food Hydrocolloids*, 62, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.07.032>
- Figueroa-Pérez, M. G., Pérez-Ramírez, I. F., 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(1), 1728–1742. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1206126>
- Firman, J., Liu, L., Mahalak, K., Tanes, C., Bittinger, K., Tu, V., Bobokalonov, J., Mattei, L., Zhang, H., & Van den Abbeele, P. (2022). The impact of environmental pH on the gut microbiota community structure and short chain fatty acid production. *FEMS Microbiology Ecology*, 98(5). <https://doi.org/10.1093/femsec/fiac038>
- Fischer, F., Romero, R., Hellhund, A., Linne, U., Bertrams, W., Pinkenburg, O., Eldin, H. S., Binder, K., Jacob, R., Walker, A., Stecher, B., Basic, M., Luu, M., Mahdavi, R., Heintz-Buschart, A., Visekruna, A., & Steinhoff, U. (2020). Dietary cellulose induces anti-inflammatory immunity and transcriptional programs via maturation of the intestinal microbiota. *Gut Microbes*, 12(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1829962>
- Flores-Hernández, A., Orona-Castillo, I., Murillo-Amador, B., Garcia-Hernandez, J. L., & Troyo-Dieguez, E. (2004). Yield and physiological traits of prickly pear cactus 'nopal' (*Opuntia* spp.) cultivars under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 70(2), 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.06.002>
- Fu, B. X., Wang, K., & Dupuis, B. (2017). Predicting water absorption of wheat flour using high shear-based GlutoPeak test. *Journal of Cereal Science*, 76, 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.05.017>
- Gänzle, M. G. (2011). Lactose and Oligosaccharides | Lactose: Galacto-Oligosaccharides. In *Encyclopedia of Dairy Sciences* (pp. 209–216). Elsevier.
- Garcia-Amezquita, L. E., Tejada-Ortigoza, V., Torres, J. A., & Welti-Chanes, J. (2020). Extraction and modification of dietary fiber applying thermal processes. In *Food Engineering Series* (pp. 329–342). Springer International Publishing.
- García-Méndez. (2011). Effect of extrusion parameters on some properties of dietary fiber from lemon (*Citrus aurantifolia* Swingle) residues. *African Journal of Biotechnology*, 10(73). <https://doi.org/10.5897/ajb11.1582>
- Gat, Y., & Ananthanarayan, L. (2016). Use of paprika oily extract as pre-extrusion colouring of rice extrudates: impact of processing and storage on colour stability. *Journal of Food Science and Technology*, 53(6), 2887–2894. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2271-3>

- GBD. (2017). Global Burden of Disease Study 2017. Healthdata.org. <https://ghdx.healthdata.org/gbd-2017>
- GBD. (2019). Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet*, 393(10184), 1958–1972. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)30041-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30041-8)
- Gibson, G. R., Hutkins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. J., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K. S., Cani, P. D., Verbeke, K., & Reid, G. (2017). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews. Gastroenterology & Hepatology*, 14(8), 491–502. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2017.75>
- Global Nutrition Report. (2022). The state of global nutrition. Bristol, UK: Development Initiatives.
- Gomes, G. M. F., Cândido, M. J. D., Lopes, M. N., Maranhão, T. D., Andrade, D. R. de, Costa, J. F. M., Silveira, W. M., & Neiva, J. N. M. (2018). Chemical composition of cactus pear cladodes under different fertilization and harvesting managements. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 53(2), 221–228. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000200011>
- Gonçalves, D. A., Teixeira, J. A., & Nobre, C. (2022). In situ enzymatic synthesis of prebiotics to improve food functionality. In *Value-Addition in Food Products and Processing Through Enzyme Technology* (pp. 253–267). Elsevier.
- Guan, Z.-W., Yu, E.-Z., & Feng, Q. (2021). Soluble dietary fiber, one of the most important nutrients for the gut Microbiota. *Molecules*, 26(22), 6802. <https://doi.org/10.3390/molecules26226802>
- Guevara-Arauza, J. C., Bárcenas, D. G., Ortega-Rivas, E., Martínez, J. D. P., Hernández, J. R., & de Jesús Ornelas-Paz, J. (2015). Effect of fiber fractions of prickly pear cactus (nopal) on quality and sensory properties of wheat bread rolls. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2990–2997. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1341-7>
- Guevara-Arauza, J. C., de Jesús Ornelas-Paz, J., Pimentel-González, D. J., Rosales Mendoza, S., Soria Guerra, R. E., & Paz Maldonado, L. M. T. (2012). Prebiotic effect of mucilage and pectic-derived oligosaccharides from nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Food Science and Biotechnology*, 21(4), 997–1003. <https://doi.org/10.1007/s10068-012-0130-1>
- Gul, K., Singh, A. K., & Jabeen, R. (2016). Nutraceuticals and functional foods: The foods for the future world. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(16), 2617–2627. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.903384>

- Haghdan, S., Renneckar, S., & Smith, G. D. (2016). Sources of Lignin. In *Lignin in Polymer Composites* (pp. 1–11). Elsevier.
- Halliwell, B. (2007). Biochemistry of oxidative stress. *Biochemical Society Transactions*, 35(Pt 5), 1147–1150. <https://doi.org/10.1042/BST0351147>
- Hamad, A. M. A. (2021). Evaluation of dietary fiber and the effect on physicochemical properties of foods. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 421–433. <https://doi.org/10.32628/ijrst218385>
- Hamdani, A. M., Wani, I. A., & Bhat, N. A. (2019). Sources, structure, properties and health benefits of plant gums: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.103>
- Harrison, M. R., Palma, G., Buendia, T., Bueno-Tarodo, M., Quell, D., & Hachem, F. (2022). A scoping review of indicators for sustainable healthy diets. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.822263>
- Hasler, C. M. (2002). Functional foods: Benefits, concerns and challenges—A position paper from the American council on science and health. *The Journal of Nutrition*, 132(12), 3772–3781. <https://doi.org/10.1093/jn/132.12.3772>
- He, Y., Li, W., Zhang, X., Li, T., Ren, D., & Lu, J. (2020). Physicochemical, functional, and microstructural properties of modified insoluble dietary fiber extracted from rose pomace. *Journal of Food Science and Technology*, 57(4), 1421–1429. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04177-8>
- Hernández Espinosa, D. R., Barrera Morín, V., Briz Tena, O., González Herrera, E. A., Laguna Maldonado, K. D., Jardinez Díaz, A. S., Sánchez Olivares, M., & Matuz Mares, D. (2019). El papel de las especies reactivas de oxígeno y nitrógeno en algunas enfermedades neurodegenerativas. *Revista de La Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México*, 62(3), 6–19. <https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2019.62.3.03>
- Hernández-Becerra, E., de los Angeles Aguilera-Barreiro, M., Contreras-Padilla, M., Pérez-Torrero, E., & Rodríguez-García, M. E. (2022). Nopal cladodes (*Opuntia Ficus Indica*): Nutritional properties and functional potential. *Journal of Functional Foods*, 95(105183), 105183. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105183>
- Hernández-Nava, R. G., Bello-Pérez, L. A., San Martín-Martínez, E., Hernández-Sánchez, H., & Mora-Escobedo, R. (2011). Effect of extrusion cooking on the functional properties and starch components of lentil/banana blends: Response surface analysis. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(3), 409-419. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382011000300007&lng=es&tlng=.](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000300007&lng=es&tlng=)

