



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS
MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

**Desarrollo de Tortillas Saludables a Base
de Maíz Azul (*Zea mays* L) y Frijol Tépari
(*Phaseolus acutifolius*) Mediante la Tecnología
de Extrusión Alcalina**

T E S I S

Que presenta
LN Katya Elizabeth Arechiga Chávez

para obtener el Grado de
MAESTRA EN CIENCIA
Y
TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Director de Tesis
Dr Cuauhtémoc Reyes Moreno
Dr Roberto Gutiérrez Dorado

Culiacán Sinaloa, México

Marzo 2020

Este trabajo de investigación titulado “Desarrollo de Tortillas Saludables a Base de Maíz Azul (*Zea mays* L) y Frijol Tépari (*Phaseolus acutifolius*) Mediante la Tecnología de Extrusión Alcalina” se llevó a cabo en “Laboratorio de Bioprocesos y Alimentos Funcionales” y “Laboratorio de Nutraceuticos”, Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa. Los C Dr Roberto Gutiérrez Dorado y Dr Cuauhtémoc Reyes Moreno participaron como Directores de Tesis. Las C Dra Edith Oliva Cuevas Morales y Dra Janitzio Xiomara Korina Perales Sánchez fungieron como Asesoras Académicas. La C Katya Elizabeth Arechiga Chávez recibió “Beca Nacional para Estudios de Posgrado (Maestría)” por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología durante el desarrollo de sus estudios de posgrado.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Culiacan de Rosales, Sinaloa el día 17 del mes febrero del año 2020, el (la) que suscribe LN Katya Elizabeth Arechiga Chávez alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos con número de cuenta 08007608, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias Químico Biológicas, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Cuauhtémoc Reyes Moreno y Dr. Roberto Gutiérrez Dorado y cede los derechos del trabajo titulado "Desarrollo de Tortillas Saludables a Base de Maíz Azul (*Zea mays* L) y Frijol Tépari (*Phaseolus acutifolius*) Mediante la Tecnología de Extrusión Alcalina", a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

LN Katya Elizabeth Arechiga Chávez

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Katya Arechiga", is written on a light yellow rectangular background.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** porque siempre ha estado conmigo, por las muchas bendiciones recibidas y brindarme las fuerzas necesarias para culminar este trabajo, dándome así la oportunidad de continuar con mi preparación académica. A mis padres **Ignacio Arechiga** y **Maria Chávez** con todo mi amor y admiración, por impulsarme y apoyarme en cada etapa de mi vida, porque este logro no hubiera sido posible sin su apoyo, desvelos y sacrificios, esperando su esfuerzo no haya sido en vano y vean en mi la realización de un sueño. A mis hermanos **Ilse** y **Jesus**, así como a mi cuñado **Ramon Cabrera** y a mi cuñada **Leticia Gutierrez** por apoyarme y darme ánimos de seguir adelante día a día, ¡LOS QUIERO MUCHO!

Al **Dr. Roberto Gutierrez Dorado** por confiar en mí y aceptarme como parte de su equipo de trabajo, por su motivación, paciencia, apoyo y enseñanzas en cada etapa del proyecto, así como impulsarme a aprender más y siempre obtener el mejor resultado.

Al **Dr. Cuauhtemoc Reyes Moreno** por aceptarme en su equipo de trabajo y compartir todos sus conocimientos, así como por el tiempo invertido en la revisión del trabajo final y las observaciones realizadas al mismo, con el afán de mejorarlo.

A la **Dra. Xiomara Perales Sánchez** por siempre brindarme su apoyo y asesorarme con mis dudas con paciencia y dedicación, por sus consejos y su ayuda al proporcionar todos los reactivos necesarios para este trabajo, pero sobre todo por el tiempo valioso que dedicó a la mejora de este proyecto. ¡Muchas gracias!

A mis amigos y compañeros de la MCTA Generación 2017-2019: **Feli, Magda, Olivia, Lulu, Andres, Rogelio, Milton y Luis Carlos** por haber compartido muchas

experiencias juntos, brindarme su amistad, apoyo y confianza, que sin duda recordare con mucho cariño.

A mis compañeros de Laboratorio #20: **Salas, Daniel Arguelles, Jennifer, Demis, Alondra, Fernanda, Ana Lilia y Daniel Martinez** gracias por apoyarme y ayudarme en mis dudas y brindarme sus conocimientos y amistad. En especial a mis amigas las chicas del pasillo: **Celeste, Denisse y Brenda** por brindarme su amistad y apoyo desde que llegue, por los viajes, fiestas, conciertos y todo lo que hemos vivido juntas ¡LAS QUIERO MUCHO!

A los profesores de la MCTA, quienes brindaron sus enseñanzas para formar los conocimientos adquiridos y empleados en esta investigación.

A mis amigas **Alejandra, Barbara y Fernanda** por estar conmigo tanto en los buenos como malos momentos, siempre apoyándome y demostrándome su enorme amistad. ¡LAS QUIERO MUCHO!!

A mi novio **Victor Rosas** por compartir esta meta a mi lado, soportando mi mal humor en algunos momentos, por tu apoyo siempre incondicional y por estar a mi lado cuando más lo he necesitado, siempre impulsándome a seguir y dar lo mejor de mi ¡TE AMO!

A la **Facultad de Ciencias Químico Biológicas** de la **Universidad Autónoma de Sinaloa**, así mismo a la **Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos** por abrirme sus puertas y aceptarme en este gran programa, por permitirme formarme como profesional dentro de sus instalaciones.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	Vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
I RESUMEN	1
ABSTRACT	3
II INTRODUCCIÓN	5
III REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
A NUTRICIÓN EN LOS SERES HUMANOS	11
1 Nutrición y salud a nivel mundial	11
2 Nutrición y salud en México	11
B ALIMENTOS FUNCIONALES	14
1 Definición	14
2 Compuestos Bioactivos	15
a Polifenoles	15
b Fibra	19
C ESTRÉS OXIDATIVO	20
1 Definición	20
2 Radicales libres y diabetes	21
3 Radicales libres e hipertensión	22
D TORTILLAS DE MAÍZ	24
1 Generalidades	24
2 Producción – Consumo de tortillas en México	25
3 Proceso tradicional para la elaboración de tortillas	26
a Nixtamalización	27
b Harinas de maíz nixtamalizado	27
c Elaboración industrial	28
4 Procesos tecnológicos alternativos para elaborar tortillas	29
a Micronización	29
b Secado de tambor	30
c Nixtamalización fracconada (NF)	30
d Cocimiento alcalino con vapor	31
e Extrusión	31
5 Mejora de la calidad nutricional y nutracéutica de la tortilla	33
a Enriquecimiento de harinas	33
b Tortillas con maíces pigmentados	36
E MAÍZ	38
1 Generalidades	38
a Origen y taxonomía	38

2	Estructura del grano	39
	a Pedicelo	39
	b Pericarpio	40
	c Endospermo	40
	d Germen	42
3	Razas de maíz en México	43
4	Maíces nativos en Sinaloa	44
5	Maíz azul	44
	a Producción	45
	b Composición química del maíz azul	47
	1) Almidón	47
	2) Carbohidratos	49
	3) Proteínas	49
	4) Lípidos	50
	5) Fibra dietaria	51
	6) Vitaminas	52
	7) Minerales	52
	c Valor nutricional del maíz azul	52
	1) Aminoácidos esenciales	52
	2) Valor biológico	54
	3) Relación de eficiencia proteínica	55
	d Fitoquímicos en maíz azul	55
	1) Compuestos fenólicos	55
	2) Antocianinas	56
	e Propiedades nutraceuticas	59
	1) Actividad antioxidante	59
	2) Actividad anticarcinogénica	63
F	FRIJOL	65
	1 Generalidades	65
	2 Frijol tépari	65
	a Taxonomía y aspectos agronómicos	66
	b Producción	68
	c Composición química de frijol tépari	68
	1) Proteínas	70
	2) Lípidos	70
	3) Vitaminas y minerales	70
	4) Fibra dietaria	71
	d Valor nutricional del frijol tépari	71
	1) Aminoácidos esenciales	71
	e Fitoquímicos en frijol tépari	72

f	Propiedades nutraceuticas	77
G	EXTRUSIÓN	80
1	Generalidades	80
2	Componentes de un extrusor	81
3	Clasificación de los extrusores	84
a	Extrusor de tornillo simple	84
b	Extrusor de doble tornillo	85
4	Efecto de la extrusión sobre la composición química	86
a	Almidón	86
b	Proteínas	86
c	Lípidos	88
d	Fibra dietaria	89
e	Vitaminas	90
5	Efecto de la extrusión sobre los niveles y perfiles de fitoquímicos	91
6	Efecto de la extrusión sobre la actividad antioxidante y propiedades nutraceuticas	93
IV	JUSTIFICACIÓN	100
V	HIPÓTESIS	101
VI	OBJETIVOS	102
A	OBJETIVO GENERAL	102
B	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	103
VII	MATERIALES Y MÉTODOS	103
A	MATERIALES	103
B	MÉTODOS	103
1	Características físicas de granos de maíz azul y frijol tépari	103
a	Peso de 1,000 granos	103
b	Peso hectolítrico	103
2	Obtención de harinas de maíz azul y frijol tépari extrudidas	104
a	Preparación harina maíz azul extrudido optimizada (HMAE)	104
b	Preparación harina frijol tépari extrudido optimizada (HFTE)	105
3	Composición química harinas de maíz azul y frijol tépari crudos y extrudidos	107
a	Humedad	107
b	Proteínas	107
c	Lípidos	108
d	Minerales	108
e	Fibra dietaria	108
f	Carbohidratos	109
4	Propiedades fisicoquímicas de harinas de maíz azul y frijol tépari crudos y extrudidos	109

a	Actividad acuosa	109
b	Diferencia total de color	110
5	Obtención de mezclas de harinas para elaboración de tortillas	111
a	Mezcla 1 [Harina de maíz azul extrudido optimizada (HMAE) + harina de frijol tépari extrudido optimizada (HFTE)]	111
b	Mezcla 2 [Harina de maíz azul extrudido optimizada (HMAE) + harina de frijol tépari extrudido optimizada (HFTE)]	111
c	Mezcla 3 [Harina de maíz azul extrudido optimizada (HMAE) + harina de frijol tépari extrudido optimizada (HFTE)]	111
6	Elaboración de tortillas a base de mezclas de HMAE + HFTE	111
7	Propiedades tecnofuncionales y sensoriales de tortillas elaboradas a partir de mezclas HMAE + HFTE	112
a	Grado de inflado de la tortilla	112
b	Capacidad de enrollamiento de la tortilla	112
c	Evaluación sensorial	113
8	Selección de la proporción adecuada de HFTE a adiciona a la HMAE para la elaboración de tortillas	113
a	Selección / Análisis estadístico	113
9	Obtención de tortillas elaboradas con proporción adecuada [80% HMAE + 20% HFTE]	114
10	Composición química de las tortillas	114
11	Propiedades fisicoquímicas de las tortillas	114
a	Actividad acuosa	114
b	Diferencia total de color	115
c	pH	115
12	Evaluación de la actividad antioxidante (AAox), contenido de compuestos fenólicos totales (CFT), flavonoides totales (FT) antocianinas totales (AT) de las tortillas elaboradas con mezcla 80% HMAE + 20% HFTE	115
a	Obtención de extractos de fitoquímicos libres y ligados	115
b	Determinación de la actividad antioxidante (AAox)	116
1)	ABTS	116
2)	DPPH	117
c	Compuestos fenólicos totales (CFT)	119
d	Antocianinas totales (AT)	119
13	Propiedades nutricionales de las tortillas elaboradas con mezcla 80% HMAE + 20% HFTE	120
a	Aminoácidos esenciales	120
b	Digestibilidad proteínica <i>in vitro</i>	121
c	Relación de eficiencia proteínica calculada (C-PER)	121

14 Propiedades nutracéuticas de las tortillas elaboradas con mezcla 80% HMAE + 20% HFTE	122
a Potencial hipoglucémico	122
1) Inhibición de α -amilasa (IAA)	122
2) Inhibición de α -glucosidasas (IAG)	123
b Potencial antihipertensivo	123
15 Propiedades tecnofuncionales y sensoriales de las tortillas elaboradas con 80% HMAE + 20% HFTE	125
a Grado de inflado de la tortilla	125
b Capacidad de enrollamiento de la tortilla	125
c Evaluación sensorial	125
16 Análisis estadístico	125
VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN	126
A CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS GRANOS DE MAÍZ AZUL Y FRIJOL TÉPARI	126
B COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS HARINAS DE MAÍZ AZUL Y FRIJOL TÉPARI EXTRUDIDOS	128
C DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD MÁXIMA POSIBLE QUE PUEDE SER AÑADIDA A LA HMAE PARA OBTENER TORTILLAS CON PROPIEDADES TECNOFUNCIONALES Y SENSORIALES ADECUADAS	133
D COMPOSICIÓN QUÍMICA, PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, TECNOFUNCIONALES Y SENSORIALES DE TORTILLAS ELABORADAS CON MEZCLA 80% HMAE + 20% HFTE	140
E ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE Y NIVELES DE FITOQUÍMICOS DE TORTILLAS ELABORADAS CON MEZCLA 80% HMAE + % 20 HFTE	146
F CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES, CALIFICACIÓN QUÍMICA, DPIV, C-PER, POTENCIALES ANTIHIPERTENSIVO (INHIBICIÓN DE ECA) E HIPOCLUCÉMICO (INHIBICIÓN DE α -AMILASA Y α -GLUCOSIDASA) DE TORTILLAS ELABORADAS A PARTIR DE LA MEZCLA DE 80% HMAE + 20% HFTE	152
IX CONCLUSIONES	159
X BIBLIOGRAFIA	161
Abreviaturas	185

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Pág
1	Recomendaciones sobre los micronutrientes, sus niveles y fuentes, para el enriquecimiento de harina de maíz en el contexto nacional	35
2	Composición química del maíz azul	48
3	Contenido de minerales promedio del maíz azul	53
4	Principales categorías de nutraceuticos asociados a maíces criollos	60
5	Composición química de frijol tépari	69
6	Contenido de aminoácidos esenciales presentes en frijoles tépari y común	73
7	Compuestos fenólicos totales, flavonoides totales y actividad antioxidante de harina de frijol tépari crudo (HFTC)	76
8	Características físicas de los granos de maíz azul y frijol tépari	127
9	Composición química y propiedades fisicoquímicas de harinas de maíz azul y frijol tépari crudos y extrudidos	129
10	Composición química, propiedades fisicoquímicas, tecnofuncionales y sensoriales de tortillas de MASECA^{MR} azul, HMAE y la mezcla de 80% HMAE +20% HFTE .	141
11	Actividad antioxidante, CFT , FT , AT de tortillas de MASECA^{MR} azul, HMAE y la mezcla de 80% HMAE + 20% HFTE .	148
12	Propiedades nutricionales y nutraceuticas de tortillas de MASECA^{MR} azul, HMAE y la mezcla de 80% HMAE + 20% HFTE .	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig	Descripción	Pág
1	Estructura del grano de maíz (<i>Zea mays</i> L)	41
2	Granos de maíz de raza Cónica sin pericarpio; y eliminada la capa de la aleurona pigmentada	46
3	Clasificación de compuestos fenólicos.	57
4	(a) Cianidina-3-Glucósido, (b) Pelargonidina-3-Glucósido y (c) Peonidina-3-Glucósido.	58
5	Estructura de la semilla de frijol tépari (<i>Phaseolus acutifolius</i>).	67
6	Componentes principales de un extrusor	83
7	Diagrama de flujo del proceso de extrusión de harina de maíz azul y harina de frijol tépari	106
8	Diagrama de flujo para la obtención de Fitoquímicos libres y ligados para la determinación de capacidad antioxidante y compuestos fenólicos totales	118
9	Hinchabilidad de tortillas elaboradas a partir de diferentes mezclas de HMAE + HFTE (90:10, 85:15 y 80:20)	134
10	Rolabilidad de tortillas elaboradas a partir de diferentes mezclas de HMAE + HFTE (90:10, 85:15 y 80:20)	136
11	Aceptabilidad global de tortillas elaboradas a partir de diferentes mezclas de HMAE + HFTE (90:10, 85:15 y 80:20)	138

I RESUMEN

En nuestro país, en los últimos años, el maíz azul ha llamado poderosamente la atención para la elaboración de tortillas. El maíz azul debe su color a las antocianinas las cuales están localizadas en una capa delgada que recubre al endospermo, estas se han estudiado por sus propiedades antioxidantes tales como inhibidores de radicales libres, actividad anti-proliferativa *in vitro* contra células cancerosas, posible efecto preventivo sobre la enfermedad cardiovascular desarrollo y su capacidad percibida para reducir el riesgo de diabetes. Por su parte el frijol es la leguminosa alimentaria más importante y una fuente importante de proteína de la dieta en varios países en desarrollo, especialmente en América Latina. Frijol tépari (*Phaseolus acutifolius*), es una planta de ciclo corto y produce grano de alta calidad proteína adecuada a la nutrición. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la adición de harina de frijol tépari extruido (HFTE) sobre la calidad (nutricional, nutracéutica, tecnofuncional y sensorial) de las tortillas de harina de maíz azul criollo extruido (HMAE). Las tortillas (“tortillas mejoradas”) se prepararon con la mezcla 80% HMAE + 20% HFTE. Se estudió el efecto de la adición de frijol tépari extruido sobre la composición química, el perfil de aminoácidos esenciales (AEE), digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV), relación de eficiencia proteínica calculada (C-PER), actividad antioxidante (AAox), compuestos fenólicos totales (CFT), potenciales antihipertensivo e hipoglucémico y propiedades tecnofuncionales (hinchabilidad, roabilidad) y aceptabilidad sensorial de las tortillas. Las tortillas mejoradas (80% HMAE + 20% HFTE) tuvieron más proteínas, minerales y fibra dietaria, y valores mayores de AAE y C-PER que las elaboradas con 100% HMAE; el mismo fenómeno se observó al compararse con tortillas elaboradas con MASECA^{MR} azul. La AAox y el contenido de

compuestos fenólicos totales (CFT) fue similar en las tortillas mejoradas que en las tortillas elaboradas con HMAE. Este patrón produjo una actividad antioxidante de las tortillas mejoradas mejor que la de la producida con MASECA^{MR} azul (7,651 vs 7,230 $\mu\text{mol ET} / 100 \text{ g, BS}$).

La adición de HFTE permitió la obtención de tortillas funcionales (tortillas mejoradas) con propiedades nutrimentales, nutricionales, antioxidantes, antihipertensivas e hipoglucémicas mejoradas y sensorialmente aceptables.

Palabras clave: maíz azul criollo, frijol tepary, extrusión, tortillas mejoradas, antioxidante, antihipertensivo, hipoglucémico

ABSTRACT

In our country, in recent years, blue corn has strongly called attention to the development of tortillas. Blue corn owes its color to anthocyanins which are located in a thin layer that covers the endosperm, these have been studied for their Antioxidant properties such as free radical inhibitors, anti-proliferative activity in vitro against cancer cells, possible preventive effect on cardiovascular disease development and its perceived ability to reduce the risk of diabetes. On the other hand, beans are the most important food legumes and an important source of dietary protein in several developing countries, especially in Latin America. Tepari bean (*Phaseolus acutifolius*), is a short-cycle plant and produces high quality grain protein suitable for nutrition. The aim was to evaluate the effect of extruded tepary bean flour (ETBF) addition on the quality (nutritional, nutraceutical, technofuncional and sensory) of tortillas from extruded creole blue maize flour (ECBMF). Tortillas were prepared with the addition of 20% ETBF to ECBMF. The effect of the addition of extruded tepary bean on chemical composition, essential amino acid (EAA) profile, in vitro protein digestibility (IVPD), calculated protein efficiency ratio (C-PER), antioxidant activity (AoxA), total phenolic compounds (TPC), antihypertensive and hipoglycemic potentials, puffing, rollability, and sensory acceptability of tortillas was studied. Improved tortillas (80% ECBMF + 20% ETBF) had higher protein content, minerals, dietary fiber, EEA and C-PER, than tortillas from 100% ECBMF and blue MASECA™. The AoxA and total phenolic content (TPC) were similar in improved tortillas and tortillas made with 100% ECBMF. This pattern produced AoxA of improved tortillas than blue MASECA™ (7,651 vs 7,230 μmol TE/100 g, DW).

The addition of ETBF allow us obtain functional tortillas (improved tortillas) with enhanced nutrimental, nutritional, antioxidant, antihypertensive, and hypoglycemic properties, and sensory acceptable.

Keywords: Creole blue maize, tepary bean, extrusion, improved tortillas, antioxidant, antihypertensive, hipoglycemic

II INTRODUCCIÓN

México sufre problemas de desnutrición, anemia, sobrepeso y obesidad. La desnutrición es un problema que afecta el crecimiento humano, el desarrollo y la salud en general, particularmente en niños menores de 5 años y mujeres embarazadas. A pesar de las intervenciones de salud pública, la prevalencia de estatura baja sigue siendo un grave problema de salud pública (13.6% en promedio), especialmente en áreas rurales y urbanas marginales. Las tasas de desnutrición son más altas en las zonas rurales y la obesidad es más alta en las zonas urbanas (Ramírez-Jaspeado *et al.*, 2018).

Las enfermedades no transmisibles (ENT), también llamadas enfermedades crónico degenerativas (ECD), afectan a todos los grupos de edad y avanzan en un tiempo prolongado; son producto de la combinación de distintos factores: genéticos, fisiológicos, ambientales y conductuales. En 2017 fallecieron 703,047 mexicanos; 17,281 más que en 2016. Las ECD fueron las principales causas de mortalidad en 2016 y 2017, siendo las enfermedades cardiovasculares (ECV) y la diabetes las dos primeras causas de muerte en el país. Las ECV continúan siendo la primera causa de muerte en México, con 141,619 fallecimientos registrados en 2017, en comparación con los 136,342 del 2016. En segundo lugar, se encuentra la diabetes, con 106,525 fallecimientos en 2017 (2016: 105,572 decesos) (INEGI. 2018).

Para prevenir las ECD se requiere combatir los factores de riesgo modificables: eliminar el consumo de tabaco, limitar la ingesta excesiva de alcohol y sal/sodio, realizar actividad física de manera regular y seguir una alimentación saludable. Así, se disminuye el riesgo de padecer sobrepeso y obesidad, hipertensión arterial y el aumento de glucosa, colesterol y triglicéridos en la sangre, enfermedades íntimamente

relacionadas con las principales ECD. Se deben reducir estos factores de riesgo para disminuir el impacto de las ECD en la salud de la población (WHO, 2019).

Los alimentos funcionales han recibido una atención sustancial en los últimos años como componentes de los cambios en el estilo de vida saludable. Muchos alimentos nuevos contienen compuestos funcionales bioactivos (fibras, prebióticos, probióticos, fitoquímicos y antioxidantes) que confieren efectos benéficos para la salud humana. Los alimentos funcionales se definen como: “Alimentos naturales o procesados que contienen compuestos biológicamente activos conocidos o desconocidos; que, en cantidades definidas y efectivas no-tóxicas, proporcionan un beneficio a la salud clínicamente probado y documentado para la prevención, el manejo o el tratamiento de enfermedades crónicas” (Martirosyan y Singh, 2015). Una gran variedad de alimentos funcionales puede desarrollarse mediante el procesamiento adecuado (p.ej. extrusión) de granos integrales subutilizados [maíz criollo azul (nativo), frijol tépari, amaranto, chía].

México, con una población estimada de 126.7 millones de personas en 2019, según los datos de la Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENADI), Instituto Nacional de Estadística Geografía (INEGI), tiene el mayor consumo mundial per capita de maíz (*Zea mays* L.). El principal producto alimenticio del maíz es la tortilla, en México se consumen 1,400 millones de tortillas/día, con una ingesta de 8 a 10 tortillas al día por las personas adultas y cuanto más bajo es el nivel socioeconómico de un individuo, mayor es la dependencia de las tortillas. El 65% de las tortillas se producen a partir de masa fresca y el 35% de harina de maíz nixtamalizado (con calcio agregado). A pesar de ser un alimento con algunos beneficios nutrimentales, una de sus principales limitantes en las tortillas a base de maíz es la carencia del aminoácido

esencial (AAE) lisina, así como de los niveles óptimos de micronutrientes importantes como las vitaminas A, D, E y B12 y los minerales Fe y Zn. Sin embargo, las tortillas representan un excelente vehículo para mejorar el estado nutricional de los consumidores de tortillas, como los mexicanos. Actualmente, en México, 1.5 millones de niños menores de cinco años sufren de desnutrición crónica (tamaño bajo para la edad). La fortificación de las tortillas de maíz con harinas de leguminosas / pseudocereales extrudidos representa una alternativa para mejorar no solamente su calidad nutrimental, también se podría incrementar sus propiedades nutraceuticas (Amaya-Guerra y col., 2004; Chuck-Hernández y col., 2015; León-López y col., 2019).

El proceso tradicional de nixtamalización para preparar tortillas o para producir harina de maíz nixtamalizado consume mucho tiempo y energía. Además, presenta problemas de altas descargas de desechos líquidos [(3–10) L H₂O / kg de maíz]. La extrusión-cocción, proceso alternativo a la nixtamalización, no genera efluentes contaminantes; puede ser utilizada para el desarrollo de alimentos funcionales. En este proceso, no hay agua de lavado o producción de licor de cocción (nejayote) y todos los componentes del grano de maíz, incluido el pericarpio, se retienen, generando una tortilla con mayor contenido de fibra (Milán-Carrillo y col., 2006).

Como estrategia para mejorar el valor nutricional de las tortillas de maíz nixtamalizado varios investigadores han propuesto la adición de harinas de diversos granos: Frijol común (Treviño-Mejía y col., 2016), soya (Acevedo-Pacheco y Serna-Saldívar, 2016; Chuck-Hernández y Serna-Saldívar, 2019), bagazo de soya (Hernández-Reyes y col., 2019), soya germinada (Inyang y col., 2019).

El mantenimiento y la mejora de la calidad nutricional / nutraceutica de los alimentos durante el procesamiento son las principales preocupaciones del mercado y

de la industria. Por lo tanto, la investigación debe centrarse en formas novedosas y sostenibles para seleccionar el método de procesamiento adecuado que aumente o no afecte sustancialmente la calidad nutricional / nutracéutica de los alimentos. La extrusión-cocción se ha propuesto como tecnología adecuada para el desarrollo de nuevas bebidas y alimentos funcionales (Montoya-Rodríguez y col., 2014, 2015; Ramírez-Torres y col., 2017; Ruiz-Gutiérrez y col., 2018; Reyes-Moreno y col., 2018). Una gran cantidad de bebidas y alimentos funcionales para el consumo humano podrían desarrollarse mediante el procesamiento adecuado (p. ej. extrusión) de granos integrales subutilizados (p. ej. maíz azul criollo, frijol tépari).

El maíz (*Zea mays* L) suministra alrededor del 50% de las calorías y proteínas en la dieta de personas de países en desarrollo; es una de las cosechas de cereales más importantes del mundo (FAO, 2019). México, centro de origen y domesticación del maíz (*Zea mays* L), tiene la mayor diversidad de recursos genéticos del mundo, con aproximadamente 59 variedades nativas diferentes. En el Noroeste de México (estado de Sinaloa) se identificaron y clasificaron más de 300 accesiones de maíz y se clasificaron en 13 variedades (Pineda-Hidalgo y col., 2013). Entre estos genotipos, los maíces azules tienen un interés especial como alimento, y se consumen principalmente en forma de tortillas de mesa y “chips” de tortilla (totopos) (Salinas-Moreno y col., 2003; Urías-Lugo y col., 2015a; Mora-Rochín y col., 2016). El maíz azul se utiliza para la elaboración de alimentos que tradicionalmente se consumen en México, sin embargo, se puede considerar como un cereal subutilizado. Varios estudios con genotipos de maíz azul han demostrado que tienen múltiples propiedades funcionales, como la protección contra el estrés oxidativo, actividades hipoglucémicas, disminuye la presión arterial y el contenido de colesterol y triglicéridos en suero.

Algunas de las propiedades nutraceuticas del maíz azul se deben a la presencia de diferentes fitoquímicos, especialmente metabolitos secundarios como los ácidos fenólicos (ácido ferúlico es el más abundante en maíz) y las antocianinas (derivados de la cianidina, de tipo acilado y no acilado, dominan el perfil de las antocianinas en maíz azul) (Espinosa-Trujillo y col., 2009; Salinas-Moreno y col., 2012; Urías-Peraldi y col., 2013; Urías-Lugo y col., 2015a,b; Guzmán Gerónimo y col., 2016; Gaxiola-Cuevas y col., 2017).

En México se cultivan principalmente cinco especies de frijol: frijol común (*Phaseolus vulgaris*), frijol comba (*Phaseolus lunatus*), frijol ayocote (*Phaseolus coccineus*), frijol gordo (*Phaseolus dumosus*), frijol tépari (*Phaseolus acutifolius*). El frijol tepari (*Phaseolus acutifolius*) es una leguminosa de ciclo de vida corto y resistente a la sequía, originaria de los desiertos y el medio ambiente semiárido del Noroeste de México y el Suroeste de los Estados Unidos de América, la cual es rica en proteínas, carbohidratos, fibra, compuestos bioactivos y posee características agronómicas sobresalientes, cuya utilización resulta beneficiosa en la agricultura, e industrias alimenticia y farmacéutica en el futuro (Salas-López y col, 2018). Es reconocido por sus bajos requerimientos de humedad con una alta adaptación a climas cálidos, es decir, es tolerante al calor, y por su resistencia a muchas enfermedades. La principal importancia nutricional del consumo de frijol tépari es su aporte de nutrimentos; sus semillas maduras contienen 13.0-32.2% de proteínas, 0.4-2.4% de lípidos y 65.3-69.1% de carbohidratos (López y col., 2005; Porch y col., 2017). Sin embargo, el alto contenido de proteínas y carbohidratos en esta leguminosa está subutilizado, debido a que las semillas de frijol tépari se consumen poco (Salas-López y col., 2018).

Por otro lado, se ha reportado que el consumo de frijol está relacionado con la prevención y control de diabetes, hipertensión y enfermedades cardiovasculares. Los extractos de frijol (ricos en compuestos fenólicos) y péptidos que se encuentran naturalmente en esta leguminosa inhiben a las enzimas de la digestión de carbohidratos como α -amilasa y α -glucosidasa, así como a las lipasas, responsables de la degradación de triglicéridos (Ombra y col., 2018; Valencia-Mejía y col., 2019). También el consumo de frijol protege la destrucción de las células beta pancreáticas, productoras de insulina (Hernández Saavedra y col., 2013). Péptidos encontrados en la fracción no digerible del frijol inhiben a la enzima convertidora de angiotensina y presentan una alta capacidad antioxidante (Luna-Vital y col., 2015). Esta leguminosa disminuye la concentración de triglicéridos en suero, y este efecto se relacionó con una mayor oxidación de éstos en el hígado (Thompson y col., 2017). Además de los péptidos, los beneficios a la salud del frijol se han atribuido de manera importante a sus compuestos fenólicos (Fernández-Orozco y col., 2009; Cevallos-Casals y Cisneros-Zevallos, 2010).

El objetivo de esta investigación fue evaluar las propiedades nutricionales y nutraceuticas (actividades antioxidantes, antihipertensiva, hipoglicémica) de una tortilla funcional [tortilla de harina de maíz azul criollo extrudido (HMACE) adicionada con harina de frijol tépari extrudido (HFTE)] para justificar científicamente su inclusión en portafolios alimentarios para el combate a la desnutrición y reducción de incidencia de enfermedades crónico degenerativas.

III REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A NUTRICIÓN EN LOS SERES HUMANOS

1 Nutrición y salud a nivel mundial

En la actualidad, el mundo se enfrenta a una doble carga de malnutrición que incluye la desnutrición y la alimentación excesiva. La malnutrición se caracteriza por la carencia de diversos nutrientes esenciales en la dieta, presenta riesgos considerables para la salud humana. La desnutrición contribuye a cerca de un tercio de todas las muertes infantiles. Por su parte, las crecientes tasas de sobrepeso y obesidad en todo el mundo están asociadas a un aumento en las enfermedades crónico degenerativas (ECD). Estas enfermedades están afectando con cifras crecientes a las personas. Las ECD son enfermedades de larga duración y por lo general de progresión lenta. Las enfermedades cardíacas, infartos, cáncer, enfermedades respiratorias y diabetes, son las principales causas de mortalidad en el mundo, siendo responsables del 63% de las muertes. En 2008, 36 millones de personas murieron de una enfermedad crónica, de las cuales la mitad era de sexo femenino y el 29% era de menos de 60 años de edad (OMS, 2018).

2 Nutrición y salud en México

A pesar de los enormes avances que en general ha experimentado México en los últimos años, la desnutrición por un lado y la obesidad infantil por otro, siguen siendo un problema a solucionar en el país. La desnutrición, que afecta de un modo significativo a la región más sur, y la obesidad, que lo hace en el norte, se extienden a lo largo de todo el territorio mexicano, poniendo de manifiesto la necesidad de

aumentar los esfuerzos en promover una dieta saludable y equilibrada en todos los grupos de edad, con especial hincapié en niños, niñas y adolescentes.

México sufre problemas de desnutrición, anemia, sobrepeso y obesidad. La desnutrición es un problema que afecta el crecimiento humano, el desarrollo y la salud en general, particularmente en niños menores de 5 años y mujeres embarazadas. A pesar de las intervenciones de salud pública, la prevalencia de estatura baja sigue siendo un grave problema de salud pública (13.6% en promedio), especialmente en áreas rurales y urbanas marginales. Las tasas de desnutrición son más altas en las zonas rurales y la obesidad es más alta en las zonas urbanas (Ramírez-Jaspeado *et al.*, 2018).

Actualmente, México ocupa el primer lugar mundial en obesidad infantil, y el segundo en obesidad en adultos, precedido sólo por los Estados Unidos de América (EUA). Problema que está presente no sólo en la infancia y la adolescencia, sino también en población en edad preescolar. La principal causa a la que se apunta son los malos hábitos en la alimentación, que acaban desembocando en una prevalencia del sobrepeso de un 70% en la edad adulta. A largo plazo, la obesidad favorece la aparición de enfermedades tales como diabetes, infartos, niveles altos de colesterol o insuficiencia renal, entre otros. Actualmente, la diabetes es el mayor problema al que se enfrenta el Sistema Nacional de Salud; es la principal causa de muerte en adultos, la primera causa de demanda de atención médica y la enfermedad que consume el mayor porcentaje de gastos en las instituciones públicas. La experiencia demuestra que una correcta alimentación previene los problemas de sobrepeso y obesidad (OMS, 2018).

La Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de Medio Camino 2016 (ENSANUT-MC 2016) exploró el estado de diversas enfermedades crónicas en México. Entre ellas, la diabetes en la población mexicana mayor de 20 años de edad. Se encontró que la prevalencia de diabetes en el país pasó de 9.2% en 2012 a 9.4% en 2016; esto en base a un diagnóstico previo de la enfermedad. Como hallazgo de la encuesta, se encontró que la prevalencia de hipertensión arterial fue de 25.5%, de los cuales 40.0% desconocía que padecía esta enfermedad y solo el 58.7% de los adultos con diagnóstico previo se encontraron en control adecuado (<140/90 mmHg). La prevalencia de hipertensión arterial por hallazgo de la encuesta fue 4.1 veces más baja en el grupo de 20 a 29 años de edad que en el grupo de 80 años ó más de edad. Tanto en hombres como en mujeres, la prevalencia más baja de hipertensión se encontró en el grupo de 20 a 29 años de edad y la prevalencia más alta en el grupo de 80 años o más. Aunque esta prevalencia se ha mantenido prácticamente sin cambios entre 2012 y 2016, debido a las consecuencias que ocasiona en la salud de la población, deben intensificarse los esfuerzos del Sistema de Salud para mejorar la prevención y los medios de control de quien ya la padece.

Las enfermedades crónico degenerativas (ECD) afectan a todos los grupos de edad y avanzan en un tiempo prolongado; son producto de la combinación de distintos factores: genéticos, fisiológicos, ambientales y conductuales. En 2017 fallecieron 703,047 mexicanos; 17,281 más que en 2016. Las ECD fueron las principales causas de mortalidad en 2016 y 2017, siendo las enfermedades cardiovasculares (ECV) y la diabetes las dos primeras causas de muerte en el país. Las ECV continúan siendo la primera causa de muerte en México, con 141,619 fallecimientos registrados en 2017,

en comparación con los 136,342 del 2016. En segundo lugar, se encuentra la diabetes, con 106,525 fallecimientos en 2017 (2016: 105,572 decesos) (INEGI, 2018).

B ALIMENTOS FUNCIONALES

1 Definición

En las últimas décadas y debido a los avances en la ciencia al boom de la revolución industrial y al desarrollo de la tecnología alimentaria, nos encontramos ante un nuevo panorama. La industria alimentaria ha ido cambiando y adaptándose a los tiempos, pasando del objetivo de asegurar la productividad (década de los setenta) o la calidad (en los ochenta) o la seguridad alimentaria (en los noventa) al actual objetivo de asegurar la salud y promoverla. En los últimos años, la investigación en el campo de la nutrición se ha multiplicado, llegando a un nuevo concepto: “el de alimento o componente del alimento que presenta un efecto beneficioso para la salud que va más allá de sus propiedades puramente nutritivas, y así surge el concepto de alimento funcional (Aranceta-Bartrina y Gil-Hernández, 2009).

El termino de alimento funcional se propuso por primera vez en Japón en la década de los 1980’s con la publicación de la *Reglamentación para los Alimentos para Uso Específico de Salud* (FOSHU= Foods for specified health use) y que se refiere a aquellos alimentos procesados que contienen ingredientes que desempeñan una función específica en las funciones fisiológicas del organismo humano, más allá de su contenido nutrimental. La Academia Nacional de Ciencias en EUA ha definido a los alimentos funcionales como: “cualquier alimento o ingredientes de los alimentos que provee un beneficio a la salud más allá de los nutrimentos tradicionales que contiene” (Arai, 1996). Cuando los alimentos funcionales ayudan en la prevención y/o

tratamiento de enfermedades o desórdenes son llamados nutraceuticos (El Sohaimy, 2012).

Muchos alimentos nuevos contienen compuestos funcionales bioactivos (fibras, prebióticos, probióticos, fitoquímicos y antioxidantes) que confieren efectos benéficos para la salud humana. Los alimentos funcionales se definen como: “Alimentos naturales o procesados que contienen compuestos biológicamente activos conocidos o desconocidos; que, en cantidades definidas y efectivas no-tóxicas, proporcionan un beneficio a la salud clínicamente probado y documentado para la prevención, el manejo o el tratamiento de enfermedades crónicas” (Martirosyan y Singh, 2015).

El desarrollo de alimentos funcionales está asociado con la identificación y caracterización de compuestos activos, de su biodisponibilidad y los efectos del procesamiento tecnológico y la identificación de poblaciones en riesgo y con posibilidades de obtener beneficios de estos productos al consumirlos (Aguilera-García y col, 2007).

2 Compuestos bioactivos

Los alimentos están compuestos por un gran número de sustancias que se clasifican principalmente en tres tipos: nutrientes, compuestos indeseables o antinutricionales y compuestos bioactivos (que pueden ser nutrientes, o compuestos que confieren características sensoriales) (FAO, 2001).

A finales del siglo XX se presentaron avances importantes en el conocimiento sobre alimentación y nutrición, así como en salud y enfermedad con base en la gran cantidad de estudios epidemiológicos, experimentales y estadísticos sobre la composición de los alimentos para determinar actividades biológicas. Todo ello

contribuyó a la identificación de determinados componentes de la dieta (fitoquímicos) como factores potencialmente implicados en la prevención de procesos patológicos. Posteriormente varios autores han coincidido en la definición básica de los compuestos bioactivos como aquellos metabolitos secundarios no nutricionales de origen vegetal que son vitales para el mantenimiento de la salud humana (Patil y col, 2009).

a Polifenoles

Los compuestos fenólicos, o polifenoles, son metabolitos secundarios de las plantas que poseen en su estructura al menos un anillo aromático al que está unido uno o más grupos hidroxilo. Los compuestos fenólicos se clasifican como ácidos fenólicos, flavonoides y taninos (Mattila y Kumpulainen, 2002).

En términos generales, los ácidos fenólicos se caracterizan por tener un anillo aromático central como en el caso del ácido cinámico y otros derivados. Existe una gran variedad de ácidos fenólicos distribuidos en productos de origen vegetal como son la curcumina, presente en el curry y la mostaza, y otros como los ácidos Cafeico, Ferúlico y Clorogénico que están presentes en maíz, café y soya. Los ácidos fenólicos como Cumárico, Caféico y Ferúlico, inhiben la actividad de agentes mútgenos y estimulan la actividad de la enzima fenolsulfotransferasa, implicada en la detoxificación de compuestos metabólicos potencialmente tóxicos, y, además, poseen actividad bactericida (Drago-Serrano y col, 2006).

Los flavonoides son un grupo aromático, pigmentos heterocíclicos que contienen oxígeno ampliamente distribuido entre las plantas, constituyendo la mayoría de los colores amarillo, rojo y azul de las plantas y frutas. Son los compuestos fenólicos mejor estudiados que se caracterizan por tener una estructura de tres anillos formada de dos

centros aromáticos y un heterociclo central oxigenado. Dentro de los flavonoides se incluyen a los flavanos, flavonoles, flavonas y antocianinas. De ellos se obtienen propiedades antiinflamatorias, antimicrobianas, antitrombóticas, antialérgicas, antitumorales, anticancerígenas y antioxidantes. De esta última, principalmente, radica su función en el sistema nervioso, pues se ha visto relación de protección en enfermedades neurodegenerativas (Drago-Serrano y col, 2006; Escamilla-Jiménez y col, 2009). Los flavonoides contienen en su estructura química un número variable de grupos hidroxilo fenólicos y excelentes propiedades de quelación del hierro y otros metales de transición, lo que les confiere una gran capacidad antioxidante. Por ello, desempeñan un papel esencial en la protección frente a los fenómenos de daño oxidativo, y tienen efectos terapéuticos en un elevado número de patologías. Los flavonoides se ubican principalmente en las hojas y en el exterior de las plantas, apareciendo sólo rastros de ellos en las partes de la planta por encima de la superficie del suelo (Martínez-Flores y col, 2002).

Las antocianinas (del griego *anthos*, flor y *kyanos*, azul) se consideran una subclase de los flavonoides; también se conocen como flavonoides azules. Son compuestos vegetales no nitrogenados pertenecientes a la familia de los flavonoides, de amplia distribución en la naturaleza. A pesar de contener pocos grupos cromóforos, se han identificado 300 de estos compuestos, que son responsables de una gama muy amplia de colores, desde el incoloro hasta el púrpura. Producen colores rojo, anaranjado, azul y púrpura de las uvas, manzanas, rosas, fresas y otros productos de origen vegetal, principalmente frutas y flores. Se conocen aproximadamente 20 antocianidinas, las más importantes son pelargonidina, delfinidina, cianidina, petunidina, peonidina y malvidina, nombres que derivan de la fuente vegetal de donde se aislaron por primera

vez; la combinación de éstas con los diferentes azúcares genera aproximadamente las 300 antocianinas que se mencionaron antes (Badui-Dergal, 2006).

El interés en las antocianinas se ha intensificado debido no solamente por el color que confieren sino a sus propiedades farmacológicas y terapéuticas. Durante el paso del tracto digestivo al torrente sanguíneo de los mamíferos, las antocianinas permanecen intactas y ejercen efectos terapéuticos conocidas que incluyen la reducción de la enfermedad coronaria, efectos anticancerígenos, antitumorales, antiinflamatorios y antidiabéticos; además del mejoramiento de la agudeza visual y del comportamiento cognitivo. Los efectos terapéuticos de las antocianinas están relacionados con su actividad antioxidante. La actividad antioxidante es la capacidad total que tiene una sustancia para disminuir la presencia de los radicales libres (Aguilera y col, 2011).

Los taninos son una clase de compuestos fenólicos incoloros o amarillo-café, y con sabor astringente y amargo, solubles en agua, alcohol y acetona. De acuerdo con su estructura y reactividad con agentes hidrolíticos, particularmente ácidos, se han dividido en dos grupos: **(1)** Taninos hidrolizables o pirogálicos y **(2)** Taninos no hidrolizables o condensados. Los taninos hidrolizables tienen una significativa capacidad antioxidante lo cual confiere protección frente a radicales libres a quien los consume. Los elagitaninos, en particular, han sido materia de estudios de casos y controles y ensayos *in vitro* en la búsqueda de evidencia sobre su capacidad funcional para el riesgo cardiovascular, capacidad vasodilatadora, antiinflamatoria, bactericida, hipolipidémica, hipoglicémica y mejoramiento de la fuerza muscular. En particular, los estudios *in vitro* han mostrado diversos mecanismos por los cuales se disminuye el riesgo cardiovascular. Dichos mecanismos incluyen un aumento en las sustancias

reguladoras de vasodilatación, reducción de peso, aumento en lipoproteínas de alta densidad, aumento en la actividad antioxidante en plasma, así como la expresión de factores que disminuyen la respuesta inflamatoria. Por su parte, las diversas evaluaciones con galotáninos proponen un efecto benéfico en la prevención y tratamiento de distintas formas de cáncer. Los mecanismos descritos para los galotáninos y su efecto anti-cancerígeno involucran la inhibición/activación de diversos factores de transcripción y replicación, el aumento en proteínas de reparación del ADN, la síntesis de proteínas y biomoléculas proapoptóticas e inhibición del crecimiento tumoral (Olivas-Aguirre y col, 2015).

b Fibra

La fibra dietaria se reconoce hoy, como un elemento importante para la nutrición sana. La Asociación Americana de Químicos en Cereales (AACC, por sus siglas en inglés) (2001) define: “la fibra dietaria es la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado, con fermentación completa o parcial en el intestino grueso”. La fibra dietaria incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias asociadas de la planta. Las fibras dietarias promueven efectos beneficiosos fisiológicos como el laxante, y/o “atenúa los niveles de colesterol en sangre y/o atenúa la glucosa en sangre” (Escudero-Álvarez y González-Sánchez, 2006).

De forma clásica, la fibra se ha clasificado en función de su condición de solubilidad. Así, distinguimos entre fibra soluble y fibra insoluble. La fibra soluble incluye el almidón resistente, pectinas, gomas, mucílagos, algunas hemicelulosas y polisacáridos no amiláceos de reserva de la planta. Son compuestos muy hidratables que forman geles

en el tracto digestivo. A esta característica se deben muchos de sus efectos fisiológicos como son el retraso en el vaciamiento gástrico o el enlentecimiento y disminución de la absorción de ciertos nutrientes en el intestino delgado. La fibra insoluble incluye la celulosa, algunas hemicelulosas, lignina y otros polifenoles. A diferencia de la fibra soluble, apenas es fermentada por las bacterias colónicas. Presenta un importante papel en la formación y el tránsito intestinal del bolo fecal, aumentando el volumen del mismo y disminuyendo su tiempo de tránsito (Sanchez-Almaraz y col, 2015).

C ESTRÉS OXIDATIVO

1 Definición

El daño o estrés oxidativo se ha definido como la exposición de la materia viva a diversas fuentes que producen una ruptura del equilibrio que debe existir entre las sustancias o factores prooxidantes y los mecanismos antioxidantes encargados de eliminar dichas especies químicas, ya sea por un déficit de estas defensas o por un incremento exagerado de la producción de especies reactivas del oxígeno. La producción de especies reactivas del oxígeno se produce constantemente en la mitocondria. Entre 2 a 5 % del oxígeno que entra en la cadena respiratoria se reduce de forma univalente para dar radical superóxido. Las sustancias que participan en las reacciones de los sistemas de defensa antioxidante se inactivan o deterioran en determinadas situaciones. Este deterioro puede ser causado por alguna enfermedad crónica o transitoria que provoca incrementos sustanciales en la producción de oxidantes y prooxidantes (Clapes-Hernández, 2000; Venereo-Gutiérrez, 2002).

Los radicales libres son especies moleculares muy reactivas con un electrón no apareado; sólo persisten durante un tiempo muy breve (del orden de 10^{-9} – 10^{-12} s)

antes de colisionar con otra molécula y sustraer o donar un electrón para alcanzar estabilidad. Al hacerlo, generan un nuevo radical a partir de la molécula con la cual colisionaron. El único modo en el cual se puede desactivar un radical libre, y así poner fin a esta reacción en cadena, es si dos radicales reaccionan juntos, cuando los electrones no apareados pueden formar par en una u otra de las moléculas originales. Este suceso es raro, debido a la vida media muy breve de un radical individual y las concentraciones muy bajas de radicales en los tejidos. Los radicales más perjudiciales en sistemas biológicos son los radicales de oxígeno (a veces denominados especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), en especial superóxido, $\cdot O_2^-$, hidroxilo, $\cdot OH$, y perhidroxilo, $\cdot O_2H$). El daño de tejido causado por radicales de oxígeno suele llamarse daño oxidativo, y los factores que protegen contra daño por radical de oxígeno se conocen como antioxidantes. Los radicales libres se forman en el organismo en condiciones normales. Dan por resultado daño de ácidos nucleicos, proteínas y lípidos en membranas celulares y lipoproteínas plasmáticas. Esto puede originar cáncer, aterosclerosis y enfermedad de arteria coronaria, y enfermedades autoinmunitarias (Bender, 2009).

2 Radicales libres y diabetes

La *diabetes mellitus* es una enfermedad metabólica de origen endócrino, cuya principal característica bioquímica es la hiperglucemia crónica asociada a fallas en la acción o producción de la insulina, con alteraciones del metabolismo intermedio de lípidos y proteínas. En la década de los 1980's se empezó estudiar el posible papel de los radicales libres en la fisiopatología de la diabetes. Así pues, Oberley en 1988 ya correlacionaba el estrés oxidante con la hiperglucemia en la diabetes. Los radicales

libres presentes en los sujetos diabéticos se asocian con la hiperglucemia crónica que caracteriza a esta enfermedad, pues ante un exceso de glucosa circulante se activan varias vías metabólicas no muy usuales en el organismo, lo que conduce a la generación de otros metabolitos, entre los cuales se encuentran radicales libres del oxígeno. En la hiperglucemia, la glucosa puede reaccionar con los grupos amino de las cadenas laterales de las proteínas para formar productos más estables como son los cuerpos de Amadori -- glicación no enzimática de las proteínas séricas. Estos compuestos pueden reducir al oxígeno para formar inicialmente radical superóxido. Por otro lado, se ha vinculado a los radicales libres con los niveles bajos de insulina en los pacientes diabéticos, pues se ha demostrado que las células beta del páncreas no son inmunes al daño por los radicales libres. Así que, ya instalada la enfermedad, es posible que empeore la situación del sujeto diabético, dado que disminuye la secreción de insulina en el páncreas por interferencia de los radicales libres sobre el proceso normal de producción y secreción de insulina (Maldonado-Saavedra y col, 2010).

3 Radicales libres e hipertensión

La hipertensión, también conocida como tensión arterial alta o elevada, es un trastorno en el que los vasos sanguíneos tienen una tensión persistentemente alta, lo que puede dañarlos. Cada vez que el corazón late, bombea sangre a los vasos, que llevan la sangre a todas las partes del cuerpo. La tensión arterial es la fuerza que ejerce la sangre contra las paredes de los vasos (arterias) al ser bombeada por el corazón. Cuanto más es la tensión, más esfuerzo tiene que realizar el corazón para bombear. La tensión arterial normal en adultos es de 120 mm Hg cuando el corazón late (tensión

sistólica) y de 80 mm Hg cuando el corazón se relaja (tensión diastólica). Cuando la tensión sistólica es igual o superior a 140 mm Hg y/o la tensión diastólica es igual o superior a 90 mm Hg, la tensión arterial se considera alta o elevada. (OMS 2015). La hipertensión arterial (**HTA**) puede clasificarse en hipertensión primaria o esencial e hipertensión secundaria. La hipertensión primaria tiene un origen desconocido multifactorial y es el tipo de hipertensión más común en la población, presentándose en aproximadamente un 95% de los pacientes. La hipertensión secundaria tiene una etiología conocida, ocurre en el 5-10% de los pacientes hipertensos y generalmente resulta de alteraciones de las arterias renales, estrechamiento de la arteria aorta, tumores de origen endocrino o efectos iatrogénicos. Una vez conocida la causa de la hipertensión y, realizando la intervención terapéutica necesaria, la presión arterial retorna a sus valores normales (Cruz-Manzano y col, 2004).

Estudios clínicos han mostrado que en los pacientes que padecen **HTA** esencial se producen cambios en los indicadores bioquímicos que evidencian una situación de estrés oxidativo: se incrementa la concentración sanguínea de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS), como indicador de peroxidación lipídica, aumento de la 8-oxo-desoxiguanina, como indicador de daño al ADN, disminución de la capacidad antioxidante del suero y de la concentración plasmática de la vitamina E; aumento de la relación entre la concentración de glutatión oxidado/glutatión reducido y disminución de la actividad de las enzimas antioxidantes superóxido dismutasa (SOD), glutatión peroxidasa (GPx) y catalasa, tanto en la sangre total, como en las células mononucleadas periféricas. Si bien estos resultados permitieron concluir que el estrés oxidativo es importante en la patogénesis de la **HTA** esencial o en el daño arterial

relacionado con esta, no constituyen una evidencia directa de la relación del estrés oxidativo con la **HTA** esencial (Cruz-Manzano y col, 2004).

D TORTILLAS DE MAÍZ

1 Generalidades

México, con una población estimada de 126.7 millones de personas en 2019, según los datos de la Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENADI), Instituto Nacional de Estadística Geografía (INEGI), tiene el mayor consumo mundial per capita de maíz (*Zea mays* L.). El principal producto alimenticio del maíz es la tortilla. La tortilla mexicana puede ser definida como un disco plano, aplastado, flaco, redondo y hecho de maíz, la cual se prepara a base maíz nixtamalizado. En México se consumen 1,400 millones de tortillas/día, con una ingesta de 8 a 10 tortillas al día por las personas adultas y cuanto más bajo es el nivel socioeconómico de un individuo, mayor es la dependencia de las tortillas. El 65% de las tortillas se producen a partir de masa fresca y el 35% de harina de maíz nixtamalizado (con calcio agregado). A pesar de ser un alimento con algunos beneficios nutrimentales, una de sus principales limitantes en las tortillas a base de maíz es la carencia del aminoácido esencial (AAE) lisina, así como de los niveles óptimos de micronutrientes importantes como las vitaminas A, D, E y B12 y los minerales Fe y Zn. Sin embargo, las tortillas representan un excelente vehículo para mejorar el estado nutricional de los consumidores de tortillas, como los mexicanos. Actualmente, en México, 1.5 millones de niños menores de cinco años sufren de desnutrición crónica (tamaño bajo para la edad). La fortificación de las tortillas de maíz con harinas de leguminosas / pseudocereales extrudidos representa una alternativa para mejorar no solamente su calidad

nutrimental, también se podría incrementar sus propiedades nutraceuticas (Amaya-Guerra y col., 2004; Chuck-Hernández y col., 2015; León-López y col., 2019).

2 Producción – Consumo de tortillas en México

Las tortillas de maíz son un alimento básico en México. Se calcula que en ciertas partes del país un 65% de los nutrientes alimenticios se derivan de las tortillas. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de México publicó una encuesta que revela que el maíz y las tortillas representan como media un 8.3% del total de gastos en alimentación en los hogares mexicanos y que un 81% de los hogares se gasta por lo menos un 6.5% de sus ingresos solo en tortillas de maíz (Juárez 2016). De acuerdo con la Unión Nacional de Industriales de Molinos y Tortillerías AC (UNIMTAC) el consumo de tortillas en 2016 se ubicó en 110 kg *per capita*, un incremento de 34% con relación a los 82 kg de 2012. La producción de tortilla en México se da por medio de dos insumos, la nixtamalización (masa) y harina de maíz. La industria harinera de maíz en México se concentra en pocas empresas: destacan Grupo Industrial MASECA (71.20%), MINSA (23.54 %), Harimasa (1.4 %), Cargill de México (1.3%), Molinos Anáhuac (1.1%) y Productos Manuel José (0.2 %). La industria de la masa y la tortilla está dispersa por todo el país con 85,111 establecimientos entre molinos y tortillerías o ambas modalidades; 94.0 % de estos establecimientos ocupan entre uno y cinco empleados. El mercado de insumos para la elaboración de tortillas en el país está distribuido de la siguiente manera: Nixtamal (65%), Grupo MASECA (25%), MINSA (8%), HARIMASA (1%), Cargill (0.50%), MACSA (0.40%) y Blancas (0.20%) (SE, 2012; Excelsior, 2014).

3 Proceso tradicional de nixtamalización para la elaboración de tortillas

a Nixtamalización

La nixtamalización (del náhuatl, *nextli*, cal de cenizas; y *tamalli*, masa cocida de maíz) del maíz es un proceso muy antiguo desarrollado por los aztecas, el cual todavía se utiliza para producir tortillas de buena calidad y otros productos alimenticios (por ejemplo, maíz para pozole, totopos, etc). Los granos de maíz se cocinan con álcali (es decir, cal) y se sumergen en el agua de cocción con lavado posterior, al menos dos veces, asegurando la eliminación de los componentes orgánicos restantes y el exceso de álcali. El nixtamal es el producto obtenido después de este proceso, y posteriormente se muele para producir una masa suave llamada masa. Este es el ingrediente base para la producción de tortillas. La nixtamalización es un proceso tradicional que involucra cambios químicos, estructurales y nutricionales en los diversos constituyentes del grano (Paredes-López y Saharópulos-Paredes, 1983; Paredes-López y col, 2006; Reyes-Moreno y col, 2013).

Durante la nixtamalización, el grano se mezcla con agua y cal, posteriormente se somete a cocción por 15-40 min a 94°C. El maíz sometido a cocción se mantiene “en reposo” por 12-20 h en solución alcalina. El licor de cocción y de “reposo”, conocido como nejayote, se descarta y luego el grano se lava con agua fresca para remover el pericarpio y álcali residual del maíz. El maíz cocido y lavado, conocido como nixtamal, se somete a molienda para obtener una pasta fina llamada “masa”. De la masa obtenida, se utilizan 25-50 g por pieza, se molde a mano o con prensas y manuales en un disco de aproximadamente 15 cm de diámetro y 2 mm de grosor, el cual se transforma en tortilla cuando se hornea sobre una superficie caliente o comal. El

producto resultante era llamado, en náhuatl, “tlaxcalli” y fue nombrado tortilla por los españoles (Eckhoff y col, 2003; Milán-Carrillo y col, 2004; Paredes-López y col. 2009).

La transformación del maíz en tortillas requiere un proceso en el que se utiliza agua, calor e hidróxido de calcio. Estos tres elementos influyen en la composición química del maíz elaborado, dando lugar a modificaciones en su contenido de nutrientes. Los cambios se deben a las pérdidas materiales de grano y a las pérdidas químicas, que pueden derivar de la destrucción de algunos elementos nutritivos y de la transformación química de otros. Durante la nixtamalización del maíz se producen cambios fisicoquímicos (como resultado del tratamiento térmico, la adición de cal y los procesos de remojo y molienda) que mejoran notablemente la calidad nutricional del maíz. En particular, la gelatinización parcial del almidón, la saponificación lipídica parcial, la solubilización de algunas proteínas que rodean los gránulos de almidón y la conversión de los componentes de hemicelulosa de la pared celular en gomas solubles influyen fuertemente en las propiedades reológicas y de textura de los productos finales (Paredes-López y col, 2009).

b Harinas de maíz nixtamalizado (HMN)

Las harinas de maíz nixtamalizado (**HMN**) se obtienen por molienda utilizando nixtamal con bajo contenido de humedad, lo que no permite la liberación de los gránulos de almidón a partir de los otros componentes presentes en el grano de maíz. En consecuencia, las partículas de las **HMN** son diferentes a las de las masas. Las partículas de las masas tienen cantidades significativas de gránulos libres de almidón con bajo contenido de proteína, mientras en las **HMN** las partículas tienen una cantidad de almidón y proteínas similar a la presente en el endospermo del grano de maíz. La

ventaja práctica de utilizar **HMN** es que únicamente se debe rehidratar con agua para obtener la masa, la cual es moldeada y cocida para obtener las tortillas. Esto reduce considerablemente el costo de mano de obra, la inversión para equipo, los problemas asociados con la adquisición del grano de maíz y la generación de desechos durante la elaboración del nixtamal (Gómez y col, 1991; Gómez-Aldapa y col, 1999).

La producción de **HMN** se ha incrementado significativamente en los últimos diez años. Las dos compañías más grandes de México han expandido sus operaciones a Estados Unidos de América, Centroamérica y Europa. Además, se ha estudiado la calidad de las **HMN** utilizando diferentes métodos, los cuales usan cocimiento por lotes, reposo y molienda. Las desventajas del uso de **HMN** son su mayor precio, el sabor y la textura de las tortillas, comparadas con la masa, por ello los productores de **HMN** intentan optimizar los procesos con mejoras en la calidad (Almeida-Domínguez y col, 1996).

c Elaboración industrial

Diversos factores, como la migración del campo a la ciudad, hicieron surgir una demanda de tortillas cocinadas o precocidas. Se ideó el equipo necesario para transformar el maíz en bruto en maíz tratado con cal y, posteriormente, en masa y tortillas. Posteriormente, se inició la producción industrial de harina para tortilla en México y otros países. Poco después de la Segunda Guerra Mundial, la producción mecanizada de tortillas adquirió importancia en México. En las zonas urbanas hay dos variantes: la primera consiste en pequeñas industrias caseras de propiedad familiar que siguen el procedimiento descrito anteriormente, aunque también utilizan máquinas de mayores dimensiones para atender a un mercado relativamente más amplio. Esto

ha sido posible gracias al empleo de molinos rotatorios y de la máquina tortillera diseñado por Romero en 1908. Dichas máquinas se sustituyeron posteriormente por un modelo más eficiente, en el que se pasa la masa por un tambor metálico rotatorio que la corta en forma de tortillas. Éstas caen a una cinta transportadora o sartén de cocción continua y desembocan en un receptáculo situado al final de la cinta. Esta pequeña industria puede utilizar harina industrial para tortillas o maíz integral, en cuyo caso la masa se cuece en receptáculos de grandes dimensiones (Bressani, 1990).

4 Procesos tecnológicos alternativos para elaborar tortillas

Actualmente se dispone de procesos alternativos a la nixtamalización tradicional. El desarrollo de estos procesos alternativos se debe a que la nixtamalización requiere de largos periodos de tiempo y el uso de gran cantidad de agua, que da como subproducto al líquido denominado “nejayote” cuyo pH es elevado y contiene gran cantidad de material orgánico. Los procesos alternos se enfocan a la reducción de tiempo de procesamiento y de efluentes contaminantes (González y col, 2004).

a Micronización

Mediante la micronización se realiza un procesamiento en seco utilizando quemadores de gas infrarrojo. Este proceso consiste en mezclar los granos de maíz pre-quebrados en solución diluida de calcio, y posteriormente la mezcla se somete a cocimiento por infrarrojo. El grano de maíz se cuece rápidamente desde su parte más interna hacia el exterior; inmediatamente los granos calientes se hojuelean en rodillos corrugados de acero, enfrían y molturan hasta obtener una harina instantánea. El grano micronizado ha mejorado la eficiencia de la alimentación cuando se utiliza de

alimento a los animales junto con tener buena apariencia, sabor, y manteniendo las características. El proceso también requiere menos energía que otras técnicas de procesamiento (Johnson y col, 1980).

b Secado de tambor

Molina y col. (1977) ensayaron un procedimiento de producción de harina instantánea para tortillas mediante el secado de tambor en una fábrica experimental. Se mezcló harina de maíz con agua en una proporción de 3:1, añadiendo 0.3% de cal sobre la base del peso de maíz. Una vez hecha la mezcla, se pasó la masa por un secador de doble tambor, calentando con vapor a 15, 20 y 25 lb/plg² (1.05, 1.40 y 1.75 kg/cm²), a 93, 99 y 104°C de temperatura superficial, y a 2, 3 y 4 rpm. El procedimiento produjo una harina instantánea con características físicoquímicas y organolépticas idénticas a las de la muestra de referencia elaborada según el método tradicional, pero que diferían de las de un producto comercial.

c Nixtamalización fraccionada (NF)

En esta técnica, los granos de maíz se remojan en agua a 30 °C durante 5 min, luego se introducen a un prototipo de decortificador con una velocidad de tornillo de 800 rpm. La separación del endospermo y de las otras partes del grano se basa en la diferencia de densidades del pericarpio, germen y pedicelo. Las fracciones separadas y el endospermo se nixtamalizan a 90 °C en soluciones de hidróxido de calcio. Finalmente, las fracciones se secan en un secador de charola y se muelen. Con la nixtamalización fraccionada (**NF**) se demostró que la nixtamalización tradicional (**NT**) es un proceso más agresivo para las antocianinas de harinas de maíz azul (pérdida de

95%, con respecto al contenido en grano) que la **NF**, debido probablemente a que la capa del endospermo y del embrión son removidas y nixtamalizadas por separado, lo que permite obtener harinas y tortillas con mayor cantidad de antocianinas (retención de 58 % con respecto al grano) (Cortes-Gómez y col, 2006).

d Cocimiento alcalino con vapor

Mendoza (1977) describe un método de cocimiento alcalino de harina de maíz utilizando vapor. El aparato consta de una cámara provista en su parte inferior de un ventilador, el cual permite la circulación de aire con un movimiento constante de harina de maíz previamente mezclada con cal; el calor y el agua son suministrados de tal forma que el vapor de agua resultante permite humedecer la mezcla-cal, llevándose a cabo el cocimiento; posteriormente la harina se transfiere a una cámara de enfriamiento, y finalmente se muele para obtener la finura requerida.

e Extrusión

La cocción por extrusión es un proceso continuo que puede hacer masa adecuada para tortillas con características similares a las contrapartes producidas utilizando procesos tradicionales (Milán-Carrillo y col, 2006). La cocción por extrusión ofrece la principal ventaja de la generación nula de aguas residuales (nejayote). Por lo tanto, los nutrientes asociados con los tejidos de pericarpio y aleurona se conservan; los productos resultantes son considerados como de grano entero. La tecnología de la extrusión se destaca en la industria de alimentos como un proceso eficiente, utilizándose en el procesamiento de cereales y proteínas, para alimentación humana y animal. Inicialmente esta tecnología se desarrolló para el transporte y formado de

materiales, tales como masas y pastas. Actualmente se dispone de diseños muy sofisticados desarrollados en las últimas décadas. Una característica importante del proceso de extrusión es que es continuo, y que opera en un estado de equilibrio dinámico estacionario, donde las variables de entrada están equilibradas con la de salidas (Serna-Saldivar y col, 1988).

Mantener y mejorar la calidad nutricional de los alimentos durante el procesamiento son las principales preocupaciones del mercado y de la industria. Por lo tanto, la investigación debe centrarse en formas novedosas y sostenibles para seleccionar el método de procesamiento apropiado que aumente o no afecte el contenido de nutrientes de los alimentos. Las técnicas de procesamiento térmico, como extrusión-cocción, se utilizan ampliamente para producir “cereales para el desayuno”, bocadillos, pastas, alimentos para mascotas, etc. La extrusión-cocción es un proceso continuo que utiliza una combinación de condiciones de temperatura y presión altas, y cizallamiento alto en un período tiempo corto. Esto resulta en una transformación molecular y reacciones químicas dentro de los productos extruidos. La extrusión-cocción produce muchos cambios bioquímicos, como desnaturalización parcial de las proteínas, gelatinización parcial del almidón, modificaciones de lípidos, inactivación de microorganismos y enzimas, formación de componentes de sabor volátiles e incremento en fibra dietaria soluble. Además, la extrusión-cocción tiene el potencial de mejorar la calidad nutricional de los productos al mejorar la digestibilidad proteínica y del almidón y aumentar la retención de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes. Además, esta tecnología altamente eficiente minimiza la contaminación del agua y el consumo de energía y puede ser utilizada para el desarrollo de nuevos

alimentos y bebidas funcionales (Reyes-Moreno y col, 2018; Ruiz-Gutiérrez y col, 2018).

5 Mejora de la calidad nutricional y nutracéutica de la tortilla

a Enriquecimiento de harinas

El enriquecimiento (o fortificación) consiste en aumentar de forma deliberada el contenido de micronutrientes esenciales, es decir, de vitaminas y minerales (incluidos los oligoelementos) en un alimento, a fin de mejorar la calidad nutricional de éste y de que resulte provechoso para la salud pública con un riesgo mínimo para la salud. Algunos procesos tecnológicos, como el refinado de las harinas y de los cereales en general, provocan importantes pérdidas de minerales y vitaminas con respecto al contenido del grano entero. También, la eliminación de la grasa de muchos alimentos para reducir su valor calórico, conlleva la pérdida de las vitaminas liposolubles, como la A o la D. Por ello, mediante el enriquecimiento se restauran o incluso se superan los niveles iniciales de los nutrimentos perdidos durante la manipulación del alimento. El enriquecimiento de la harina de maíz procesada industrialmente, cuando se realiza adecuadamente, constituye una estrategia eficaz, simple y barata para aportar vitaminas y minerales a la dieta de grandes segmentos de la población mundial. Por su alto consumo en México, las tortillas de maíz se pueden utilizar como vehículo para disminuir o abatir el problema de mala nutrición proteínica y de micronutrientes (Schrimshaw y Altschul, 1999; OMS, 2015).

La regulación de harinas en México se remonta a la década de 1970's. Sin embargo, no fue hasta la década de 1990's que se establecieron directrices generales para el enriquecimiento de alimentos y la primera iniciativa para la introducción de especificaciones nutricionales para el enriquecimiento de harina de maíz y de trigo fue

un acuerdo voluntario entre el gobierno y el sector firmado en 1998. La primera Legislación al respecto, requiriendo el enriquecimiento de la harina de trigo con hierro y ácido fólico, no entro en vigor hasta el 2000. Habría que esperar hasta el 2002, cuando una enmienda de la Ley General de Salud extendió la obligación existente para la harina de trigo a la harina de maíz. En 2010, el gobierno mexicano publicó la legislación NOM-247-SSA1-2008 estableciendo estándares nutricionales obligatorios y más completos para el enriquecimiento tanto de harina de trigo como de maíz, con hierro, zinc, ácido fólico, niacina, tiamina y riboflavina. Esta legislación, que anulaba las obligaciones precedentes, estableció el estándar actual para los nutrientes que deben añadirse para enriquecer y restaurar las harinas de trigo y de maíz nixtamalizado. La medida se propuso recuperar hasta un 60% de los micronutrientes perdidos en el procesamiento industrial de refinado de harina, así como el suplemento de micronutrientes que más faltan en la dieta mexicana. La legislación también establece especificaciones sanitarias, límites de contaminantes y requisitos de transporte, almacenamiento, etiquetado y envasado para cereales para consumo humano. La legislación mexicana se basó en un estudio que desarrolló recomendaciones sobre los micronutrientes, sus niveles y fuentes, para el enriquecimiento de harina de trigo y de maíz en el contexto nacional **(Cuadro 1)** (Rosado y col, 1999).

Cuadro 1. Recomendaciones sobre los micronutrientes, sus niveles y fuentes, para el enriquecimiento de harina de maíz en el contexto nacional

Nutrimiento (mg/kg)	Harina de maíz			Compuesto recomendado
	Nivel mínimo	Nivel recomendado	Nivel máximo	
Tiamina	4.0	5.0	8.0	Mononitrato de tiamina
Riboflavina	2.4	5.0	5.0	Hidroclorhidrato de riboflavina
Niacina	28	36.0	45.0	Nicotinamida
Ácido fólico	0.4	0.5	0.8	Ácido fólico
Hierro	24	30.0	40.0	Hierro reducido extrafino
Zinc	16	20.0	26.0	Óxido de zinc

Paredes-López y col (2006)

b Tortillas con maíces pigmentados

A pesar de que los maíces blancos y amarillos son los que tradicionalmente se consumen, en México existen 59 razas nativas de maíz que son ingrediente básico de más de 600 alimentos preparados con características pluriculturales. En el Centro del país, además de las tortillas de maíz blanco y amarillo, se consumen productos de maíz nixtamalizado a partir de variedades coloreadas o pigmentadas con tonalidades rojas, azules, moradas y negras. Sin embargo, estos maíces pigmentados son producidos en baja proporción por agricultores de subsistencia en pequeñas parcelas para autoconsumo; de acuerdo con estimaciones, representa sólo el 10% de la producción nacional de maíz. La preferencia de muchas personas por consumir productos de maíz pigmentado nixtamalizado como las tortillas, se debe a que encuentran que el sabor y la textura son más agradables que los de la tortilla de maíz blanco o amarillo.

La pigmentación del grano de maíz se debe a las antocianinas, compuestos químicos con dos anillos aromáticos a los que se une un azúcar y diversos sustituyentes. Las antocianinas se encuentran principalmente en el pericarpio y en la capa de aleurona del grano de maíz. Muy diversas investigaciones sobre antocianinas de maíz, pero también de uvas y de muchos otros frutos y vegetales, han demostrado que tienen actividad antioxidante, anti-mutagénica, es decir, que impide la alteración del material genético (el ADN), antiproliferativa (que reduce el crecimiento de células cancerosas), antiinflamatoria, y acción protectora hacia nefropatías (daño renal) en pacientes con diabetes Tipo 2 (Bello-Pérez, 2015).

Salinas-Moreno y col (2003) evaluaron el efecto de la nixtamalización sobre las antocianinas en granos de variedades de maíz de colores rojo y azul producidos en

ciertas regiones de México. Este estudio fue uno de los primeros que evaluó los cambios en el contenido y perfil de estos compuestos. Los autores reportaron que los maíces con pigmentos en el pericarpio presentaron mayores pérdidas (73 y 100%), en contraste con los granos con pigmentos ubicados en la capa de aleurona que perdieron entre 19.5 y 50.2%, posiblemente por el efecto de protección del pericarpio a la capa de aleurona la cual mostró escaso daño. Además, los autores registraron un incremento en el contenido de Cianidina 3-glucósido en harinas nixtamalizadas de maíz azul, y un cambio en el perfil de antocianinas de maíces de ambos colores, por una degradación de compuestos acilados que da lugar a la formación de nuevas estructuras químicas como antocianinas simples. Otros compuestos son prácticamente transformados en su totalidad por efecto del pH alcalino.

Por su parte Mora-Rochín y col (2010) evaluaron el efecto de la nixtamalización tradicional y la cocción por extrusión en fenoles totales, ácido ferúlico y antocianinas, así como en la actividad antioxidante de las tortillas producidas a partir de maíz regular (blanco y amarillo) y maíz mexicano pigmentado (azul y rojo). Los autores reportaron que, entre los granos crudos, el grano contenía la concentración de TFA más alta seguida de blanco y maíz amarillo. Tanto la nixtamalización como la extrusión redujeron la cantidad de antocianinas en tortillas de maíz azul, perdieron 55.3% y 57.3%, respectivamente, de las antocianinas presente en granos crudos. Concluyendo que ambos procesos promovieron la pérdida de fenólicos y antioxidantes pero el proceso de extrusión generó pérdidas significativamente menores.

E MAÍZ

1 Generalidades

a Origen y taxonomía

Maíz, palabra de origen indio caribeño, significa literalmente «lo que sustenta la vida», es junto con el trigo y el arroz uno de los cereales más importantes del mundo, suministra elementos nutritivos a los seres humanos y a los animales y es una materia prima básica de la industria de transformación. El cultivo del maíz tuvo su origen, con toda probabilidad, en América Central, especialmente en México, de donde se difundió hacia el norte hasta el Canadá y hacia el sur hasta la Argentina. La evidencia más antigua de la existencia del maíz, de unos 7,000 años de antigüedad, ha sido encontrada por arqueólogos en el Valle de Tehuacán (México) pero es posible que hubiese otros centros secundarios de origen en América. Este cereal era un artículo esencial en las civilizaciones Maya y Azteca y tuvo un importante papel en sus creencias religiosas, festividades y nutrición. Ambos pueblos incluso afirmaban que la carne y la sangre estaban formadas por maíz. La supervivencia del maíz más antiguo y su difusión se debió a los seres humanos, quienes recogieron las semillas para posteriormente plantarlas. A finales del siglo XV, tras el descubrimiento del continente americano por Cristóbal Colón, el grano se introdujo en Europa a través de España.

El maíz (*Zea mays*) y sus parientes silvestres, los teosintles, se clasifican dentro del género *Zea*, perteneciente a la familia *Graminea* o *Poaceae* que incluye también a importantes cultivos agrícolas como el trigo, arroz, avena, sorgo, cebada y caña de azúcar. Es una planta anual alta dotada de un amplio sistema radicular fibroso. Se trata de una especie que se reproduce por polinización cruzada y la flor femenina (elote) y la masculina (espiguilla) se hallan en distintos lugares de la planta (FAO, 1993).

2 Estructura del grano

En forma general el maíz se divide fundamentalmente en cuatro partes: **(a)** pericarpio y aleurona, **(b)** pedicelo, **(c)** endospermo y **(d)** germen (Watson, 1987). En la **Fig 1** se muestran las principales partes estructurales del grano.

a Pedicelo

El pedicelo es la estructura celular mediante la cual el grano se encuentra unido al olote. Está compuesto de haces vasculares que terminan en la porción basal del pericarpio, consta de una capa exterior de abscisión con la función de sellar la punta del grano maduro. A esta capa le sigue una serie de células parenquimatosas en forma de estrella, unidas entre sí por medio de sus puntas formando una estructura frágil y porosa. El pedicelo constituye un 0.8% del peso total del grano (Wolf y col, 1952; Watson, 1987).

b Pericarpio

Capa exterior dura y fibrosa que encierra al grano. Comprende el pericarpio, la testa y la cofia, en un pequeño casquete que cubre la punta del grano y protege al embrión. Representa del 5-7 % del peso total del grano (bs). El pericarpio es la cubierta botánica de la semilla y está compuesta por varias capas (tejidos más externos grano, incluyendo grandes cantidades de aleurona) ricas en celulosa del y hemicelulosa. La epidermis es la capa más externa y se encuentra recubierta con cutina (sustancia cerosa que restringe la entrada de agua y otros líquidos o gases). El mesocarpio es la capa inferior a la epidermis, compuesto de 17-25 capas de células elongadas conectadas entre sí por conductos a través de los cuales pueden circular líquidos y gases. Las siguientes cuatro capas las constituyen células cruzadas y tubulares; el

agua que entra por el pedicelo puede ser transportada rápidamente dentro del grano a través de estas células (Eckhoff y col, 2003).

c Endospermo

En la mayoría de las variedades de maíz, el endospermo representa el 80 % del total del peso del grano, está compuesto por tres tipos de células: **(1)** Aleurona, de una sola célula, contiene aceite, minerales, vitaminas y polifenoles; **(2)** Endospermo corneo, formado por células de forma irregular y alargadas; **(3)** Endospermo harinoso, se localiza en la parte central del grano; está constituido por células grandes en relación a las otras células que componen el endospermo. El endospermo contiene 87% de almidón, aproximadamente 8% de proteínas y un contenido de grasas crudas relativamente bajo (0.8%) (Ospina-Machado, 2002).

d Germen

Es la parte primaria del grano de maíz necesaria para el proceso de reproducción; contiene todas las enzimas, nutrimentos y componentes esenciales para producir una nueva planta de maíz (Inglett, 1970). Aporta un 9.5-12 % del peso total del grano y se localiza en la parte inferior del mismo. Posee dos partes destacables: **(1)** Eje embrionario y **(2)** Escutelo. El escutelo constituye cerca del 90% del germen y es donde se almacenan los nutrientes que utiliza el grano durante la germinación. Químicamente el germen está compuesto por aproximadamente un 35-40 % del contenido total de lípidos encontrados en el grano (Wolf y col, 1952; Watson, 1987; Hernández, 2005).