- Hernández-Urbiola, M. I., Pérez-Torrero, E., & Rodríguez-García, M. E. (2011). Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus indica*) at varied ages in an organic harvest. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), 1287–1295. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051287>
- Hu, L., Fang, X., Du, M., Luo, F., & Guo, S. (2020). Hemicellulose-based polymers processing and application. *American Journal of Plant Sciences*, 11(12), 2066–2079. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1112146>
- Huang, L.-Z., Ma, M.-G., Ji, X.-X., Choi, S.-E., & Si, C. (2021). Recent developments and applications of hemicellulose from wheat straw: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 690773. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.690773>
- Huang, X., Liu, H., Ma, Y., Mai, S., & Li, C. (2022). Effects of extrusion on starch molecular degradation, order-disorder structural transition and digestibility-A review. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(16), 2538. <https://doi.org/10.3390/foods11162538>
- Huang, Y.-L., & Ma, Y.-S. (2016). The effect of extrusion processing on the physiochemical properties of extruded orange pomace. *Food Chemistry*, 192, 363–369. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.039>
- Humphries, T., Campbell, S., & Florentine, S. (2022). Challenges Inherent in Controlling Prickly Pear Species; a Global Review of the Properties of *Opuntia stricta*, *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia monacantha*. *Plants*, 11(23), 3334. <https://doi.org/10.3390/plants11233334>
- Ibrahim, O., & Menkovska, M. (2022). Dietary fibers-classification, properties, analysis and function: A review. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 13(12), 527–544. <https://doi.org/10.4236/abb.2022.1312036>
- IMSS. (2018). Nopal, auxiliar en el control de la diabetes y la hiperglucemia: IMSS. Gob.mx. <http://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/201810/265>
- IMSS. (2019). Tablas Bromatológicas del Cuadro Básico de Alimentos IMSS. Gob.Mx. <https://www.imss.gob.mx/sites/all/statics/pdf/cuadros-basicos/TBcompleto.pdf>
- INEGI. (2022a). ESTADÍSTICA DE DEFUNCIONES REGISTRADAS: COMUNICADO DE PRENSA NÚM. 24/22. Org.Mx. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2022/dr/dr2021.pdf>
- INEGI. (2022b). Estadísticas Vitales. Estadísticas de defunciones registradas 2020 - Mexico [Data set]. <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/703>

- INFOBAE. (2019). Piel de nopal, la casa de moda que aprovecha al máximo la planta mexicana. INFOBAE. <https://www.infobae.com/america/mexico/2022/12/03/piel-de-nopal-la-casa-de-moda-que-aprovecha-al-maximo-la-planta-mexicana/>
- INIFAP. (2008). USO DEL NOPAL EN LA ALIMENTACION DE RUMIANTES. Gob.Mx. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/778.pdf>
- Ioniță-Mîndrican, C.-B., Ziani, K., Mititelu, M., Oprea, E., Neacșu, S. M., Moroșan, E., Dumitrescu, D.-E., Roșca, A. C., Drăgănescu, D., & Negrei, C. (2022). Therapeutic benefits and dietary restrictions of fiber intake: A state of the art review. *Nutrients*, 14(13), 2641. <https://doi.org/10.3390/nu14132641>
- Iqbal, S., Tirpanalan-Staben, Ö., & Franke, K. (2022). Modification of dietary fibers to valorize the by-products of cereal, fruit and vegetable industry-A review on treatment methods. *Plants*, 11(24), 3466. <https://doi.org/10.3390/plants11243466>
- Jagelaviciute, J., Basinskiene, L., Cizeikiene, D., & Syrpas, M. (2022). Technological properties and composition of enzymatically modified cranberry pomace. *Foods* (Basel, Switzerland), 11(15), 2321. <https://doi.org/10.3390/foods11152321>
- Jiang, C., Wang, R., Liu, X., Wang, J., Zheng, X., & Zuo, F. (2022). Effect of particle size on physicochemical properties and in vitro hypoglycemic ability of insoluble dietary fiber from corn bran. *Frontiers in Nutrition*, 9, 951821. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.951821>
- Jideani, A. I. O., Silungwe, H., Takalani, T., Omolola, A. O., Udeh, H. O., & Anyasi, T. A. (2021). Antioxidant-rich natural fruit and vegetable products and human health. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 41–67. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1866597>
- Jin, Z., Wang, M., Wu, F., Cai, H. Y., Jin, W. P., Sun, W., Chen, X., Li, F., Wang, Z., & Shen, W. Y. (2020). Effect of extrusion on the total antioxidant capacity and free phenolic compounds of wheat bran by response surface methodology. *Rivista Italiana Di Scienza Degli Alimenti [Italian Journal of Food Science]*, 32(2). <https://doi.org/10.14674/IJFS-1626>
- Jing, Y., & Chi, Y.-J. (2013). Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue. *Food Chemistry*, 138(2–3), 884–889. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.12.003>
- Jozinović, A., Ačkar, Đ., Jokić, S., Babić, J., Panak Balentić, J., Banožić, M., & Šubarić, D. (2017). Optimisation of extrusion variables for the production of corn snack products enriched with defatted hemp cake. *Czech Journal of Food Sciences*, 35(6), 507–516. <https://doi.org/10.17221/83/2017-cjfs>

- Jr, P., & W, Y. (2016). A review of physiological effects of soluble and insoluble dietary fibers. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 06(02). <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000476>
- Kabir, A., Karim, M. N., Islam, R. M., Romero, L., & Billah, B. (2022). Health system readiness for non-communicable diseases at the primary care level: a systematic review. *BMJ Open*, 12(2), e060387. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-060387>
- Kassem, I. A. A., Joshua Ashaolu, T., Kamel, R., Elkasabgy, N. A., Afifi, S. M., & Farag, M. A. (2021). Mucilage as a functional food hydrocolloid: ongoing and potential applications in prebiotics and nutraceuticals. *Food & Function*, 12(11), 4738–4748. <https://doi.org/10.1039/d1fo00438g>
- Kaur, C., & Kapoor, H. C. (2001). Antioxidants in fruits and vegetables - the millennium's health. *International Journal of Food Science & Technology*, 36(7), 703–725. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.00513.x>
- Kaur, G., Sharma, S., Singh, B., & Dar, B. N. (2016). Comparative study on functional, rheological, thermal, and morphological properties of native and modified cereal flours. *International Journal of Food Properties*, 19(9), 1949–1961. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1089892>
- Kesselly, S. R., Mugabi, R., & Byaruhanga, Y. B. (2023). Effect of soaking and extrusion on functional and pasting properties of cowpeas flour. *Scientific African*, 19(e01532), e01532. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01532>
- Khanpit, V. V., Tajane, S. P., & Mandavgane, S. A. (2022). Extrusion for soluble dietary fiber concentrate: Critical overview on effect of process parameters on physicochemical, nutritional, and biological properties. *Food Reviews International*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2097689>
- Kiran, T. R., Otlu, O., & Karabulut, A. B. (2023). Oxidative stress and antioxidants in health and disease. *Journal of Laboratory Medicine*, 47(1), 1–11. <https://doi.org/10.1515/labmed-2022-0108>
- Kojić, J., Belović, M., Krulj, J., Pezo, L., Teslić, N., Kojić, P., Tukuljac, L. P., Šeregelj, V., & Ilić, N. (2022). Textural, color and sensory features of spelt wholegrain snack enriched with betaine. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(3), 475. <https://doi.org/10.3390/foods11030475>
- Konstantinidi, M., & Koutelidakis, A. E. (2019). Functional foods and bioactive compounds: A review of its possible role on weight management and obesity's metabolic consequences. *Medicines (Basel, Switzerland)*, 6(3), 94. <https://doi.org/10.3390/medicines6030094>
- Korkerd, S., Wanlapa, S., Puttanlek, C., Uttapap, D., & Rungsardthong, V. (2016). Expansion and functional properties of extruded snacks enriched with nutrition