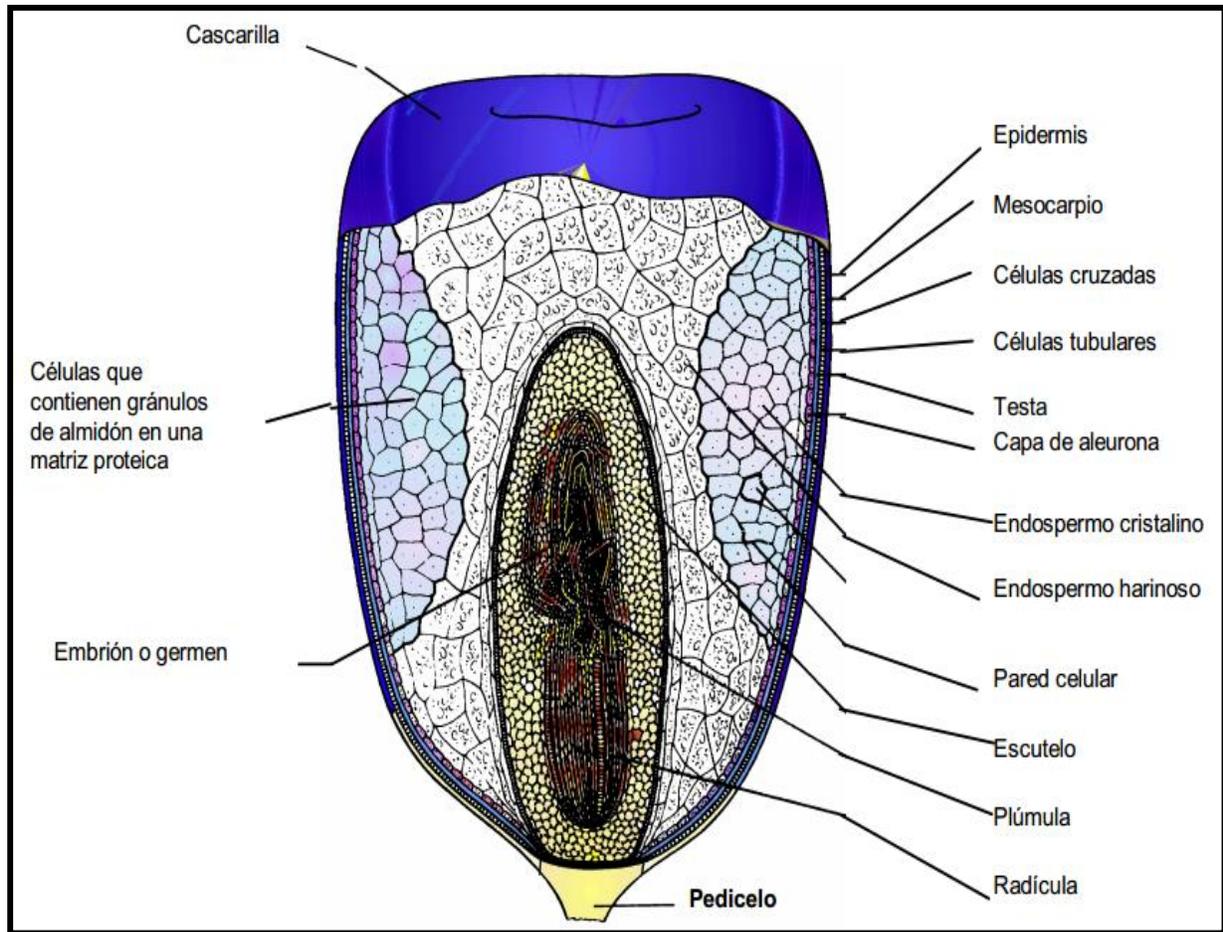


Fig 1. Estructura del grano de maíz (*Zea mays* L)

Watson (1987).

3 Razas de maíz en México

El término raza se ha utilizado en el maíz y en las plantas cultivadas para agrupar individuos o poblaciones que comparten características en común, de orden morfológico, ecológico, genético y de historia de cultivo, que permiten diferenciarlas como grupo (Anderson y Cutler, 1942; Hernández y Alanís, 1970; Harlan y de Wet, 1971). Las razas se agrupan a su vez en grupos o complejos raciales, los cuales se asocian a una distribución geográfica y climática más o menos definida y a una historia evolutiva común (Goodman y McK Bird, 1977; Sánchez, 1989).

El concepto y la categoría de raza es de gran utilidad como sistema de referencia rápido para comprender la variación de maíz, para organizar el material en las colecciones de bancos de germoplasma y para su uso en el mejoramiento, así como para describir la diversidad a nivel de paisaje. Sin embargo, cada raza puede comprender numerosas variantes diferenciadas en formas de mazorca, color y textura de grano, adaptaciones y diversidad genética (Wellhausen, 1990; Perales y Golicher, 2011).

Las razas se nombran a partir de distintas características fenotípicas (Cónico, por la forma de la mazorca), tipo de grano (Reventador, por la capacidad del grano para explotar y producir palomitas), por el lugar o región donde inicialmente fueron colectadas o son relevantes (Tuxpeño de Tuxpan, Veracruz; Chalqueño, típico del Valle de Chalco) o por el nombre con que son conocidas por los grupos indígenas o mestizos que las cultivan (Zapalote Chico en el Istmo de Oaxaca o Apachito en la Sierra Tarahumara) (Wellhausen y col, 1951).

La diversidad del maíz se ha agrupado en al menos 59 razas con base en características morfológicas, bioquímicas, genéticas y moleculares. Como variantes

dentro de las razas se ha propuesto una clasificación por tipos o por coloración de grano. El color se determina por el contenido de pigmentos encontrados, como los carotenoides en los granos amarillos y las antocianinas y flobafenos en los azules o rojos. Estas variedades pigmentadas están presentes en 41 razas, ya sea por su color en el grano o bien por la presencia de antocianinas en hojas, tallo y mazorca. Actualmente, el maíz pigmentado ha recibido una mayor atención desde una perspectiva nutracéutica debido a su potencial benéfico para la salud (Aguayo-Rojas y col, 2012; Serna-Saldívar y col, 2013).

4 Maíces nativos en Sinaloa

El maíz es el cultivo de mayor importancia económica en Sinaloa. Durante los últimos diecisiete años, este cultivo ha observado un crecimiento acelerado en superficie, producción y rendimiento. Este crecimiento se debe al auge adquirido por el cultivo bajo condiciones de riego. Sin embargo, bajo condiciones de temporal, modalidad en la que se cultivan los maíces nativos, se ha observado una continua reducción de superficie. En el Estado de Sinaloa el maíz de temporal se siembra en 15 de los 18 municipios; los de mayor importancia, en cuanto área sembrada, son: Sinaloa de Leyva, Culiacán, Badiraguato, San Ignacio y Cósala que en conjunto cultivan el 69% del total en el estado. Los municipios donde el cultivo de temporal es imperceptible son Ahome, Guasave y Navolato, debido principalmente a su ubicación en planicies costeras, donde predominan zonas irrigadas en el estado (Guerrero-Herrera y col, 2018).

En áreas de temporal de Sinaloa, predominan el uso de maíces nativos en mayor grado y el uso de generaciones avanzadas de variedades mejoradas de polinización

libre en menor grado. Las condiciones limitadas por la escasa y errática precipitación pluvial, en que se siembran los maíces nativos, con elevado nivel de siniestralidad (20 a 50 % de la superficie sembrada), provoca que se obtengan rendimientos bajos (810 kg/ha en promedio). Dentro las áreas de temporal con frecuencia se siembran pequeñas aras de riego, en la cuales se utiliza semilla de híbridos de maíz, lo que favorece su infiltración en los maíces nativos. En cuanto a las variedades pigmentadas, en el estado de Sinaloa se han identificado 11 razas de maíces pigmentados, de las cuales se han identificado cuatro de ellas como nativas de la región, entre ellas la raza Elotero de Sinaloa de maíces de grano azul. Las razas de maíz presentes en el estado de Sinaloa son: **(1)** Chapalote, **(2)** Reventador, **(3)** Tabloncillo, **(4)** Tabloncillo Perla, **(5)** Tuxpeño Norteño, **(6)** Blanco de Sonora o Blandito de Sonora, **(7)** Harinoso de Ocho, **(8)** Onaveño (Guerrero-Herrera y col, 2018).

5 Maíz azul

El maíz azul (*Zea mays* L) debe su color a las antocianinas las cuales están localizadas en una capa delgada que recubre el endospermo. La mayoría de los maíces azules son típicamente de grano harinoso. El endospermo es de textura suave. El color azul se encuentra en la capa de células llamada aleurona, donde una mayor concentración de pigmentos de antocianinas hace que los granos parezcan negros (Beltrán y col, 2001; Dickerson, 2003). El endospermo a su vez está formado por proteínas y gránulos de almidón (responsable de las propiedades e textura en los productos elaborados con este cereal) cuya forma y tamaño tienen influencia en sus propiedades fisicoquímicas (Lindeboom y col. 2004; Mishra y Raid, 2006).

En la **Fig 2 (a)** se puede apreciar con claridad que el pericarpio del grano de maíz azul es translúcido, mientras que, en la **Fig 2 (b)**, se observa que al retirar el estrato unicelular que constituye la capa de aleurona, el endospermo carece de pigmentación.

a Producción

En cuanto a la producción nacional de maíces pigmentados, es menor en comparación con la de maíces de color claro, en los estados ubicados en Valles Altos del Centro de la República Mexicana como Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y Estado de México. Aproximadamente un tercio de los productores de maíz en temporal siembran al menos una tercera parte de su parcela con maíz de color, lo que equivale a una superficie de 150 mil hectáreas, en las que se cosechan unas 300 mil toneladas de granos de color (Miguel y col, 2004). Un aspecto muy importante a considerar en el incremento de la productividad de maíces azules, es que, si el consumo de éstos no crece de manera paralela o más que la oferta, el precio será igual o quizá menor que el de los blancos. La industria que procesa este grano para la elaboración de harinas nixtamalizadas está interesada en los híbridos de maíz azul por las ventajas que se tienen al procesar el grano con características consistentes, pero no por el beneficio que pudiera representar al producto al tener mayores rendimientos, ya que los industriales están más interesados en tener el maíz azul al mismo precio que el blanco o amarillo (Salinas-Moreno y col, 2010).

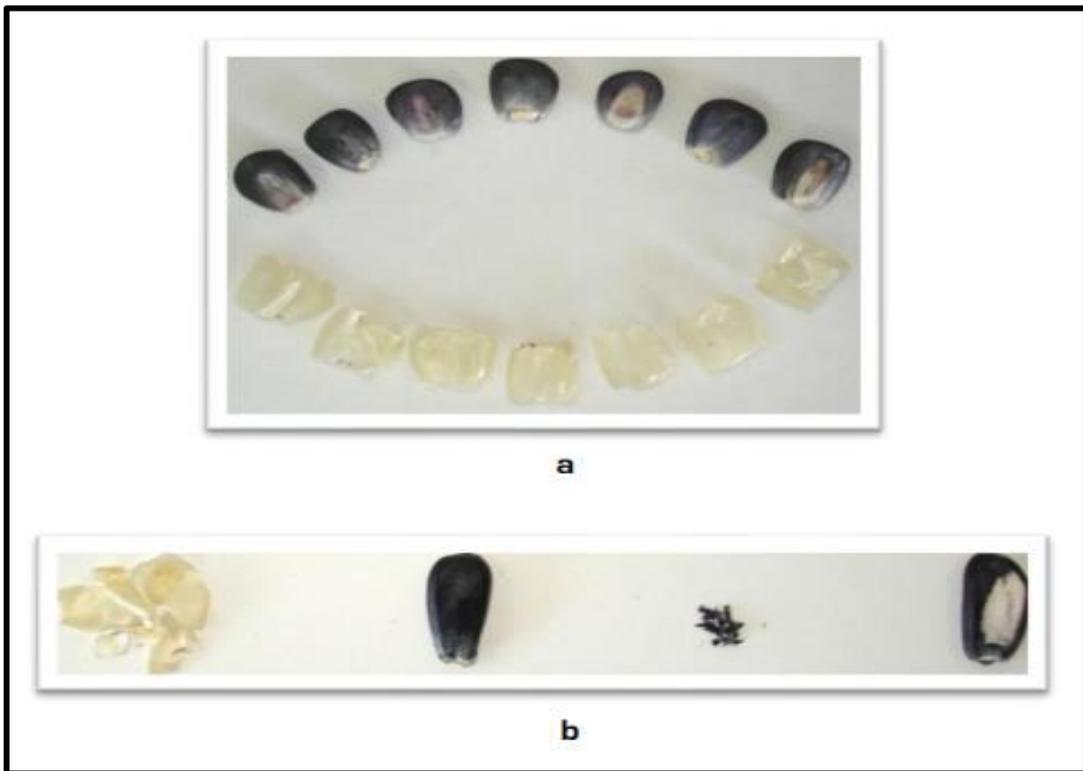


Fig 2. (a) Granos de maíz de raza Cónica sin pericarpio; y **(b)** eliminada la capa de la aleurona pigmentada
Salinas-Moreno y col (2012)

b Composición química del maíz azul

La composición química del maíz varía de acuerdo a las condiciones climatológicas, variedad (genotipo) y condiciones de crecimiento; a su vez, dentro de las distintas zonas del mismo grano, su composición varía de un lugar a otro. En México existe una gran diversidad de variedades de maíz azul; en diferentes regiones del país se cultivan variedades criollas de este grano. La composición química del grano de maíz azul se destaca el contenido de carbohidratos y proteínas (**Cuadro 2**).

1) Almidón

El componente químico principal del grano de maíz es el almidón, al que corresponde hasta el 72-73 % del peso del grano. Uriarte-Aceves y col (2015) reportaron un contenido de almidón en un rango del 58.1 - 71.5 % para maíz azul cultivado en el Estado de Sinaloa. Los maíces pigmentados se caracterizan por contener un endospermo mayor cantidad de almidón que la encontrada en el maíz blanco [0.7-0.78 g/g (bs)] (Krieger y col, 1998). Utrilla-Coello y col (2009) reportaron, en maíz azul y blanco, contenidos de almidón total de 0.84 y 0.78 g/g (bs), respectivamente. Agama-Acevedo y col (2011) evaluaron 15 muestras de maíces azules (razas Tabloncillo y Chalqueño); estos maíces tuvieron contenidos de almidón total de 0.785 – 0.899 g/g (bs).

Diversos autores (Utrilla-Coello y col, 2009; Agama-Acevedo y col, 2011) han reportado que el almidón de maíz azul presenta contenidos de amilosa entre de 20 – 33.3 %. En general, las muestras caen en la clasificación de almidón normal en base a su contenido de amilosa que va de 20 – 35 % de acuerdo a Tester y col (2004). La

Cuadro 2. Composición química del maíz azul

Componente (% , bs)	
Proteínas	9.9 ± 0.5
Lípidos	5.6 ± 0.1
Cenizas	1.3 ± 0.05
Carbohidratos	83.2 ± 0.3

Gaxiola-Cuevas (2010)

concentración de amilosa en los gránulos de almidón de maíz se incrementa con la edad fisiológica del tejido en el cual son sintetizados (Boyer y col, 1976; Lu y col, 1996) reportaron que cuando el maíz es cultivado a temperaturas de 35°C disminuye el contenido de amilosa comparado con el cultivado a 25°C. El contenido de amilosa es importante ya que este componente del almidón de maíz es el encargado de los procesos de gelificación y retrogradación del almidón cuando éste es cocinado y almacenado, por lo que los maíces con contenido bajo de amilosa pudieran formar productos con textura más suave y mayor digestibilidad (Biliaderis, 1991).

2) Carbohidratos

El maíz (*Zea mays* L) es una fuente importante de carbohidratos; los azúcares constituyen aproximadamente el 2% del peso total del grano y cerca del 65% se encuentran en el germen. Contiene fructosa, glucosa, sacarosa, maltosa, rafinosa y algunos oligosacáridos. Los carbohidratos complejos representan alrededor del 80 % del peso total del grano. Los polisacáridos más importantes en el maíz son los estructurales y los de reserva. Los de tipo estructural se encuentran en las paredes del grano y son pectina, hemicelulosa, celulosa y lignina; el polisacárido de reserva es el almidón y se encuentra en el endospermo (Boyer y Shannon, 2001).

3) Proteínas

Desde el punto de vista nutricional, las proteínas son las macromoléculas más importantes. Las proteínas del maíz son consideradas de calidad bajo por sus reducidos niveles de dos aminoácidos esenciales: Lisina y Triptófano. El maíz aporta

el 38.8% de las proteínas dentro de la canasta básica de consumo alimentario del mexicano promedio (Figueroa y col, 1994).

El contenido promedio de proteína en el maíz es de 10 % y la mayor parte se localiza en el germen del grano; no obstante, el endospermo y pedicelo llegan a tener hasta un 9 % de proteína. Las proteínas se han clasificado en cuatro tipos de acuerdo a su solubilidad: **(1)** Albúminas (solubles en agua), **(2)** Globulinas (solubles en soluciones salinas), **(3)** Prolaminas (solubles en soluciones alcohólicas) y **(4)** Glutelinas (solubles en soluciones alcalinas o ácidas diluidas). En el grano de maíz, las Prolaminas se encuentran principalmente en el endospermo y se les reconoce como Zeínas. Las Glutelinas se encuentran en la matriz proteínica de esta misma estructura. Ambas proteínas constituyen cerca del 90 % del total de las proteínas presentes en el grano. Las Albúminas y Globulinas se encuentran en menor proporción en el endospermo; estas proteínas son predominantes en el germen (Paredes-López y col, 2006).

Estudios realizados en la Universidad Estatal de Colorado indican que el maíz azul presenta un 30 % más de proteína que los maíces blancos o amarillos (Johnson y Jha, 1993). Gaxiola-Cuevas (2010) evaluó el contenido de proteína de distintas variedades de maíces azules cultivados en el Estado de Sinaloa; reportó contenidos de alrededor del 9.9 %, bs.

4) Lípidos

En maíz azul, los lípidos representan el 5% del peso total; casi todos los lípidos en el grano de maíz son triglicéridos libres y están compuestos principalmente por ácidos grasos polinsaturados [Linoleico (18:2) 58.7-61.9 %, Oleico (18:1) 24.1-26.6 %] que

representan la mayoría de los lípidos presentes en el grano de maíz, al igual que la mayoría de los aceites de origen vegetal. A su vez, contienen en menor proporción, ácido Palmítico (16:0) 11-11.5 %, Esteárico (18:0) 2-2.2 % y Linolénico (18:3) 0.7-0.8 %. Estos ácidos se han relacionado, desde un punto de vista epidemiológico, con problemas cardiovasculares (Paredes-López y col, 2000). Los lípidos del maíz azul son muy estables, porque contienen altos niveles de antioxidantes naturales. Por lo tanto, el maíz azul es una excelente fuente de ácidos grasos y para generar aceites de buena calidad (Boyer y Shannon, 2001).

5) Fibra dietaria

Después de los carbohidratos, proteínas y lípidos, la fibra dietaria es el componente químico del maíz que se encuentra en mayor cantidad. Los carbohidratos complejos, como la fibra, se encuentran en el pericarpio, aunque también en las paredes celulares del endospermo y, en menor medida, en las del germen. El valor de fibra dietaria dependen del método de análisis y también de la eficiencia de remoción de la cáscara del maíz durante su procesamiento; sin embargo, en general, se presentan contenidos entre 12 y 14 % (FAO, 2001). La fibra dietaria está presente en el maíz azul como en todas las variedades de maíz. Se encuentra mayoritariamente en el pericarpio y en las paredes celulares del endospermo, ciertos factores como la genética, clima y altura afectan el contenido de fibra. Uriarte-Aceves y col (2015) cuantificaron los niveles de fibra dietaria en 15 genotipos de maíz azul mexicano; reportó contenidos de 18-25 %, bs.

6) Vitaminas

El grano de maíz azul contiene vitaminas hidrosolubles y liposolubles. El grano contiene dos vitaminas liposolubles en concentraciones importantes, la vitamina A (β -caroteno) con 2.5 mg/kg y la vitamina E con 36 mg/kg. Además, están presentes en menor proporción la vitamina B₁, Piridoxina, Niacina, y vitamina C en concentraciones muy bajas. En la aleurona, germen y endospermo están las proteínas hidrosolubles. Se han encontrado cantidades variables de Tiamina y Riboflavina. La concentración está determinada por el medio ambiente, las prácticas de cultivo y la genética (Dickerson, 2008).

7) Minerales

En el maíz, alrededor del 78 % de los minerales están contenidos en el germen del grano probablemente porque son esenciales durante el crecimiento del embrión. El P es el más abundante y representa 0.10 % de grano integral. El Ca es el mineral más importante del maíz azul, ya que es fundamental en el consumo humano. El contenido de Ca puede variar del 0.01 % al 0.10 % del peso seco del grano. Además, posee cantidades de K y Mg. El **Cuadro 3** muestra el contenido de minerales promedio del maíz azul (Dickerson, 2008).

c Valor nutricional de maíz azul

1) Aminoácidos esenciales

El grano de maíz es deficiente en aminoácidos esenciales Lisina y Triptófano, dos de los ocho aminoácidos esenciales; aquellos que el hombre no puede sintetizar. Aún con la ausencia de estos dos aminoácidos, tanto las Albúminas como las Globulinas y

Cuadro 3. Contenido de minerales promedio del maíz azul

Mineral (mg/100 g, bs)	Contenido
Fósforo	299.6 ± 37.8
Potasio	324.8 ± 33.9
Calcio	48.3 ± 12.3
Magnesio	107.9 ± 9.4
Níquel	59.2 ± 4.1
Hierro	4.8 ± 1.9
Cobre	1.3 ± 0.2
Manganesio	1.0 ± 0.2
Zinc	4.6 ± 1.2

Dickerson (2008)

las Glutelinas contienen un adecuado balance de aminoácidos esenciales y presentan un contenido alto del aminoácido esencial Leucina. Variedades de maíces modificados o híbridos, conocidos como maíces de calidad proteínica (QPM por sus siglas en inglés), contienen 70-90% de Lisina y Triptófano que los maíces normales (Paredes-López y col, 2000; Milán-Carrillo y col, 2004; 2006).

En una evaluación realizada en 1990 por la *Cooperativa de Extensión de Servicios de Nuevo México*, EUA, en cinco variedades de maíz azul, se encontró un contenido de Lisina (2.3 mg/g peso seco) mayor que en dos variedades de maíz blanco (1.6 mg/g) y amarillo (1.4 mg/g). Al igual que el maíz *Opaco-2*, el maíz azul contiene una fuente más completa de proteínas que los maíces blanco y amarillo (Dickerson y Holocomb, 1992).

2) Valor biológico

El valor biológico (VB) es un parámetro a través del cual se determina la calidad de una proteína, considerando su grado de absorción por parte del organismo. Este valor se obtiene al medir el grado de retención del nitrógeno contenido en una proteína. De acuerdo a este parámetro la proteína de mayor calidad, contenida en un alimento, es la del huevo con un valor biológico de 93.7%. Debido a esto, se le ha designado como la proteína de referencia, por la Organización para los Alimentos y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) de las Naciones Unidas (OMS, 1985).

Las proteínas de maíz son de un valor nutricional bajo; su contenido de Lisina y Triptófano es limitado. Además, las Prolaminas (Zeínas), que representan un 39% de las proteínas del grano, no pueden ser digeridas por animales monogástricos (Inglett, 1970; Reiners y col, 1973; Serna-Saldívar, 1996). Además, las Zeínas tienen un

desequilibrio muy marcado en las concentraciones de Leucina/Isoleucina. Todo esto hace que estas proteínas sean poco aprovechables por el humano. Aún con la ausencia de estos dos aminoácidos tanto Albúminas como Globulinas y Glutelinas contienen un adecuado balance de aminoácidos esenciales, pero, desafortunadamente, presentan un contenido alto del aminoácido esencial Leucina, la cual se relaciona con la incidencia de la pelagra. El valor biológico del maíz entero es de 60.0 y del maíz procesado es 36.0 (Martínez, 1997).

3) Relación de eficiencia proteínica

Uno de los indicadores más importantes de la calidad de las proteínas es la relación de eficiencia proteínica (PER, por sus siglas en inglés). La PER mide la relación que existe entre la ganancia de peso con respecto a la cantidad de proteína consumida. De esta forma, una proteína presentará mayor eficiencia proteínica cuando el organismo en cuestión gane más peso con menor cantidad de proteína ingerida (Paredes-López y col, 2009). Se han reportado, para maíz crudo, valores de PER y de utilización neta de proteína (NPU, por sus siglas en inglés) de 1.37 y 72.78%, respectivamente (Véles-Medina, 2004).

d Fitoquímicos en maíz azul

1) Compuestos fenólicos

El maíz contiene una cantidad mayor de compuestos fenólicos y actividad antioxidante que otros cereales como trigo, arroz y avena (Ichikawa y col, 2001; Adom y Liu, 2002). Cabrera-Soto y col (2009) demostraron que los compuestos fenólicos del maíz se encuentran en varias partes anatómicas del grano donde varían en contenido,

y que éste correlaciona con la dureza del grano. El estudio realizado por Mora-Rochín y col. (2010) se reporta un contenido de compuestos fenólicos totales en maíz azul criollo 142.1 ± 8.3 mg de EAG/ 100g, bs, de ellos 27 ± 4.2 mg de EAG/ 100g, bs, corresponden a compuestos fenólicos libres y 115.10 ± 5.3 mg de EAG/ 100g, bs, a compuestos fenólicos ligados. En la **Fig 3** se presenta la clasificación de compuestos fenólicos.

2) Antocianinas

Los compuestos que le confieren la coloración característica a este tipo de maíces son las antocianinas, que representan los principales pigmentos solubles en agua visibles al ojo humano. El grano de maíz azul presenta entre 9 y 11 diferentes antocianinas, entre las que se tienen del tipo no aciladas y aciladas. El porcentaje relativo de cada tipo puede cambiar de acuerdo a la raza de la cual provenga el material y el sitio de cultivo; en productos derivados de este cereal, las condiciones del proceso usado en su elaboración también influyen (Salinas-Moreno, 2000; Salinas-Moreno y col, 2003; Mora-Rochín y col, 2016; Aguilar-Hernández y col, 2019). El porcentaje de antocianinas aciladas es mayor al 50% del total y en algunos maíces como el derivado de la raza Chalqueño llega a ser de hasta 83.3% (Harborne y Self, 1987; Salinas-Moreno, 2000). Entre las antocianinas no aciladas del grano de maíz azul destacan: **(1)** Cianidina-3-Glucósido, **(2)** Pelargonidina-3-Glucósido y **(3)** Peonidina-3-Glucósido (**Fig 4**).

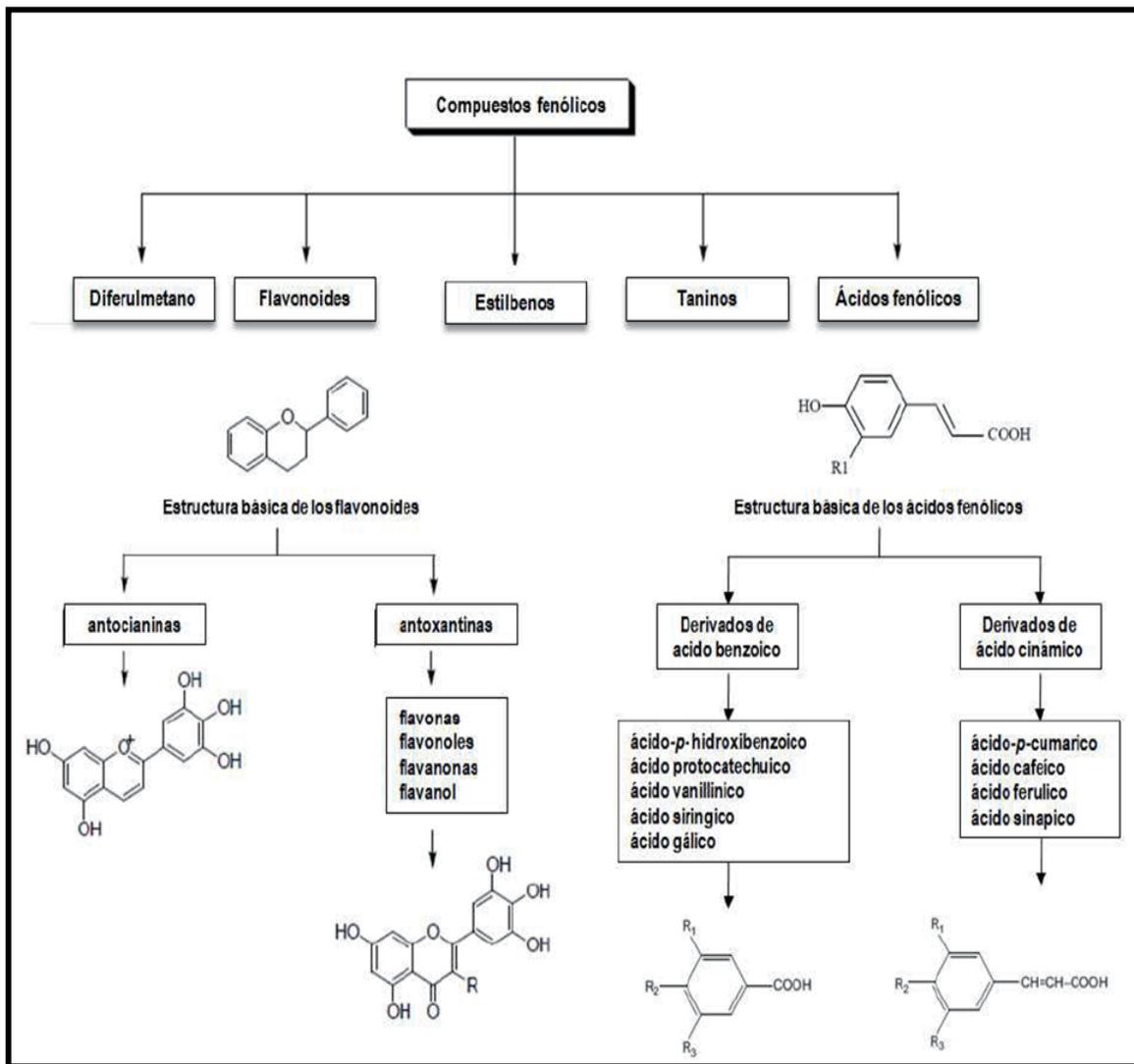


Fig 3. Clasificación de compuestos fenólicos.

Han y col (2007)

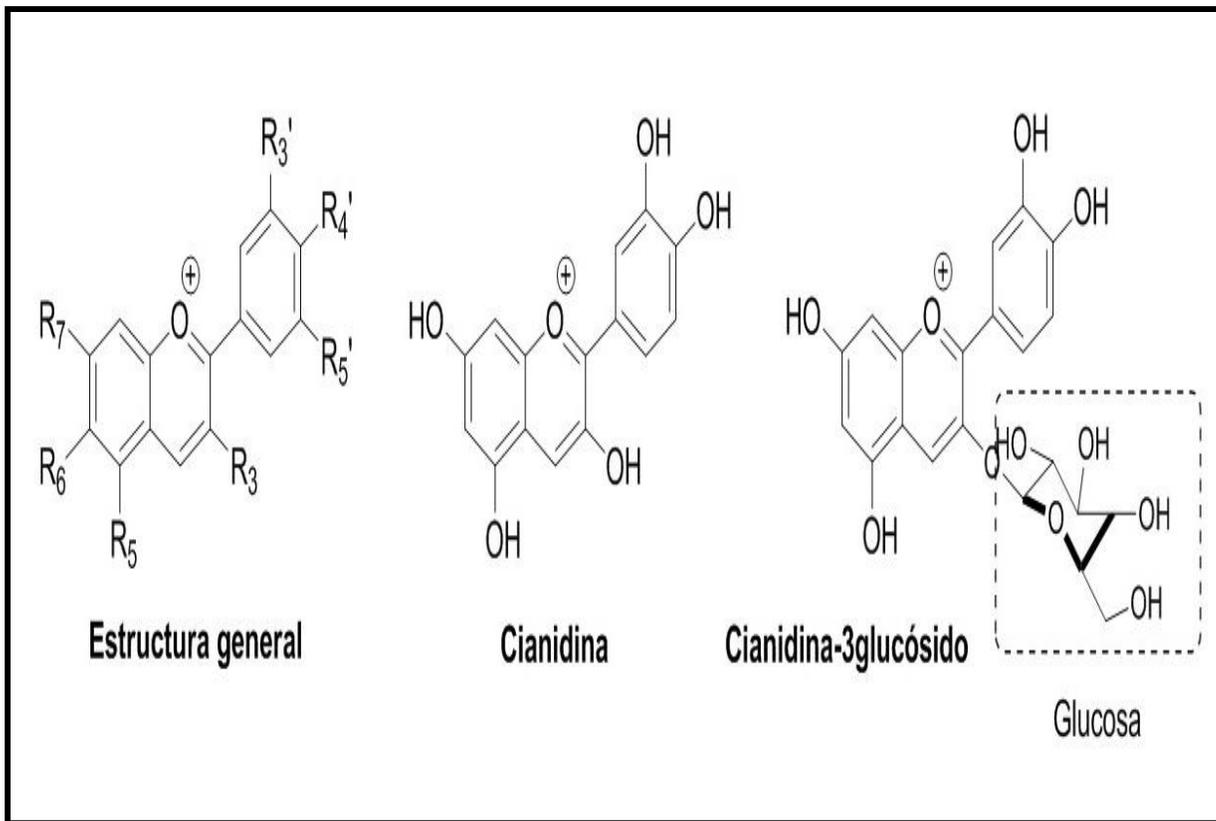


Fig 4. (a) Cianidina-3-Glucósido, (b) Pelargonidina-3-Glucósido y (c) Peonidina-3-Glucósido.
 Castañeda-Ovando y col (2009)

Gaxiola-Cuevas (2013) evaluó los niveles y perfiles de antocianinas de seis genotipos de maíces criollos azules 230, 290, 387, 419, 485 y 512; reportó un contenido de antocianinas totales de 17.2, 23.7, 20.6, 27.9, 33.1, 31.0 mg EC3G/100g, bs, respectivamente. Se identificaron seis diferentes tipos de antocianinas, CY-3-Glu, CY-MalGlu I, PG-3Glu, CY-MalClu II, CY-MalClu III, CY-SucGlu I, PG-MalGlu, CYSucGlu II, CY-diSucGlu I, CY-diSucGlu I.

e Propiedades nutracéuticas del maíz azul

Las propiedades nutracéuticas del maíz están ligadas con su composición fitoquímica. El **Cuadro 4** muestra algunos de estos fitoquímicos presentes en maíces pigmentados y sus propiedades nutracéuticas.

1) Actividad antioxidante

La actividad antioxidante de los cereales es mayoritariamente debida a los compuestos fenólicos. El grano de maíz produce diversos tipos de compuestos fenólicos que son categorizados como simples, favonoides y antocianinas. Todos los maíces contienen fenólicos simples, mientras que solamente los maíces pigmentados como el azul o morado contienen cantidades significativas de antocianinas. Entre los fenoles simples el ácido Ferúlico es el más relevante, es el compuesto fenólico presente en mayor cantidad en maíz, donde se le puede encontrar en forma ligada, libre y condensada. Su propiedad antioxidante está asociada a su núcleo fenólico y su cadena lateral extendida, el ácido Ferúlico forma fácilmente una resonancia estabilizante con su radical fenoxi que aplica un efecto secuestrador de radicales libres (Palacios 1990; López-Martínez y col, 2011; Serna-Saldívar y col, 2013).

Cuadro 4. Principales categorías de nutraceuticos asociados a maíces criollos

Compuesto nutraceutico		Estructura anatómica	Efecto preventivo o terapéutico
Familia	Clase		
Fenólicos	Simples como el Ferúlico	Principalmente asociados al pericarpio	Previenen el estrés oxidativo, cáncer, colesterol alto, arterioesclerosis y envejecimiento
Antocianinas y flavonoides	Antocianinas, flavonoles, flavan- 3 – ols	Principalmente asociados a la aleurona	Previenen el estrés oxidativo, cáncer, colesterol alto, arterioesclerosis y envejecimiento
	Carotenos	Principalmente asociados al endospermo de maíces amarillos	Los α - Carotenos son convertidos en vitamina A o retinol. Previenen el cáncer, las enfermedades cardiovasculares y refuerzan el sistema inmunológico
Carotenoides	Xantofilas: Luteínas, Zeaxantina, Criptoxantina	Principalmente asociados al endospermo de maíces amarillos	Previene la degradación macular y formación de cataratas (opacidad en el cristalino ocular). Retarda la aparición de síntomas relacionados con retinitis. Previene enfermedades cardiovasculares.
Fitoesteroles	Sitosterol, Estigmasterol, Campesterol	Principalmete asociados al germen, pericarpio y aleurona	Compiten con los sitios de absorción de colesterol y por consiguiente son considerados como hipocolesterolémicos y previsores de enfermedades cardiovasculares
Fibra	Soluble como Arabinoxilanos y Hemicelulosas solubles	Principalmente asociados al pericarpio	Mejora función gastrointestinal, mejora la viscosidad de bolo alimenticio y reduce el índice glicémico. Reduce el riesgo de

			diabetes e hipocolesterolemia. Efecto prebiótico generando ácidos grasos volátiles
	Insoluble como celulosa y lignina	Principalmente asociados en el endospermo de maíces amarillos	Mejora la función gastrointestinal, mejora el ligado de ácidos biliares y el volumen y peso de las heces y reduce constipación, hemorroides, diverticulosis y cáncer
Ácido fitico inositol	Inositol	Principalmente asociado al pericarpio y aleurona	Considerado como antioxidante y con propiedades anticancerígenas de mama, colon, hígado, leucemia, próstata y sarcomas
Ácidos grasos polinsaturados	Ácido Linoleico (18:2 ω 6) y Ácido Linolénico (18:2 ω 3)	Principalmente asociados al germen	Ayudan a reducir triglicéridos y colesterol sanguíneo. Estos ácidos son convertidos en prostaglandinas y otros ácidos grasos como EPA y DHA
Fosfolípidos	Fosfatidil colina, Fosfatidil etanolamida, Fosfatidil inositol, Fosfatidil serina	Principalmente asociados al germen	Esenciales para el funcionamiento de las membranas celulares y las neurinas cerebrales. Previenen el envejecimiento celular y colesterol alto. La colina es esencial para producir acetil colina como principal neurotransmisor
Vitaminas	Tocoferoles	Principalmente asociados al germen	Los tocoferoles son considerados antioxidantes. El α -tocoferol o vitamina E es considerado como la segunda línea de defensa contra el estrés oxidativo que previene

			enfermedades cardiovasculares, colesterol alto y todo tipo de cáncer. Además ayudan a mejorar la capacidad mental y función cerebral
	Ácido Fólico	Principalmente asociados a la capa de aleurona	Previene abortos y los defectos del tubo neural y malformaciones del bebe. Ayuda a reducir los niveles de homocisteína y, por ello, previene enfermedades cardiovasculares
Policosanoles o ceras	Octacosanol, Tricontanol, Hexacosanol, Dotriacontanol	Principalmente asociados al germen y pericarpio	Reducen lípidos séricos, colesterol y la agregación de plaquetas

Serna-Saldívar y col. (2013)

Las antocianinas tienen la habilidad de capturar radicales libres como el superóxido (O_2^-), oxígeno (O_2), peróxido (ROO^-), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radical hidroxilo (OH^-). La acción antioxidante de las antocianinas se atribuye específicamente a la presencia de grupos hidroxilo en la posición 3 del anillo C y en las posiciones 3', 4' y 5' del anillo B. En general, la capacidad antioxidante de las antocianidinas (agliconas) es superior al de antocianinas, capacidad que se incrementa al aumentar el número de azúcares en la molécula (Shih y col 2005; Cone 2007; Wang y Stoner, 2008).

Del Pozo-Insfran y col (2006) determinaron la actividad antioxidante de un maíz blanco y dos genotipos de maíces azules encontrando que los maíces azules presentaban una mayor actividad antioxidante (25-29 μmol equivalentes Trolox/g) que el maíz blanco (17.5 μmol equivalentes Trolox/g). De la Parra y col (2007) evaluaron la actividad antioxidante en extractos hidrofílicos de cinco tipos de maíces (blanco, amarillo, azul, rojo y con contenido alto de carotenoides), reportando valores de 41-49.6 μmoles equivalentes de vitamina C/100 g para los extractos. No se encontró diferencia significativa en la actividad antioxidante hidrofílica entre el maíz azul y blanco. Mora-Rochín y col (2010) evaluaron la actividad antioxidante de maíces pigmentados (rojo y azul) y comerciales (blanco y amarillo) reportando valores de 19,312, 19,191 y 19,180 μmol Trolox equivalentes /100 g bs, para maíces blanco, rojo y amarillo, respectivamente; estos valores fueron mayores que los obtenidos para maíz azul.

2) Actividad anticarcinogénica

Los radicales libres son considerados factores importantes en la etiología del cáncer. Los componentes de la dieta con actividad antioxidante reciben particular

atención como potenciales inhibidores de varios tipos de cáncer. Los fitoquímicos pueden presentar actividades anticáncer, parcialmente basadas en su habilidad para combatir a las especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) y por ende proteger moléculas celulares críticas (ADN, proteínas y lípidos) del estrés oxidativo. Los fitoquímicos también pueden interferir con los caminos de señalización celular, entre ellos, los que regulan la proliferación celular, inducen la apoptosis y la respuesta al estrés oxidativo (Gutiérrez-Urbe, 2003; Loo, 2003; Roy y col, 2003; Dedoussis y col, 2005).

Los granos de maíz contienen una compleja mezcla de componentes, algunos con propiedades antimutagénicas (Pedreschi y Cisneros-Zevallos, 2007). Un extracto de maíz azul mostró propiedades antimutagénicas al inhibir la carcinogénesis colo-rectal en ratas macho F344 tratadas con 1,2-dimetilhidrazina (Hagiwara y col, 2001; Pedreschi y Cisneros-Zevallos, 2007). La inhibición se atribuyó a las antocianinas presentes en el maíz azul, aunque no se descartó la posible acción de otros compuestos fenólicos y flavonoides en el extracto de maíz. Acciones antimutagénicas contra el mutágeno Trp-P-1 presentaron una respuesta de 96 % para las fracciones de maíz azul a una concentración de 850 $\mu\text{g mL}^{-1}$. La actividad antioxidante probada fue de 0.954 μg equivalentes de Trolox, valor que representa una actividad antioxidante más alta que la de arándano (*Vaccinium corymbosum*). Las fracciones revelaron la presencia de formas glucosidadas de Cianidina, Peonidina, Pelargonidina, y sus contrapartes aciladas. Se ha concluido que el potencial antimutagénico se debió a antocianinas glucosidadas y en menor grado a antocianinas aciladas.

Reynoso-Camacho y col (2015), evaluaron el efecto protector de tortillas de maíz (azul, rojo, amarillo y blanco) contra el desarrollo de cáncer de colon, administrando en la dieta tortilla (27 % p/s) a ratas con cáncer de colon inducido. Observando una disminución de la incidencia de hasta el 77.5% en las dietas con tortillas elaboradas con maíz blanco y azul. Además, una inhibición de la actividad de β - glucuronidasa, así como una disminución en la expresión de las dos proteínas de proliferación más importantes (K-ras y β -catenina) implicadas en la carcinogénesis de colon.

F FRIJOL

1 Generalidades

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L) es la más importante leguminosa alimentaria y una fuente importante de proteína de la dieta en varios países en desarrollo, especialmente en América Latina. El género *Phaseolus* se clasifica dentro de la familia *Leguminosae*, subfamilia *Papilionoidae*, tribu *Phaseolae* y subtribu *Phaseolinae*. Es una planta herbácea autógama de ciclo anual, que se cultiva en zonas tropicales y regiones templadas. Esta característica permite agruparla en las denominadas especies termófilas, dado que no soporta bajas temperaturas. El género *Phaseolus* incluye cinco especies domesticadas: *P. vulgaris* (frijol común), *P. lunatus* (frijol lima), *P. acutifolius* (frijol tépari), *P. coccineus* ssp. *coccineus* (frijol ayocote) y *P. dumosus* = *P. polyanthus* (= *P. coccineus* ssp. *darwinianus*) (frijol de año) (Reyes-Rivas, 2008).

2 Frijol tépari

La palabra tépari se originó de las palabras de Papago *state* y *pave*, teniendo como significado la palabra *state* blanco y *pave* hace referencia al tipo de planta para distinguirlo del grano (Freeman, 1913). El frijol tépari es también conocido como yori

mui, pavi y Texas bean. La principal área de distribución, y probablemente de origen, de *P. acutifolius* es el desierto sonorense de Norte América (Jiménez-Galindo y Acosta-Gallegos, 2012).

a Taxonomía y aspectos agronómicos

El frijol tépari es una planta de enredaderas anuales delicadas, de cuatro metros de longitud aproximadamente, con raíz típica, foliolos laminares principalmente angostos y alargados. Posee inflorescencias cortas, con pocas flores, bractéolas cortas de 1-3 mm de largo, estigma lateral introrso, carpelo con suturas pronunciadas y generalmente cubiertas con tricomas uncinados distintivos. El color de las flores va de violeta a blanco de 15-20 mm de longitud, las vainas son rectas o ligeramente curvadas, generalmente redondeadas y algunas veces aplanadas de 7.3-10 cm de largo y 10.5-13 mm de ancho (Orduño 2008). Su semilla se presenta en dos formas: una medianamente redonda blanca o negra y la otra rómbica que puede ser blanca, verdosa, gris, amarilla oscura, negro o violeta, pequeñas de 5-7 mm de largo, 3.5-7.5 mm de ancho y 2.5-5.5 mm en grosor (**Fig 5**). El promedio en peso de 100 semillas de tépari cultivados es entre 10 y 20 g y en su forma silvestre, entre 2 y 5 g. Aunque los cultivados y los silvestres no tienen un hábitat definido, es necesario un ambiente desértico (Cordoba y Martínez, 1997). Es altamente adaptable a las temperaturas altas, humedad baja y concentración de sal alta en el suelo. En adición, el frijol tepari es resistente al ataque de varios patógenos y microorganismos que afectan al frijol común (González y col 2005; Jiménez-Galindo y Acosta-Gallegos, 2012).

Su forma de cultivo consiste en un ciclo corto, floreando de 27 a 40 días después de su germinación y maduran de 60 a 80 días. El cultivo se ha encontrado de 50 a 1920 m sobre el nivel del mar, requiere de una precipitación anual de 250 a 300 mm,

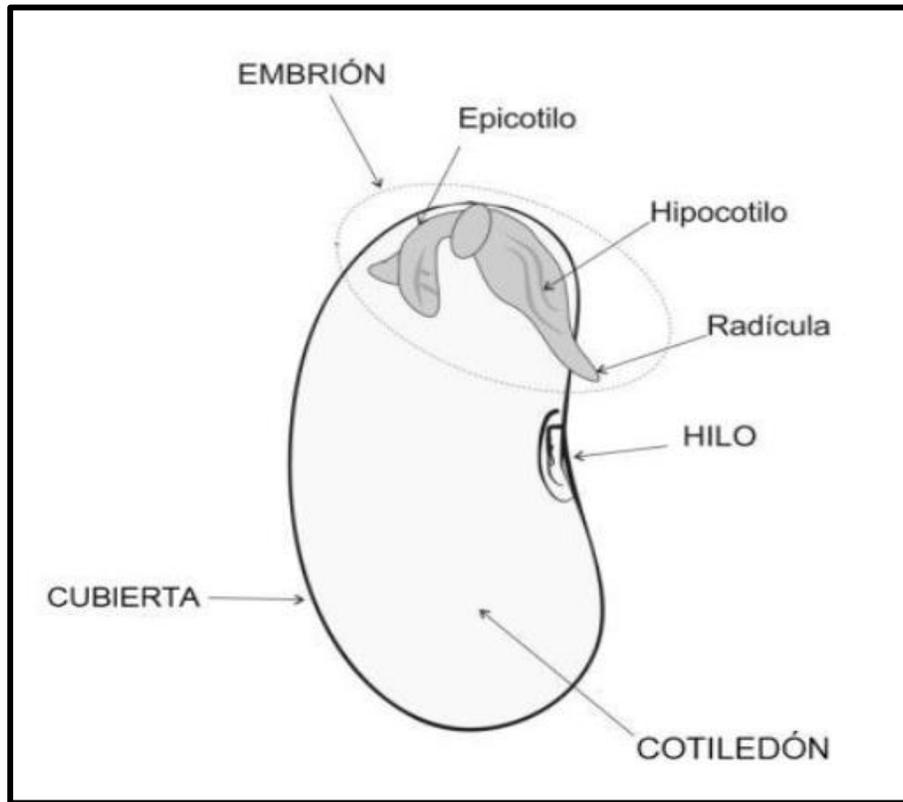


Fig 5. Estructura de la semilla de frijol tépari (*Phaseolus acutifolius*).

aunque crece en México en regiones con una precipitación de 150 mm (Sonora) a 750 mm (Campeche). Crece en suelos secos, arenosos, lodosos, y algunas veces en suelos orgánicos con un pH 6.7 a 7.1 (Cordoba y Martínez, 1997).

b Producción

No obstante, todas las características ventajosas, el frijol tépari prácticamente ha desaparecido como cultivo; hoy en día tan sólo se encuentran pequeñas áreas establecidas en reservas indígenas o en zonas cercanas a ellas. No se cuenta con estadísticas de su producción a nivel mundial, sin embargo, se ha reportado que el frijol tépari silvestre tiene una producción de 1,600 kg/ha correspondiente al ciclo otoño-invierno. Para el frijol tépari domesticado se ha obtenido una producción de 2,020 kg/ha en el desierto de Sonora. Desafortunadamente, no existe un historial de la producción de este grano, que permita observar cuál es su tendencia de producción (Florez-Ramos y col, 1997).

c Composición química de frijol tépari

La composición química de las leguminosas varía según la especie de la planta, las condiciones de crecimiento, las áreas geográficas y la etapa de maduración de la semilla. Los frijoles tépari son cultivos alimenticios potenciales para muchas áreas áridas y semiáridas del mundo. Su consumo está destinado para alimentos humanos y alimentos para animales. Una mejor comprensión de las propiedades de las proteínas del frijol tépari y su evaluación nutricional podría conducir a un uso más amplio de esta leguminosa en la industria alimentaria (**Cuadro 5**) (Idouraine, 1993)

Cuadro 5. Composición química del frijol tépari

Componente	(%, bs)
Proteína	18.76 ± 0.23
Lípidos	1.77 ± 0.22
Minerales	3.76 ± 0.23
Carbohidratos	56.15 ± 3.41
Fibra dietaria total	9.80 ± 1.55
Insoluble	9.23 ± 1.50
Soluble	0.57 ± 0.05

Idouraine (1993)

1) Proteínas

Los niveles de proteína del frijol tépari oscila entre 13.0 y 32.2%, y los valores informados más comúnmente varían de 22.0-24.0% (Scheerens y col, 1983). Idouraine y col (1995) informaron sobre 14 muestras de frijol tépari blanco, marrón, moteado y negros recolectados en varios lugares, mostrando un contenido de proteína que oscilaba entre 17 y 23%. Salas-López y col (2018) reportaron, en frijol tépari, contenidos de proteínas de 18.88 %, bs.

2) Lípidos

El contenido de lípidos del frijol tépari es de 1.4 a 1.9%, y depende de la variedad, clima, localización, condiciones ambientales y tipo de tierra en que crece. Los lípidos de este tipo de leguminosa poseen una gran variedad de ácidos grasos, de los cuales el 33.4% son saturados y 66.6% insaturados (monoinsaturados 24.2% y poliinsaturados 42.3%) (Bhardwaj y Hamama, 2005). Salas-López y col (2018) reportaron, en frijol tépari, contenidos de lípidos de 1.8%, bs.

3) Vitaminas y Minerales

El frijol tépari es una buena fuente de minerales tales como Ca (126-446 mg/100g), Fe (195.6 mg/100g), P (60-432 mg/100g), K (1501-1608 mg/100g), Mg (95-281 mg/100g) y S (260-410 mg/100g). El K contribuye con el 25 a 30% del contenido total de minerales en la semilla, así mismo, contienen una cantidad importante de P que está presente como ácido fítico. Además, posee el doble de Fe que el frijol común (Bhardwaj y Hamama, 2004). Se ha demostrado que las leguminosas son una rica fuente de vitaminas y aportan a la dieta cantidades considerables de Ácido fólico, Tiamina, Riboflavina y Niacina (Salunkhe y col, 1985).

4) Fibra dietaria

Las leguminosas contienen una cantidad significativa de fibra dietaria. Se han informado valores de 0.9 a 5.8% y de 11.0 a 32.0% para fibra dietaria soluble e insoluble, respectivamente. El contenido de fibra de frijol tépari es de 5.80-7.14% con un promedio de 6.45% (Idouraine y col, 1995). Los principales componentes químicos de la fibra en el frijol son las pectinas, pentosanos, hemicelulosa, celulosa y lignina (Ulloa y col, 2011).

d Valor nutricional del frijol tépari

1) Aminoácidos esenciales

Típicamente, son de 20-24 los tipos de aminoácidos que se encuentran presentes en las proteínas alimentarias. El cuerpo humano adulto es capaz de sintetizar todos menos 8 de estos constituyentes (denominados aminoácidos esenciales), que deben obtenerse de la dieta (Sheerens y col 1983). Una característica importante en el frijol tépari es su contenido alto de Lisina (7.7 g/100 g de proteína en tépari salvaje - 6.9 g/100 g de proteína en tépari domesticado), Leucina (9.6 g/100 g de proteína en tépari salvaje – 8.6 g/100 g de proteína en tépari domesticado) y de aminoácidos aromáticos (Fenilalanina y Tirosina 10.2 g/100 g de proteína en tépari salvaje – 8.8 g/100 g de proteína en tépari domesticado). Aunque las proteínas de las leguminosas son deficientes en aminoácidos azufrados (Met+Cys) y triptófano, el frijol tépari mantiene valores mayores en aminoácidos azufrados (2.43 g de AAE/100g de proteína) de la recomendación de la FAO (2013) (2.3 g/100g de proteína), de igual manera para el triptófano. Así mismo su valor biológico mejora cuando se complementa con proteínas

como maíz o arroz (deficientes en Lys, pero ricos en Met+Cys), incrementando el valor de la proteína ingerida (Sheerens y col, 1983; Salas-López y col, 2018) (**Cuadro 6**).

e Fitoquímicos en frijol tépari

El frijol común predomina entre las leguminosas más producidas y consumidas en África, India, América Latina y México. Este último es el sitio donde se originaron 47 de las 52 especies clasificadas del género *Phaseolus* (Silva-Cristóbal y col, 2010). Aunque históricamente este alimento ha sido la principal fuente de proteínas en los países en desarrollo, su consumo ha disminuido durante las últimas décadas a medida que la población ha adoptado un estilo de vida occidental. Su consumo ha sido infravalorado en América del Norte y el Norte de Europa (Messina, 2014). La misma tendencia se observa en los países a lo largo del Mar Mediterráneo y esto ha llevado a una mayor incidencia de enfermedades crónicas como el cáncer, la obesidad y las enfermedades cardiovasculares (Moreno-Franco y col, 2014). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (WHO, 2017), esta última es la causa más común de muerte causada por enfermedades no transmisibles (NTD), que suman 17.7 millones de casos cada año, seguidos de cáncer (8.8 millones de casos), enfermedades respiratorias (3.9 millones de casos) y diabetes (1.6 millones de casos). Estos cuatro grupos de enfermedades son responsables del 81% de las muertes causadas por NTD. Una cantidad creciente de evidencia científica actualmente apoya el papel de los compuestos bioactivos en prevención de enfermedades y el tratamiento debido a su efecto beneficioso sobre la salud (Guzmán-Maldonado y col, 2002). Varios estudios informan que el frijol común es un alimento con un contenido alto de proteínas,

Cuadro 6. Contenido de aminoácidos esenciales presentes en frijol común y tépari

Aminoácidos	Frijol común	Frijol tépari	FAO¹
Histidina	-	2.4	1.6
Isoleucina	4.5	4.0	3.0
Leucina	7.5	6.9	6.1
Lisina	7.0	6.4	4.8
Treonina	5.5	4.1	2.5
Triptófano	0.6	1.1	0.6
Valina	6.5	4.7	4.0
AAE azufrados (Met+Cys)	2.0	2.4	2.3
AAE aromáticos (Phe+Tyr)	6.5	8.4	4.1

¹Requerimientos para niños mayores de 3 años y adultos FAO/WHO (2013)

Sheerens y col (1983)

Salas-López y col (2018)

carbohidratos, fibra dietaria, minerales y vitaminas (Luthria y Pastor-Corrales, 2006). Además, contienen varios compuestos bioactivos que no solo confieren un color a la semilla, como glucósidos de flavonol, antocianinas y taninos condensados (proantocianidinas), sino que también poseen actividad biológica (Aparicio-Fernández y col, 2006).

El consumo de frijoles ha sido una parte integral de la dieta en México durante miles de años (Cardador-Martínez y col, 2002). Los estudios realizados sobre este tema han identificado que el sitio donde se originó y domesticó el frijol es Mesoamérica, en particular al oeste y sur de México. Desde esos sitios, la especie migró hacia América del Sur (Hernández-López y col, 2013). Actualmente, se está cultivando una gran diversidad genética de frijoles en México, incluidas las variedades de tipo silvestre que aún permanecen sin clasificación.

Varios estudios han cuantificado los fitoquímicos contenidos en varias variedades del frijol mexicano común. Así, los compuestos fenólicos totales, antocianinas, taninos, flavonoides, lectinas, ácido fítico, oligosacáridos y otros compuestos bioactivos se identificaron como los más predominantes (González de Mejía y col, 2003; Martínez y col, 2003; Iniestra-González y col, 2005; Almanza-Aguilera y col, 2006; Espinosa-Alonso y col, 2006; Juárez-López y col, 2012).

La promoción de la cultura se promueve al extender la base genética y el conocimiento de los recursos disponibles. En algunos países, como Italia y España, se han realizado algunos estudios para recolectar, conocer y proteger sus razas de frijoles que se introdujeron previamente desde América hace aproximadamente cinco siglos. Con respecto a México, los campos se encuentran actualmente en un estado de abandono y la falta de continuidad del cultivo está causando la pérdida de información

sobre sus beneficios, así como el manejo de las variedades cultivadas tradicionalmente. Esto también puede conducir a la pérdida de las variedades mismas. El conocimiento sobre la diversidad genética que se produce en sus cultivares contribuirá a ampliar la base de los programas de mejora y puede contribuir a los esfuerzos realizados para aumentar el consumo de frijol per cápita y disminuir el consumo de comida rápida (Raya-Pérez y col, 2013).

Salas-López y col (2018) reportaron un contenido de compuestos fenólicos en frijol tépari crudo y germinado de 107 y 355 mg EAG/100 g muestra, respectivamente, así mismo, un contenido de flavonoides y taninos condensados en tépari crudo de 84 mg EQ/100 g muestra y 370 mg ECA/100 g, muestra **(Cuadro 7)**. Existen variaciones en el contenido de taninos de acuerdo a la variedad del frijol, pero también cabe destacar que los taninos son metabolitos secundarios de las plantas, por lo que su presencia se ve afectada por las condiciones ambientales e incluso dentro de una misma variedad (Aparicio-Fernández y col, 2006).

Salas-López (2020) realizó estudios sobre el efecto de la germinación en condiciones optimizadas de semillas de frijol tépari (*Phaseolus acutifolius*) y reportó que fue posible la identificación de un total de 21 compuestos fenólicos en la fracción libre los extractos de frijol tépari crudo (HFTC LB) y germinado optimizado (HFTGO LB), los cuales fueron tentativamente dilucidados como: Ácido ferúlico, (Epi)catequina-4,8'-(epi)catequina, Luteína-7-O-glucósido, Coumaroíl-isoferuloíl-cafeico, Quercetina-hexósido, Luteolina-3,7-di-O-glucósido, Isoorientina-2-O-ramnósido, Luteolina-glucósido, Quercetina-3-O-sinapoíl-dihexósido, Quercetina-3-O-ramnosíl-dihexósido, Ácido digaloíl-hexoíll-elágico, kaempferol-3,7-diglucósido, Quercetina-3,7-di-O-diglucósido, Rutina, Isoramnetina 3-sinapoíl, Quercetina-3-O-hexosíl-ramnósido,

Cuadro 7. Compuestos fenólicos totales, flavonoides totales y actividad antioxidante de harina de frijol tépari crudo (HFTC)

Propiedad	HFTC
<i>Compuestos fenólicos totales</i>²	
Fitoquímicos libres	15.0 ± 2.0 ^b
Fitoquímicos ligados	92.0 ± 1.0 ^b
Total	107.0 ± 2.0 ^b
<i>Flavonoides totales</i>³	
Fitoquímicos libres	30.0 ± 1.0 ^b
Fitoquímicos ligados	54.0 ± 2.0 ^b
Total	84.0 ± 2.0 ^b
<i>Actividad antioxidante (AAox)</i>⁴	
ORAC	
Fitoquímicos libres	2,446 ± 317 ^b
Fitoquímicos ligados	4,438 ± 169 ^b
Total	6,884 ± 205 ^b
ABTS	
Fitoquímicos libres	2,302 ± 87 ^b
Fitoquímicos ligados	5,867 ± 60 ^b
Total	8,169 ± 147 ^b

¹Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar;
Medias con letra diferente en el mismo renglón indican diferencia significativa (Duncan $p \leq 0.05$)

² mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g de muestra (bs)

³ mg equivalentes de catequina (ECA)/100 g de muestra (bs)

⁴ μ mol equivalentes de Trolox (ET)/100 g de muestra (bs)

Adaptado de: Salas-López (2019)

Quercetina-3-diglucósido-7-feruíl-diglucósido, Quercetina-3-feruloíl-7-glucósido, Quercetina-7-glucósido, Kaempferol-3-hydroxyferuloíl-diglucosido-7-O-glucosido, y Kaempferol 3-O-sinapoíl-soforósido-7-O-glucósido.

Ese mismo investigador (Salas-López, 2020) observó que en la fracción ligada los extractos de frijol tépari crudo (HFTC LB) y germinado (HFTGO LB), se pudieron identificar un total de 18 compuestos fenólicos los cuales fueron tentativamente dilucidados como: Ácido Quínico, Ácido coumaríl-quínico, Di- O- coumaroíl- O- galoíl-hexósido, Hidroxitirosol , Ácido Jasmónico, Ácido cafeoíl-shikímico, Ácido Cafeico, Ácido dicafeóíl, Ácido 4,5-di-O-Caffeóíl-quinico, Ácido Coumárico, Luteolina 7,4-O-diglucósido, Ácido coumaroíl-isoferuloíl-cafeico, Kaempferol-3-O-a-L-arabinopiranósido, Quercetina-3,7-O-di-glucopiranósido, Ácido cafeoíl-shikimatoquinato, 5-O-p-coumaroíl-4-O-cafeóíl- 3-quinato, Ácido 3-O-feruloíl-7-O-acíl-feruloíl-4-O-cafeóíl-quínico, y Rutina.

f Propiedades nutraceuticas

Se ha reportado al frijol como alimento nutraceutico, por el papel que algunos de sus componentes (compuestos fenólicos, fibra dietaria, ácidos grasos esenciales, etc.) desempeñan en beneficio de la salud. La presencia de compuestos fenólicos en la dieta se relaciona con la disminución del riesgo de desarrollar ciertas enfermedades; entre estas se encuentran canceres pancreáticos, de mama y de colon y enfermedades coronarias e inflamatorias. Lo anterior se debe en gran parte a su actividad antioxidante. Los efectos benéficos atribuidos a los compuestos fenólicos acentúan la importancia de las leguminosas como potenciales alimentos funcionales

(García-Gasca y col, 2001; Reynoso-Camacho y col, 2003; 2007, 2015; Messina, 2014, Mudryj y col, 2014

García-Gasca y col (2001) evaluaron el efecto antiproliferativo de una fracción proteica de semillas de frijol tépari (*Phaseolus acutifolius*) con actividad inhibidora de proteasa (AIP), en células normales y malignas, los resultados mostraron que la fracción proteica de semillas de frijol tépari con AIP, afectó diferencialmente la proliferación celular y la supervivencia celular de las células normales y transformadas. También se muestra que AIP afectó a los patrones de adhesión celular de fibroblastos transformados poco adherentes. Ambos efectos, la citotoxicidad y el aumento de la adhesión celular, representan una nueva alternativa en el uso de proteínas para disminuir o prevenir el desarrollo de malignidad. Se ha reportado que las lectinas activan el sistema inmune mediante la proliferación de linfocitos T y que estimulan la diferenciación de células de cáncer de colon. Reynoso-Camacho y col (2003) evaluaron la toxicidad aguda de una lectina extraída y purificada de frijol tépari en ratones, concluyendo que la lectina de frijol tépari tiene una toxicidad relativamente baja, por lo tanto, puede ser utilizado en estudios carcinógenos que potencialmente pueden conducir a la terapia del cáncer. Además, se ha demostrado que el consumo de algunas variedades del frijol mexicano común disminuye la aparición de tumores cancerígenos en ratas Sprague-Dawley (Reynoso-Camacho y col, 2007, 2015).

Algunos estudios clínicos han demostrado un efecto beneficioso del consumo de frijoles sobre el índice glucémico y un papel protector contra el establecimiento de diabetes tipo 2 debido a su alto contenido de polifenoles que les confiere un efecto antioxidante significativo. Además, varias líneas de evidencia sugieren que el consumo de frijoles disminuye el riesgo de enfermedades isquémicas del corazón y

cardiovasculares, cáncer de estómago y próstata, control de peso y obesidad, atenuación del estrés, ansiedad y depresión en las personas de edad avanzada, entre otros roles (Messina, 2014, Mudryj y col, 2014).

El investigador Salas-López (2020) realizó estudios sobre “Identificación de Compuestos Bioactivos y Propiedades Nutracéuticas de Frijol Tépari (*Phaseolus acutifolius*) Bioprocesado en Condiciones Óptimas de Germinación” y, como una de las conclusiones derivadas del mismo, reportó que el bioproceso de germinación, en condiciones optimizadas, mejoró la capacidad antihipertensiva in vivo de extractos fenólicos de frijol tépari, disminuyendo significativamente la presión arterial sistólica (PAS) en ratas espontáneamente hipertensas hasta las 6 h de estudio para la mayoría de las dosis estudiadas (250 y 500 mg/kg). La concentración de 500 mg/kg de extractos fenólicos libres y ligados causó las mayores disminuciones de PAS (Δ PAS= -36.33 a -45.49 mmHg), y presentó diferencias significativas con el captopril (Δ PAS= -34.21 mmHg) a las 6 h de estudio. Adicionalmente, al realizar evaluaciones sobre el efecto del bioproceso de germinación sobre potencial hipoglucemiante de extractos de frijol tépari germinado estableció que: “el bioproceso de germinación, en condiciones optimizadas, incrementó el potencial hipoglucemiante in vitro de extractos fenólicos del frijol tépari, disminuyendo el valor IC50 de inhibición de las enzimas α -amilasa (115 y 10.42 mg/mL en la fracción libre y ligada de frijol tépari crudo (HFTC) a 84.4 y 8.97 mg/mL en la fracción libre y ligada de frijol tépari germinado optimizado (HFTGO)).

Acorde a Salas-López (2020), en lo que respecta a “propiedades nutracéuticas del frijol tépari”, reportó que el bioproceso de germinación, en condiciones optimizadas, es una estrategia efectiva para mejorar el potencial hipoglucemiante y antihipertensivo in vivo de extractos fenólicos de frijol tépari, representando una potencial alternativa

natural para el control de glucosa en sangre y la presión arterial elevada en personas que sufren o son propensas a estos padecimientos.

G EXTRUSIÓN

1 Generalidades

La palabra extrusión proviene del latín "extrudere" que significa forzar un material a través de un orificio y es definida como "el proceso que consiste en dar forma a un producto, forzándolo a través de una abertura con diseño específico". No es una operación unitaria, combina las operaciones de transporte, mezcla, trabajo y formado está puede o no implicar simultáneamente un proceso de cocción. El primer conocimiento registrado sobre el uso del extrusor fue en 1979 cuando Joseph Bramah usó un artefacto con un pistón para elaborar tubos de plomo sin costura. A mediados de los años 1930's los extrusores se utilizaron para mezclar harina y agua y formar productos de pasta; años después esta tecnología se utilizó para producir el primer "cereal instantáneo para el desayuno" (harina de avena precocida) (Rodríguez-Castellanos y col, 2013).

La cocción por extrusión ha ganado popularidad en la industria de alimentos en los últimos años, debido a diversos factores tales como su mayor versatilidad y flexibilidad de operación, permitiendo obtener una gran diversidad de productos en forma continua. Posibilita el procesamiento en diversas formulaciones, adecuación del nivel nutricional según las necesidades; costo bajo de procesamiento, deterioro mínimo de nutrientes en el proceso, eficiente utilización de la energía, ausencia de efluentes,

inactivación de enzimas y factores antinutricionales (Reyes-Moreno y col, 2018; Ruiz-Gutiérrez y col, 2018).

El extrusor puede ser considerado como un reactor continuo en el que se desarrolla un proceso temperatura alta – tiempo corto (HTST, por sus siglas en inglés) que transforma una variedad de ingredientes a productos intermedios o terminados como por ejemplo: cereales para desayuno, snacks (aperitivos salados y dulces), alimentos para bebés, sopas instantáneas, rebozadores y coberturas, proteínas vegetales texturizadas, sustitutos de carne, almidones modificados, productos de confitería, pastas (fideos), bebidas en polvo, galletas, productos dietéticos, granolas, etc. (González y col, 2002; Ruiz-Gutiérrez y col, 2018).

En la extrusión, los parámetros importantes que influyen en la calidad del producto terminado son: el contenido de humedad del material y el tiempo de residencia, el cual es influenciado por la velocidad de alimentación, velocidad y configuración del tornillo, geometría del dado, temperatura y presión. Particularmente, los atributos sensoriales de los extrudidos dependen en gran medida de las variables relacionadas con el equipo y con la composición química de la materia prima (Chen y col, 1991; Reyes-Moreno y col, 2018).

2 Componentes de un extrusor

Las partes principales de un extrusor incluyen el alimentador, el barril, tornillo (s), y el dado, aunque se pueden agregar muchas más piezas para mayor versatilidad del producto (**Fig 6**). El alimentador se usa para alimentar continuamente la mezcla al extrusor a una constante tasa para garantizar la coherencia. Los alimentadores a menudo alimentan el material ya sea gravimétricamente o volumétricamente. El barril encierra el tornillo o un juego de tornillos. A menudo, el barril es con camisa para

calentar y para enfriar. La calefacción también puede ser lograda al proporcionar unidades de calefacción eléctrica en el barril o por vapor. La capa interna de barriles suele ser lisa en sistemas de doble tornillo mientras que puede ser ranurado o acanalado en sistemas de un solo tornillo.

El barril también puede tener varias inyecciones o puertos de alimentación adicionales a lo largo de él. Los puertos de inyección pueden ser utilizados para agua u otros ingredientes líquidos. El papel del (de los) tornillo (s) es ayudar a impartir cizallamiento a la mezcla del ingrediente y forzar la masa de los ingredientes mezclados hacia afuera desde el extrusor a través del dado. Los tornillos también son responsables de la acumulación de presión que ocurre al final del extrusor, así como la mezcla agregada de los ingredientes. La función del dado es para mantener el material en los tornillos, proporcionando tiempo a los tornillos para impartir energía de corte a la muestra.

El dado también controla la forma final del producto y se puede variar tremendamente. La última parte esencial del extrusor es el motor, que proporciona la energía necesaria para girar los tornillos. Otras partes opcionales pueden incluir un preacondicionador, que puede ser utilizado para prehidratar la mezcla de ingredientes y en algunos casos precocine los materiales antes de introducirlos en el extrusor. Una troqueladora también se utiliza con frecuencia para ayudar a cortar los extrudidos finales que salen de la matriz (Bon y col, 2017).

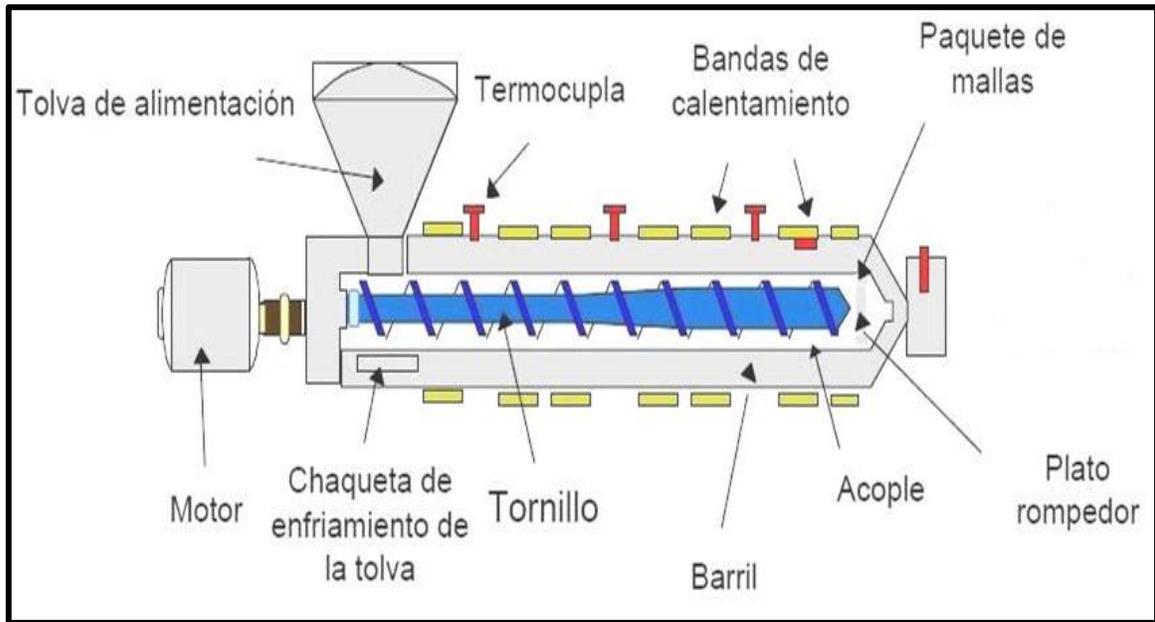


Fig 6. Componentes principales de un extrusor
Siddiq y Uebersax (2013)

3 Clasificación de los extrusores

De forma sencilla, los extrusores pueden ser clasificados como: húmedos o secos, y a su vez de acuerdo al tipo de construcción: extrusores de tornillo simple y de doble tornillo. Extrusión en seco: Este tipo de extrusor no necesita una fuente externa de calor o vapor por inyección o calentamiento por camisa, y el calentamiento de todo el producto se consigue mediante fricción mecánica. Los extrusores secos pueden procesar ingredientes que tienen un amplio intervalo de contenido de humedad, es decir 10-40 %, dependiendo de la formulación premezclada (Valls, 1993). Extrusión en húmedo: Son aquéllos donde el vapor y el agua se pueden inyectar dentro del cilindro durante el procesado. Típicamente, los cilindros de estas máquinas están equipadas con camisas de calentamiento y enfriamiento. En forma general en este proceso se deben cuidar los siguientes aspectos: el producto a procesar debe estar bien molido, regular la temperatura de las diferentes secciones del proceso para conseguir la máxima calidad nutritiva del producto, y que el agua y el vapor sean adecuados para conseguir el nivel de humedad necesarios, la presión y la superficie de apertura de la matriz idóneos para que el producto salga con la máxima calidad y el mínimo costo (Valls, 1993).

a Extrusor de tornillo simple

En éste, el canal del tornillo no se encuentra dividido, sino que es continuo a lo largo del tamaño del tornillo. En lugar de ser empujado por las aletas del tornillo, el producto es arrastrado por el canal del tornillo por el movimiento relativo del tornillo y la superficie de barril-presión y flujo son generados por el corte. El resultante “flujo de arrastre” es más o menos la mitad de la capacidad volumétrica del tornillo, la mitad del producto es dejado atrás. Las aletas del tornillo redirigen la mayoría del flujo tangencial

de arrastre a una dirección hacia abajo. La porción restante del flujo de arrastre se mueve a lo largo de la dirección del canal, originando una circulación del producto en el canal, importante para la transferencia de calor y mezcla. Cuando se genera presión en el tornillo, otro flujo se combina con el flujo de arrastre; debido a que el canal es continuo a lo largo del tornillo, la presión en la descarga hace que el producto quiera fluir hacia atrás, sustrayéndolo del flujo de arrastre. Por lo tanto, la capacidad actual de un extrusor de tornillo único oscila de la mitad de la capacidad volumétrica a mucho menos a presiones altas. La eficiencia de bombeo está afectada por la geometría del tornillo y por la viscosidad del material (Dziezack, 1989).

b Extrusor de doble tornillo

Los extrusores de doble tornillo o tornillos gemelos están compuestos de dos tornillos que tienen rotación dentro de un cilindro simple. De este modo, es posible tener cuatro configuraciones para la dirección de la rotación y posición de los tornillos. La configuración entrelazada es más eficiente ya que la función de los dos tornillos es la de una bomba de desplazamiento positivo, incrementa el flujo y reduce los depósitos de material en el extrusor. Estos extrusores pueden estar contruidos en varios diseños, el diámetro puede ser igual o desigual y cónico. El ancho del canal y el espesor del alabe también puede ser variable. En algunos diseños de extrusores se utilizan elementos calefactores a base de resistencias eléctricas, en otros se emplea vapor de agua para calentar directamente el cilindro. El calor también se genera en el material por fricción, causada por la acción del tornillo y las barras interiores del cilindro (Fellows, 1990).

4 Efecto de la extrusión sobre la composición química de los granos

a Almidón

El almidón es el elemento más importante en el proceso de extrusión de alimentos porque los cambios que sufre afectan la expansión del producto extruido y la textura final. Los cambios en la estructura del almidón, como fusión, gelatinización, fragmentación y dextrinización, se ven afectados por factores como la relación agua/almidón, temperatura, morfología, cizallamiento, tamaño de partícula, relación amilosa/amilopectina y adición de azúcar, entre otros (Pérez-Navarrete y col, 2006). Durante la extrusión los almidones se someten a alta presión, calor y fuerza de corte mecánicas. Se sabe que el contenido de agua en combinación con la temperatura tiene un efecto significativo en la conversión del almidón, este puede tomar muchas formas: la estructura granular desaparece, los cristales se funden y las macromoléculas se depolimerizan. Este proceso es conocido como gelatinización y ocurre cuando el almidón es calentado en exceso de agua. La gelatinización total del almidón se lleva a cabo cuando al menos 14 moléculas de agua por unidad de glucosa están presentes. La gelatinización o cocimiento de almidones es la conversión de un almidón crudo e indigerible a un almidón digerible, mediante la aplicación de humedad y calor (Zazueta-Morales y col, 2011).

b Proteínas

Los cereales (maíz, sorgo, arroz, cebada) y leguminosas (frijoles, chícharos, garbanzos, lentejas, habas, frijol tépari) han sido tradicionalmente la principal fuente de proteína vegetal en la dieta (Day, 2013). La proteína es el segundo componente más importante en los productos extrudidos. Durante el proceso de extrusión, las proteínas se desnaturalizan y disminuye su solubilidad debido a la agregación. Algunos

enlaces se rompen por el aumento de la temperatura y de la fricción, formando nuevas estructuras. Al enfriarse se forman enlaces no covalentes y puentes disulfuro y si el contenido de humedad es lo suficientemente bajo, las zonas amorfas se transforman en cristalinas (Pérez-Navarrete y col, 2006). Durante la extrusión, la reacción de Maillard se ve favorecida por las condiciones de alta temperatura ($> 180^{\circ}\text{C}$) y cortante (> 100 rpm) en combinación con baja humedad ($<15\%$) (Camire y col, 1990). El valor nutricional de la proteína depende del contenido de aminoácidos esenciales y de la digestibilidad y utilización de la proteína (FAO, 2011).