- sources from food processing by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 561–570. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2039-1>
- Kotha, R. R., Tareq, F. S., Yildiz, E., & Luthria, D. L. (2022). Oxidative stress and antioxidants-A critical review on in vitro antioxidant assays. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 11(12), 2388. <https://doi.org/10.3390/antiox11122388>
- Kris-Etherton, P. M., Sapp, P. A., Riley, T. M., Davis, K. M., Hart, T., & Lawler, O. (2022). The dynamic interplay of healthy lifestyle behaviors for cardiovascular health. *Current Atherosclerosis Reports*, 24(12), 969–980. <https://doi.org/10.1007/s11883-022-01068-w>
- Kshirsagar, S. B., Takarkhede, S., Jha, A. G., Jain, R. P., Jadhav, V. S., & Jadhav, D. D. (2020). A comprehensive review on dietary fiber and their functional properties in human body. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, 4(3), 059–076. <https://doi.org/10.30574/wjbphs.2020.4.3.0104>
- Kudanga, T., & Aruwa, C. E. (2021). Industrial Applications of *Opuntia* spp. (Nopal, Fruit and Peel). In *Opuntia spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications* (pp. 841–875). Springer International Publishing.
- Kuljarachanan, T., Advanced Food Processing Research Laboratory, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha u-tid Road, Tungkru, Bangkok 10140, Thailand, Chiewchan, N., & Devahastin, S. (2019). Mechanical grinding effects on health-related functional properties of dietary fiber powder from white cabbage by-products. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, 6(2), 154–160. <https://doi.org/10.18178/joaat.6.2.154-160>
- Kurutas, E. B. (2015). The importance of antioxidants which play the role in cellular response against oxidative/nitrosative stress: current state. *Nutrition Journal*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s12937-016-0186-5>
- Küster, I., & Vila, N. (2017). Healthy lifestyle and eating perceptions: correlations with weight and low-fat and low-sugar food consumption in adolescence. *Frontiers in Life Science*, 10(1), 48–62. <https://doi.org/10.1080/21553769.2017.1329170>
- Kusumiyati, Hadiwijaya, Y., Putri, I. E., Mubarak, S., & Hamdani, J. S. (2020). Rapid and non-destructive prediction of total soluble solids of guava fruits at various storage periods using handheld near-infrared instrument. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 458(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/458/1/012022>
- Launay, B., & Lisch, J. M. (1983). Twin-screw extrusion cooking of starches: Flow behaviour of starch pastes, expansion and mechanical properties of extrudates. *Journal of Food Engineering*, 2(4), 259–280. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(83\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0260-8774(83)90015-8)

- Legesse, E., Nigussie, T., Girma, D., Geleta, L. A., Dejene, H., Deriba, B. S., Geleta, T. A., Sahlu, D., Tesema, M., Tilahun, A., Awol, M., Teshome, F., Midaksa, G., & Bati, F. (2022). Level of adequate knowledge of non-communicable diseases and associated factors among adult residents of North Shewa zone, Oromia region, Ethiopia: A mixed-method approach. *Frontiers in Public Health*, 10, 892108. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.892108>
- Lei, H., Ruan, R., Fulcher, G.R., Lengerich, B. (2008). Color development in an extrusion-cooked model system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 1. 55-63. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2008.02.055-063>.
- Leonard, W., Zhang, P., Ying, D., & Fang, Z. (2020). Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), 218–246. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12514>
- Li, J.-L., Sun, D.-W., & Cheng, J.-H. (2016). Recent advances in nondestructive analytical techniques for determining the total soluble solids in fruits: A review: Nondestructive techniques for soluble solids in fruits.... *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(5), 897–911. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12217>
- Li, S., Hu, N., Zhu, J., Zheng, M., Liu, H., & Liu, J. (2022). Influence of modification methods on physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from corn bran. *Food Chemistry: X*, 14(100298), 100298. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100298>
- Li, X., Masatcioglu, M. T., & Koxsel, F. (2019). Physical and functional properties of wheat flour extrudates produced by nitrogen injection assisted extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 89(102811), 102811. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102811>
- Lichtenthaler, H. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in enzymology*. 148C. 350-382. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
- Liu, X., Zhao, J., Zhang, X., Li, Y., Zhao, J., Li, T., Zhou, B., Yang, H., & Qiao, L. (2018). Enrichment of soybean dietary fiber and protein fortified rice grain by dry flour extrusion cooking: the physicochemical, pasting, taste, palatability, cooking and starch digestibility properties. *RSC Advances*, 8(47), 26682–26690. <https://doi.org/10.1039/c8ra01781f>
- Liu, Y., Hsieh, F., Heymann, H., & Huff, H. E. (2000). Effect of process conditions on the physical and sensory properties of extruded oat-corn puff. *Journal of Food Science*, 65(7), 1253–1259. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb10274.x>

- Liu, Yanlan, Zhang, H., Yi, C., Quan, K., & Lin, B. (2021). Chemical composition, structure, physicochemical and functional properties of rice bran dietary fiber modified by cellulase treatment. *Food Chemistry*, 342(128352), 128352. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128352>
- Liu, Yanlong, Wang, L., Liu, F., & Pan, S. (2016). Effect of grinding methods on structural, physicochemical, and functional properties of insoluble dietary fiber from orange peel. *International Journal of Polymer Science*, 2016, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2016/6269302>
- Liu, Yaowen, Ahmed, S., Sameen, D. E., Wang, Y., Lu, R., Dai, J., Li, S., & Qin, W. (2021). A review of cellulose and its derivatives in biopolymer-based for food packaging application. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 532–546. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.016>
- Lobo, V., Patil, A., Phatak, A., & Chandra, N. (2010). Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy Reviews*, 4(8), 118–126. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.70902>
- López-Cervantes, J., Sánchez-Machado, D. I., Campas-Baypoli, O. N., & Bueno-Solano, C. (2011). Functional properties and proximate composition of cactus pear cladodes flours. *Food Science and Technology*, 31(3), 654–659. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612011000300016>
- López-Romero, P., Pichardo-Ontiveros, E., Avila-Nava, A., Vázquez-Manjarrez, N., Tovar, A. R., Pedraza-Chaverri, J., & Torres, N. (2014). The effect of nopal (*Opuntia ficus indica*) on postprandial blood glucose, incretins, and antioxidant activity in Mexican patients with type 2 diabetes after consumption of two different composition breakfasts. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 114(11), 1811–1818. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2014.06.352>
- Lotfi Shirazi, S., Koocheki, A., Milani, E., & Mohebbi, M. (2020). Production of high fiber ready-to-eat expanded snack from barley flour and carrot pomace using extrusion cooking technology. *Journal of Food Science and Technology*, 57(6), 2169–2181. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04252-5>
- Luna-Zapién, E. A., Zegbe, J. A., Meza-Velázquez, J. A., & Minjares-Fuentes, R. (2023). MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia* spp.) Y SU APLICACIÓN COMO ADITIVO ALIMENTARIO: UNA VISIÓN GENERAL. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(1), 51. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.1.51>
- Ma, Q., Ma, Z., Wang, W., Mu, J., Liu, Y., Wang, J., Stipkovits, L., Hui, X., Wu, G., & Sun, J. (2022). The effects of enzymatic modification on the functional ingredient - Dietary fiber extracted from potato residue. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 153(112511), 112511. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112511>

- Magallanes-Cruz, P. A., Flores-Silva, P. C., & Bello-Perez, L. A. (2017). Starch structure influences its digestibility: A review: Structure-digestibility relationship. *Journal of Food Science*, 82(9), 2016–2023. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13809>
- Mahmood, Z., Yameen, M., Jahangeer, M., Riaz, M., Ghaffar, A., & Javid, I. (2018). Lignin as Natural Antioxidant Capacity. In *Lignin - Trends and Applications*. InTech.
- Majure, L. C., Judd, W. S., Soltis, P. S., & Soltis, D. E. (2017). Taxonomic revision of the *Opuntia humifusa* complex (Opuntieae: Cactaceae) of the eastern United States. *Phytotaxa*, 290(1), 1. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.290.1.1>
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., & Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia* (1996), 49(1), 31–51. Recuperado de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952015000100003](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000100003)
- Manzanarez-Tenorio, L. E., Ruíz Cruz, S., Cira-Chávez, L. A., Estrada-Alvarado, M. I., Márquez-Rios, E., Del-Toro-Sánchez, C. L., & Suárez-Jiménez, G. M. (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. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1662>
- Marcel Moshi, A., Ravindran, D., Sundara Bharathi, S. R., Suganthan, V., & Kennady Shaju Singh, G. (2019). Characterization of new natural cellulosic fibers – A comprehensive review. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 574(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/574/1/012013>
- Martinez-Albino, F., & Gordillo-Mejía, A. (2022). Enforcement in the processing of nopal and by-products at Teotihuacan. *Revista Multidisciplinaria de Avances de Investigación*, 8, 1–14.
- Martins, G. N., Ureta, M. M., Tymczyszyn, E. E., Castilho, P. C., & Gomez-Zavaglia, A. (2019). Technological aspects of the production of fructo and galacto-oligosaccharides. Enzymatic synthesis and hydrolysis. *Frontiers in Nutrition*, 6, 78. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00078>
- Martirosyan, D., Lampert, T., & Lee, M. (2022). A comprehensive review on the role of food bioactive compounds in functional food science. *Functional Food Science*, 2(3), 64. <https://doi.org/10.31989/ffs.v2i3.906>
- McRorie, J. W., Jr, & McKeown, N. M. (2017). Understanding the physics of functional fibers in the gastrointestinal tract: An evidence-based approach to resolving enduring misconceptions about insoluble and soluble fiber. *Journal of the*

Academy of Nutrition and Dietetics, 117(2), 251–264.  
<https://doi.org/10.1016/j.jand.2016.09.021>

Medina-Torres, L., Brito-De La Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., & Alonso, S. (2003). Mechanical properties of gels formed by mixtures of mucilage gum (*Opuntia ficus indica*) and carrageenans. *Carbohydrate Polymers*, 52(2), 143–150. [https://doi.org/10.1016/s0144-8617\(02\)00269-2](https://doi.org/10.1016/s0144-8617(02)00269-2)

Medina-Torres, L. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*, 14(5), 417–424. [https://doi.org/10.1016/s0268-005x\(00\)00015-1](https://doi.org/10.1016/s0268-005x(00)00015-1)

Medina-Torres, L., Vernon-Carter, E. J., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzman, N. E., Herrera-Valencia, E. E., Calderas, F., & Jiménez-Alvarado, R. (2011). Study of the antioxidant properties of extracts obtained from nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes after convective drying: Antioxidant properties of extracts of convectively dried nopal cactus cladodes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(6), 1001–1005. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4271>

Mendoza-Ávila, M., Gutiérrez-Cortez, E., Quintero-García, M., Real, A. D., Rivera-Muñoz, E. M., Ibarra-Alvarado, C., Rubio, E., Jiménez-Mendoza, D., & Rojas-Molina, I. (2020). Calcium bioavailability in the soluble and insoluble fibers extracted from *Opuntia ficus indica* at different maturity stages in growing rats. *Nutrients*, 12(11), 3250. <https://doi.org/10.3390/nu12113250>

Mensink, M. A., Frijlink, H. W., van der Voort Maarschalk, K., & Hinrichs, W. L. J. (2015). Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics. *Carbohydrate Polymers*, 130, 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.05.026>

Mézes M., & Erdélyi M. (2018). Az élelmiszerek rosttartalmának antioxidáns hatása. *Orvosi hetilap*, 159(18), 709–712. <https://doi.org/10.1556/650.2018.30953>

Mjoun, K., & Rosentrater, K. A. (2011). Extruded aquafeeds containing distillers dried grains with solubles: effects on extrudate properties and processing behaviour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(15), 2865–2874. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4536>

Möller, J. (2014). Comparación de los métodos para la determinación de fibra en pienso y en los alimentos (Dedicated Analytical Solutions). FOSS. <https://docplayer.es/82653469-Comparacion-de-los-metodos-para-la-determinacion-de-fibra-en-pienso-y-en-los-alimentos.html>

Moran-Ramos, S., He, X., Chin, E. L., Tovar, A. R., Torres, N., Slupsky, C. M., & Raybould, H. E. (2017). Nopal feeding reduces adiposity, intestinal inflammation and shifts the cecal microbiota and metabolism in high-fat fed rats. *PloS One*, 12(2), e0171672. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171672>

- Moraru, C. I., & Kokini, J. L. (2003). Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2(4), 147–165. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2003.tb00020.x>
- Mounir, B., Younes, E. G., Asmaa, M., Abdeljalil, Z., & Abdellah, A. (2020). Physico-chemical changes in cladodes of *Opuntia ficus-indica* as a function of the growth stage and harvesting areas. *Journal of Plant Physiology*, 251(153196), 153196. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153196>
- Moure, A., Sineiro, J., Domínguez, H., & Parajó, J. C. (2006). Functionality of oilseed protein products: A review. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 39(9), 945–963. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.07.002>
- Mudannayake, D. C., Jayasena, D. D., Wimalasiri, K. M. S., Ranadheera, C. S., & Ajlouni, S. (2022). Inulin fructans – food applications and alternative plant sources: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(9), 5764–5780. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15947>
- Mudgil, D. (2017). The interaction between insoluble and soluble fiber. In *Dietary Fiber for the Prevention of Cardiovascular Disease* (pp. 35–59). Elsevier.
- Nabil, B., Ouaabou, R., Ouhammou, M., Essaadouni, L., & Mahrouz, M. (2020). Functional properties, antioxidant activity, and organoleptic quality of novel biscuit produced by Moroccan cladode flour “*Opuntia ficus-indica*.” *Journal of Food Quality*, 2020, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2020/3542398>
- Nagy, R., Máthé, E., Csapó, J., & Sipos, P. (2020). Modifying effects of physical processes on starch and dietary fiber content of foodstuffs. *Processes (Basel, Switzerland)*, 9(1), 17. <https://doi.org/10.3390/pr9010017>
- Nassar, A. G. (2008). Chemical Composition and Functional Properties of Prickly Pear (*Opuntia ficus indica*) Seeds Flour and Protein Concentrate. *World Journal of Dairy & Food Sciences*, 3(1), 11–16.
- Naumann, S., Schweiggert-Weisz, U., Martin, A., Schuster, M., & Eisner, P. (2021). Effects of extrusion processing on the physiochemical and functional properties of lupin kernel fibre. *Food Hydrocolloids*, 111(106222), 106222. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106222>
- Navale, S. A., Swami, S., & Thakor, N. J. (2016). Extrusion cooking technology for foods : A review. <https://www.semanticscholar.org/paper/6ae36b589f17a2bdc4f3b695a0c1e14b4aa5b36e>
- Navarro-Cortez, R. O., Hernández-Santos, B., Gómez-Aldapa, C. A., Castro-Rosas, J., Herman-Lara, E., Martínez-Sánchez, C. E., Juárez-Barrientos, J. M., Antonio-Cisneros, C. M., & Rodríguez-Miranda, J. (2016). DEVELOPMENT OF

EXTRUDED READY-TO-EAT SNACKS USING PUMPKINSEED (*Cucurbita pepo*) AND NIXTAMALIZED MAIZE (*Zea mays*) FLOUR BLENDS. *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, 15(2), 409–422.

- Neha, K., Haider, M. R., Pathak, A., & Yar, M. S. (2019). Medicinal prospects of antioxidants: A review. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 178, 687–704. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2019.06.010>
- Niroula, A., Khatri, S., Timilsina, R., Khadka, D., Khadka, A., & Ojha, P. (2019). Profile of chlorophylls and carotenoids of wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) microgreens. *Journal of Food Science and Technology*, 56(5), 2758–2763. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03768-9>
- O’Grady, J., O’Connor, E. M., & Shanahan, F. (2019). Review article: dietary fibre in the era of microbiome science. *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 49(5), 506–515. <https://doi.org/10.1111/apt.15129>
- OECD. (2021). Health status - Potential years of life lost - OECD Data. TheOECD. <https://data.oecd.org/healthstat/potential-years-of-life-lost.htm>
- Omohimi, C. I., Sobukola, O. P., Sarafadeen, K. O., & Sanni, L. O. (2013). Effect of Process Parameters on the Proximate Composition, Functional and Sensory Properties (Vol. 7). *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnology Engineering*.
- OMS. (2018). Alimentación Sana: Todo lo Que hay Que saber sobre Una dieta saludable. OMS Corporation.
- OMS. (2019). Malnutrición (OMS, Ed.; 2nd ed., Vol. 67). S Karger AG. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/malnutrition>
- OMS. (2021). Dietas saludables sostenibles: Principios rectores. Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- OMS. (2022). Enfermedades no transmisibles. Who.int. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>
- Ordoñez, M. R., Gely, M. C., & Pagano, A. M. (2012). Estudio de las propiedades físicas y de la cinética de secado de granos de maíz colorado duro. *Avances en ciencias e ingeniería*, 3(3), 153–171. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4052717>
- Ortiz-Cruz, R. A., Ramírez-Wong, B., Ledesma-Osuna, A. I., Torres-Chávez, P. I., Sánchez-Machado, D. I., Montañón-Leyva, B., López-Cervantes, J., & Gutiérrez-Dorado, R. (2020). Effect of extrusion processing conditions on the phenolic compound content and antioxidant capacity of sorghum (*sorghum bicolor* (L.) Moench) bran. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75(2), 252–257. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00810-6>