Varios factores pueden afectar la digestibilidad de las proteínas de los cereales, entre ellos están los estructura y composición del grano, presencia de enlaces disulfuro, grupos funcionales de superficie e hidrofobicidad y conformación de proteínas (Duodu y col, 2003). Además, el procesamiento como la presión, la temperatura, la fermentación, los ciclos de congelación / descongelación y el cizallamiento también pueden modificar la digestibilidad de las proteínas (Sun-Waterhouse y col, 2014). Varios informes han demostrado que la extrusión puede mejorar la digestibilidad de las proteínas desnaturalizando las proteínas y exponiendo los sitios susceptibles a las enzimas. Este fenómeno se atribuye a los efectos del alto cizallamiento sobre la estructura y conformación de las proteínas que ocurren durante la extrusión, lo que lleva a la fabricación de productos con proteínas altamente digestibles (Vaz y Arêas, 2010). Vaz y Arêas (2010) mostraron que el aumento en la solubilidad de las proteínas observado en las formulaciones a base de carne extruida se asoció con la degradación y desnaturalización de las proteínas durante el proceso. De manera similar, las enzimas y los inhibidores enzimáticos generalmente pierden actividad durante la extrusión a menos que sean estables al calor y al cizallamiento.

Las reducciones en los inhibidores de la proteasa pueden contribuir a una mejor utilización de la proteína vegetal (Sarwar y col, 2013).

Además, la extrusión se ha propuesto como una alternativa viable para influir en las propiedades alergénicas de las proteínas alimentarias. La posible reducción de la antigenicidad se debe a la degradación de las estructuras de las proteínas, que en última instancia da como resultado la reducción de la capacidad de unión a IgE e IgG durante el procesamiento térmico de los alimentos (Verhoeckx y col, 2015).

c Lípidos

Los lípidos pueden actuar como lubricantes durante la extrusión; el contenido de lípidos puede afectar propiedades de los extruidos. La presencia de lípidos en menos del 3% no afecta la extrusión, pero en cantidades superiores al 5% puede reducir la velocidad de expansión, y por encima del 10% reducen el deslizamiento dentro del cilindro del extrusor, lo que dificulta el proceso de extrusión (Camire, 2002).

Los alimentos extruidos, particularmente los productos expandidos, son susceptibles a la oxidación de lípidos, uno de las principales causas del deterioro de los alimentos (Viscidi y col, 2004). Aunque no hay mucha investigación centrada en los cambios nutricionales en los lípidos después de la extrusión, se ha informado que la cocción por extrusión puede minimizar la oxidación de los lípidos, aumentando así la calidad nutricional y sensorial y la vida útil de los alimentos (Singh y col, 2007). Entre los factores implicados en el retraso de la oxidación en los alimentos extruidos se encuentran: (1) La desnaturalización de la lipasa y otras enzimas que pueden contribuir a la oxidación (Viscidi y col, 2004); (2) Formación de complejos lípido-amilosa, reduciendo así la disponibilidad de almidón y lípidos y aumentando la estabilidad oxidativa y la vida útil de los productos extruidos (Thachil y col, 2014); (3)

Liberación de antioxidantes endógenos en los granos durante la extrusión que pueden proporcionar protección contra la peroxidación (Camire y col, 2005); y (4) creación de productos de reacción de Maillard con actividad antioxidante. En este sentido, Sproston y Akoh (2016) demostraron, recientemente, que un producto de reacción de Maillard (MRP, por sus siglas en inglés) derivado de la D-glucosa y la L-cisteína posee propiedades antioxidantes y que dicho producto podría ser útil para inhibir la oxidación de lípidos en emulsiones complejas.

d Fibra dietaria

Diferentes investigadores han informado un aumento en el contenido de almidón resistente a enzimas en trigo, maíz (Chanvrier y col, 2007) y cebada (2–3%) después de la extrusión (Huth y col, 2000). Con respecto al contenido de fibra, Jing y Chi (2013) optimizaron el proceso de extrusión [Temperatura de extrusión (TE)= 115 ° C, contenido de humedad de alimentación (CH)= 31% y velocidad del tornillo (VT)=, 180 rpm] para obtener valores máximos de fibra dietaria en pasta de soya extrudida. En estas condiciones, el contenido de fibra dietaria soluble en la “harina de pasta de soya extrudida” se incrementó 10,6%; adicionalmente, se observó mayor capacidad de absorción de agua, y de aceite, así como capacidad de hinchamiento que la “harina de pasta de soya sin extrudir”. Chen y col (2014) reportaron resultados similares al aplicar a “harina de pasta de soya” condiciones optimizadas del proceso de extrusión (TE=170°C / VT=150 rpm). Estos investigadores encontraron que el contenido de fibra dietaria soluble de la “harina de pasta de soya extrudida” aumentó más de diez veces y mostró una capacidad de absorción de agua, y solubilidad en agua, además de capacidad de hinchamiento, mejorados (mayores) en comparación con la “harina de pasta de soya sin procesar”. Además, probaron los efectos fisiológicos de su producto

con contenido alto de fibra dietaria y observaron que era capaz de reducir significativamente el colesterol total, el colesterol de lipoproteínas de baja densidad y los niveles de triglicéridos *in vivo*.

El aumento de la fibra dietaria soluble en productos extruidos podría explicarse por la formación de componentes adicionales por transglucosidación, por lo que se rompen enlaces 1-4 carbono-oxígeno y se forman nuevos enlaces de glucosa anhidra; los nuevos enlaces resultantes son resistentes a la digestión enzimática (Stojceska y col, 2010). Otra posibilidad, asociada al incremento de fibra dietaria total, es el incremento en fibra dietaria insoluble con la formación de amilosa retrogradada, insoluble a temperatura ambiente (Vasanthan y col, 2002; Stojceska y col, 2010). Esto también podría atribuirse a la formación de interacciones covalentes entre macronutrientes que conducen a componentes insolubles y no hidrolizables por enzimas digestivas (Vasanthan y col, 2002; Esposito y col, 2005). Estos glucanos no digeribles pueden ser productos de reacción de Maillard (MRP, por sus siglas en inglés) que probablemente resulten de reacciones químicas entre el almidón y las proteínas presentes en la matriz que contiene fibra dietaria (Esposito y col, 2005).

e Vitaminas

Cada vitamina tiene sus propias características de estabilidad durante los procesos térmicos. Los efectos en la estabilidad en las vitaminas durante la extrusión son complicados debido a la acción de la humedad, fricción, altas temperaturas y presiones. Las vitaminas liposolubles A, D y E, en general, son razonablemente estables durante la extrusión. El nivel de humedad del producto durante la extrusión tiene el mayor efecto sobre la retención de vitaminas. Como norma general, alto nivel de humedad en el proceso da más vitaminas retenidas. Las vitaminas hidrosolubles,

como la vitamina C o del grupo B, pueden perder estabilidad durante la extrusión (Valls 1993).

5 Efecto de la extrusión sobre los niveles y perfiles de fitoquímicos en granos

Los granos de cereales son una buena fuente de compuestos bioactivos, principalmente compuestos fenólicos (ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas, proantocianidinas). Un porcentaje significativo de estos compuestos se pierde durante el proceso de extrusión debido a su sensibilidad hacia variables del procesamiento como las condiciones de temperatura alta (Riaz y col 2009).

Varios investigadores han demostrado la retención o el aumento de compuestos bioactivos durante extrusión-cocción de cereales y leguminosas. Zielinski y col (2001) encontraron cambios significativos en los cereales seleccionados (trigo, cebada, centeno y avena) durante la extrusión cocción a diferentes temperaturas (120, 160, 200°C). Estos investigadores encontraron incrementos significativos en algunos ácidos fenólicos (principalmente ácido ferúlico) como consecuencia de la extrusión; sin embargo, los ácidos sinápico y caféico no se detectaron en los granos extrudidos. Awika y col (2003) observaron que la extrusión cocción del sorgo (*Sorghum bicolor*) no causó pérdida en el contenido de taninos condensados; sin embargo, se extrajeron con mayor dificultad.

La extrusión-cocción causa la descomposición de compuestos fenólicos lábiles al calor y la polimerización de algunos otros (Altan y col, 2009), lo que resulta en la disminución del contenido de compuestos fenólicos extraíbles. Por otro lado, la extrusión-cocción altera las matrices de la pared celular y rompe los enlaces covalentes en los complejos de compuestos fenólicos de peso molecular alto (Awika y col, 2009), mejorando la accesibilidad fenólica. El efecto neto de la extrusión-cocción

en el contenido de compuestos fenólicos totales depende de cuál de estos fenómenos son predominantes (Wang y col, 2014). La actividad antioxidante se correlaciona con la presencia de compuestos bioactivos como compuestos fenólicos, carotenoides, flavonoides y antocianinas en los alimentos (Liu, 2004).

Los compuestos fenólicos durante la extrusión pueden sufrir descarboxilación debido a las temperaturas altas del barril. Además, el contenido alto de humedad puede promover la polimerización de fenoles y taninos reduciendo su capacidad de extracción y actividad antioxidante (Repo-Carrasco-Valencia y col, 2009). Si bien el aumento de los ácidos fenólicos en los productos extruidos se debe generalmente a la liberación de la matriz de la pared celular, la mayoría de los compuestos bioactivos son sensibles a la temperatura, y la temperatura del barril juega un papel importante en la estabilidad de sus propiedades antioxidantes (Brennan y col, 2011).

Corrales-Bañuelos y col (2016) aplicaron el proceso de extrusión-cocción en presencia de hidróxido de calcio para la obtención de harina de maíz, a partir de maíces amarillos criollos nativos de Sinaloa, para la elaboración de tortillas. Ellos reportaron que el proceso de extrusión-cocción disminuyó ($p \leq 0.05$) el contenido total de carotenoides al compararse con granos sin procesar. Las tortillas elaboradas con harina de maíz extrudido retuvieron el 68.8%-79.5% del contenido total de carotenoides presente en granos de maíz sin procesar; además estas tortillas mantuvieron una concentración del 60% de la Luteína asociada al grano crudo. Estos investigadores consideran que los maíces amarillos pueden ser considerados para la elaboración de productos alimenticios extruidos con potencial nutracéutico.

Durante la extrusión-cocción se informó una disminución significativa (<50%) en las antocianinas totales en el maíz azul mexicano. Esta disminución se atribuye principalmente a la sensibilidad de los flavonoides a las temperaturas altas (Mora-Rochín y col, 2010; Aguayo-Rojas y col, 2012; Sánchez-Madrigal y col, 2015). Sin embargo, también hay un aumento de monómeros y dímeros biológicamente importantes debido a la interrupción de la matriz alimentaria de la pared celular (Khanal y col, 2009).

6 Efecto de la extrusión sobre la actividad antioxidante y propiedades nutraceuticas en granos

El procesamiento de alimentos produce la destrucción o el cambio de compuestos bioactivos naturales, que pueden afectar las propiedades antioxidantes de los alimentos (Nicoli y col, 1999; Nayak y col, 2015). Según la literatura, el procesamiento de alimentos puede alterar la actividad antioxidante positiva y negativamente. En este sentido, la extrusión-cocción puede tener un efecto sobre el contenido de compuestos fenólicos en los granos de cereales y leguminosas. Por un lado, la extrusión causa la descomposición de compuestos fenólicos lábiles al calor y la polimerización de algunos otros (Altan y col, 2009), lo que resulta en la disminución del contenido de compuestos fenólicos extraíbles. Por otro lado, la extrusión altera las matrices de la pared celular y rompe los enlaces covalentes en los complejos de compuestos fenólicos de peso molecular alto (Awika y col, 2009), mejorando la accesibilidad fenólica. Los compuestos fenólicos durante la extrusión pueden sufrir descarboxilación debido a las temperaturas altas del barril. Además, el contenido alto de humedad puede promover la polimerización de fenoles y taninos reduciendo su capacidad de extracción y

actividad antioxidante (Repo-Carrasco-Valencia y col, 2009). El efecto neto de la extrusión en el contenido de compuestos fenólicos totales depende de cuál de estos fenómenos son predominantes (Wang y col, 2014). La actividad antioxidante se correlaciona con la presencia de compuestos bioactivos como compuestos fenólicos, carotenoides, flavonoides y antocianinas en los alimentos (Liu, 2004).

Recientemente, varios estudios han informado el efecto de la extrusión, y de las condiciones de extrusión, en el contenido de fitoquímicos y la actividad antioxidante de los granos de cereales y leguminosas. Se han reportado pérdidas o incrementos importantes de compuestos bioactivos debido a los efectos térmicos y los cambios químicos que ocurren durante la extrusión (Leyva-Corral y col, 2016). Por ejemplo, la liberación de compuestos fenólicos depende en gran medida del contenido de humedad, el tiempo y la temperatura (Dimberg y col, 1996; Ragaee y col, 2014).

Sensoy y col (2006) no observaron cambios en la actividad antioxidante de trigo oscuro después de que se sometió a temperaturas de extrusión de 170°C. En investigaciones sobre el efecto de la extrusión sobre niveles de fitoquímicos y actividad antioxidante de cebada, llevadas a cabo por Altan y col (2009), se reportó una reducción significativa tanto en contenido de compuestos fenólicos totales (46-60%) como en actividad antioxidante (60-68%). En general, una reducción del contenido fenólico causado por el proceso térmico resultó de la polimerización de estos compuestos y, en consecuencia, de una menor capacidad de extracción (Dlamini y col, 2007).

Delgado-Licon y col (2009) estudiaron el efecto de la extrusión-cocción sobre los compuestos bioactivos y la actividad antioxidante de una mezcla de maíz/frijol; reportaron una disminución significativa en el contenido de compuestos fenólicos totales y en actividad antioxidante; atribuyeron tales disminuciones a las condiciones de procesamiento.

Milán-Carrillo y col (2012) estudiaron el efecto de la extrusión de grano integral de amaranto sobre la actividad antioxidante (**AAox**). La AAox se evaluó aplicando la metodología de capacidad de absorción de radicales oxígenos (ORAC, por sus siglas en inglés). Ellos reportaron un incremento en la AAox hidrofílica total [de 4,403 a 5,046 μmol equivalentes de Trolox (ET) / 100 g muestra, bs]. Sin embargo, al analizar la contribución de fitoquímicos libres y ligados a la AAox y el efecto de la aplicación del proceso de extrusión comunicaron que la AAox atribuida a compuestos fenólicos libres decreció ($p \leq 0.05$) [de 1,947 a 1,467 μmol equivalentes de Trolox (ET) / 100 g muestra, bs], mientras que la relacionada con compuestos fenólicos ligados se incrementó ($p \leq 0.05$) [de 2,456 a 3,579 μmol equivalentes de Trolox (ET) / 100 g muestra, bs]. Este comportamiento se atribuyó a **(1)** Rompimiento de fitoquímicos conjugados y liberación de los mismos como fitoquímicos libres, **(2)** Prevención de oxidación enzimática y **(3)** Oscurecimiento de las harinas de amaranto extrudido indica la formación de productos de la reacción de Maillard que poseen actividad antioxidante. Estos resultados muestran que los compuestos fenólicos ligados son los principales contribuyentes (56-71%) de la AAox hidrofílica, tanto en harinas de amaranto crudo como extrudido.

Espinoza-Moreno y col (2016) aplicaron la metodología de superficie de respuesta, como herramienta de optimización, para optimar el proceso de extrusión-cocción y

obtener productos extrudidos de valor nutricional y actividad antioxidante altos. A partir de una mezcla (70/30) de maíz mejorado genéticamente [con inserción del cDNA de la amarantina (proteína de amaranto)] y frijoles negros, y aplicando condiciones optimizadas del proceso de extrusión, se desarrolló una “botana expandida” lista para comer con valor nutricional y actividad antioxidante altos. Estos investigadores reportaron un incremento (74%) en el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) y en la actividad antioxidante hidrofílica [AAox evaluada como ORAC (18%) y ABTS (20%)] en la “botana extrudida” con respecto a la mezcla de granos enteros sin procesar. En general, el incremento en el contenido de CFT durante el proceso de extrusión podría deberse a la destrucción de las paredes celulares, la consiguiente liberación de compuestos fenólicos y los productos de reacción de Maillard cuantificados como compuestos fenólicos (Espinoza-Moreno y col, 2016).

Los compuestos fenólicos durante la extrusión pueden sufrir descarboxilación debido a las temperaturas altas del barril. Además, el contenido alto de humedad puede promover la polimerización de fenoles y taninos reduciendo su capacidad de extracción y actividad antioxidante (Repo-Carrasco-Valencia y col, 2009). Si bien el aumento de los ácidos fenólicos en los productos extrudidos se debe generalmente a la liberación de la matriz de la pared celular, la mayoría de los compuestos bioactivos son sensibles a la temperatura, y la temperatura del barril juega un papel importante en la estabilidad de sus propiedades antioxidantes (Brennan y col, 2011). En un estudio con maíz mexicano pigmentado (blanco, amarillo, azul y rojo) procesado por extrusión-cocción, las harinas obtenidas se usaron para hacer tortillas. Estas tortillas mostraron una retención alta del contenido fenólico total (76–93%), ácido ferúlico total

(58–97%) y actividad antioxidante evaluada como ensayo ORAC (93–75%) en comparación con las tortillas hechas con el proceso tradicional (Mora-Rochín y col, 2010). Del mismo modo, Aguayo-Rojas y col (2012) encontraron una mayor retención en el contenido fenólico total (76–87%) y la actividad antioxidante (ORAC, 87–90%), en tortillas de maíz mexicano pigmentado elaborado a partir de harinas extruidas al compararse con tortillas elaboradas por el proceso tradicional de nixtamalización. Durante la extrusión-cocción se informó una disminución significativa (<50%) en las antocianinas totales en el maíz azul mexicano. Esta disminución se atribuye principalmente a la sensibilidad de los flavonoides a las temperaturas altas (Mora-Rochín y col, 2010; Aguayo-Rojas y col, 2012; Sánchez-Madrigal y col, 2015). Sin embargo, también hay un aumento de monómeros y dímeros biológicamente importantes debido a la interrupción de la matriz alimentaria de la pared celular (Khanal y col, 2009).

Montoya-Rodríguez y col (2014a) reportaron que hidrolizados de proteínas provenientes de harina de amaranto extrudido inhibieron la inflamación inducida por LPS en macrófagos humanos y de ratón al evitar la activación de la señalización de NF- κ B. La extrusión mejoró el efecto antiinflamatorio de los hidrolizados de amaranto en ambas células, lo que podría atribuirse a la producción de péptidos bioactivos durante el proceso de extrusión-cocción.

Montoya-Rodríguez y col (2014 a, b) evaluaron la actividad biológica de los péptidos presentes en los hidrolizados de amaranto extrudido; descubrieron que los péptidos presentes en estos hidrolizados tienen un potencial antiinflamatorio y

antiateroesclerótico. Sin embargo, no informaron sobre las características específicas de estos péptidos.

De acuerdo a lo reportado por Montoya-Rodríguez y col (2015) el proceso de extrusión-cocción de harina de amaranto integral tuvo un impacto significativo en el perfil peptídico, produciendo más péptidos con menor peso molecular y actividad biológica. La digestión in vitro con pepsina y pancreatina produjo péptidos con actividad biológica, lo que representó la digestión simulada y demostró que los péptidos podrían formarse durante la digestión real. Además, el proceso de extrusión era una buena alternativa como pretratamiento porque podía descomponer las proteínas de los alimentos y hacer que estuvieran más disponibles para la acción enzimática. En resumen, las harinas de amaranto extrudido son fuentes de péptidos con actividad biológica potencial, como el inhibidor de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) y el inhibidor de la dipeptidil peptidasa IV (DPP-IV), que están relacionados con la prevención de enfermedades crónicas importantes. Las harinas de amaranto extrudido, así como los péptidos encontrados en ellas, podrían usarse como ingrediente o suplemento alimenticio en una dieta saludable para prevenir el riesgo de desarrollar enfermedades crónicas.

León-López y col (2019) llevaron a cabo investigaciones para mejorar la calidad de la tortilla; emplearon como estrategia la adición de harina de chíá desgrasada extrudida (HCDE) (25%) a harina de maíz nixtamalizado comercial (MASECATM, 75%). Ellos observaron una mejora sustancial en la actividad antioxidante (AAox) y en el potencial antihipertensivo [referido como inhibición de la enzima convertidora de angiotensina (ECA)] durante el proceso de extrusión de harina de chíá desgrasada; propusieron que

estos incrementos en AAox y potencial antihipertensivo podrían haberse producido por la liberación y formación de compuestos bioactivos (compuestos fenólicos y productos de reacción de Maillard) con potencial antioxidante y antihipertensivo. Los compuestos fenólicos (ácidos fenólicos, flavonoides, taninos, estilbenos) inhiben la actividad in vitro de la ECA (Massaretto y col, 2011; Al-Shukor y col, 2013).

IV JUSTIFICACIÓN

México, con una población estimada de 126.7 millones de personas en 2019, según los datos de la Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENADI), Instituto Nacional de Estadística Geografía (INEGI), tiene el mayor consumo mundial per capita de maíz (*Zea mays* L.). El principal producto alimenticio del maíz es la tortilla.

En México se consumen 1,400 millones de tortillas/día, con una ingesta de 8 a 10 tortillas al día por las personas adultas y cuanto más bajo es el nivel socioeconómico de un individuo, mayor es la dependencia de las tortillas. A pesar de ser un alimento con algunos beneficios nutrimentales, una de sus principales limitantes en las tortillas a base de maíz es la carencia de dos AAE esenciales (Lys, Trp), así como de los niveles óptimos de minerales importantes como Fe y Zn.

Las tortillas representan un excelente vehículo para mejorar el estado nutricional de los consumidores de tortillas, como los mexicanos. La fortificación de las tortillas de maíz (p. ej. criollo azul) con harinas de leguminosas (p. ej. frijol tépari) / pseudocereales extrudidos representa una alternativa para mejorar no solamente su calidad nutrimental, también se podría incrementar sus propiedades nutraceuticas.

El conocimiento de las propiedades nutricionales y nutraceuticas (actividad antioxidante, potenciales antihipertensivo, hipoglicémico) de la “tortilla mejorada” [tortilla de harina de maíz azul criollo extrudido (**HMAE**) adicionada con harina de frijol tépari extrudido (**HFTE**); 80% **HMAE**+20% **HME**] servirá de base para justificar científicamente su inclusión en portafolios alimentarios para el combate a la desnutrición y reducción de incidencia de enfermedades crónico degenerativas.

V HIPÓTESIS

Las tortillas elaboradas a partir de harinas de maíz azul extrudido (aptas para elaborar tortillas) y frijol tépari extrudido (con actividad antioxidante y contenido de compuestos fenólicos altos), obtenidas en condiciones de extrusión optimizadas en estudios previos, presentan propiedades tecno-funcionales (hinchabilidad, rolabilidad) y sensoriales aceptables, así como mejores propiedades nutricionales y nutracéuticas que las elaboradas con harinas de maíz [**MASECA^{MR} azul**, harina de maíz azul extrudido (**HMAE**)]

VI OBJETIVOS

A OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la adición de harina de frijol tépari extrudido (**HFTE**) sobre las propiedades nutrimentales, nutricionales, fisicoquímicas, tecno-funcionales, sensoriales, fisicoquímicas, nutrimentales, nutricionales y nutracéuticas de tortillas elaboradas a partir de harinas de maíz azul extrudido (**HMAE**).

B OBJETIVOS ESPECIFICOS

1.- Determinar la cantidad de harina de frijol tépari extrudido (**HFTE**) máxima posible que puede ser añadida a la harina de maíz azul extrudido (**HMAE**) para obtener tortillas con propiedades tecno-funcionales (hinchabilidad y rolabilidad) y sensoriales adecuadas.

2.- Evaluar composición química a tortillas elaboradas a partir de la mejor mezcla **HMAE + HFTE**

3.- Determinar propiedades fisicoquímicas y tecno-funcionales de harinas y tortillas elaboradas a partir de la mejor mezcla de maíz azul y frijol tépari extrudidos.

4.- Evaluar las propiedades nutricionales (**perfil de AAE, CQ, DPIV, C-PER**) de tortillas elaboradas a partir de la mejor mezcla **HMAE + HFTE**

5.- Evaluar contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**), antocianinas totales (**Ant**) y actividad antioxidante (**DPPH, ABTS**) de tortillas elaboradas a partir de la mejor mezcla **HMAE + HFTE**

6.- Determinar propiedades nutraceuticas [Actividades hipoglucemiante (inhibición de α -amilasas (**IAA**) y α -glucosidasa (**IAG**)) y antihipertensiva (Inhibición de **ECA**)] de tortillas elaboradas a partir de la mejor mezcla **HMAE + HFTE**

7.- Evaluar sensorialmente las tortillas elaboradas a partir de la mejor mezcla **HMAE + HFTE**

VII MATERIALES Y MÉTODOS

A MATERIALES

Como material de estudio se utilizaron granos de maíz azul (*Zea mays* L) cosecha 2018, sembrados bajo sistema de riego en la localidad de Tepeaca, Puebla, México. Los granos de frijol tépari (*Phaseolus acutifolius*) cosecha 2018, se sembraron y cosecharon en el municipio de Ahome, Sinaloa, México. Los granos, después de la cosecha, se limpiaron, se colocaron en recipientes de plástico, con cierre hermético, y se almacenaron bajo refrigeración (4-6°C) hasta su posterior utilización.

B MÉTODOS

1 Características físicas de granos de maíz azul y frijol tépari

A los granos bajo estudio se les evaluó longitud, anchura y grosor, utilizando un vernier y un microscopio estereoscópico. Las mediciones se realizaron en 30 granos seleccionadas al azar. Las determinaciones se realizaron por triplicado.

a Peso de 1,000 granos

Se determinó pesando 1,000 granos, tomados al azar, de un lote de granos limpios, en una balanza OHAUS (Mod TP2KS, SeedburoEquipment, Co., EUA). La prueba se realizó por triplicado.

b Peso hectolítrico

Para la determinación del peso hectolítrico se usó el procedimiento 55-10.01 de la AACC (1995). Un recipiente de volumen conocido (1L) se llenó de granos (maíz azul ó frijol tépari), posteriormente se pesó en una balanza analítica (OHAUS, Mod.

Explorer). El peso hectolítrico se obtuvo al dividir el peso de los granos entre el volumen del recipiente y relacionándolo a un volumen de 100 L (hL). Los valores se reportaron como kg/hL. Esta característica física se determinó mediante 10 repeticiones.

2 Obtención de harinas de maíz azul y frijol tépari extrudidos

a Preparación de harina de maíz azul extrudido (HMAE)

La harina de maíz azul extrudido (**HMAE**) se obtuvo con el procedimiento recomendado por Milán-Carrillo y col (2006). Estos investigadores optimizaron el proceso de extrusión cocción para obtener harina de maíz extrudido apta para elaboración de tortillas; como herramienta de optimización utilizaron la Metodología de Superficie de Respuesta, como variables de respuesta seleccionaron características de calidad de la tortilla (hinchabilidad, rolabilidad). Lotes de 1 kg de granos de maíz azul molturados se mezclaron con cal [0.21 g Ca(OH)_2 /100 g de maíz azul] y se humectaron con agua purificada hasta alcanzar un contenido total de humedad de 28%. Cada lote se empacó en bolsas de polietileno y se almacenó a 4°C por 12 h para asegurar el equilibrio de humedad. Antes de la extrusión, la harina de maíz azul se atemperó (25°C / 2 h). La extrusión se realizó en un extrusor de tornillo simple modelo 20Dn (CW Brabender Instruments, Inc, NY, EUA) con diámetro de tornillo de 19 mm; relación de longitud a diámetro 20:1; razón de compresión nominal 1:1 y una apertura de dado de 3 mm. La temperatura en el barril fue la misma para las tres zonas y la zona de anotación se enfrió por aire. Una tercera zona, en el barril del troquel, se calentó eléctricamente pero no se refrigeró por aire. La tasa de alimentación fue de 30 rpm. Las condiciones del extrusor: Temperatura de extrusión (TE) = 85 °C / Velocidad

de tornillo (VT) = 240 rpm. Después de la extrusión los extrudidos se enfriaron y equilibraron al medio ambiente (25°C, HR=65%). Los extrudidos se molturaron utilizando un molino (Perten Laboratory Mill 3100), hasta pasar a través de malla US 80 (0,180 mm), se envasaron en bolsas de plástico y almacenaron a 4°C. Se le reconoce como harina de maíz azul extrudido optimizada (**HMAE**).

b Preparación de harina de frijol tépari extrudido (HFTE)

La harina de frijol tépari extrudido (**HFTE**) se obtuvo con el procedimiento recomendado por Gastélum-Ávila (2019) (**Fig 7**). Lotes de 1 kg de granos de frijol tépari molturados se mezclaron con cal [0.21 g Ca(OH)₂/100 g de frijol tépari] y se humectaron con agua destilada hasta alcanzar un contenido total de humedad de 24%. Cada lote se empacó en bolsas de polietileno y se almacenó a 4°C por 12 h para asegurar el equilibrio de humedad; Antes de la extrusión, la harina de frijol tépari se atemperó (25°C) 2 h antes de ser extrudidos. La extrusión se realizó en un extrusor de tornillo simple modelo 20DN (CW Brabender Instruments, Inc, NY, EUA) con diámetro de tornillo de 19 mm; relación de longitud a diámetro 20:1; razón de compresión nominal 1:1 y una apertura de dado de 3 mm. La temperatura en el barril fue la misma para las tres zonas y la zona de anotación se enfrió por aire. Una tercera zona, en el barril del troquel, se calentó eléctricamente pero no se refrigeró por aire. La tasa de alimentación fue de 30 rpm. Las condiciones del extrusor: TE: 137 °C / Velocidad de tornillo (VT): 220 rpm. Después de la extrusión los extrudidos se enfriaron y equilibraron al medio ambiente (25°C, HR=65%). Los extrudidos se molturaron utilizando un molino (Perten Laboratory Mill 3100), hasta pasar a través de malla US 80 (0,180 mm), se envasaron en bolsas de plástico y almacenaron a 4°C. Se le reconoce como harina de frijol tépari extrudido (**HFTE**)

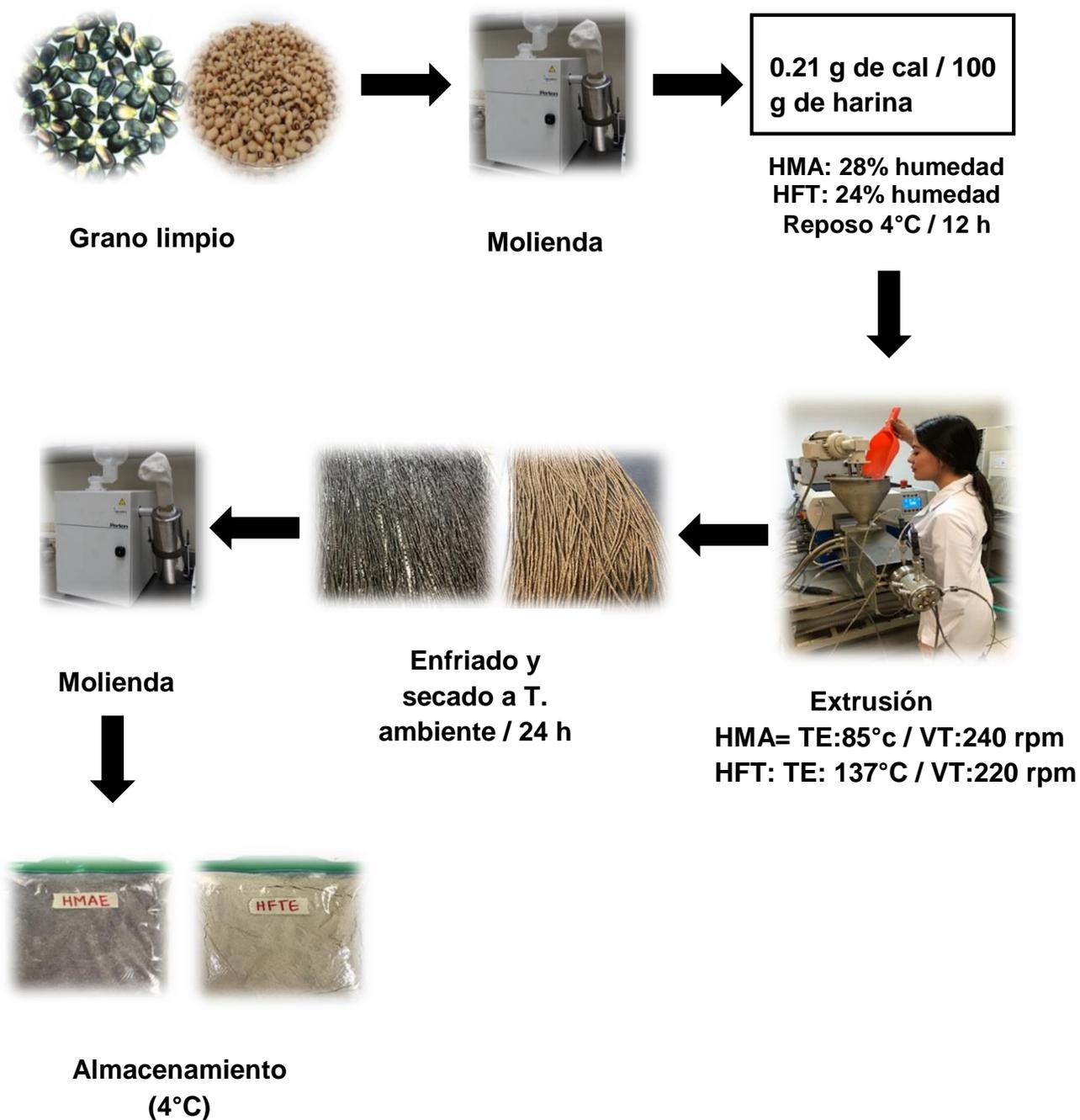


Fig 7. Diagrama de flujo del proceso de extrusión de harina de maíz azul y harina de frijol tépari

Mora-Rochín y col. (2010)

Gastélum-Avila (2019)

3 Composición química de harinas de maíz azul y frijol tépari crudos y extrudidos

La composición química de los granos y las harinas extrudidas se determinó de acuerdo a los métodos oficiales de AOAC (1999).

a Humedad

Se determinó humedad de las muestras aplicando el método 44.15 de la AOAC (1999). Se calculó la pérdida de peso de 2 g de muestra, después de calentar a 80°C durante 12 h, posteriormente se aumentó la temperatura a 130°C durante 1 h en una estufa de circulación de aire (FELISA mod 142^a, México). La prueba se realizó por triplicado.

b Proteínas

Se utilizó el método 46.12, microKjeldahl, de la AOAC (1999) para la determinación de nitrógeno en un sistema Kjeltex (Mod 1009 y 1002, Tecator, Suecia). 0.2 g de muestra se digirieron con 5 mL de ácido sulfúrico y mezcla reactiva de Selenio (Merck Co., Alemania) a una temperatura de 200°C. En la destilación de la muestra, previamente diluida con 10 mL de agua destilada, se emplearon disoluciones de NaOH al 40% y ácido bórico al 4% como indicador para recibir el destilado. La titulación se llevó a cabo con una disolución valorada de HCl 0.1 N. Posteriormente, la proteína cruda se calculó multiplicando el contenido de nitrógeno total por 6.25. La prueba se realizó por triplicado.

c Lípidos

Se determinó de acuerdo al método 920.39 de la AOAC (1999). Las extracciones se realizaron en muestra de 3-4 g de harina. Se utilizó el equipo Soxhlet System HT 1043 Extraction Unit (Tecator, Suecia); como disolvente se empleó éter de petróleo. La prueba se realizó por triplicado.

d Cenizas

Se utilizó el método 934.01 de la AOAC (1999). Se pesaron 3 a 5 g de muestra, se colocaron en crisol de porcelana y se incineraron en mufla a 550°C hasta que resultaron cenizas de color gris luminoso con peso constante. Las muestras incineradas se enfriaron en un desecador, atemperaron (25°C) y pesaron. La prueba se realizó por triplicado.

e Fibra dietaria

Se evaluó acorde al método oficial 958.29 (AOAC, 1999). Se utilizó un kit de análisis de fibra dietaria total (TDF-100A, Sigma). Se realizaron cuatro réplicas utilizando muestras de 1 g de cada una, previamente desgrasadas. Las muestras se colocaron en matraces de 250 mL de una solución reguladora de fosfatos (pH 6) a cada muestra. A cada matraz con la muestra se le adicionaron 100 µL de α-amilasa. Las muestras se sometieron a tratamiento térmico (95°C/20 min) en baño María, con agitación constante. Después de este tiempo, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente, y el pH se ajustó a 7.5 ± 0.2 con NaOH 0.275. Se adicionaron 100 µL de una solución de proteasa (5 mg proteasa) a cada muestra y se sometieron a calentamiento (60°C/30 min) y posteriormente se enfriaron. Se ajustó el pH 4 - 4.6 con HCl 0.325 M, y se adicionaron 100 µL de amiloglucosidasa, las muestras se colocaron en estufa (60°C/30 min). Finalmente, las muestras se enfriaron y filtraron (usando filtros Gösh #2, previamente secos con 0.5 g de celita, a peso constante), se hicieron tres lavados con 20 mL de etanol al 78%, dos lavados de 10 mL con etanol al 96%, y finalmente dos lavados de 10 mL con acetona. El residuo del filtrado se secó en estufa (70°C/12 h). Esta parte del residuo se denomina fracción insoluble o fibra insoluble (**FI**). A la solución del filtrado de la fracción insoluble se le adicionaron 250 mL de etanol al 96%

y se dejó reposar (12 h/25°C), para posteriormente filtrar (usando filtros Gösh #2, previamente secos con 0.5g de celita) y lavar con etanol al 78%, 96% y acetona pura. Al residuo de este filtrado se le reconoce como fracción soluble o fibra soluble (**FS**). El filtro con el residuo se secó en estufa (105°C/12 h). Se registraron los pesos de la fracción insoluble y soluble; de las cuatro réplicas se tomaron dos muestras de cada fracción para cuantificar proteínas y dos para cenizas.

El porcentaje de fibra de la fracción insoluble y soluble se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ FDI } \text{ ó } \% \text{ FDS } = [(\text{PRF}-\text{Proteínas}-\text{Cenizas})/\text{PMI}] \times 100$$

Donde:

FDI = Fibra insoluble

FDS = Fibra soluble

PRF = Peso del residuo final seco

PMI = Peso de la muestra inicial

f Carbohidratos

El porcentaje de carbohidratos se calculó por la diferencia de 100%, menos la suma de los porcentajes de humedad, proteína cruda, grasa cruda, fibra total y cenizas.

4 Propiedades fisicoquímicas de harinas de maíz azul y frijol tépari crudas y extrudidas

a Actividad acuosa (aw)

Para su determinación se utilizó un equipo marca Aqualab mod CX2 (Decagon Devices Inc, Pullman, WA, EUA). Una muestra de aproximadamente 2 g se colocó en

la celda portamuestras del equipo hasta que alcanzó el equilibrio (40-60 min). El instrumento se calibró con agua destilada ($a_w=1.00$). Las mediciones se realizaron por triplicado a $25 \pm 1^\circ\text{C}$. (Milán-Carrillo y col, 2002).

b Diferencia total de color (ΔE)

Para evaluar la diferencia total de color, se utilizó la metodología reportada por Reyes-Moreno y col (2003). El color de las muestras se determinó utilizando un colorímetro Minolta Chroma-meter mod CR-210 (Minolta LTD, Japón). La determinación de color se basa en el efecto triestímulo, donde “L” mide la brillantez y varía de 100 a 0, donde 100 es un blanco perfecto y cero un color negro. Las dimensiones de cromaticidad son dadas por los parámetros “a” y “b”. El valor positivo de “a” está asociado al color rojo y el negativo al verde. El valor positivo de “b” está asociado al color amarillo y el negativo con el azul. Para la evaluación del color se utilizaron aproximadamente 100 g de muestra; la muestra se colocó en una tapa de caja Petri de 15 cm de diámetro y se midieron los parámetros correspondientes “L”, “a” y “b”. Se utilizó un mosaico blanco como referencia (estándar) de valores de “L”, “a” y “b” conocidos ($L=97.63$, $a=-0.78$ y $b=2.85$). La diferencia total de color (ΔE) de la muestra se calculó con la ecuación:

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}$$

Donde:

ΔE = Diferencia total de color entre el estándar y la muestra

ΔL , Δa y Δb = Diferencias absolutas de los valores de “L”, “a” y “b” del estándar utilizado y los valores correspondientes observados de la muestra.

5 Obtención de mezclas de harinas procesadas para la elaboración de tortillas a Mezcla 1 [90% Harina de maíz azul extrudido (HMAE) + 10% Harina de frijol tépari extrudido (HFTE)].

Para la obtención de la **Mezcla 1** las harinas (**HMAE, HFTE**) se mezclaron en una proporción 90:10; se pesaron 450 g de **HMAE** y 50 g de **HFTE**, se mezclaron y homogenizaron. La **Mezcla 1** se almacenó en bolsas herméticas hasta su utilización.

b Mezcla 2 [85% Harina de maíz azul extrudido (HMAE) + 15% Harina de frijol tépari extrudido (HFTE)]

Para la obtención de la **Mezcla 2** las harinas (**HMAE, HFTE**) se mezclaron en una proporción 85:15; se pesaron 425 g de **HMAE** y 75 g de **HFTE**, se mezclaron y homogenizaron. La **Mezcla 2** se almacenó en bolsas herméticas hasta su utilización.

c Mezcla 3 [80% Harina de maíz azul extrudido (HMAE) + 20% Harina de frijol tépari extrudido (HFTE)]

Para la obtención de la **Mezcla 3** las harinas (**HMAE, HFTE**) se mezclaron en una proporción 80:20; se pesaron 400 g de **HMAE** y 100 g de **HFTE**, se mezclaron y homogenizaron. La **Mezcla 3** se almacenó en bolsas herméticas hasta su utilización.

6 Elaboración de tortillas a base de mezclas de harina de maíz azul extrudido (HMAE) y harina de frijol tépari extrudido (HFTE).

Las tortillas se elaboraron a partir de las mezclas: **Mezcla 1** (90%**HMAE**+ 10%**HFTE**), **Mezcla 2** (85%**HMAE** + 15%**HFTE**) y **Mezcla 3** (80%**HMAE** + 20%**HFTE**) mezclando con suficiente agua hasta alcanzar una consistencia adecuada para la

producción de tortillas. La masa fresca (30 g) se moldeó en forma de disco plano utilizando una máquina manual. Los discos de masa se cocieron en un comal caliente de $290 \pm 10^{\circ}\text{C}$ por 27 s en un lado, seguido de 30 s en la otra cara, posteriormente se voltearon otra vez hasta su expansión (hinchamiento). Las tortillas de cada tratamiento se evaluaron después de 10 min a temperatura ambiente. Las tortillas frescas se secaron y molieron para obtener harina de tortillas la cual se almacenó a 4°C en bolsas de polietileno para su posterior análisis.

7 Propiedades tecnofuncionales y sensoriales de tortillas elaboradas a partir de mezclas de harina de maíz azul extrudida (HMAE) y harina de frijol tépari extrudido (HFTE)

a Grado de inflado de la tortilla (hinchamiento)

El hinchamiento de las tortillas se evaluó observando el porcentaje del total de superficie que se hinchó, utilizando valores de 1-3; donde **1** = poco o nulo hinchamiento (0 a 30 %), **2** = hinchamiento medio (30-70 %), y **3** = hinchamiento completo (70-100 %). Se utilizaron 25 réplicas para cada tratamiento.

b Capacidad de enrollamiento de la tortilla

Se determinó de acuerdo a Bedolla y Rooney (1984). Se evaluó su capacidad de enrollamiento a los 10 min después de que la tortilla se elaboró. La tortilla entera se enrolló alrededor de una varilla de vidrio cilíndrica de 2.54 cm de diámetro y el grado de rompimiento se determinó usando una escala subjetiva de 1 a 5, donde 1, 2, 3, 4 y 5 corresponden al grado de rompimiento a lo largo de la tortilla en un **1**= 0, **2**=25 %, **3**=50 %, **4**=75 %, y **5**=100 %.

3=26-50%, **4**=51-75% y **5**=76-100 %, respectivamente. Se utilizaron 25 pruebas para cada tratamiento.

c Evaluación sensorial

La evaluación sensorial de las tortillas se llevó a cabo con un panel de jueces no entrenados. Las muestras de (1/4) de tortilla se sirvieron en orden aleatorio en recipientes marcados (1, 2 y 3). Para la evaluación se seleccionó un panel de 30 jueces de ambos géneros semientrenados de los estudiantes, profesores y personal (10-35 años de edad) de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas (FCQB), Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), México. La evaluación y selección de los panelistas se basó en el interés de los participantes, agudeza para la detección de sabor y olor, y la capacidad de entender los procedimientos del ensayo, además de que declararon estar familiarizados con el consumo cotidiano de tortillas. Los evaluadores se ubicaron en compartimentos individuales con temperatura (25°C) y humedad relativa (60-80%) controladas. Las tortillas se evaluaron sensorialmente empleando una escala LAM (labeled affective magnitude) para los atributos sabor, color, textura y aceptabilidad global. Estos valores de aceptabilidad sensorial se transformaron a una escala de 0 a 100 (Cardello y Schutz, 2004).

8 Selección de la proporción adecuada de harina de frijol tépari extrudido (HFTE) a adicionar a la harina de maíz azul extrudido (HMAE) para la elaboración de tortillas

a Selección / Análisis estadístico

Para seleccionar la proporción adecuada de **HFTE** que podía ser añadida a la **HMAE** se compararon los resultados obtenidos en las pruebas tecnofuncionales y

sensoriales de tortillas con las diferentes proporciones, seleccionando aquella que obtuvo los mejores valores, en este caso el 20% de **HFTE**.

Los resultados se sometieron a un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA) seguido por la aplicación de la prueba de Tukey, con un nivel de significancia del 0.05, para comparación de medias. Para la realización de estos análisis se utilizó el paquete estadístico Minitab 18.

9 Obtención de tortillas elaboradas con la proporción adecuada de HMAE y HFTE

Una vez obtenida la proporción adecuada (80%**HMAE** + 20%**HFTE**) se llevó a cabo la elaboración de tortillas aplicando el procedimiento descrito en el apartado **B.6** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**. A dichas tortillas se les evaluó la composición química, propiedades fisicoquímicas, actividad antioxidante y contenido de fitoquímicos, digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV), propiedades tecnofuncionales y sensoriales, y propiedades nutracéuticas (potenciales hipoglucémico e hipertensivo).

10 Composición química de tortillas (80%HMAE** + 20%**HFTE**)**

La composición química de las tortillas se evaluó aplicando la metodología descrita en el apartado **B.3** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

11 Propiedades fisicoquímicas de tortillas (80%HMAE** + 20%**HFTE**)**

a Actividad acuosa (a_w)

La actividad acuosa se determinó aplicando la metodología descrita en el apartado **B.4.a** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

b Diferencia total de color (ΔE)

La diferencia total de color de las tortillas se evaluó aplicando la metodología descrita en el apartado **B.4.b** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**.

c pH

Se determinó de acuerdo a la AOAC (1999). 10 g de muestra se agregaron a 100 mL de agua destilada hervida y enfriada. La suspensión se agitó (240 rpm / 10 min) en agitador orbital, después de midió el pH de la suspensión (Potenciómetro EC40 pH/ISE Meter Mod 50 Printer). Las mediciones se realizaron por triplicado.

12 Evaluación de la actividad antioxidante (AAox), contenido de compuestos fenólicos totales (CFT), antocianinas totales (Ant) y digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV) de tortillas (80%HMAE + 20%HFTE)

a Obtención de extractos fitoquímicos libres y ligados

La extracción de fitoquímicos libres se realizó de acuerdo al método descrito por Dewanto y col (2002). Los fitoquímicos libres se extrajeron de 0.5 g de muestra con 10 mL de etanol al 80% (v/v), se agitaron en un rotator (25 rpm / 10 min) (OVAN noria R, EUA 2010). Después se centrifugó (5,000xg / 10°C/10 min). El sobrenadante se colocó en un tubo cónico y se concentró a 45°C a presión baja (Apud Vac Concentrator, Thermo Elector Corporation) hasta alcanzar un volumen final de 2 mL. El concentrado se almacenó a -20°C hasta su posterior utilización [determinación de actividad antioxidante (AAox) y compuestos fenólicos totales (CFT) correspondientes a fitoquímicos libres). El precipitado se guardó para la obtención de los extractos fitoquímicos ligados. La extracción de fitoquímicos ligados se realizó según el procedimiento descrito por Adom y Liu (2002), con ligeras modificaciones de Mora-

Rochín y col. (2010). Al precipitado se le realizó una extracción con hexano (10 mL) para remover lípidos, se agitó durante 30 seg en un vortex y se colocó durante 10 min en rotator, posteriormente se centrifugó (5,000xg / 10°C / 10 min) y por decantación se retiró el hexano. La muestra se digirió con 10 mL de NaOH 2 M, posteriormente la muestra se sometió a tratamiento térmico, en baño María (95°C/30 min), después se agitó durante 1 h a temperatura ambiente (25°C). La mezcla se neutralizó con 2 mL de HCl concentrado, se agitó por 30 segundos en un vortex y se procedió a realizar las extracciones de los fitoquímicos ligados, con acetato de etilo, las cuales se colectaron en tubos cónicos; las extracciones se realizaron cuatro veces. Las fracciones de acetato de etilo se concentraron a 45°C a presión baja (Apuc Vac Concentrator, Thermo Elector Corporation). Posteriormente se sometieron a sequedad a 45°C. Los compuestos extraídos se reconstituyeron con metanol y almacenaron a -20°C hasta su posterior utilización. Ver **Fig. 8**

b Determinación de la actividad antioxidante (AAox)

Las actividades antioxidantes hidrofílicas de fitoquímicos libres y ligados de las diferentes muestras se determinaron a través de los métodos de ABTS yDPPH

1) ABTS

Se determinó la actividad captadora de radicales libres mediante el ensayo de decoloración del catión radical ABTS propuesto por Re y col. (1999), el cual se basa en la reducción del radical ABTS** por los antioxidantes presentes en los extractos evaluados. Se preparó una solución de ABTS mezclada con persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) a una concentración de 2.45 mM en etanol, la solución restante se almacenó en oscuridad por 16 h para permitir el desarrollo del radical. Posteriormente, se realizó

una dilución de la solución en agua destilada (45 mL de agua destilada + 500 µL de la solución ABTS) hasta alcanzar una absorbancia de 0.716 a 735 nm. Se tomaron 20 µL del blanco y se mezclaron con 1980 µL de la solución de ABTS**, se homogenizaron suavemente y se leyó su absorbancia en un espectro (UV-VIS Genesys 10 UV Thermo Electron Corporation, Madison, WI, EUA). Una vez que el radical quedó ajustado a .716 se colocaron 20 µL de cada muestra por cuadruplicado y se le añadieron 1980 µL del radical, teniendo un tiempo de 30 s entre una muestra y otra. La lectura de las muestras se inició a los 6 min de haber colocado el radical en la primera muestra. La actividad antioxidante de las muestras se expresó en µmol equivalente de Trolox (ET)/100g de muestra, base seca (bs).

2) DPPH

La actividad antiradical DPPH de las muestras se determinó utilizando la metodología descrita por Brand-Williams y col (1995) con algunas modificaciones. Se preparó una solución concentrada de DPPH (20 mM) para lo cual se pesaron 0.789 g de radical DPPH en un matraz aforado de 100 mL, posteriormente se aforó con metanol puro y se dejó reposar 2 h antes de iniciar las mediciones. Posteriormente se preparó un blanco con 200 µL de metanol puro + 800 µL de PBS y se procedió a medir la absorbancia del blanco en un espectro (UV-VIS Genesys 10 UV Thermo Electron Corporation, Madison, WI, EUA). Para la medición del radical se colocaron 500 µL de la solución **DPPH** concentrada y se llevó a 50 mL con metanol puro y se procedió a ajustar la absorbancia del radical a 1. Posteriormente se colocaron 200 µL de cada punto de la curva y muestra + 800 µL de PBS + 1000 µL de radical **DPPH** ajustado a

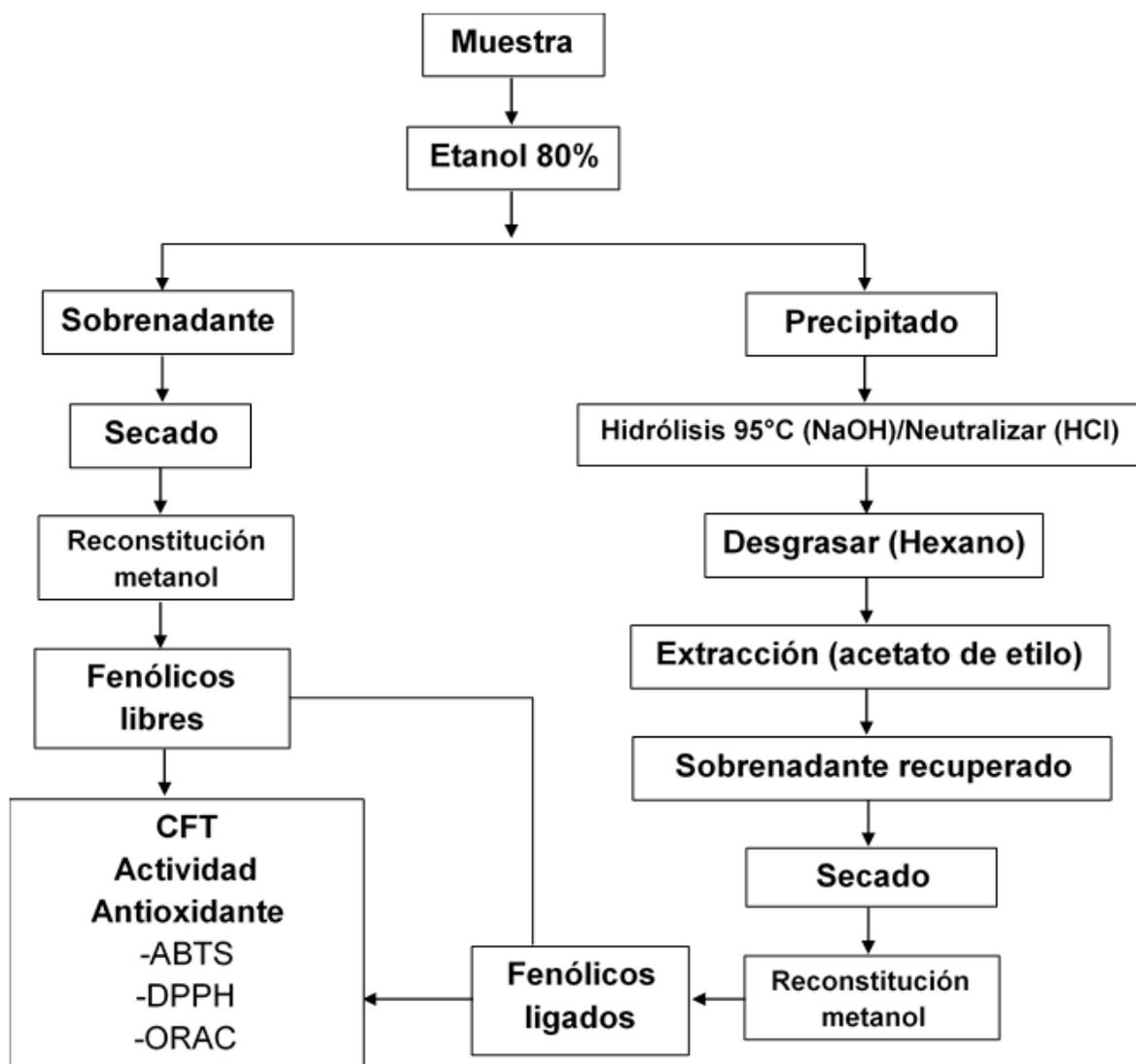


Fig 8. Diagrama de flujo para la obtención de fitoquímicos libres y ligados para la determinación de capacidad antioxidante y compuestos fenólicos totales

Adaptado de: Adom y Liu (2002), Mora-Rochín y col (2010)

(por triplicado). Se incubó a temperatura ambiente durante 30 min en la oscuridad y se midió la absorbancia a 517 nm. Los resultados se expresaron como μmol equivalente de Trolox / g muestra, bs.

c Compuestos fenólicos totales (CFT)

Para determinar la concentración de compuestos fenólicos totales (libres + ligados) se empleó el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu, descrito por Singleton y col. (1999). En viales de 2 mL, se agregaron 20 μL de una solución estándar de ácido Gálico para construir una curva de calibración y 20 μL de muestra (por cuadruplicado), y se utilizó agua destilada y posteriormente se les agregó 100 μL de Folin-Ciocalteu, se anexaron 300 μL de NaCO_3 al 7% y se dejó reposar durante 8 min. Una vez transcurridos los 8 min, se agregaron 380 μL de agua destilada hasta completar 2 mL. Obtenidos los 2 mL se dejó reposar 90 min en oscuridad. Transcurridos los 90 min se procedió a realizar la lectura en un espectrofotómetro, (UV-Vis Genesys 10 UV Thermo Electron Corporation, Madison, WI, EUA) a 765 nm. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido Gálico (GAE, por sus siglas en inglés) / 100 g de muestra, bs. El contenido de los compuestos fenólicos totales se calculó al sumar los compuestos fenólicos presentes en los extractos de fitoquímicos libres y ligados.

d Contenido de antocianinas totales (Ant)

El contenido de antocianinas se determinó de acuerdo a Abdel-Aal y Hucl (1999). Se pesó 0.5 g de muestra el cual se homogenizó en 10 mL de una solución de metanol acidificado (95 % metanol y 1 N de HCl 85:15, v/v) en un tubo de centrífuga de 10 mL. Se agitó por 30 min y posteriormente se centrifugó (30,000xg/ 4 °C/10 min) (Sorvall

RCSC, Sorvall Instruments, Dupont, Wilmington, DE, EUA); se recolectó el sobrenadante. La absorbancia de los extractos se leyó a 353 nm y 700 nm en un lector de microplacas (Synergy™ HY Multi-detection, DioTek, Inc., Winooski, VT, EUA). El contenido de antocianinas se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Ant} = [(A_{535\text{nm}} - A_{700\text{nm}}) / (\epsilon)] \times [(\text{vol total del extracto}) \times (\text{PM})] \times [1 / (\text{Peso de la muestra})]$$

Donde:

Ant = Concentración total de antocianinas (mg de Cianidina 3 – Glucósido / g muestra)

A= Absorbancia

ε= Absorción molar de Cianidina 3-Glucósido = 25,965/cm/M

PM= Peso molecular de Cianidina 3-Glucósido (449.2 g)

13 Propiedades nutricionales de tortillas (80%HMAE + 20%HFTE)

a Aminoácidos esenciales

Se utilizó la metodología descrita por López-Cervantes y col (2006). Para determinar el contenido de aminoácidos esenciales en las muestras estudiadas. 50 mg de muestra se sometieron a hidrólisis ácida con 10 ml de HCl 6 M, e incubaron por 24 h a 100°C. La muestra hidrolizada, se filtró y el filtrado se diluyó 200 veces con agua MilliQ. Se tomó una alícuota de 300 µL, la cual se secó y sometió a derivatización con 300 µL de 9-fluorenilmetil-cloroformato (FMOC). Se tomó una alícuota de 20 µL para su análisis, utilizando una columna de escala analítica (4.6 mm x 250 mm) SGE Hypersil ODS C18 (SGE, Dandenong, Australia) mantenida a 38°C y conectada a un sistema HPLC (GBC, Dandenong, Australia) equipado con un detector de fluorescencia LC 5100. Se utilizaron las siguientes fases móviles: A: 30 Mm de fosfato

de amonio (pH = 6.5) en 15:85 (v/v) de metanol/agua. Velocidad de flujo constante de 1.2 mL / min. La detección se lleva a cabo por fluorescencia usando longitudes de onda de excitación y emisión a 270 y 316 nm, respectivamente. Se construye una curva de calibración usando una mezcla estándar de aminoácidos. Los niveles de triptófano se determinaron aplicando hidrólisis alcalina. Se mezclan 25 mg de muestra con 3 mL de 4.2 M NaOH y se incuba en tubos sellados (en atmósfera de N₂) a 120°C por 4 h. Después del hidrólisis, la muestra se ajusta a pH 9, y es lavada con solución reguladora de boratos (pH=9), filtrado a vacío y después se diluye a 50 mL con solución reguladora de boratos. Después de la centrifugación, el sobrenadante se filtra (0.45 µm) y se toma una alícuota de 20 µL para su análisis como se describió anteriormente.

b Digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV)

Se determinó de acuerdo al procedimiento reportado por Rathod y Annapure (2016) con modificaciones menores. Se pesó un gramo de muestra, se incubó (15 mg de pepsina en 20 mL de HCl 0.1 N neutralizada con 10 mL NaOH 0.2 N) a 37°C/3 h. Se agregaron 7.5 mL de solución reguladora de fosfatos (pH=8) que contenían 40 mg de pancreatina, se incubó a 37°C/24 h, luego se agregaron 700 µL de ácido TCA (tricloroacético) y se centrifugó a 5,000xg/10 min. Se descartó el sobrenadante, el precipitado se secó (40-50°C) y posteriormente se utilizó en la digestión de proteínas en sistema Microkjehldal. La digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV) (%) se calculó como:

$$\text{DPIV (\%)} = \left[\frac{\text{Proteína total} - \text{Residuo de proteína}}{\text{Proteína total}} \right] \times 100$$

c Relacion de eficiencia proteínica calculada (C-PER)

Se utilizará la metodología reportada por Satterlee y col. (1979) y adoptada por la AOAC (1999). Este cálculo está basado en el valor de DPIV y el perfil de aminoácidos esenciales (AAE) de las muestras diferentes de harinas y tortillas elaboradas a partir de éstas. Se emplea caseína como proteína de referencia. El C-PER se determina utilizando la siguiente ecuación de regresión:

$$\text{C-PER} = -2.1074 + 2.8525 (Z) - 0.4030 (Z^2)$$

En donde Z se calcula a partir del perfil de aminoácidos y la digestibilidad in vitro de las muestras, y de la proteína de referencia, así como en relación a los valores estándares de la FAO/WHO (1991) para aminoácidos esenciales.

14 Propiedades nutraceuticas de tortillas (80%HMAE + 20%HFTE)

a Potencial antiperlucemiante

1) Inhibición de α -amilasa (IAA)

La actividad α -amilasas se determinó usando colorimetría del ácido 3,5-dinitrosalicílico (McCue y col, 2005). Se preparó una solución de α -amilasas a una concentración de 2U/mL en solución reguladora de fosfatos de potasio pH 6.9 al 0.2 mM con 6.7 mM de Na Cl. 300 μ L de muestra se mezcló con 300 μ L de enzima y se incubó a 37°C por 10 min, luego se le agregó 500 μ L de solución de almidón al 1% en buffer de fosfatos de potasio pH 6.9 al 0.2 mM con 6.7 mM de NaCl. Luego de 5 min de incubación a 37°C se detuvo la reacción con 1 mL de ácido dinitrosalicílico en baño de agua hirviendo por 10 min, se enfrió y diluyó a 10 mL con agua. Se le midió absorción a 540 nm. Los datos se reportaron como índice de inhibición de α -amilasa (**IIAA**), que se definen como la relación de la actividad de la α -amilasa del control

(enzima solo) / actividad de la enzima en el extracto de la harina de maíz azul y frijol tépari extrudido. Los valores superiores a 1 indican una inhibición de la α -amilasa. Se utilizó una curva de acarbosa como control y se reportaron los resultados como μg equivalentes de acarbosa (EA) por 100 gramos de muestra.

2) Inhibición de α -glucosidasa (IAG)

La inhibición α -glucosidasa se determinó según la metodología de López-Angulo y col. 2014) con ligeras modificaciones. En una microplaca de 96 pocillos, se le agregaron alícuotas de las muestras ($50\mu\text{L}$) y se mezclaron con $100\mu\text{L}$ de la α -glucosidasa (0.5 U/mL) en buffer de fosfato (0.1 M , $\text{pH } 6.9$); la microplaca se incubó durante 10 min a 37°C y se añade $50\ \mu\text{L}$ de p-nitrofenilo-glucopiranosido en buffer de fosfato (5 mM) a cada pocillo. Nuevamente, la microplaca se incubó ($37^\circ\text{C} / 10\text{ min}$) y se midió la absorbancia a 405 nm utilizando un Lector de Microplacas (Synergy™, BioTek, Inc., Winooski, VT, EUA). Los datos se reportaron como índice de inhibición de α -glucosidasa del control (enzima solo) / actividad de la enzima en el extracto. Los valores superiores a 1 indican una inhibición de la α -glucosidasa. Se utilizó una curva de acarbosa como control y se reportaron resultados como μg equivalentes de acarbosa (EA) por 100 gramos de muestra.

d Potencial antihipertensivo (IC_{50})

La inhibición de la enzima Convertidora de Angiotensina (ECA), considerada para evaluar el potencial antihipertensivo, se determinó mediante el kit ACE Kit-WST (A50210), que se basa en la detección colorimétrica de ácido 3-hidroxibutílico (3HB) generado a partir del 3-hidroxibutilil-Gly-Gly-Gly (3HB-GGG). En la solución de

reacción enzimática (SER) la ECA hidroliza Gly-Gly, generando 3-hidroxi-butiril-Gly; posteriormente, por acción de una aminoacilasa, se obtiene ácido 3-hidroxi-butírico, el cual se hace reaccionar con una solución indicadora. En una microplaca se agregaron 20 µL de los extractos a evaluar, posteriormente se agregó el sustrato 3 HB-GGG y la ECA, además de un blanco 1 (sin muestra) y un blanco 2 (sin muestra ni solución enzimática).

La reacción se llevó a cabo a 37°C durante 1 h en una incubadora y posteriormente se agregaron 20 µL de la solución indicadora. Se incubó por 10 min a temperatura ambiente y enseguida se midió la absorbancia a una longitud de onda de 420 nm en un lector de microplacas. Para determinar el porcentaje de inhibición se preparó una curva de inhibición utilizando la concentración de la muestra para el eje X y el porcentaje de inhibición de ECA para el eje Y, calculada mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Inhibición} = (\text{Abs}_{\text{blanco1}} - \text{Abs}_{\text{muestra}}) / (\text{Abs}_{\text{blanco1}} - \text{Abs}_{\text{blanco2}})$$

Dónde: $\text{Abs}_{\text{simple}} = \text{Abs SER} + \text{Indicador}$ conteniendo el inhibidor-ECA; $\text{Abs}_{\text{control}} = \text{Abs SER} + \text{Indicador}$ sin contener el inhibidor-ECA

Se trazaron diferentes concentraciones de extractos fenólicos frente a los valores correspondientes de actividad inhibidora de la ECA (%), y las curvas dosis-respuesta se obtuvieron mediante regresión sigmoidea no lineal con Prism v5 (GraphPad Prism). El valor de **IC₅₀** se calculó como la concentración de extractos fenólicos que causaron el 50% de la inhibición de la actividad de la ECA.

14 Propiedades tecnofuncionales y sensoriales

a Grado de inflado de la tortilla

El grado de inflado de las tortillas se evaluó aplicando la metodología descrita en el apartado **B.7.a** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**

b Capacidad de enrollamiento de la tortilla

El grado de inflado de las tortillas se evaluó aplicando la metodología descrita en el apartado **B.7.b** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**

c Evaluación sensorial

La evaluación sensorial de las tortillas se evaluó aplicando la metodología descrita en el apartado **B.7.c** del capítulo **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**

15 Análisis estadístico

Los resultados se sometieron a un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA) seguido por la aplicación de la prueba de Tukey, con un nivel de significancia del 0.05, para comparación de medias. Para la realización de estos análisis se utilizó el paquete estadístico Minitab 18

VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS GRANOS DE MAÍZ AZUL Y FRIJOL TÉPARI

En el **Cuadro 8** se muestran las características físicas de los granos de maíz azul y frijol tépari. Las dimensiones físicas de los granos enteros son importantes indicadores de la calidad comercial, del manejo y almacenamiento de los mismos. El tamaño de los granos de maíz azul fue de 12.27 ± 1.5 mm de largo, 7.63 ± 0.77 mm de ancho y 4.97 ± 0.76 mm de espesor. El peso de 1000 granos y el peso hectolitrico fue de 380.48 g y 70.62 kg/hL respectivamente. El peso de 1000 granos indica el tamaño del grano de dicha variedad mientras que el peso hectolitrico es una medida indirecta de la densidad del grano. Las características físicas de los granos de maíz azul son similares a las reportadas por Gaxiola-Cuevas (2010). La calidad del grano de maíz está asociada tanto con su constitución física, que determina la textura y dureza, como con su composición química, que define el valor nutricional y las propiedades tecnológicas. La importancia relativa de estas características resultará del destino de la producción. Los mercados son cada vez más exigentes y se interesan por granos sanos, limpios, uniformes de tamaño, textura y color.

El tamaño de los granos de frijol tépari fue de 7.80 ± 0.55 mm de largo, 5.69 ± 0.64 mm de ancho y 4.73 ± 0.33 de espesor. Mientras que el peso de 1000 granos y el peso hectolitrico fue de 133.34 g y 72.1 kg/hL respectivamente. Estos valores caen dentro de los rangos reportados por Idouriane y col (1999) y Salas-López (2010). Los granos utilizados para llevar a cabo la presente investigación, acorde a sus características físicas, pueden ser catalogados como de buena calidad.

Cuadro 8. Características físicas¹ de granos de maíz azul y frijol tépari

Propiedad	Maíz azul	Frijol tépari
Características físicas		
Dimensiones físicas (mm)		
Largo	12.27 ± 1.5	7.80 ± 0.55
Ancho	7.63 ± 0.77	5.69 ± 0.64
Espesor	4.97 ± 0.76	4.73 ± 0.33
Peso de 1000 granos (g)	380.48 ± 8.32	133.34 ± 2.52
Peso hectolitrico (kg/hL)	70.62 ± 0.3	72.1 ± 0.68

¹Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar.

B COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS HARINAS DE MAÍZ AZUL Y FRIJOL TÉPARI CRUDOS Y EXTRUDIDOS

El **Cuadro 9** muestra la composición química de las harinas de maíz azul y frijol tépari: Harina de maíz azul crudo (sin procesar) (**HMAC**), harina de maíz azul extrudido (**HMAE**) [obtenida al aplicar condiciones optimizadas del proceso de extrusión (TE=85°C/VT=240 rpm) (Mora-Rochin y col, (2010)], harina de frijol tépari crudo (**HFTC**) y harina de frijol tépari extrudido (**HFTE**) [obtenida al aplicar condiciones optimizadas del proceso de extrusión (TE=137°C/VT=220 rpm) (Gastelúm-Ávila (2019)]. Los contenidos de proteína cruda de las harinas **HMAC** y **HMAE** fue de 11.67% y 11.53%, mientras que las harinas **HFTC** y **HFTE** presentaron niveles de 25.45% y 25.85% respectivamente. En ambos casos no se observaron diferencias ($p \geq 0.05$) después de aplicar el proceso de extrusión.

Llopas (2011) evaluó el contenido de proteína en harina cruda y extrudida de sorgo integral obteniendo valores de 11.01% y 10,67% respectivamente, reportando que no se encontró diferencia significativa después del proceso de extrusión. Otros investigadores (Reyes-Moreno y col. 2013; Montoya-Rodríguez y col, 2014a) reportaron que al someter al proceso de extrusión granos como amaranto y maíz de calidad proteínica no observaron diferencias ($p \geq 0.05$) en el contenido de proteína entre los granos crudos y extrudidos.

El contenido de lípidos de las harinas de maíz **HMAC** y **HMAE** fue de 5.31% y 3.17% respectivamente, por otro lado, las harinas de frijol **HFTC** y **HFTE** presentaron niveles de lípidos de 1.10% y 0.76% (**Cuadro 8**). En ambos granos el proceso de extrusión propició una disminución ($p \leq 0.05$) de 40% en **HMAE** y del 31% en **HFTE** en el contenido de lípidos.

Cuadro 9. Composición química y propiedades fisicoquímicas de harinas de maíz azul y frijol tépari crudos y extrudidos

Propiedad ¹	HMAC ²	HMAE ³	HFTC ⁴	HFTE ⁵
Composición química (% , bs)				
Proteínas	11.67±0.20 ^b	11.53±0.25 ^b	25.45±0.28 ^a	25.85±0.33 ^a
Lípidos	5.31±0.28 ^a	3.17±0.13 ^b	1.10±0.05 ^c	0.76±0.02 ^d
Minerales	1.07±0.04 ^d	1.45±0.02 ^c	3.77±0.05 ^b	4.51±0.06 ^a
Fibra dietaria				
Soluble	0.96±0.05 ^b	0.73±0.06 ^c	0.57±0.05 ^d	1.43±0.07 ^a
Insoluble	11.38±0.38 ^a	10.56±0.37 ^b	9.23±0.06 ^c	8.59±0.07 ^d
Total	12.34±0.38 ^a	11.29±0.37 ^b	9.80±0.25 ^c	10.02±0.23 ^c
Carbohidratos	69.61±0.17 ^b	72.56±0.18 ^a	60.88±0.28 ^c	58.86±0.31 ^d
Propiedades fisicoquímicas				
Color				
Valor Hunter (L)	67.64±2.33 ^b	51.62±1.55 ^c	82.62±1.53 ^a	67.90±1.16 ^b
Diferencia total de color (ΔE)	29.05±2.31 ^b	45.25±1.55 ^a	17.45±1.47 ^c	29.56±1.18 ^b
Actividad acuosa	0.49	0.41	0.44	0.45

¹Los resultados se expresan como promedio \pm desviación estándar. ^{a-c}Medias con diferentes letras minúsculas en superíndice en la misma fila son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$)

² **HMAC**= Harina de maíz azul crudo

³ **HMAE**= Harina de maíz azul extrudido

⁴ **HFTC**= Harina de frijol tépari crudo

⁵ **HFTE**= Harina de frijol tépari extrudido

Durante el proceso de extrusión, ocurre formación de complejos entre lípidos y amilosa del almidón; la parte hidrofóbica de la molécula de amilosa puede atrapar la cadena de un hidrocarburo de una molécula de lípido, y formar el complejo lípido-amilosa (Tran y col. 2008). También es posible que ocurra una saponificación de lípidos que se encuentran presentes en el germen del grano, el cual se conserva en la harina extrudida, al entrar en contacto el hidróxido de calcio adicionado en el proceso de extrusión, se puede llevar a cabo esta reacción (Alam y col. 2016).

Estos resultados coinciden con los reportados por Milán-Carrillo y col. (2012) quienes observaron un mayor contenido de lípidos en harina de amaranto sin procesar que en harina de amaranto extrudida optimizada, atribuyendo la disminución a la formación de complejos lípidos-almidón durante el proceso de extrusión.

Marzo y col. (2002) extrudieron frijol (TE=150°C, VT=100 rpm) encontrando una reducción en el contenido de lípidos, explicando que esto puede ser producto de la volatilización de estos compuestos durante el proceso de extrusión, como resultado de la temperatura alta dentro del canal del tornillo.

El contenido de minerales para la harina **HMAC y HMAE** fue de 1.07% y 1.45%, mientras que en las harinas **HFTC y HFTE** se obtuvieron valores de 3.77% y 4.51%, de acuerdo con los resultados obtenidos se observó una mayor ($p \leq 0.05$) concentración de minerales en las harinas extrudidas en ambos granos (**Cuadro 8**). Esto podría deberse a que, durante el proceso de cocción alcalina por extrusión, se adiciona cal, por lo que el incremento en cenizas podría estar causado principalmente a la presencia de calcio, mineral encontrando en la cal, de igual manera el tratamiento térmico mejora la absorción del contenido de minerales al reducir otros factores que inhiben su disponibilidad. Espinoza-Moreno y col. (2016) y Milán-Carrillo y col. (2012) observaron

un incremento en cenizas en la harina extrudida a base de maíz transgénico con frijol común negro y harina de amaranto respectivamente.

Por su parte el proceso de extrusión ocasionó ligeros cambios en los valores de fibra total (**FDT**). Las harinas de maíz azul **HMAC** y **HMAE** tuvieron contenidos de fibra dietaria total de 12.33% y 11.29% respectivamente. Los niveles de fibra dietaria total en harinas de frijol **HFTC** y **HFTE** fue de 9.80% y 10.02% aumentando ($p \leq 0.05$) un 2.24% (**Cuadro 8**). El aumento puede deberse a la liberación de oligosacáridos debido a la rotura de enlaces glucosídicos de los polisacáridos por el estrés mecánico, así como, a la formación de materiales resistentes a las degradaciones enzimáticas, como el almidón y los complejos de proteína-polisacáridos originados por el calentamiento. Así como, a los ciclos de enfriamiento y reacción de Maillard (Espinoza-Moreno y col, 2016). El Codex Alimentarius (2009b) define a la fibra dietética como "polímeros de carbohidratos comestibles con diez o más unidades monoméricas que no son hidrolizadas por las enzimas endógenas en el intestino delgado de los humanos". Esta está asociada con la prevención de diferentes enfermedades y es fundamental para el mantenimiento de la salud intestinal. (Liu, 2007).

El **Cuadro 9** muestra las propiedades fisicoquímicas de las harinas de maíz azul y frijol tépari: **HMAC**= harina de maíz azul crudo, **HMAE**= harina de maíz azul extrudido, **HFTC**= harina de frijol tépari crudo y **HFTE**= harina de frijol tépari extrudido.

Los valores Hunter "L" para las harinas de maíz azul **HMAC** y **HMAE** fueron de 67.64 y 51.62 respectivamente; mientras que los valores de ΔE fueron de 29.05 y 45.25 respectivamente (**Cuadro 9**). Para las harinas de frijol tépari **HFTC** y **HFTE** se obtuvieron valores de Hunter "L" de 82.62 y 67.90 y valores de ΔE de 17.45 y 29.56 respectivamente (**Cuadro 9**). El proceso de extrusión causó en ambos granos una

disminución en el valor “L” y un incremento en ΔE . Estos valores concuerdan con los reportado por Gastélum-Ávila (2019) en donde el proceso de extrusión de harina de frijol tépari provocó una disminución significativa ($p \leq 0.05$) en el valor “L” (84.43-68.06) y un aumento en ΔE (14.61-30.83). Valores más altos de ΔE y menores de L significa harinas más oscuras. El valor ΔE representa la diferencia total de color en referencia a un estándar de color blanco, valores mayores de ΔE significan materiales más oscuros. Los cambios de color durante el proceso de extrusión podrían deberse principalmente a las reacciones provocadas por las altas temperaturas. El aumento en el pardeamiento durante la extrusión, expresado por el aumento en el valor del parámetro a^* de color, podría estar asociado con la formación de polímeros marrones llamados melanoidinas durante las reacciones de Maillard, Lo que podría ser indicativo de la magnitud de esta reacción.

Rodríguez-Miranda y col (2014) reportaron que los cambios de color en el proceso de extrusión, se deben principalmente a las reacciones de Maillard donde el azúcar reacciona con las proteínas, lo que hace que los extrudidos se vuelvan de color marrón oscuro, reduciendo los valores L^* .

Los valores de actividad de agua (0.49, 0.41, 0.44 y 0.45) para harinas de maíz azul (**HMAC, HMAE**) y harinas de frijol tépari (**HFTC, HFTE**), se encuentran en un rango en donde el crecimiento de microorganismos, así como las reacciones químicas y enzimáticas ocurren lentamente, lo que se traduce en una larga vida de anaquel.

C DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE HFTE MÁXIMA POSIBLE QUE PUEDE SER AÑADIDA A LA HMAE PARA OBTENER TORTILLAS CON PROPIEDADES TECNO-FUNCIONALES (HINCHABILIDAD Y ROLABILIDAD) Y SENSORIALES ADECUADAS.

Una vez obtenidas las harinas de maíz azul y frijol tépari (**HMAE, HFTE**) por el proceso de extrusión, se obtuvieron tortillas a partir de tres diferentes mezclas de dichas harinas (**Mezcla 1= 90% HMAE + 10% HFTE; Mezcla 2 = 85% HMAE + 15% HFTE y Mezcla 3 = 80% HMAE + 20% HFTE**) las cuales se evaluaron en sus propiedades tecno-funcionales (hinchabilidad y rolabilidad) y sensoriales para así poder seleccionar la mezcla con las propiedades adecuadas.