- Pang, Z., Chen, J., Wang, T., Gao, C., Li, Z., Guo, L., Xu, J., & Cheng, Y. (2021). Linking plant secondary metabolites and plant microbiomes: A review. *Frontiers in Plant Science*, 12, 621276. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.621276>
- Parcheta, M., Świsłocka, R., Orzechowska, S., Akimowicz, M., Choińska, R., & Lewandowski, W. (2021). Recent developments in effective antioxidants: The structure and antioxidant properties. *Materials*, 14(8), 1984. <https://doi.org/10.3390/ma14081984>
- Pardhi, S. D., Singh, B., Nayik, G. A., & Dar, B. N. (2019). Evaluation of functional properties of extruded snacks developed from brown rice grits by using response surface methodology. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(1), 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.11.006>
- Pascoe-Ortiz, S., Rodríguez-Macías, R., Robledo-Ortiz, J. R., Salcedo-Pérez, E., Zamora-Natera, J. F., Rabelero-Velasco, M., & Vargas-Radillo, J. J. (2019). Identificación de propiedades presentes en jugo de *Opuntia megacantha* Salm-Dyck importantes para la producción de biopolímeros. *Tip Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 22. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.197>
- Patterson, M. A., Maiya, M., & Stewart, M. L. (2020). Resistant starch content in foods commonly consumed in the United States: A narrative review. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 120(2), 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2019.10.019>
- Perucini-Avendaño, M., Nicolás-García, M., Jiménez-Martínez, C., Perea-Flores, M. de J., Gómez-Patiño, M. B., Arrieta-Báez, D., & Dávila-Ortiz, G. (2021). Cladodes: Chemical and structural properties, biological activity, and polyphenols profile. *Food Science & Nutrition*, 9(7), 4007–4017. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2388>
- Pesic, D. (2021). Cellulose in nature - versatile sources for novel applications: A literature review. *Undergraduate Research in Natural and Clinical Science and Technology (URN CST) Journal*, 5(2), 1–9. <https://doi.org/10.26685/urncst.200>
- Quezada-Moreno, W., Gallardo-Aguilar, I., & Quezada-Torres, W. (2015). Temperatura y concentración del jugo de caña según pisos climáticos en Ecuador. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 49(1), 17–21.
- Raghavendra, S. N., Ramachandra Swamy, S. R., Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Kumar, S., & Tharanathan, R. N. (2006). Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber. *Journal of Food Engineering*, 72(3), 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.008>
- Rahim, M. A., Saeed, F., Khalid, W., Hussain, M., & Anjum, F. M. (2021). Functional and nutraceutical properties of fructo-oligosaccharides derivatives: a review. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 1588–1602. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1986520>

- Ramachandraiah, K., & Chin, K. B. (2016). Evaluation of ball-milling time on the physicochemical and antioxidant properties of persimmon by-products powder. *Innovative Food Science & Emerging Technologies: IFSET: The Official Scientific Journal of the European Federation of Food Science and Technology*, 37, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.005>
- Ramírez, A., & Pacheco de Delahaye, E. (2009). PROPIEDADES FUNCIONALES DE HARINAS ALTAS EN FIBRA DIETÉTICA OBTENIDAS DE PIÑA, GUAYABA Y GUANÁBANA. *Interciencia*, 34(4), 293-298.
- Ramírez-Balboa, G., Balois-Morales, R., León-Fernández, A. E., Bautista-Rosales, P. U., Jiménez-Zurita, J. O., & Montalvo-González, E. (2023). EN PRENSA. Caracterización fisicoquímica y proximal de almidón y harina de jícama (*Pachyrhizus erosus* L.) . EN PRENSA: Análisis fisicoquímico y proximal. *Revista Bio Ciencias*, 10. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1427>
- Rampersad, R., Badrie, N., & Comissiong, E. (2003). Physico-chemical and sensory characteristics of flavored snacks from extruded cassava/Pigeonpea flour. *Journal of Food Science*, 68(1), 363–367. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb14166.x>
- Ranaivo, H., Thirion, F., Béra-Maillet, C., Guilly, S., Simon, C., Sothier, M., Van Den Berghe, L., Feugier-Favier, N., Lambert-Porcheron, S., Dussous, I., Roger, L., Roume, H., Galleron, N., Pons, N., Le Chatelier, E., Ehrlich, S. D., Laville, M., Doré, J., & Nazare, J.-A. (2022). Increasing the diversity of dietary fibers in a daily-consumed bread modifies gut microbiota and metabolic profile in subjects at cardiometabolic risk. *Gut Microbes*, 14(1), 2044722. <https://doi.org/10.1080/19490976.2022.2044722>
- Rasheed, A., & Abdul-Azeez, F. R. (2019). A review on natural antioxidants. In *Traditional and Complementary Medicine*. IntechOpen.
- Rashid, S., Rakha, A., Anjum, F. M., Ahmed, W., & Sohail, M. (2015). Effects of extrusion cooking on the dietary fibre content and Water Solubility Index of wheat bran extrudates. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(7), 1533–1537. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12798>
- Rathod, R. P., & Annapure, U. S. (2017). Antioxidant activity and polyphenolic compound stability of lentil-orange peel powder blend in an extrusion process. *Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 954–963. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2383-9>
- Reda, T. H., & Atsbha, M. K. (2019). Nutritional composition, antinutritional factors, antioxidant activities, functional properties, and sensory evaluation of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) seeds grown in Tigray region, Ethiopia. *International Journal of Food Science*, 2019, 5697052. <https://doi.org/10.1155/2019/5697052>

- Redgwell, R. J., Curti, D., Robin, F., Donato, L., & Pineau, N. (2011). Extrusion-induced changes to the chemical profile and viscosity generating properties of citrus fiber. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(15), 8272–8279. <https://doi.org/10.1021/jf201845b>
- Rivera Cañón, A. F., Hernández Carrillo, C. G., & Gómez Cuaspuud, J. A. (2021). Evaluation of physicochemical properties of Nopal (*Opuntia Ficus-Indica*) as bio coagulant-flocculant for water treatment. *Journal of Physics. Conference Series*, 2046(1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012057>
- Rives-Castillo, S. C. H., Correa-Pacheco, Z. N., Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R. I., Schettino-Bermudez, B. S., Ortega-Gudiño, P., & Barajas-Cervantes, A. (2021). Análisis químico proximal y térmico en harinas de productos residuales de nopal (*Opuntia ficus-indica*) para obtención de compuestos poliméricos biobasados. *Agrociencia*, 55(5), 403-416. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i5.2516>
- Robin, F., Schuchmann, H. P., & Palzer, S. (2012). Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 28(1), 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.06.008>
- Rodiles-López, J. O., Arriaga-Martínez, L. P., Martínez-Flores, H. E., Zamora-Vega, R., & García-Martínez, R. M. (2019). Desarrollo de una tortilla adicionada con harinas de aguacate y nopal y su efecto en la reducción de colesterol, triglicéridos y glucosa en ratas. *Biotecnia*, 21(2), 71–77. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v21i2.909>
- Rodríguez Robledo, V., & Isabel Castro Vázquez, L. (2020). Pectin - Extraction, Purification, Characterization and Applications. In *Pectins - Extraction, Purification, Characterization and Applications*. IntechOpen.
- Rodríguez-García, M. E., de Lira, C., Hernández-Becerra, E., Cornejo-Villegas, M. A., Palacios-Fonseca, A. J., Rojas-Molina, I., Reynoso, R., Quintero, L. C., Del-Real, A., Zepeda, T. A., & Muñoz-Torres, C. (2007). Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 62(3), 107–112. <https://doi.org/10.1007/s11130-007-0049-5>
- Roupar, D., Coelho, M. C., Gonçalves, D. A., Silva, S. P., Coelho, E., Silva, S., Coimbra, M. A., Pintado, M., Teixeira, J. A., & Nobre, C. (2022). Evaluation of microbial-fructo-oligosaccharides metabolism by human gut Microbiota fermentation as compared to commercial inulin-derived oligosaccharides. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(7), 954. <https://doi.org/10.3390/foods11070954>
- Ruiz-Garza, A. E., Nuñez-González, M. A., Amaya-Guerra, C. A., Baez-González, J. G., Aguilera-González, C. J., & Montemayor-Leal, J. (2017). Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2, 422–427.