1 Hinchabilidad

En la **Fig 9** se muestran los resultados de hinchabilidad de las tortillas elaboradas con las diferentes mezclas, así como los resultados de las tortillas utilizadas como control (tortilla de **MASECA™ azul** y tortilla de **HMAE**). Los valores de hinchabilidad de las tortillas variaron de 2.04 a 3. La tortilla que obtuvo una mayor hinchabilidad fue aquella que contenía el 20% de **HFTE** (3.0) a diferencia de la tortilla con el 10% de **HFTE**, la cual obtuvo el menor valor (2.04). Se puede observar que al aumentar la cantidad de **HFTE** en las tortillas de maíz azul la hinchabilidad mejoró significativamente. La hinchabilidad es una prueba subjetiva que consiste en un examen visual del grado de hinchamiento de la tortilla a lo largo de su cocción, esta característica es muy importante en tortillas ya que nos indica si la masa, a partir de la cual se obtuvo la tortilla, tuvo un adecuado grado de cocción o una proporción

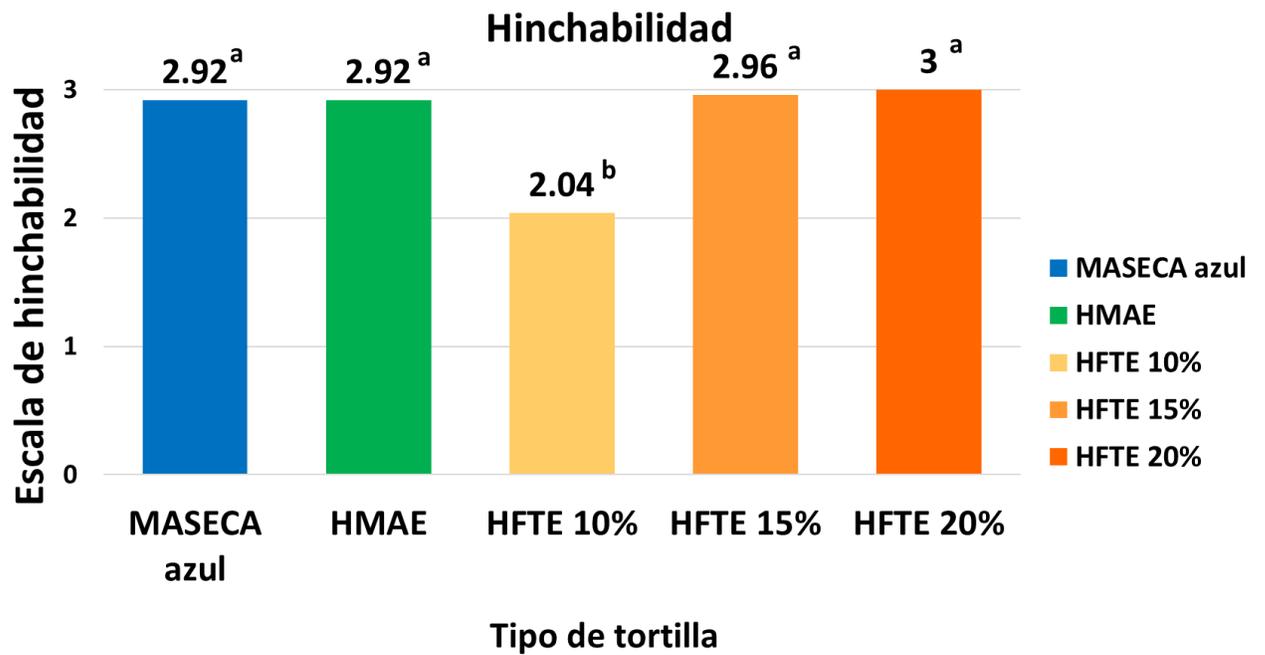


Fig 9. Hinchabilidad de tortillas elaboradas a partir de diferentes mezclas de **HMAE** + **HFTE** (90:10, 85:15 y 80:20)

adecuada de tiempo de exposición al calor en ambos lados de la tortilla, durante el proceso de cocción.

2 Rolabilidad

La **Fig 10** muestra los resultados de rolabilidad de las tortillas adicionadas con **HFTE** y las tortillas control (**MASECA^{MR} azul** y **HMAE**). La rolabilidad es un parámetro de calidad importante en las tortillas este determina la capacidad de enrollamiento de la tortilla según su ruptura. La rolabilidad de las tortillas fue similar cuando se emplearon las diferentes proporciones de **HFTE**, obteniendo valores de 1.88 a 2.33. Al contrastar estas tortillas con las tortillas control elaborada a partir de **MASECA^{MR} azul** y de solo **HMAE**, las tortillas elaboradas con 20% de **HFTE** presentó rolabilidad similar (2.25). Treviño-Mejía y col. (2016) elaboraron tortillas a base de maíz y frijol común utilizando una proporción 80-20% encontrando que al aumentar el contenido de harina de frijol común las tortillas se hacían más quebradizas lo cual afectaba la rolabilidad de las mismas, esto debido al incremento en el contenido de fibra. No se observaron diferencias significativas en la rolabilidad.

Wu y Arntfield (2016) evaluaron propiedades físicas y sensoriales de tortillas adicionadas con harina de soya encontrando que las tortillas control de maíz, así como las tortillas hechas con 25% y 35% de soya mostraron la mejor capacidad de rollar, seguidas de las tortillas hechas con 10%, 20%, 30%, y 40% soya, concluyendo que la flexibilidad de las tortillas dependía principalmente de la gelatinización del almidón libre. Por lo tanto, se esperaría que las tortillas control de maíz tuvieran la mejor capacidad de rotación, debido al mayor contenido de humedad, así como a un mayor contenido de almidón.

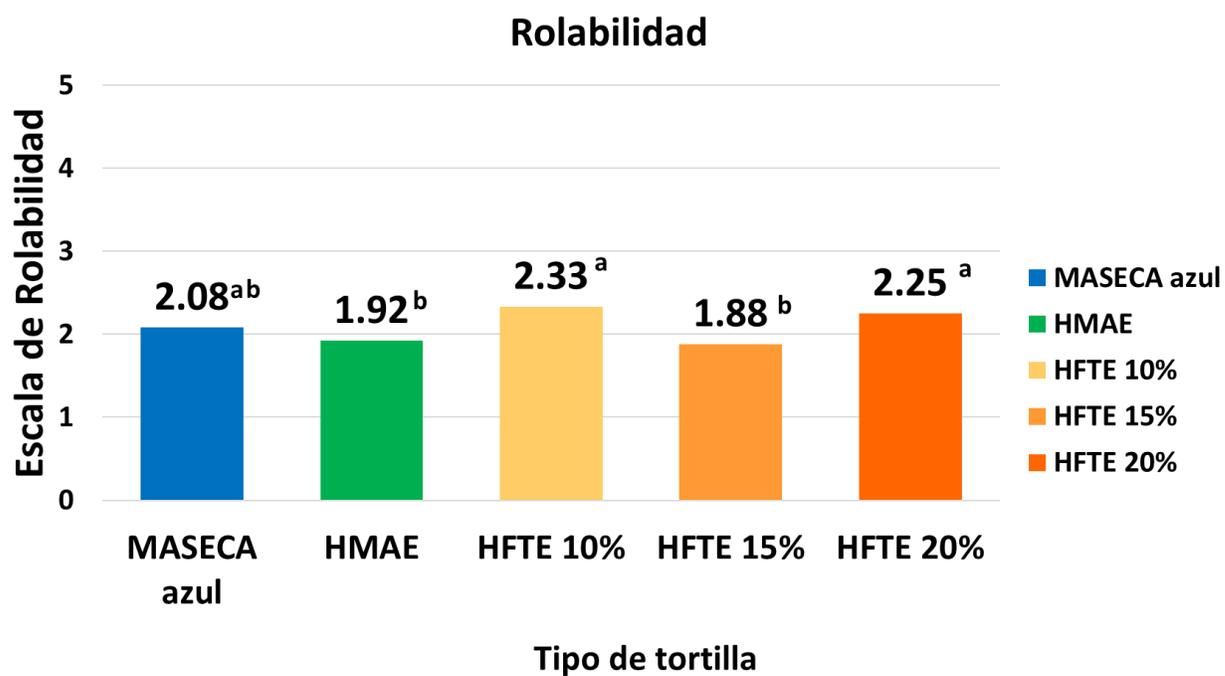


Fig 10. Rolabilidad de tortillas elaboradas a partir de diferentes mezclas de **HMAE + HFTE** (90:10, 85:15 y 80:20)

3 Evaluación Sensorial

En la **Fig 11** se muestran los resultados obtenidos en la evaluación sensorial de las tortillas adicionadas con **HFTE** y las tortillas control. Los valores del atributo de color variaron de 61.42 a 70.15. Se encontró que los panelistas dijeron que las tortillas elaboradas con 20% de **HFTE** presentaron el mejor color (65.70). Las tortillas adicionadas con **HFTE** se ubican entre “me gusta ligeramente” y “me gusta moderadamente” mientras que las tortillas control se ubican entre “me gusta ligeramente” y “me gusta mucho”.

Treviño-Mejía y col. (2016) evaluaron sensorialmente una tortilla a base de maíz y frijol, en donde participaron 120 panelistas entre 18 y 35 años de edad, los cuales eran consumidores habituales de tortillas. Los criterios a evaluar fueron sabor, olor, color, textura y aceptación global utilizando una escala hedónica de 7 categorías. La evaluación de color mostro que la mayor proporción corresponde a la opción 4: no me gusta ni disgusta.

De acuerdo a los comentarios de los consumidores las tortillas eran preferidas en color blanco, por lo tanto, un color café en las tortillas con frijol no era totalmente aceptado. En cuanto al atributo de sabor se obtuvieron valores de 62.25 a 75.20, encontrando que las tortillas producidas con 10% de **HFTE** mostraron el mejor sabor (72.23). Las tortillas adicionadas con **HFTE** se ubicaron en la escala LAM en “me gusta ligeramente” y “me gusta mucho” mientras que las tortillas control se ubicaron entre “me gusta moderadamente” y “me gusta mucho”. Collin y Sánchez (1980) fortificaron tortillas de maíz con harina de soya integral; reportaron baja aceptación general, y menores puntuaciones de sabor para las tortillas hechas con 20 y 30% de soya integral adicionada.

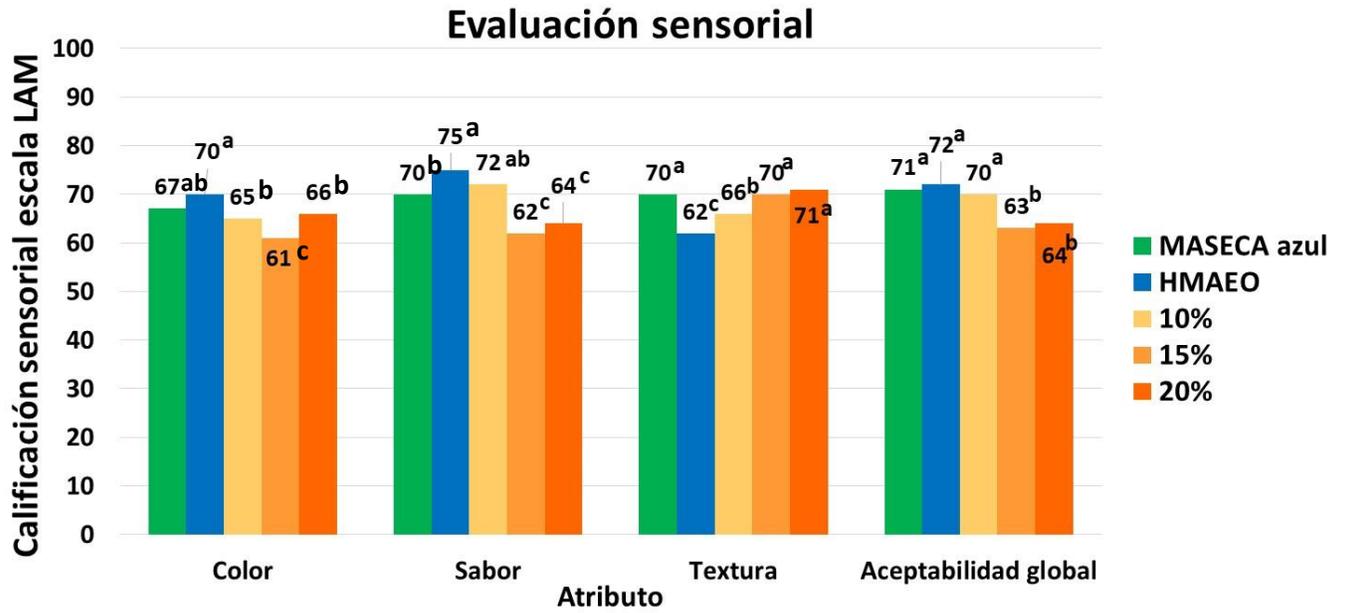


Fig 11. Aceptabilidad global de tortillas elaboradas a partir de diferentes mezclas de HMAE + HFTE (90:10, 85:15 y 80:20)

Por otro lado la textura de las tortillas adicionadas con **HFTE** obtuvieron valores de 62.3 a 70.68. Las tortillas elaboradas con el 20% de **HFTE** presentaron la mejor textura. Al contrastar los resultados de la evaluación sensorial de las tortillas adicionadas con **HFTE** con las tortillas producidas con las harinas control se observó que la adición de **HFTE** a las tortillas mejoró significativamente su textura, tortillas adicionadas con **HFTE** se ubicaron entre “me gusta ligeramente” y “me gusta mucho” mientras que las tortillas control se ubicaron en “me gusta ligeramente” y “me gusta moderadamente”. Anton y col. (2009) también encontraron que las tortillas de trigo fortificadas con frijol las harinas tuvieron una mejor aceptación general, sabor y textura. Los valores de aceptabilidad global de las tortillas variaron de 62.67 a 72.5. Los resultados indicaron que las tortillas elaboradas con 10% de **HFTE** presentaron la mejor aceptación global con un valor de 70.49, mientras que la tortilla elaborada con el 15% fue la que obtuvo el menor valor (62.67).

En general las tortillas adicionadas con **HFTE** se encontraron en valores de “me gusta ligeramente” y “me gusta mucho” mientras que las tortillas control se encontraron entre “me gusta moderadamente” y “me gusta mucho”.

En un estudio realizado por Rendón-Villalobos y col. (2012) evaluaron sensorialmente tortillas de maíz adicionadas con harina de chía (5,10, 15 y 20%) utilizando un panel de 17 jueces y una escala hedónica de 3 puntos. Encontrando que no hubo diferencia significativa entre las tortillas conforme el nivel de harina de chía aumentaba, sin embargo, la tortilla adicionada al 5% obtuvo los valores más altos para todos los atributos evaluados (2.71) (color, sabor, sabor, intensidad del aroma y aceptabilidad global).

Una vez evaluadas las tortillas elaboradas a partir de las diferentes mezclas, para poder seleccionar la proporción adecuada de **HFTE** que podía ser añadida a la **HMAE** se tomó en cuenta que al elegir el porcentaje más alto en este caso 20% se puede alcanzar un perfil de aminoácidos adecuado que es lo que primordialmente se está buscando mejorar en la tortilla, por lo que nosotros podemos decir que la adición del 20% de **HFTE** causó buenos valores tecnofuncionales así como buenos valores sensoriales.

D COMPOSICIÓN QUÍMICA, PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, TECNOFUNCIONALES Y SENSORIALES DE TORTILLAS ELABORADAS A PARTIR DE LA MEZCLA DE 80% HMAE + 20% HFTE

Una vez obtenidas las tortillas a partir de la mezcla de 80% **HMAE** + 20% **HFTE** a dichas tortillas se les evaluó la composición química, propiedades fisicoquímicas, propiedades tecnofuncionales y sensoriales, actividad antioxidante y contenido de fitoquímicos, antocianinas, digestibilidad proteínica in vitro (DPIV) y propiedades nutraceuticas (Índice de inhibición de α -amilasas, α -glucosidasa e inhibición de ECA).

En el **Cuadro 10** se muestra la composición química de las tortillas elaboradas con 100% **HMAE** y con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE**; adicionalmente, se muestra la composición química de tortillas elaboradas con **MASECA^{MR} azul** (utilizadas como referencia por ser producto comercialmente disponible). La composición química (% , bs) de la tortilla elaborada con **HMAE** fue de 11.05, 2.92, 1.21, 9.62 y 75.20, para proteínas, lípidos, minerales, fibra dietaria total y carbohidratos, respectivamente

Cuadro 10. Composición química, propiedades fisicoquímicas, tecnofuncionales y sensoriales de tortillas elaboradas con la mezcla de 80% HMAE + 20%HFTE, 100% HMAE y de MASECA^{MR} azul

Propiedad ¹	Tortillas de HMAE ²	Tortillas de HMAE+HFTE (80-20%) ³	Tortillas de MASECA ^{MR} azul ⁴
Composición química (% , bs)			
Proteínas	11.05±0.05 ^b	11.81±0.04 ^a	8.81±0.23 ^c
Lípidos	2.92±0.04 ^a	2.50±0.02 ^a	2.38±0.05 ^a
Minerales	1.21±0.04 ^c	1.88±0.02 ^a	1.49±0.14 ^b
Fibra dietaria			
Soluble	1.29±0.03 ^c	1.32±0.02 ^b	1.37±0.06 ^a
Insoluble	8.33±0.02 ^b	10.58±0.18 ^a	4.70±0.1 ^c
Total	9.62±0.05 ^b	11.90±0.20 ^a	6.07±0.16 ^c
Carbohidratos	75.20±0.35 ^b	73.23±0.33 ^c	81.25±0.25 ^a
Fisicoquímicas			
Color			
L*	47.61±1.33 ^b	53.21±1.16 ^a	47.59±0.68 ^b
a*	2.05±0.08 ^a	1.02±0.06 ^b	-1.98±0.10 ^c
b*	-0.91±0.10 ^b	0.60±0.08 ^a	-0.19±0.08 ^b
pH	7.36±0.01 ^b	7.36±0.03 ^b	6.5±0.05 ^a
Actividad acuosa	0.48±0.02 ^a	0.39±0.00 ^c	0.44±0.00 ^b
Tecnológica / sensorial			
Hinchabilidad ⁵	2.92 ^a	3.00 ^a	2.92 ^a
Rolabilidad ⁶	1.92 ^b	2.25 ^a	2.08 ^{ab}
Aceptabilidad global ⁷	72 ^a	63.93 ^b	71 ^a

¹Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar. ^{a-c}Medias con diferentes letras minúsculas en superíndice en la misma fila son significativamente diferentes (Tukey, p≤0.05).

²Tortillas elaboradas con 100 % harina de maíz azul extrudido (HMAE).

³Tortillas elaboradas con 80 % harina de maíz azul extrudido (HMAE) + 20 % harina de frijol tépari extrudido (HFTE)

⁴Tortillas elaboradas con 100% harina comercial de maíz azul nixtamalizado.

⁵ 1 = Poco o nulo hinchamiento (0-30%), 2 = Hinchamiento medio (30-70%), 3 = Hinchamiento completo (70-100%).

⁶ Valores del 1 al 5 representan el porcentaje de área de las tortillas que presentó grietas en la superficie y se evaluó con la siguiente escala: 1 = 0%, 2 = 25%, 3 = 50%, 4 = 75%, 5 = 100%.

⁷ La aceptabilidad global se evaluó empleando una escala LAM (Labeled Affective Magnitude), la cual se basó en una escala hedónica de 11 puntos (1=Máximo valor de desagrado imaginable, 11= Máximo valor de agrado imaginable).

La tortilla elaborada con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** registró los siguientes contenidos (% , bs): proteínas 11.81%, lípidos 2.50%, minerales 1.88%, fibra dietaria total 11.90% y carbohidratos 73.23%. El contenido de proteínas, lípidos, minerales, fibra dietaria total y carbohidratos para la tortilla control de **MASECA^{MR} azul** fue de 8.81%, 2.38%, 1.49%, 6.07% y 81.25% respectivamente. La tortilla elaborada con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** presentó mayor cantidad ($p \geq 0.05$) de proteínas (11.81 vs 11.05 %, bs), minerales (1.88 vs 1.49%), fibra dietaria total (11.90 vs 6.07 %) que la tortilla elaborada con 100% **HMAE**; los incrementos pueden ser atribuidos a la diferencia en composición química entre las harinas **HMAE** y **HFTE**, con contenido mayor de proteínas y fibra dietaria, principalmente, en esta última (**Ver Cuadro 9**). La tortilla elaborada a partir de la mezcla 80% **HMAE** +20% **HFTE** tuvo un contenido de proteínas 34.05% mayor que el contenido de la tortilla elaborada con harina comercial de maíz azul nixtamalizado (**MASECA^{MR} azul**) (**Cuadro 10**).

Treviño-Mejía y col. (2016) evaluaron la composición química de tortillas de maíz nixtamalizado fortificadas con 20% de frijol común encontrando que el contenido de proteínas en las tortillas de maíz nixtamalizado adicionado con frijol común era mayor, en un 15.48% (10.89% vs 9.43%), en comparación con las tortillas elaboradas con harina comercial de maíz nixtamalizado.

El contenido de minerales de la tortilla elaborada con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** fue mayor en 55.37% al compararse con tortillas elaboradas con 100% **HMAE** (**Cuadro 10**). El contenido mayor de minerales en la tortilla elaborada a partir de la mezcla se relaciona con el mayor contenido de minerales en la **HFTE** que en **HMAE** (**Ver Cuadro 9**).

Un estudio realizado por Pastor-Cavada y col (2011) evaluó los efectos de la adición de leguminosas silvestres (*Lathyrus*) del sur de España sobre las propiedades nutricionales de los productos extrudidos a base de maíz y arroz integral. Los resultados mostraron que con solo el 15% de reemplazo de leguminosas, se obtuvo un aumento significativo en el contenido de proteínas, fibra y minerales.

Gómez-Aldapa y col (1999) compararon tortillas de maíz hechas por el proceso tradicional y por extrusión encontrando que la adición de hidróxido de calcio (0.15% y 0.25%) durante la preparación para las tortillas aumento 20 veces el contenido de calcio, otros autores han reportado este aumento.

El contenido de fibra dietaria total en tortilla elaborada con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** fue mayor que el de la tortilla producida a partir de 100% **HMAE** (11.90 vs 9.62%) (**Cuadro 10**). Este aumento en el contenido de fibra en las tortillas concuerda con los resultados reportados por Grajales-García y col. 2012, quienes también informaron un aumento en el contenido de fibra dietaria total (57.26%) cuando se añadió frijol negro a las tortillas de maíz QPM, concluyendo que era un tema importante debido a que la tortilla de frijol negro podría considerarse como un alimento funcional.

Las tortillas de **HMAE** y **80% HMAE + 20% HFTE** presentaron valores de "L" de 47.61 y 53.21 respectivamente. Mientras que los valores de a^* y b^* fueron de 2.05 y -0.91 para la tortilla de **HMAE** y de 1.02 y 0.60 para la tortilla con **HFTE**. La adición del 20% de **HFTE** provocó un aumento significativo ($p \geq 0.05$) en "L" y b^* . El aumento en el valor Hunter "L" indican un aumento en la luminosidad y un aclaramiento en la materia prima, esto puede estar asociado a la adición de **HFTE**.

Las tortillas producidas a partir de la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** tuvieron un pH=7.36; las elaboradas con 100% **HMAE** registraron un valor similar (7.36). Las tortillas elaboradas con harina comercial de maíz nixtamalizado (**MASECA^{MR}** azul) tuvieron un pH=6.5 (**Cuadro 10**). Bedolla y Rooney (1984) reportaron que las tortillas con un pH entre 7.1 y 7.2 retuvieron mejor el sabor característico del producto, con una vida de anaquel aceptable.

Las tortillas elaboradas con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** y con 100% **HMAE** tuvieron actividades de agua de 0.39 y 0.48, respectivamente. Las tortillas producidas a partir de **MASECA^{MR}** azul tuvieron actividad de agua de 0.44 (**Cuadro 10**). Estos valores se encuentran en un rango en donde el crecimiento de microorganismos, así como las reacciones químicas y enzimáticas ocurren lentamente, lo que se traduce en una larga vida de anaquel.

En el **Cuadro 10** se muestran las propiedades tecnofuncionales de las tortillas, así como la evaluación sensorial de las mismas. Las tortillas elaboradas a partir mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** y las producidas a partir de 100% **HMAE** presentaron un valor promedio de hinchabilidad de 3.0 y 2.92, respectivamente; las tortillas derivadas de **MASECA^{MR}** azul tuvieron una hinchabilidad de 2.92 (**Cuadro 10**). Los valores de hinchabilidad no fueron estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). Esta característica es muy importante en tortillas ya que nos indica si la masa, a partir de la cual se obtuvo la tortilla, tuvo un adecuado grado de cocción o una proporción adecuada de tiempo de exposición al calor en ambos lados de la tortilla, durante el proceso de cocción.

La rolabilidad de las tortillas hechas con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** y de las tortillas elaboradas con 100% **HMAE** fue de 2.25 y 1.92, respectivamente; las tortillas fabricadas con **MASECA^{MR}** azul registraron un valor de rolabilidad de 2.08

(Cuadro 10). Observamos que la adición de HFTE causó una ligera disminución en la roabilidad de la tortilla, recordemos que valores más bajos significan mejores valores, sin embargo, como fue mencionado anteriormente las 3 tortillas presentaron un grado de daño en la superficie similar alrededor del 25%.

Wu y Arntfield (2016) evaluaron propiedades físicas y sensoriales de tortillas adicionadas con harina de soya encontrando que las tortillas control de maíz, así como las tortillas hechas con 25% y 35% de soya mostraron la mejor capacidad de rolar, seguidas de las tortillas hechas con 10%, 20%, 30%, y 40% soya, concluyendo que la flexibilidad de las tortillas dependía principalmente de la gelatinización del almidón libre. Por lo tanto, se esperaba que las tortillas control de maíz tuvieran la mejor capacidad de rotación, debido al mayor contenido de humedad, así como a un mayor contenido de almidón.

Treviño-Mejía y col (2016) elaboraron tortillas a base de maíz y frijol común utilizando una proporción 80-20% encontrando que al aumentar el contenido de harina de frijol común las tortillas se hacían más quebradizas lo cual afectaba la roabilidad de las mismas, esto debido al incremento en el contenido de fibra. No se observaron diferencias significativas en la roabilidad.

Los valores de aceptabilidad global correspondientes a la evaluación sensorial de las tortillas elaboradas con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** y de las manufacturadas con 100% HMAE fueron de 63.93 (entre “me gusta ligeramente” y “me gusta moderadamente”) y 72 (entre “me gusta moderadamente” y “me gusta mucho”), respectivamente. Las tortillas elaboradas con **MASECA^{MR}** azul tuvieron un valor de aceptabilidad global de 71 (entre “me gusta moderadamente” y “me gusta mucho”)

(Cuadro 10). El hecho de que las tortillas adicionadas con **HFTE** tengan propiedades

sensoriales no muy alejadas a aquellas que se elaboraron con harinas comerciales de maíz nixtamalizado (**MASECA^{MR}** azul) es de singular importancia, ya que esto permitiría aprovechar la calidad de la mezcla de harinas de maíz azul y frijol tépari extrudidos. En un estudio realizado por Rendón-Villalobos y col (2012) evaluaron sensorialmente tortillas de maíz adicionadas con harina de chía (5, 10, 15 y 20%) utilizando un panel de 17 jueces y una escala hedónica de 3 puntos. Encontrando que que no hubo diferencia significativa entre las tortillas conforme el nivel de harina de chía aumentaba, sin embargo, la tortilla adicionada al 5% obtuvo los valores más altos para todos los atributos evaluados (2.71) (color, sabor, sabor, intensidad del aroma y aceptabilidad global).

E ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE, NIVEL DE FITOQUIMICOS Y ANTOCIANINAS TOTALES DE TORTILLAS ELABORADAS A PARTIR DE LA MEZCLA DE 80% HMAEO + 20% HFTEO

La medición de la actividad antioxidante hidrofílica total (suma de AAox de fitoquímicos libres y ligados) fue determinada empleando las metodologías de ABTS y DPPH y los resultados se muestran en el **Cuadro 11**. Los resultados para las tortillas mostraron una mayor capacidad antioxidante por el método ABTS. Los valores de actividad antioxidante (**AAox**) hidrofílica para las tortillas hechas con la mezcla 80% **HMAE + 20% HFTE** y con 100% **HMAE** fueron de 7,651 y 7,524 μmol equivalentes de Trolox (ET)/100 g (bs); las tortillas elaboradas con harina comercial de maíz nixtamalizado (**MASECA^{MR}** azul) tuvieron una **AAox** de 7,230 μmol ET/100 g (bs) (**Cuadro 11**). Cuando la AAox se evaluó a través del método DPPH se obtuvieron valores de 2,463 y de 2,417 μmol ET/100 g (bs) para las tortillas confeccionadas a

partir de la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** y de 100% **HMAE**, respectivamente; las tortillas hechas con **MASECA^{MR}** azul tuvieron una **AAox** de 2,015 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$ (bs) (**Cuadro 11**).

Cuando la **AAox** se evaluó aplicando la metodología **ABTS** se observó que la mayor contribución a la misma se derivó de los fitoquímicos ligados, siendo esta contribución de 88% en el caso de las tortillas elaboradas con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** y de las hechas con 100% **HMAE**; en el caso de **MASECA^{MR}** azul los fitoquímicos ligados contribuyeron con 86% de la **AAox** detectada en tortillas (**Cuadro 11**).

Cuando la **AAox** se evaluó aplicando la metodología **DPPH** se observó que la mayor contribución a la misma se derivó de los fitoquímicos ligados, siendo esta contribución de 70 % en el caso de las tortillas elaboradas con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** y de 69% en las tortillas hechas con 100% **HMAE**; en el caso de **MASECA^{MR}** azul los fitoquímicos ligados contribuyeron con 56% de la **AAox** detectada en tortillas (**Cuadro 11**).

Los diferentes valores aquí reportados pueden atribuirse a la capacidad de cada método para detectar la actividad antioxidante de varios compuestos (Anton y col, 2009). Algunos autores han declarado que los procesos térmicos como la extrusión, aumentan la **AAox** de productos alimenticios, probablemente mediante el desarrollo de nuevos antioxidantes, incluidos productos de la reacción o reacciones de pardeamiento no enzimático, como las melanoidinas (Stojceska y col, 2009; Sharma y col 2012). Las propiedades antioxidantes de los productos de reacción de Maillard se

Cuadro 11. Actividad antioxidante, compuestos fenólicos y antocianinas de tortillas elaboradas con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE**, **HMAE** y **MASECA^{MR}** azul

Propiedad ¹	Tortillas de HMAE ²	Tortillas de HMAE+HFTE (80-20%) ³	Tortillas de MASECA TM azul ⁴
Actividad antioxidante			
ABTS⁵			
Fitoquímicos libres	873.85±103.62 ^a	903.16±141.60 ^a	994.01±54.22 ^b
Fitoquímicos ligados	6650.31±81.72 ^a	6747.49±884.71 ^a	6235.79±846.69 ^a
Fitoquímicos totales	7524.16±185.34 ^a	7650.65±1025.7 ^a	7229.80±900.91 ^b
DPPH⁶			
Fitoquímicos libres	739.87±48.73 ^b	727.78±18.78 ^c	878.16±62.85 ^a
Fitoquímicos ligados	1677.04±80.49 ^a	1735.57±64.04 ^c	1136.55±87.72 ^b
Fitoquímicos totales	2416.91±129.22 ^a	2,463.35±82.82 ^a	2014.71±150.57 ^b
Compuestos fenólicos⁷			
Fenólicos libres	74±2.20 ^b	82.6±2.76 ^a	56.3±2.11 ^c
Fenólicos ligados	165±3.90 ^a	144.7±3.50 ^b	128.9±4.15 ^c
Fenólicos totales	239±6.1 ^a	227.3±6.26 ^a	185.22±6.26 ^b
Ant⁸	21.62±1.81 ^a	19.96±1.48 ^a	17.11±1.16 ^b

¹Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar. ^{a-c}Medias con diferentes letras minúsculas en superíndice en la misma fila son significativamente diferentes (Tukey, p≤0.05).

²Tortillas elaboradas con 100 % harina de maíz azul extrudido (**HMAE**).

³Tortillas elaboradas con 80 % harina de maíz azul extrudido (**HMAE**) + 20 % harina de frijol tépari extrudido (**HFTE**).

⁴Tortillas elaboradas con 100% harina comercial de maíz azul nixtamalizado

⁵⁻⁶µmol equivalentes de Trolox (ET)/100 g,

⁷mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g, bs.

⁸mg equivalentes de Cianidina-3-Glucosido (C3G)/100 g, bs.

ven fuertemente afectadas por las propiedades físico-químicas de la matriz alimenticia y por las condiciones de procesamiento (Manzocco y col, 2000).

Algunos autores también confirmaron que el contenido de polifenoles y la actividad antioxidante de los productos alimenticios extrudidos cambian en diferentes rangos según la humedad de la materia prima y las condiciones de extrusión, particularmente la temperatura y la velocidad de rotación del tornillo, la cual influye en la energía mecánica (Anton y col, 2009; Sharma y col, 2012).

Dewanto y col (2002) reportaron que el procesamiento térmico puede liberar ácidos fenólicos ligados; ellos informaron sobre un incremento en la actividad antioxidante de maíz después de tratamientos térmicos. Por su parte Dueñas y col (2010) sugieren que durante el procesamiento térmico de leguminosas pueden formarse algunos compuestos como hidroximetilfulfuraldehído (**HMF**), producto de la reacción de Maillard que posee actividad antioxidante alta.

Mora-Rochín y col (2010) investigaron los efectos del proceso de extrusión (TE=85 °C, VT=240 rpm) en la AAox por el método ORAC de tortillas elaboradas con harina extrudida de maíces pigmentados (azul y rojo) y comerciales (blanco y amarillo). Encontrando que la mayoría de las tortillas producidas a partir de harinas extrudidas retuvieron más del 90% del valor ORAC observado en los granos crudos. Las tortillas de maíz azul producidas después de la extrusión tuvieron la mayor retención de capacidad antioxidante (93.2%) y concentración de ácido ferúlico (96.7%). Dichos resultados indicaron que la aplicación de la tecnología de extrusión-cocción es fundamental para la retención de niveles más altos de fitoquímicos y la actividad antioxidante en la tortilla.

Treviño-Mejía y col (2016) evaluaron la AAox de tortillas adicionadas con harina de frijol comun por dos métodos: DPPH y ABTS, los resultados fueron ligeramente similares entre los métodos, ellos observaron que la adición de harina de frijol comun a las tortillas de maíz resultó en un aumento del 15% en la capacidad antioxidante por el método ABTS y del 56% por el método DPPH.

Delgado-Licon y col (2009) investigaron la influencia de la extrusión en los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante de las mezclas de frijol/maíz. La harina de frijoles enteros y maíz nixtamalizado se mezclaron en una proporción de 60:40 y la extrusión se realizó en diferentes condiciones de humedad (14.5, 15.4, 17.1 y 18.0 %) y temperatura (150, 160, 170, 180 y 190 °C) bajo una velocidad de tornillo de 90 rpm para encontrar las condiciones óptimas de extrusión. Los resultados de esta investigación mostraron que, después de los procedimientos de extrusión, el contenido de polifenoles y flavonoides permanecieron altos, así como la capacidad antioxidante de las muestras (de 37.02 a 32.57 $\mu\text{m ET/g}$). Los autores encontraron una buena correlación entre los resultados de los procedimientos de extrusión (humedad de extrusión, temperatura de extrusión) y los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante.

El contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**) en tortillas hechas con la mezcla 80% **HMAE+** 20% **HFTE** y con **HMAE** fue de 227.3 y 239 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g de muestra (bs), respectivamente; las tortillas de **MASECA^{MR}** azul tuvieron un contenido de **CFT** de 185.22 mg EAG/100 g (bs). En las tres tortillas los compuestos fenólicos ligados fueron los que contribuyeron en mayor porcentaje al contenido total: 69%, 69.59% y 63.66% respectivamente. Estos compuestos son

importantes ya que sobreviven a la digestión en el estómago y el intestino y llegan al colón, donde pueden producir un ambiente antioxidante favorable (Fardet y col, 2008).

Treviño-Mejía y col (2016) evaluaron tortillas adicionadas con harina de frijol común, ellos observaron que aunque la harina de frijol comun tenía un contenido mayor de compuestos fenólicos totales (9.26), no se encontraron diferencias significativa entre las tortillas de maíz (6.15) y las tortillas de maíz-frijol (6.67). El contenido de compuestos fenolicos reportados en esta investigación difieren a lo reportado por otros autores quienes obtuvieron un 20.8 mg EAG/100 g, bs, en tortillas extrudidas (Gaxiola-Cuevas y col, 2017). Las diferencias encontradas en los distintos estudios, puede ser atribuida al genotipo del grano y a los diferentes métodos de extracción para obtener la fracción de polifenoles.

El contenido de antocianinas totales (**Ant**) en tortillas hechas con la mezcla de 80% **HMAE+** 20% **HFTE** y con 100% **HMAE** fue de 21.62 y 19.96 mg equivalentes de Cianidina-3-glucósido (ECG)/100 g de muestra (bs), respectivamente; las tortillas de **MASECA^{MR}** azul tuvieron un contenido de Ant de 17.11 mg ECG/100 g de muestra (bs) (**Cuadro 11**). Sánchez-Madrigal y col (2015) reportaron que las pérdidas en el contenido de antocianinas se incrementan con el pH alcalino y temperaturas elevadas, afectando la estabilidad de las mismas, el color y apariencia de la tortilla.

Aguayo-Rojas y col (2012) encontraron una perdida de **Ant** de 53.5% en tortillas elaboradas a partir de maíz azul extruido para cocción con cal. Debido a los tratamientos térmicos, la antocianina puede sufrir importantes cambios estructurales, como la conversión a chalconas incoloras (Wrolstad y col, 2002), y debido a su termolabilidad, las chalconas pueden degradarse instantáneamente en ácidos

fenólicos. Por otro lado, la polimerización y el oscurecimiento también conducen a una disminución en el **Ant** (Sing y col, 2007).

F CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES, CALIFICACIÓN QUIMICA, DPIV, C-PER, POTENCIALES ANTIHIPERTENSIVO (INHIBICIÓN DE ECA) E HIPOCLUCÉMICO (INHIBICIÓN DE α -AMILASA Y α -GLUCOSIDASA) DE TORTILLAS ELABORADAS A PARTIR DE LA MEZCLA DE 80% HMAE + 20% HFTE

El contenido de aminoácidos esenciales (**AAE**) para las tortillas elaboradas a partir de la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** y de 100% **HMAE** fue de 39.58 y 37.95 g AAE / 100 g proteína; la tortilla producida con **MASECA^{MR}** azul tuvo un contenido de AAE de 39.15 g AAE / 100 g proteína (**Cuadro 12**). El grano de maíz es deficiente en aminoácidos esenciales Lys y Trp. La tortilla fabricada con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE** presentó mayor ($p \leq 0.05$) contenido de estos que la tortilla elaborada con 100% **HMAE**. Lo cual se debe a la complementación aminoacídica dada gracias a la adición de **HFTE**, una característica importante en el frijol tépari es su contenido alto de Lys, Leu y de aminoácidos aromáticos (Phe, Tyr) y aunque las proteínas de las leguminosas son deficientes en aminoácidos azufrados (Met+Cys) y Trp, el frijol tépari mantiene valores mayores en aminoácidos azufrados (2.43 g de AAE/100g de proteína) que la recomendación de la FAO (Sheerens y col, 1983; Salas-López y col, 2018).