- Ruiz-Gutiérrez, M. G., Sánchez-Madrugal, M. Á., & Quintero-Ramos, A. (2018). The extrusion cooking process for the development of functional foods. In *Extrusion of Metals, Polymers and Food Products*. InTech.
- Sabater-Molina, M., Larqué, E., Torrella, F., & Zamora, S. (2009). Dietary fructooligosaccharides and potential benefits on health. *Journal of Physiology and Biochemistry*, 65(3), 315–328. <https://doi.org/10.1007/BF03180584>
- SADER. (2019). Crece en México el consumo y producción de nopal: Agricultura. Gob.Mx. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crece-en-mexico-el-consumo-y-produccion-de-nopal-agricultura?idiom=es>
- SADER. (2020). El nopal, parte de la riqueza del campo mexicano. gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo-mexicano>
- Sadowska-Bartosz, I., & Bartosz, G. (2022). Evaluation of the antioxidant capacity of food products: Methods, applications and limitations. *Processes (Basel, Switzerland)*, 10(10), 2031. <https://doi.org/10.3390/pr10102031>
- Sáenz-Hernandez, C. (2006). Utilización agroindustrial del nopal (Vol. 162). Food & Agriculture Org.
- Salleh, S. N., Fairus, A. A. H., Zahary, M. N., Bhaskar Raj, N., & Mhd Jalil, A. M. (2019). Unravelling the effects of soluble dietary fibre supplementation on energy intake and perceived satiety in healthy adults: Evidence from systematic review and meta-analysis of randomised-Controlled Trials. *Foods*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.3390/foods8010015>
- Samia El-Safy, F. (2013). Evaluation and utilization of cladodes flour in formulating functional sponge cake. *World Applied Sciences Journal*, 27(4), 512–523. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.27.04.81117>
- Samy, D., Deka, S. C., & Das, A. B. (2018). Effect of extrusion conditions on the physicochemical and phytochemical properties of red rice and passion fruit powder based extrudates. *Journal of Food Science and Technology*, 55(12), 5003–5013. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3439-9>
- Sánchez-Tapia, M., Aguilar-López, M., Pérez-Cruz, C., Pichardo-Ontiveros, E., Wang, M., Donovan, S. M., Tovar, A. R., & Torres, N. (2017). Nopal (*Opuntia ficus indica*) protects from metabolic endotoxemia by modifying gut microbiota in obese rats fed high fat/sucrose diet. *Scientific Reports*, 7(1), 4716. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05096-4>
- Sandrin, R., Mejía, S. M. V., Caon, T., & de Francisco, A. (2019). Optimization of extrusion process parameters for preparing fiber-rich oat flour. *Journal of Food Process Engineering*, 42(1), e12943. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12943>

- Sang, J., Li, L., Wen, J., Gu, Q., Wu, J., Yu, Y., Xu, Y., Fu, M., & Lin, X. (2021). Evaluation of the structural, physicochemical and functional properties of dietary fiber extracted from Newhall navel orange by-products. *Foods*, 10(11), 2772. <https://doi.org/10.3390/foods10112772>
- Sangnark, A., & Noomhorm, A. (2003). Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse. *Food Chemistry*, 80(2), 221–229. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(02\)00257-1](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(02)00257-1)
- Santos-Zea, L., Gutierrez-Urbe, J. A., & Serna-Saldivar, S. O. (2011). Comparative analyses of total phenols, antioxidant activity, and flavonol glycoside profile of cladode flours from different varieties of *Opuntia* spp. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(13), 7054–7061. <https://doi.org/10.1021/jf200944y>
- Sarangarajan, R., Meera, S., Rukkumani, R., Sankar, P., & Anuradha, G. (2017). Antioxidants: Friend or foe? *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 10(12), 1111–1116. <https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2017.10.017>
- Šárka, E., Sluková, M., & Henke, S. (2021). Changes in Phenolics during Cooking Extrusion: A Review. *Foods*, 10(9), 2100. <https://doi.org/10.3390/foods10092100>
- Sarkar, P., & Choudhury, G.S. (2014). Peach pomace processing using twin screw extrusion. *The Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2017, 279-285.
- Sharifi-Rad, M., Anil Kumar, N. V., Zucca, P., Varoni, E. M., Dini, L., Panzarini, E., Rajkovic, J., Tsouh Fokou, P. V., Azzini, E., Peluso, I., Prakash Mishra, A., Nigam, M., El Rayess, Y., Beyrouthy, M. E., Polito, L., Iriti, M., Martins, N., Martorell, M., Docea, A. O., Sharifi-Rad, J. (2020). Lifestyle, oxidative stress, and antioxidants: Back and forth in the pathophysiology of chronic diseases. *Frontiers in Physiology*, 11, 694. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00694>
- Sharma, A., Yadav, B. S., & Ritika. (2008). Resistant starch: Physiological roles and food applications. *Food Reviews International*, 24(2), 193–234. <https://doi.org/10.1080/87559120801926237>
- Sharma, C., Singh, B., Hussain, S. Z., & Sharma, S. (2017). Investigation of process and product parameters for physicochemical properties of rice and mung bean (*Vigna radiata*) flour based extruded snacks. *Journal of Food Science and Technology*, 54(6), 1711–1720. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2606-8>
- Shebis, Y., Iluz, D., Kinel-Tahan, Y., Dubinsky, Z., & Yehoshua, Y. (2013). Natural antioxidants: Function and sources. *Food and Nutrition Sciences*, 04(06), 643–649. <https://doi.org/10.4236/fns.2013.46083>
- SIAP. (2019). Gaceta Parlamentaria. Gob.mx. [https://www.senado.gob.mx/65/gaceta\\_comision\\_permanente/documento/97390](https://www.senado.gob.mx/65/gaceta_comision_permanente/documento/97390)

- SIAP. (2021a). Crece en México el consumo y producción de nopal: Agricultura. gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crece-en-mexico-el-consumo-y-produccion-de-nopal-agricultura?idiom=es>
- SIAP. (2021b). El cultivo de nopal verdura en la Ciudad de México. Gob.Mx. <https://www.gob.mx/agricultura/cdmx/articulos/el-cultivo-de-nopal-verdura-en-la-ciudad-de-mexico?idiom=es>
- Silva, Y. P., Bernardi, A., & Frozza, R. L. (2020). The role of short-chain fatty acids from gut Microbiota in gut-brain communication. *Frontiers in Endocrinology*, 11, 25. <https://doi.org/10.3389/fendo.2020.00025>
- Singh, S., Gamlath, S., & Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 42(8), 916–929. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x>
- Singha, P., Singh, S. K., Muthukumarappan, K., & Krishnan, P. (2018). Physicochemical and nutritional properties of extrudates from food grade distiller's dried grains, garbanzo flour, and corn grits. *Food Science & Nutrition*, 6(7), 1914–1926. <https://doi.org/10.1002/fsn3.769>
- Singhal, S., & Swami Hulle, N. R. (2022). Citrus pectins: Structural properties, extraction methods, modifications and applications in food systems – A review. *Applied Food Research*, 2(2), 100215. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100215>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. In *Oxidants and Antioxidants Part A* (pp. 152–178). Elsevier.
- Slavin, J. (2013). Fiber and prebiotics: mechanisms and health benefits. *Nutrients*, 5(4), 1417–1435. <https://doi.org/10.3390/nu5041417>
- Slavin, J. L., Savarino, V., Paredes-Diaz, A., & Fotopoulos, G. (2009). A review of the role of soluble fiber in health with specific reference to wheat dextrin. *The Journal of International Medical Research*, 37(1), 1–17. <https://doi.org/10.1177/147323000903700101>
- Sobota, A., Sykut-Domańska, E., & Rzedzicki, Z. (2010). Effect of extrusion-cooking process on the chemical composition of corn- -wheat extrudates, with particular emphasis on dietary fibre fractions. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 60, 251–259.
- Soliman, G. A. (2019). Dietary fiber, atherosclerosis, and cardiovascular disease. *Nutrients*, 11(5), 1155. <https://doi.org/10.3390/nu11051155>
- Soquetta, M. B., Stefanello, F. S., Huerta, K. da M., Monteiro, S. S., da Rosa, C. S., & Terra, N. N. (2016). Characterization of physicochemical and microbiological properties, and bioactive compounds, of flour made from the skin and bagasse

- of kiwi fruit (*Actinidia deliciosa*). *Food Chemistry*, 199, 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.022>
- Speroni, C. S., Bender, A. B. B., Stiebe, J., Ballus, C. A., Ávila, P. F., Goldbeck, R., Morisso, F. D. P., Silva, L. P. da, & Emanuelli, T. (2020). Granulometric fractionation and micronization: A process for increasing soluble dietary fiber content and improving technological and functional properties of olive pomace. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 130(109526), 109526. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109526>
- Spotti, M. J., & Campanella, O. H. (2020). Enzymatic processes of dietary fibers. In *Food Engineering Series* (pp. 301–327). Springer International Publishing.
- SSA. (2022). ¿Cuánta fibra dietética se debe consumir? [gob.mx. https://www.gob.mx/salud/articulos/cuanta-fibra-dietetica-se-debe-consumir](https://www.gob.mx/salud/articulos/cuanta-fibra-dietetica-se-debe-consumir)
- Stockwell, S., Trott, M., Tully, M., Shin, J., Barnett, Y., Butler, L., McDermott, D., Schuch, F., & Smith, L. (2021). Changes in physical activity and sedentary behaviours from before to during the COVID-19 pandemic lockdown: a systematic review. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 7(1), e000960. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2020-000960>
- Stoia, M., & Oancea, S. (2022). Low-molecular-weight synthetic antioxidants: Classification, pharmacological profile, effectiveness and trends. *Antioxidants*, 11(4), 638. <https://doi.org/10.3390/antiox11040638>
- Sundar Raj A. A., Rubila S., Jayabalan R., Ranganathan TV (2012) A Review on Pectin: Chemistry due to General Properties of Pectin and its Pharmaceutical Uses. 1:550 doi: 10.4172/scientificreports.55
- Sworn, G. (2021). Xanthan gum. In *Handbook of Hydrocolloids* (pp. 833–853). Elsevier.
- Tabibloghmany, F. S., Mazaheri Tehrani, M., & Koocheki, A. (2020). Optimization of the extrusion process through response surface methodology for improvement in functional and nutritional properties of soybean hull. *Journal of Food Science and Technology*, 57(11), 4054–4064. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04439-w>
- Tanabe, S., O'Brien, J., Tollefsen, K. E., Kim, Y., Chauhan, V., Yauk, C., Huliganga, E., Rudel, R. A., Kay, J. E., Helm, J. S., Beaton, D., Filipovska, J., Sovadinova, I., Garcia-Reyero, N., Mally, A., Poulsen, S. S., Delrue, N., Fritsche, E., Luettich, K., ... FitzGerald, R. (2022). Reactive oxygen species in the adverse outcome pathway framework: Toward creation of harmonized consensus key events. *Frontiers in Toxicology*, 4, 887135. <https://doi.org/10.3389/ftox.2022.887135>
- Tańska, M., Konopka, I., & Ruszkowska, M. (2017). Sensory, physico-chemical and water sorption properties of corn extrudates enriched with *Spirulina*. *Plant Foods for Human Nutrition*, 72(3), 250–257. <https://doi.org/10.1007/s11130-017-0628-z>

- Tao, J., Li, S., Ye, F., Zhou, Y., Lei, L., & Zhao, G. (2020). Lignin - An underutilized, renewable and valuable material for food industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(12), 2011–2033. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1625025>
- Tap, J., Furet, J.-P., Bensaada, M., Philippe, C., Roth, H., Rabot, S., Lakhdari, O., Lombard, V., Henrissat, B., Corthier, G., Fontaine, E., Doré, J., & Leclerc, M. (2015). Gut microbiota richness promotes its stability upon increased dietary fibre intake in healthy adults: Gut microbiota richness and dietary fibre intake. *Environmental Microbiology*, 17(12), 4954–4964. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13006>
- Teferra, T. F. (2021). Possible actions of inulin as prebiotic polysaccharide: A review. *Food Frontiers*, 2(4), 407–416. <https://doi.org/10.1002/fft2.92>
- Thamarai Selvi, S., Sunitha, R., Ammayappan, L., & Prakash, C. (2023). Impact of chemical treatment on surface modification of agave Americana fibres for composite application – A futuristic approach. *Journal of Natural Fibers*, 20(1). <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2142726>
- Tiishetso Maswanganye, G. M., Liu, B., Che, D., & Han, R. (2021). Review: Effects of dietary fiber levels and composition on the intestinal health of finishing pigs. *Open Journal of Animal Sciences*, 11(03), 384–398. <https://doi.org/10.4236/ojas.2021.113028>
- Tobias-Espinoza, J. L., Amaya-Guerra, C. A., Quintero-Ramos, A., Pérez-Carrillo, E., Núñez-González, M. A., Martínez-Bustos, F., Meléndez-Pizarro, C. O., Báez-González, J. G., & Ortega-Gutiérrez, J. A. (2019). Effects of the addition of flaxseed and amaranth on the physicochemical and functional properties of instant-extruded products. *Foods*, 8(6), 183. <https://doi.org/10.3390/foods8060183>
- Topolska, K., Florkiewicz, A., & Filipiak-Florkiewicz, A. (2021). Functional food-consumer motivations and expectations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10), 5327. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105327>
- Torres-Ponce, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. de L., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1129–1142.
- Tosif, M. M., Najda, A., Bains, A., Kaushik, R., Dhull, S. B., Chawla, P., & Walasek-Janusz, M. (2021). A comprehensive review on plant-derived mucilage: Characterization, functional properties, applications, and its utilization for nanocarrier fabrication. *Polymers*, 13(7), 1066. <https://doi.org/10.3390/polym13071066>

- Twaij, B. M., & Hasan, M. N. (2022). Bioactive secondary metabolites from plant sources: Types, synthesis, and their therapeutic uses. *International Journal of Plant Biology*, 13(1), 4–14. <https://doi.org/10.3390/ijpb13010003>
- UCSF. (2019). Increasing fiber intake. [ucsfhealth.org; UCSF Health. https://www.ucsfhealth.org/education/increasing-fiber-intake](https://www.ucsfhealth.org/education/increasing-fiber-intake)
- Uriarte-Frías, G., Hernández-Ortega, M. M., Gutiérrez-Salmeán, G., Santiago-Ortiz, M. M., Morris-Quevedo, H. J., & Meneses-Mayo, M. (2021). Pre-Hispanic Foods Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus*), Nopal (*Opuntia ficus-indica*) and Amaranth (*Amaranthus* sp.) as New Alternative Ingredients for Developing Functional Cookies. *Journal of Fungi*, 7(11), 911. <https://doi.org/10.3390/jof7110911>
- USDA. (2018). FoodData central: Nopales, raw. [Usda.gov. https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/168571/nutrients](https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/168571/nutrients)
- Valderrama-Amasifuen, F., Arteaga, H., Flores, A., Obregón, J., & Barraza-Jáuregui, G. (2021). Snacks a base de maíz morado, quinua y kiwicha. Características físicas y sensoriales. En M. M. Larrondo Petrie, L. F. Zapata Rivera, & C. Aranzazu-Suescun (Eds.), 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education Caribbean Conference for Engineering and Technology: "Prospective and Trends in Technology and Skills for Sustainable Social Development" and "Leveraging Emerging Technologies to Construct the Future", LACCEI 2021 - Proceedings (Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology; Vol. 2021-July). Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.569>
- Valenzuela, B. A., Sanhueza, J., & Nieto, S. (2003). Natural antioxidants in functional foods: from food safety to health benefits. *Grasas y Aceites*, 54(3). <https://doi.org/10.3989/gya.2003.v54.i3.245>
- Valenzuela-Lagarda, J. L., Gutiérrez-Dorado, R., Pacheco-Aguilar, R., Lugo-Sánchez, M. E., Valdez-Torres, J. B., Reyes-Moreno, C., Mazorra-Manzano, M. A., & Mui-Rangel, M. D. (2016). Botanas expandidas a base de mezclas de harinas de calamar, maíz y papa: efecto de las variables del proceso sobre propiedades fisicoquímicas. *CyTA - Journal of Food*, 1–7. <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1219391>
- van Boekel, M., Fogliano, V., Pellegrini, N., Stanton, C., Scholz, G., Lalljie, S., Somoza, V., Knorr, D., Jasti, P. R., & Eisenbrand, G. (2010). A review on the beneficial aspects of food processing. *Molecular Nutrition & Food Research*, 54(9), 1215–1247. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200900608>
- van Breda, S. G. J., & de Kok, T. M. C. M. (2018). Smart combinations of bioactive compounds in fruits and vegetables may guide new strategies for personalized

- prevention of chronic diseases. *Molecular Nutrition & Food Research*, 62(1).  
<https://doi.org/10.1002/mnfr.201700597>
- Vargas-León, E. A., Gómez-Aldapa, C. A., Aguayo-Rojas, J., Vargas-Torres, A., Hernandez-Uribe, J. P., Palma-Rodríguez, H. M., & Navarro-Cortez, R. O. (2022). Phytochemical content and antioxidant activity of extruded products made from yellow corn supplemented with apple pomace powder. *Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1590/fst.91221>
- Vargas-Solano, S. V., Rodríguez-González, F., Martínez-Velarde, R., Campos-Mendiola, R., Hurtado-Salgado, M. A., & Muthuswamy Ponniah, J. (2022). Chemical composition of pear cactus mucilage at different maturity stages. *Agrociencia* (1996), 56(2), 126–150.  
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2726>
- Vasanthan, T., Gaosong, J., Yeung, J., & Li, J. (2002). Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *Food Chemistry*, 77(1), 35–40.  
[https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(01\)00318-1](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(01)00318-1)
- Viera, I., Herrera, M., & Roca, M. (2022). Influence of food composition on chlorophyll bioaccessibility. *Food Chemistry*, 386(132805), 132805.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132805>
- Vilcanqui, F., Villanueva, M. E., & Vílchez, C. (2018). Propiedades funcionales in-vitro y efectos fisiológicos in-vivo sobre ratas Holtzman de dietas con nuevas fuentes de fibra. *Revista Chilena de Nutricion: Organo Oficial de La Sociedad Chilena de Nutricion, Bromatologia y Toxicologia*, 45(3), 223–231.  
<https://doi.org/10.4067/s0717-75182018000400223>
- Villarroel, P., Gómez, C., Vera, C., & Torres, J. (2018). Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos. *Revista Chilena de Nutricion: Organo Oficial de La Sociedad Chilena de Nutricion, Bromatologia y Toxicologia*, 45(3), 271–278. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182018000400271>
- Vinardell, M. P., & Mitjans, M. (2017). Lignins and their derivatives with beneficial effects on human health. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(6).  
<https://doi.org/10.3390/ijms18061219>
- Waghmare, R., R, P., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2022). Mucilages: sources, extraction methods, and characteristics for their use as encapsulation agents. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(15), 4186–4207.  
<https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1873730>
- Wang, S., Fang, Y., Xu, Y., Zhu, B., Piao, J., Zhu, L., Yao, L., Liu, K., Wang, S., Zhang, Q., Qin, L., & Wu, J. (2022). The effects of different extraction methods on physicochemical, functional and physiological properties of soluble and insoluble

- dietary fiber from *Rubus chingii* Hu. fruits. *Journal of Functional Foods*, 93(105081), 105081. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105081>
- Wani, S. A., Ganie, N. A., & Kumar, P. (2021). Quality characteristics, fatty acid profile and glycemic index of extrusion processed snacks enriched with the multicomponent mixture of cereals and legumes. *Legume Science*, 3(2). <https://doi.org/10.1002/leg3.76>
- Wanikar, R., & Kotwal, S. (2022). Resistant starch: A promising functional food ingredient. In *Starch - Evolution and Recent Advances*. IntechOpen.
- Williams, B. A., Mikkelsen, D., Flanagan, B. M., & Gidley, M. J. (2019). "Dietary fibre": moving beyond the "soluble/insoluble" classification for monogastric nutrition, with an emphasis on humans and pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 10(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0350-9>
- Wójtowicz, A., & Mościcki, L. (2014). Influence of legume type and addition level on quality characteristics, texture and microstructure of enriched precooked pasta. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 59(2), 1175–1185. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.010>
- Wu, M., Li, D., Wang, L.-J., Zhou, Y.-G., & Mao, Z.-H. (2010). Rheological property of extruded and enzyme treated flaxseed mucilage. *Carbohydrate Polymers*, 80(2), 460–466. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.12.003>
- Würfel, H., Geitel, K., Qi, H., & Heinze, T. (2021). Chemical modification of pectin and polygalacturonic acid: A critical review. *Bioresources*, 16(4), 8457–8488. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.wurfel>
- Xie, J., Peng, G., Hu, X., Xie, J., Chen, Y., Dong, R., Si, J., Yang, C., & Yu, Q. (2022). Physicochemical characteristics of soluble dietary fiber obtained from grapefruit peel insoluble dietary fiber and its effects on blueberry jam. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(22), 3735. <https://doi.org/10.3390/foods11223735>
- Xuan Hoan, N., Thi Hong Anh, L., Hong Quan, D., Xuan Cuong, D., Thai Ha, H., Thi Thao Minh, N., Trong Hieu, D., Dinh Thuat, N., Duc Thinh, P., & Thi Thanh Tuyen, D. (2021). Functional-antioxidant food. In *Functional Foods - Phytochemicals and Health Promoting Potential*. IntechOpen.
- Yang, X.-D., Wang, L.-K., Wu, H.-Y., & Jiao, L. (2018). Effects of prebiotic galactooligosaccharide on postoperative cognitive dysfunction and neuroinflammation through targeting of the gut-brain axis. *BMC Anesthesiology*, 18(1), 177. <https://doi.org/10.1186/s12871-018-0642-1>
- Young, N.W.G. 2007. Nonstarch Applications - Hydrocolloids. In: *The RVA Handbook* (Crosbie, G.B. and Ross, A.S. (eds.)), AACC International, St. Paul, MN, pp.85-94.

- Yousf, N., Nazir, F., Salim, R., Ahsan, H., & Sirwal, A. (2017). Water Solubility Index and Water Absorption Index of Extruded Product from Rice and Carrot Blend. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6, 2165-2168.
- Yu, C., Liu, J., Tang, X., Shen, X., & Liu, S. (2017). Correlations between the physical properties and chemical bonds of extruded corn starch enriched with whey protein concentrate. *RSC Advances*, 7(20), 11979–11986. <https://doi.org/10.1039/c6ra26764e>
- Zdunek, A., Pieczywek, P. M., & Cybulska, J. (2021). The primary, secondary, and structures of higher levels of pectin polysaccharides. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 1101–1117. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12689>
- Zehiroglu, C., & Ozturk Sarikaya, S. B. (2019). The importance of antioxidants and place in today's scientific and technological studies. *Journal of Food Science and Technology*, 56(11), 4757–4774. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03952-x>
- Zhang, M., Bai, X., & Zhang, Z. (2011). Extrusion process improves the functionality of soluble dietary fiber in oat bran. *Journal of Cereal Science*, 54(1), 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.04.001>
- Zhang, R., Khan, S. A., Chi, J., Wei, Z., Zhang, Y., Deng, Y., Liu, L., & Zhang, M. (2018). Different effects of extrusion on the phenolic profiles and antioxidant activity in milled fractions of brown rice. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 88, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.09.042>
- Zhang, Y., & Naebe, M. (2021). Lignin: A review on structure, properties, and applications as a light-colored UV absorber. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(4), 1427–1442. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c06998>
- Zhao, Y., Sun, H., Yang, B., & Weng, Y. (2020). Hemicellulose-based film: Potential green films for food packaging. *Polymers*, 12(8), 1775. <https://doi.org/10.3390/polym12081775>
- Zhong, L., Fang, Z., Wahlqvist, M. L., Hodgson, J. M., & Johnson, S. K. (2019). Extrusion cooking increases soluble dietary fibre of lupin seed coat. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 99, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.018>