La digestibilidad es uno de los parámetros utilizados para medir el valor nutricional de los distintos alimentos destinados a la alimentación humana, debido a que no basta que la proteína u otro nutrimento se encuentren en porcentajes altos en el alimento, si

Cuadro 12. Propiedades nutricionales y nutracéuticas de tortillas elaboradas con la mezcla de 80% HMAE + 20% HFTE, HMAE y de MASECA^{MR} azul

Propiedad ¹	Tortillas de HMAEO ²	Tortillas de HMAEO + HFTEO (80%-20%) ³	Tortillas de Maseca ^{MR} azul ⁴	FAO
Nutricional				
AAE⁵ (g/100 g proteína)				
His	3.13+0.02 ^a	2.96+0.03 ^b	2.49+0.02 ^c	1.6
Ile	2.50+0.03 ^b	2.79+0.02 ^a	2.83+0.03 ^a	3
Leu	7.39+0.03 ^b	7.15+0.04 ^c	12.94+0.06 ^a	6.1
Lys	3.01+0.02 ^b	3.65+0.03 ^a	2.44+0.04 ^c	4.8
Met-Cys	3.42+0.04 ^b	4.80+0.03 ^a	3.39+0.03 ^b	2.3
Phe+Tyr	9.80+0.05 ^a	9.42+0.04 ^b	7.58+0.05 ^c	4.1
Thr	2.56+0.03 ^a	2.76+0.04 ^a	2.70+0.02 ^a	2.5
Trp	0.64+0.01 ^b	0.73+0.01 ^a	0.54+0.04 ^c	0.66
Val	5.50+0.03 ^a	5.32+0.03 ^a	4.23+0.05 ^c	4
Total	37.95 ^b	39.58 ^a	39.15 ^a	29.06
Calificación Química (%)	62.70	76.04	50.83	
AAE limitante	Lys	Lys	Lys	
DPIV (%) ⁶	80.21±0.20 ^a	79.14±0.17 ^a	75.86±0.21 ^b	
C-PER	1.35±0.05 ^b	1.61±0.08 ^a	0.97±0.06 ^c	
Nutracéuticas				
Potencial antihipertensivo ⁸	0.4495 ^b	0.4325 ^b	2.433 ^a	
Inhibición de α-amilasa ⁹	57.37 ^a	20.70 ^c	31.86 ^b	
Inhibición de α-glucosidasa ¹⁰	49.59 ^a	38.17 ^b	25.58 ^c	

¹Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar. ^{a-c}Medias con diferentes letras minúsculas en superíndice en la misma fila son significativamente diferentes (Tukey, p≤0.05).

²Tortillas elaboradas con 100 % harina de maíz azul extrudido (HMAE).

³Tortillas elaboradas con 80 % harina de maíz azul extrudido (HMAE) + 20 % harina de frijol tépari extrudido (HFTE).

⁴Tortillas elaboradas con 100% harina comercial de maíz azul nixtamalizado

⁵AAE = Aminoácidos esenciales.

⁶DPIV= Digestibilidad proteínica in vitro (%).

⁷C-PER= Relación de eficiencia proteínica calculada.

⁸⁻¹⁰IC₅₀ (mg/mL)

no que debe ser digerible para que pueda ser asimilado y, por consecuencia, aprovechado por el organismo que lo ingiera (Au y Bidar, 1992).

La digestibilidad proteínica *in vitro* (**DPIV**) de las tortillas hechas con la mezcla 80% **HMAE**+ 20% **HFTE** y con 100% **HMAE** fueron de 79.14% y 80.21 %, respectivamente; las tortillas elaboradas con **MASECA^{MR}** azul tuvieron una **DPIV**=75.86% (**Cuadro 12**). La adición de un 20% de **HFTE** a 80% de **HMAE** no causó un efecto significativo en la **DPIV** con respecto a la tortilla 100% **HMAE**.

León-López y col. (2019) adicionaron harina de chía extrudida para mejorar la calidad nutricional y nutracéutica de tortillas de maíz nixtamalizado, ellos utilizaron la mezcla 75-25 (75% **MASECA^{MR}**+ 25% **HCDE**). Se observó que las tortillas adicionadas con harina de chía extrudida aumentaba un 9.64% la **DPIV** con respecto a la tortilla de maíz nixtamalizado (**MASECA^{MR}**), concluyendo que la harina de chia extruida, obtenida por el proceso de extrusión en condiciones óptimas, podría usarse, por su potencial antihipertensivo, como complemento alimenticio funcional o natural. El proceso de extrusión aumenta la digestibilidad de proteínas debido a que se favorece la desnaturalización de las mismas haciéndolas más accesibles a la acción de las proteasas (Della Valle y col, 1989). Los valores de digestibilidad proteínica de los productos extruidos son superiores, esto es posible debido a que por el corte de cizalla y temperaturas altas hay una mayor desnaturalización de proteínas e inactivación de factores antinutricionales que dificultan la digestión (Morales y col. 2015).

En el **Cuadro 12** se presentan los valores de potencial inhibitorio de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) (potencial antihipertensivo), el cual fue expresado como **IC50** [concentración de extracto necesario para inhibir el 50% de la actividad de

la enzima convertidora de angiotensina (ECA); entre más pequeño el valor de **IC₅₀** mayor potencial inhibitorio de la actividad de la enzima tendrá el extracto], de extractos fenólicos hidrofílicos de tortillas elaboradas a partir de la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HMAE**, con 100% **HMAE** y con una harina comercial de maíz nixtamalizado (**MASECA^{MR}** azul).

Los extractos fenólicos totales presentaron los siguientes valores de **IC₅₀**: tortilla hecha con mezcla 80% **HMAE** + 20% **HMAE** = de 0.4325 mg/mL; tortilla hecha con 100% **HMAE** = 0.4495 mg/mL. La tortilla fabricada a partir de **MASECA^{MR}** azul tuvo un **IC₅₀**=2.433 mg/mL (**Cuadro 12**). El efecto inhibitorio de ECA *in vitro* e *in vivo* ha sido documentado a partir de compuestos aislados de algunos alimentos como chocolate, café, té verde, entre otros, particularmente glucósidos fenólicos como quercetina, mircetina y kaempferol (Diebolt y col, 2001; Basu y Lucas, 2007). Existen diferentes hipótesis sobre el mecanismo de inhibición a partir de estos compuestos. Se describe que su estructura fenólica tiene un mecanismo de inhibición competitiva, alterando su función por aglutinación (Guerrero y col, 2012). Al Shukur y col (2013), probaron que el efecto inhibitorio puede explicarse por el secuestro del Zn²⁺; esto se probó por la teoría de que la ECA es una metaloproteinasa dependiente de Zn²⁺, y que los compuestos quelantes de metales no específicos también pueden presentar un efecto inhibitorio de ECA. También se destaca el hecho de que los grupos hidroxilo presentes en los compuestos fenólicos establecen una interacción tipo puente de hidrógeno con ciertas secuencias ricas en prolina presente cerca del sitio activo de la ECA (Kaushik y Bhat, 2003).

No existen reportes en la literatura acerca de los valores de **IC₅₀** para la actividad inhibitoria de ECA de extractos de compuestos fenólicos de tortillas elaboradas a partir

de **HMAE+ HFTE**. Asimismo, existen muy pocos reportes acerca del efecto inhibitorio de extractos fenólicos de granos sobre la actividad de ECA.

Ademiluyi y Oboh (2013) explican que la actividad inhibitoria de extractos fenólicos libres y ligados de harinas de frijol común puede ser atribuida a que su naturaleza hidrofílica favorece la interacción directa con la enzima en la fase acuosa lo cual puede ser responsable de la inhibición de ECA, por lo tanto, el carácter hidrofílico del tipo de compuestos fenólicos presentes en cada uno de los extractos posiblemente definirá la actividad inhibitoria sobre la actividad de ECA.

Cian y col (2011) evaluaron el efecto del proceso de extrusión sobre la inhibición de la ECA en productos expandidos de maíz a los cuales se les incorporo concentrados hidrolizados de hemoglobina bovina, utilizando condiciones de proceso de TE=170°C y VT=150 rpm. Ellos observaron que los extruidos de maíz mostraron un cierto grado de inhibición de la enzima, y que al incorporarse los hidrolizados de hemoglobina ocurría una reducción del 96% en la inhibición de ECA.

León-López y col (2019) evaluaron el potencial antihipertensivo en harina de chía extrudida (TE=147°C, VT=237 rpm). Ellos encontraron que los compuestos fenólicos extraídos de la harina de chía extrudida tenían un mejor potencial antihipertensivo (valor IC₅₀ más bajo) que los compuestos fenólicos extraídos de harina de chía sin procesar (0.34 vs. 0.51 mg extracto / mL, respectivamente). Atribuyendo que la mejora del valor IC₅₀ durante el proceso de extrusión de semillas de chía desgrasadas ocurrió por liberación y formación de compuestos bioactivos (compuestos fenólicos y productos de reacción de Maillard) con potencial antihipertensivo. Se ha informado que los compuestos fenólicos (ácidos fenólicos, flavonoides, taninos, estilbenos) inhiben la actividad *in vitro* de la ECA. El grado de inhibición de la actividad de ECA depende de

la absorción y el metabolismo de estos compuestos, y su modo de acción está estrechamente relacionado con la clase (subclase) y la estructura del compuesto fenólico que se emplea (Massaretto y col, 2011; Al-Shukor y col, 2013). Posteriormente la harina de chíá extrudida fue empleada para la elaboración de una tortilla (75% **MASECA^{MR}** + 25 % **HCDEO**) la cual presento un **IC₅₀** de 0.67.

La enzima α -amilasa es responsable del hidrólisis de almidón durante el proceso digestivo, lo cual es importante para manejo postprandial de niveles de glucosa en sangre. En el **Cuadro 12** se muestran los valores para el potencial hipoglicémico, en cuanto al **IC₅₀** de α -amilasa se obtuvieron los siguientes valores: 20 mg/mL para las tortillas elaborada con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE**, 57.37 mg/mL para las tortillas de **HMAE**; las tortillas elaboradas con **MASECA^{MR}** azul presentaron **IC₅₀** de α -amilasa de 31.86 mg/mL. Mientras que los valores obtenidos en la inhibición de α -glucosidasa fueron de 38.17, 49.59 y 25.58 mg/mL para tortillas elaboradas con la mezcla 80% **HMAE** + 20% **HFTE**, 100% **HMAE**, **MASECA^{MR}** azul, respectivamente. La adición de **HFTE** mejoro significativamente el potencial inhibitorio de estas, lo cual es atribuido a la mezcla funcional que se da al juntar las dos harinas. Las antocianinas presentes en el maíz azul pueden actuar como inhibidores de α -glucosidasa debido a la similitud estructural entre sus sustratos y los azúcares que se unen a las antocianinas a través del enlace β -glucosídico. No existen reportes en la literatura acerca de los valores de α -amilasa y α -glucosidasa para la actividad inhibitoria de extractos de compuestos fenólicos de tortillas elaboradas a partir de la mezcla de **HMAE + HFTE**.

Una importante alternativa terapéutica para el manejo de las primeras etapas de la diabetes tipo 2 es el control de la absorción de glucosa a través de la reducción del

hidrólisis del almidón mediante la inhibición de las enzimas α -amilasa y α -glucosidasa. Estudios clínicos en humanos utilizando inhibidores naturales de α -amilasa y α -glucosidasa provenientes de plantas alimenticias (e.j. frijol común blanco) han demostrado excelentes efectos hipoglucémicos sin causar efectos colaterales como diarrea, distinción intestinal, vómito y flatulencia, los cuales son comúnmente encontrados con el uso de medicamentos disponibles comercialmente, promocionados como inhibidores terapéuticos de α -amilasa y α -glucosidasa. Los frijoles comunes tienen 3 isoformas de inhibidor de α -amilasa (alfa-A1, alfa-A12, alfa-A1L). La isoforma alfa-A1 tiene actividad anti-amilasa en humanos. Esta enzima se encuentra en los ejes embrionarios y cotiledones en la semilla y no en otros órganos de la planta. No está activo contra las α -amilasas vegetales y, por lo tanto, se clasifica como una proteína de defensa de semillas. El inhibidor de alfa amilasa previene la digestión del almidón bloqueando completamente el acceso al sitio activo del enzima alfa-amilasa (Fujita y col, 2001; Barrett y Udani, 2011).

IX CONCLUSIONES

- 1.- La cantidad de harina de frijol tépari extrudido (HFTE) máxima posible que pudo ser añadida a la harina de maíz azul extrudido (HMAE) para obtener tortillas con propiedades tecno-funcionales (hinchabilidad y rolabilidad) y sensoriales adecuadas fue 20%.
- 2.- La incorporación de 20% de HFTE incrementó el contenido de proteína (6.87 %), minerales (55.37%) y fibra dietaria total (23.70 %) en las tortillas de HMAE.
- 3.- Las tortillas elaboradas con 80% HMAE + 20% HFTE presentaron propiedades tecnofuncionales (hinchabilidad y rolabilidad) y fisicoquímicas similares a las tortillas elaboradas con 100% HMAE.
- 4.- La adición de 20% de HFTE en las tortillas de HMAE causó una ligera disminución de su aceptación sensorial global (AG) (tortilla 80% HMAE + 20% HFTE: AG = 63.93, ubicada entre los descriptores “me gusta ligeramente” y “me gusta moderadamente” vs tortilla 100% HMAE: AG = 72.50, ubicada entre los descriptores “me gusta moderadamente” y “me gusta mucho”).
- 5.- Tortillas elaboradas con 80% HMAE + 20% HFTE presentaron mayores valores de aminoácidos esenciales (AAE) (39.58 vs 37.95 g/100g de proteína), calificación química de la proteína (CQ) (76.04 vs 62.70%), lisina (3.65 vs 3.01 g/100g de proteína), triptófano (0.73 vs 0.64 g/100g de proteína) y C-PER (1.61 vs 1.36).
- 6.- La adición de 20% de HFTE no causó un efecto sinificativo en la actividad antioxidante (AAox) (métodos ABTS y DPPH) y el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) y antocianinas totales (AT) de las tortillas de HMAE.
- 7.- Extractos de compuestos fenólicos de tortillas de HMAE adicionadas con 20% de HFTE presentaron un mejor potencial inhibitorio de las enzimas α -amilasa (IC_{50} : 20.70

vs 57.37 mg/mL) y α -glucosidasa (IC_{50} : 38.17 vs 49.59 mg/mL) que los extractos de tortillas elaboradas solamente de HMAE. Mientras que, la adición de HFTE (20%) a las tortillas de HMAE no modificó significativamente el potencial de inhibición de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) (IC_{50} : 0.4325 vs 0.4495 mg/mL) de los extractos fenólicos. Entre más pequeño el valor de IC_{50} mayor potencial inhibitorio de la actividad de la enzima tiene el extracto.

8.- Debido a las propiedades tecno-funcionales, sensoriales y nutricionales, al contenido de proteína, minerales, fibra dietaria, compuestos fenólicos y antocianinas, así como, los potenciales antioxidantes, hipoglucemiante y antihipertensivo, de las tortillas de harina de maíz azul extrudido adicionadas con 20 % de harina de frijol tépari extrudido, éstas podrían ser empleadas como un excelente vehículo para mejorar el estatus de salud de los consumidores de este tipo de productos.

X BIBLOGRAFIA

- Acevedo-Pacheco L, Serna-Saldívar SO. 2016. *In vivo* protein quality of selected cereal-based staple foods enriched with soybean proteins. *Food and Nutrition Research* 60: 31382
- Abdel-Aal ESM, Hucl P. 1999. A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry* 76(3):350–354
- Ademiluyi AO, Oboh G. 2013. Soybean phenolic-rich extracts inhibit key-enzymes linked to type 2 diabetes (α -amylase and α -glucosidase) and hypertension (angiotensin I converting enzyme) *in vitro*. *Experimental and Toxicologic Pathology* 65(3):305-309
- Adom KK, Liu RH. 2002. Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50:6182-6187
- Agama-Acevedo E, Salinas-Moreno Y, Pacheco-Vargas G, Bello-Pérez LA. 2011. Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: Morfología del almidón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:317–329
- Aguayo-Rojas J, Mora-Rochín S, Cuevas-Rodríguez EO, Serna-Saldívar SO, Gutierrez-Urbe JA, Reyes-Moreno C, Milán-Carrillo J. 2012. Phytochemicals and antioxidant capacity of tortillas obtained after lime-cooking extrusion process of whole pigmented Mexican maize. *Plant Foods for Human Nutrition* 67(2):178-185
- Aguilar-Hernández AD, Salinas-Moreno Y, Ramírez-Díaz JL, Alemán-De la Torre I, Bautista-Ramírez E, Flores-López HE. 2019. Antocianinas y color en grano y olote de maíz morado peruano cultivado en Jalisco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(5):1071-1082
- Aguilera M, Reza M, Chew R, Meza J. 2011. Propiedades funcionales de las antocianinas. *Biotechnia* XIII (2): 16-22
- Aguilera-Garca MC, Barberá-Mateos JM, Esperanza-Díaz L, Duarte A, Gálvez-Peralta J, Gil-Hernández A, Gómez S, González-Gross M, Granado-Lorencio F, Guarner F, Martínez-Agustín O, Nova E, Olmedilla-Alonso B, Pujol-Amat P, Ramos E, Romeo J, Tobal FM, Vidal DR. 2007. *Alimentos Funcionales, Aproximación a una Nueva Alimentación*. ISB. Instituto de Nutrición y Trastornos Alimenticios. Madrid, España. 238 p.
- Altan A, McCarthy KL, Maskan M. 2009. Effect of extrusion process on antioxidant activity, total phenolics and β -glucan content of extrudates developed from barley-fruit and vegetable by-products. *International Journal of Food Science and Technology* 44(6):1263-1271
- Al Shukor N, Van Camp J, Gonzalez GB, Staljanssens D, Struijs K, Zotti MJ, Raes K, Smagghe G. 2013. Angiotensin-converting enzyme inhibitory effects by plant

- phenolic compounds: A study of structure activity relationships. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61(48):11832-11839
- Alam M S, Kaur J, Khaira H, Gupta K. 2016. Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters. A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 56: 445-473
- Almanza-Aguilera E, Guzmán-Tovar I, Acosta-Gallegos JA, Guzmán-Maldonado SH. 2006. Content of Phytochemicals in Beans of Cooked and Refried Black Beans. En: "Proceedings of the International Congress of Industry and Food Technology", Puebla, PUE, MEX, August 31
- Almeida-Dominguez HD, Cepeda M, Rooney L. 1996. Properties of commercial nixtamalized corn flour. *Cereal Foods World* 41: 624-630
- Amaya-Guerra C, Serna-Saldívar SO, Alanis-Guzman MG. 2006. Soybean fortification and enrichment of regular and quality protein maize tortillas affects brain development and maze performance of rats. *British Journal of Nutrition* 96: 161-168
- Anderson E, Cutler HC. 1942. Races of *Zea mays* L. Their recognition and classification. *Annals of Missouri Botanical Garden* 29:69-88
- Anderson RA, Conway HF, Pfeifer VF y Griffin E. 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today* 14:4-7,11-12.
- Anton A, Fulcher R, Arntfield S. 2009. Physical and nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. *Food Chemistry* 113:989-996
- AOAC. 1999. Official Methods of Analysis. *Association of Official Analytical Chemists*, 16ava edn, Washington, DC, USA
- Aparicio-Fernández X, García-Gasca T, Yousef GG, Lila MA, González de Mejía E, Loarca-Piña G. 2006. Chemopreventive activity of polyphenolics from black Jamapa bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on HeLa and HaCaT cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54:2116–2122.
- Arai S. 1996. Studies on functional foods in Japan state of the art. *Bioscience, Biotechnolog and Biochemistry* 60 (1):9-15
- Aranceta-Bartrina J, Gil-Hernández A. 2009. Alimentos Funcionales y Salud en la Etapa Infantil y Juvenil. Editorial Médica Panamericana SA, 216 p, ISBN: 849835255x
- Au N, Bidart J. 1992. Manual de Harina de Pescado. Compañía Pesquera San Pedro. Coronel, Chile 56 pp
- Awika JM, Dykes L, Gu L, Rooney LW, Prior RL. 2003. Processing of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products alters procyanidin oligomer and polymer

- distribution and content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(18):5516-5521
- Awika JM, Rooney LW, Wu X, Prior RL, Cisneros-Zevallos L. 2003. Screening methods to measure antioxidant activity of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(23):6657-6662
- Badui-Dergal S. 2006. Química de los Alimentos. Cuarta edición, Quintanar-Duarte E (ed), México. Pearson Educación de México, SA de CV, 736 p, ISBN 970-26-0670-5
- Barrett ML, Udani JK . 2011. A proprietary alpha-amylase inhibitor from white bean (*Phaseolus vulgaris*): A review of clinical studies on weight loss and glycemic control. *Nutrition Journal* 10:24.
- Basu A, Lucas EA. 2007. Mechanisms and effects of green tea on cardiovascular health. *Nutrition Reviews* 65(8):361-375
- Bedolla S, Rooney LW. 1984. Characteristics of us and mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation. *Cereal Foods World* 29:732-735
- Bello-Pérez LA. 2015. Maíces pigmentados: sabrosos, bonitos y saludables. Disponible en: www.acmor.org.mx. Consultado el 18 de abril de 2018.
- Bender DA. 2009. Radicales libres y nutrientes antioxidantes. Capítulo 45. Disponible de: highered.mheducation.com Consultado el 24 de abril de 2018.
- Beltrán FJ, Bockholt AJ, Rooney L. 2001. Blue Corn. En: "Specialty Corns" Hallauer AR (ed), Iowa State University, Ames Iowa, USA Pp 293-337
- Bhardwaj H, Hamama A. 2004. Protein and mineral composition of tepary bean seed. *Hort Science* 39:1363-1365
- Bhardwaj H, Hamama A. 2005. Oil and fatty acid composition of tepary bean seed. *Hort Science* 40:1436-1438.
- Biliaderis CG. 1991. The structure and interactions of starch with food constituents. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 69:60-78
- Bon JG., Ryan JK., Girish MG. 2017. Food Extrusion Processing: An Overview. Washington State University Extension and the US Department of Agriculture Pp 1-7
- Boyer C, Shannon J. 2001. Carbohydrates of the kernel, corn: Chemistry and technology. *Journal of Cereal Science* 1:253-272
- Boyer CD, Shannon JC, Garwood DL, Creech RG. 1976. Changes in starch granule size and amylose percentage during kernel development in several *Zea mays* L. genotypes. *Cereal Chemistry* 53:327-337
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. 1995. Use a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology* 28:25-30

- Brennan C, Brennan M, Derbyshire E, Tiwari BK. 2011. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. *Trends in Food Science and Technology* 22(10):570-575
- Bressani R. 1990. Chemistry, technology and nutritive value of maize tortillas. *Foods Review International* 62(6):225-264
- Cabrera-Soto ML, Salinas-Moreno GA, Velázquez-Cardelas E, Espinosa-Trujillo. 2009. Content of soluble and insoluble phenols in the structures of corn grain and their relationship with physical properties. *Agrociencia* 43:827-839
- Camire ME, Camire A, Krumhar K. 1990. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 19(1):25-57
- Camire M. 2002. Extrusion Cooking. En: "The Nutrition Handbook for Food Processors". 1st ed. Henry CJK, Chapman C, (ed), Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, Pp 314-326
- Camire ME, Dougherty MP, Briggs JL. 2005. Antioxidant-rich foods retard lipid oxidation in extruded corn. *Cereal Chemistry* 82(6):666-670
- Cardador-Martinez A, Castaño-Tostado E, Loarca-Piña G. 2002. Antimutagenic activity of natural phenolic compounds present in the common bean (*Phaseolus vulgaris*) against aflatoxin B1. *Food Additives and Contaminants* 19:62-69
- Cardello AV, Schutz HG. 2004. Research note numerical scale-point locations for constructing the LAM (labeled affective magnitude) scale. *Journal of Sensory Studies* 19:341-346
- Cevallos-Casals BA, Cisneros-Zevallos L. 2010. Impact of germination on phenolic content and antioxidant activity of edible seed species. *Food Chemistry* 119:1485-1490
- Chanvrier H, Uthayakumaran S, Appelqvist IA, Gidley MJ, Gilbert EP, López-Rubio A. 2007. Influence of storage conditions on the structure, thermal behavior, and formation of enzyme-resistant starch in extruded starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55(24):9883-9890
- Chen J, Serafin FL, Pandya RN, Daun H. 1991. Effects of extrusión conditions on sensory properties of corn meal extrudates. *Journal of Food Science* 56: 84-89
- Chen Y, Ye R, Yin L, Zhang N. 2014. Novel blasting extrusion processing improved the physicochemical properties of soluble dietary fiber from soybean residue and *in vivo* evaluation. *Journal of Food Engineering* 120:1-8
- Chuck-Hernández C, Perez-Carrillo E, Soria-Hernández C, Serna-Saldívar SO. 2015. Functionality and organoleptic properties of maize tortillas enriched with five different soybean proteins. *Cereal Chemistry* 92: 341-349

- Chuck-Hernández CE, Serna-Saldívar SO. 2019. Flours and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention. 2nd edition. In: "Soybean-Fortified Nixtamalized Corn Tortillas and Related Products." Chap 25, Preedy VR, Watson RR (ed), Academic Press, pp 319-333, ISBN: 978-0-12-814639-2 <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01593-8>
- Cian E, Luggren P, Drago S. 2011. Effect of extrusion process on antioxidant and ACE inhibition properties from bovine haemoglobin concentrate hydrolysates incorporated into expanded maize products. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 62(7): 774–780
- Clapes-Hernández S. 2000. *Diabetes mellitus*, estrés oxidativo y embarazo. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas* 19(3):191-5
- Cordoba F, Martínez M. 1997. Estudio Bioquímico de la Evolución de la Lectina de Coleoptilo de Maíz. <http://www.laboratorio.com.mx/ito00007.html> Consultado el 26 de abril de 2018.
- Corrales-Bañuelos AB, Cuevas-Rodríguez EO, Gutiérrez-Iribe JA, Milán-Noris EM, Reyes-Moreno C, Milán-Carrillo J, Mora-Rochín S. 2016. Carotenoid composition and antioxidant activity of tortillas elaborated from pigmented maize landraces by traditional nixtamalization or lime cooking extrusion process. *Journal of Cereal Science* 69:64-70
- Cortés-Gómez A, Salinas MY, Martín-Martínez SE, Martínez-Bustos F. 2006. Stability of anthocyanins of blue maize (*Zea mays* L.) after nixtamalization of separated pericarp-germ tip cap and endosperm fractions. *Journal of Cereal Science* 43:57-62
- Cruz-Manzano E, Sanfiel-Vasseur L, Palacio-Omar M. 2004. Estrés oxidativo e hipertensión esencial: Una realidad clínica. *Revista Cubana de Investigación Biomédica* 23(3):190-196
- Day L. 2013. Proteins from land plants—potential resources for human nutrition and food security. *Trends in Food Science and Technology* 32(1):25-42
- De la Parra C, Serna-Saldívar SO, Liu RH. 2007. Effect of processing on the phytochemical profiles and antioxidant activity of corn production of masa, tortillas and tortilla chips. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55:4177-4183
- Debouck DG. 1984. Morfología de la planta de frijol común. CIAT. 2da edición. 49 p.
- Dedossis GVZ, Kaliora AC, Andrikopoulos NK. 2005. Effect of phenols on natural killer (NK) cell-mediated death in the K562 human leukemic cell line. *Cell Biology International* 29:884-889

- Del Pozo-Insfran D, Brenes CH, Serna-Saldívar SO, Talcott ST. 2006. Polyphenolic and antioxidant content of white and blue corn (*Zea mays* L.) products. *Food Research International* 39:696-703
- Delgado-Licon E, Martínez A, Rocha-Guzmán L, Gallegos-Infante J, Atienzo-Lazos M, Drzewiecki J, Martínez-Sánchez C, Gorinstein S. 2009. Influence of extrusion on the bioactive compounds and the antioxidant capacity of the bean/corn mixtures. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 60:522-532
- Dewanto V, Wu X, Liu RH. 2002. Processed sweet corn has higher antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50:4959-4964
- Dickerson GW. 2003. Nutritional Analysis of New Mexico Blue Corn and Dent corn Kernels. Cooperative Extension Service, College of Agriculture and Home Economics. New Mexico State University, Las Cruces, NM, USA, Pp 2
- Dickerson GW. 2008. Nutritional analysis of New Mexico blue corn and dent corn kernels. *Cooperative Extension of Agriculture* 20:7-8
- Dielbolt M, Bucher B, Andrianstsitohaina R. 2001. Wine polyphenols decrease blood pressure, improve NO vasodilation, and induce gene expression. *Hypertension* 38(2):159-165
- Dimberg L, Molteberg E, Solheim R, Frølich W. 1996. Variation in oat groats due to variety, storage and heat treatment. I: Phenolic compounds. *Journal of Cereal Science* 24(3):263-272
- Dlamini NR, Taylor JR, Rooney LW. 2007. The effect of sorghum type and processing on the antioxidant properties of African sorghum-based foods. *Food Chemistry* 105(4):1412-1419
- Drago-Serrano ME, López-López M, Sainz-Espuñes TR. 2006. Componentes bioactivos de alimentos funcionales de alimentos de origen vegetal. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas* 37(4):58-68
- Duodu K, Taylor J, Belton P, Hamaker B. 2003. Factors affecting sorghum protein digestibility. *Journal of Cereal Science* 38(2):117-131
- Dziezack DJ. 1989. Single and twin extruders in food processing. *Food Technology* 43:163-174.
- Eckhoff SR, Paulsen MR, Yang SC. 2003. Maize. En: "Enciclopedia of Food Sciences and Nutrition", 6th edition, Caballero B, Trugo LC, Finglas PM (ed). United Kingdom: Elsevier Science Ltd, Pp 3647-3653
- ENSANUT MC 2016. Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de Medio Camino. Informe final de resultados.

- Escamilla-Jiménez CI, Cuevas-Martínez EY, Guevara-Fonseca J. 2009. Flavonoides y sus acciones antioxidantes. *Medigraphic Artemisa en Línea (Revista de la Facultad de Medicina UNAM)* 52(2):73-75
- Escudero-Álvarez E, González-Sánchez P. 2006. La fibra dietética. *Nutrición Hospitalaria* 21 (Supl. 2) 61-72
- Espinosa-Alonso LG, Lygin A, Widholm JM, Valverde ME, Paredes-Lopez O. 2006. Polyphenols in wild and weedy Mexican common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54: 4436–4444
- Espinoza-Moreno RJ, Reyes-Moreno C, Milán-Carrillo J, López-Valenzuela JA, Paredes-López O, Gutiérrez-Dorado R. 2016. Healthy ready-to-eat snack with high nutritional and antioxidant value produced from whole amarantin transgenic maize and common bean. *Plant Foods for Human Nutrition* 71:218-224
- Esposito F, Arlotti G, Maria Bonifati A, Napolitano A, Vitale D, Fogliano V. 2005. Antioxidant activity and dietary fibre in durum wheat bran by-products. *Food Research International* 38(10):1167-1173
- Excelsior. 2014. Consume cada mexicano 90 kilos de tortilla al año. Disponible en: www.excelsior.com.mx Consultado el 17 de abril de 2018.
- FAO. 2001. Directrices para el Uso de Declaraciones Nutricionales y Saludables: CAC/GL 23-1997. *Codex Alimentarius*, 22º período de sesiones (1997) y enmendadas en su 24º período de sesiones. Roma.
- FAO. 1993. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. El Maíz en la Nutrición Humana. Disponible de: www.fao.org. Consultado el 13 de abril de 2018.
- FAO. 2011. Consultation R. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. FAO *Food and Nutrition Paper* 92:3-5
- FAO. 2015. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Enriquecimiento de Harina de Trigo y de Maíz. Disponible de: www.fao.org. Consultado el 18 de abril de 2018.
- FAO.2019. Perspectivas Alimentarias 2019. División de Comercio y Mercados de la FAO.
<http://www.fao.org/home/es/>
- Fardet A, Rock E, Remesy C. 2008. Is the in vitro antioxidant potential of whole grains cereals and cereal products well reflected in vivo. *Journal of Cereal* 48(2):258-276
- Fellows PG. 1990. Extrusion, Food Processing and Technology. En: "Principles and Practice", Harwood DE (ed), Great Britain, Pp 267-277

- Fernandez-Orozco R, Frias J, Zielinski H, Muñoz R, Piskula MK, Kozłowska H, Vidal-Valverde C. 2009. Evaluation of bioprocesses to improve the antioxidant properties of chickpeas. *Food Research Technology* 42:885-892
- Figuroa CJ, Martínez BF, González HJ, Sánchez SF. 1994. Modernización tecnológica del proceso de nixtamalización. *Avances y Perspectivas* 13:323-329
- Figuroa CJD, Martínez BF, González HJ, Sánchez SF, Martínez JL, Ruiz M. 1994. Modernización tecnológica del proceso de nixtamalización. *Avance y Perspectiva* 13:323-329
- Flórez-Ramos CP, Debouck DG, Gutiérrez A. 1997. Patrones de diversidad genética y domesticación en frijol tepari (*Phaseolus acutifolius* Asa Gray). *Acta Agronómica* 47(4):19-24
- Freeman GF. 1913. The tepary; a new cultivated legume from the Southwest. *Botanical Gazette* 55:395-417
- Fujita H, Yamagami T, Ohshima K. 2001. Efficacy and safety of Touchi extract, an α -glucosidase inhibitor derived from fermented soybeans, in non-insulin-dependent diabetic mellitus. *The Journal of Nutritional Biochemistry* 12:351-356
- García-Gasca T, Salazar-Olivo L, Mendiola-Olaya E, Blanco-Labra A. 2002. The effects of a protease inhibitor fraction from tepary bean (*Phaseolus acutifolius*) on *in vitro* cell proliferation and cell adhesion of transformed cells. *Toxicology in vitro* 16:229-233
- Gastélum-Avila A. 2018. Procesamiento de Extrusión para Obtener Harina Funcional de Frijol Tépari (*Phaseolus acutifolius*) con Valor Nutricional / Nutracéutico Alto. Tesis de Maestría en Ciencias, Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, SIN, MEX
- Gaxiola-Cuevas N. 2013. Capacidad Antioxidante y Antiinflamatoria de Maíces (*Zea mays* L) Criollos Pigmentados Procesados. Tesis de Maestría en Ciencias, Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, SIN, MEX
- Gaxiola-Cuevas N, Mora-Rochín S, Cuevas-Rodríguez EO, León- López L, Reyes-Moreno C, Montoya-Rodríguez A, Milán-Carrillo J. 2017. Phenolic acids profiles and cellular antioxidant activity in tortillas produced from Mexican maize landrace processed by nixtamalization and lime extrusion cooking. *Plant Foods for Human Nutrition* 72:314-320
- Gómez MH, Waniska RD, Rooney LW. 1991. Starch characterization of nixtamalized corn flour. *Cereal Chemistry* 68: 578-582

- Gómez-Aldapa C, Martínez-Bustos F, Figueroa CJD, Ordorica-Falomir CA. 1999. A comparison of the quality of whole corn tortillas made from instant corn flours by traditional or extrusion processing. *International Journal of Food Science and Technology* 34:391–399
- González RJ, Torres RL, De Greef. 2002. Extrusión - cocción de cereales. *Boletín da Sociedade Brasileira de Ciencia e Tec de Alimentos (Campinas)* 36(2):83-136
- González R, Reguera E, Mendoza L, Figueroa JM, Sánchez-Sinacio F. 2004. Physicochemical changes in the hull of corn grains during their alkaline cooking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52:3831-3837
- González de Mejía E, Guzmán-Maldonado SH, Acosta-Gallegos JA, Reynoso-Camacho R, Ramírez-Rodríguez E, Pons-Hernández JL, González-Chavira MM, Castellanos JZ, Kelly JD. 2003. Effect of cultivar and growing location on the trypsin inhibitors, tannins, and lectins of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in the semiarid highlands of Mexico. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51:5962–5966
- González E, Valadez MC, Reynoso R, Loarca G. 2005. Tannins, trypsin Inhibitors and lectin cytotoxicity in tepary (*Phaseolus acutifolius*) and common (*Phaseolus vulgaris*) beans. *Plant Foods for Human Nutrition* 60: 137–145
- Goodman MM, McK-Bird R. 1977. The races of maize IV: Tentative grouping of 219 Latin American races. *Economic Botany* 31:204-221
- Grajales-García EM, Osorio-Díaz P, Goñi I, Hervert-Hernández D, Guzmán-Maldonado S, Bello-Pérez L. 2012. Chemical composition, starch digestibility and antioxidant capacity of tortilla made with a blend of quality protein maize and black bean. *International Journal of Molecular Science* 13:286-301
- Guerrero L, Castillo J, Quiñones M, Garcia-Vallve S, Arola L, Pujadas G, Muguerza B. 2012. Inhibition of Angiotensin-converting enzyme activity by flavonoids: Structure activity relationship studies. *PLoS ONE* 7(11):e49493. doi:10.1371/journal.pone.0049493
- Guerrero-Herrera MDJ. 2018. Conocimiento de la Diversidad y Distribución Actual del Maíz Nativo y sus Parientes Silvestres en México. Version 1.5. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/jneemv> accessed via GBIF.org on 2020-02-07.
- Gutiérrez-Dorado R, Cardenas-Valenzuela OG, Alarcón-Valdéz C, Garzón-Tiznado JA, Milán-Carrillo J, Armienta-Aldana E, Reyes-Moreno C. 2008. Alimentos para niños preparado con harinas de maíz de calidad proteínica y garbanzos extrudidos. *Interciencia* 33(12):868-874

- Gutierrez-Urbe JA. 2003. Efecto de la Germinación sobre el Contenido de Isoflavonas del Frijol Negro (*Phaseolus vulgaris* L) y su Capacidad para Inhibir el Crecimiento de Células Cancerosas de Mama Hormonodependientes. Tesis de Maestría en Ciencias. *Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Campus Monterrey*, Monterrey, NL, MEX
- Guzmán-Gerónimo RI, Alarcón-Zavaleta TM, Oliart-Ros RM, Meza-Alvarado JE, Herrera-Meza S, Chávez-Servia JL. 2017. Blue Maize extract improves blood pressure, lipid profiles, and adipose tissue in high sucrose diet induced metabolic syndrome in rats. *Journal of Medicinal Food* 2:110-115
- Guzmán-Maldonado SH, Acosta-Gallegos JA, Álvarez-Muñoz MA, García-Delgado S, Loarca-Piña G. 2002. Food quality and nutraceutical potential of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.]. *Agricultura Técnica de México* 28:159–173
- Hagiwara A, Miyashita K, Nakanishi T, Sano M, Tamano S, Kado-ta T, Koda T, Nakamura M, Imaida K, Ito N, Shirai T. 2001. Pronounced inhibition by a natural anthocyanin, purple corn color, of 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo [4,5-b] pyridine (PhIP)-associated colorectal carcinogenesis in male F344 rats pretreated with 1,2-dimethylhydrazine. *Cancer Letters* 171:17-25
- Harlan JR, de Wet JMJ. 1971. Toward a rational classification of cultivated plants. *Taxon* 20:509-517.
- Hernández HE. 2005. Influencia de la L- α lisofosfatidilcolina sobre las Propiedades Térmicas y Estructurales del Almidón de Maíz Nativo. Tesis de Licenciatura. Pachuca, Hidalgo, México. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pp 02-43.
- Hernández X, Alanís FG. 1970. Estudio morfológico de cinco nuevas razas de maíz de la Sierra Madre Occidental de México: Implicaciones filogenéticas y fitogeográficas. *Agrociencia* 5: 3-30
- Hernández-López VM, Vargas-Vázquez M, Luisa P, Muruaga-Martínez JS, Hernández-Delgado S, Mayek-Pérez N. 2013. Origen, domesticación y diversificación del frijol común: Avances y perspectivas. *Revista Fitotecnia de México* 36:95–104
- Hernández-Reyes KE, Montemayor-Mora G, Pérez-Carrillo E, De la Rosa-Millán J, García-Villanueva C, Serna-Saldívar SO. 2019. Effect of soybean bagasse addition on texture, sensory properties, and protein quality of maize tortillas. *Cereal Chemistry* 96:283–291
- Hernández-Saavedra D, Mendoza-Sánchez M, Hernández-Montiel HL, Guzmán-Maldonado HS, Loarca-Piña GF, Salgado LM, Reynoso-Camacho R. 2013.

- Cooked common beans (*Phaseolus vulgaris*) protect against β -cell damage in streptozotocin-induced diabetic rats. *Plant Foods for Human Nutrition* 2:207-212
- Huth M, Dongowski G, Gebhardt E, Flamme W. 2000. Functional properties of dietary fibre enriched extrudates from barley. *Journal of Cereal Science* 32(2):115-128
- Ichikawa H, Ichiyangi T, Xu B, Yoshii Y, Nakajima M, Konishi T. 2001. Antioxidant activity of anthocyanin extract from purple black rice. *Journal of Medicinal Foods* 4:211-218.
- Idouraine A, Weber C, Kohlhepp E. 1995. Composition of tepary bean (*Phaseolus acutifolius*) of the Southwestern U.S. and Northern Mexico. *Ecology of Food and Nutrition* 33:139-147
- Idouraine A. 1993. Isolation, characterization, functional properties and biological evaluation of tepary bean (*Phaseolus acutifolius*) proteins. [Tesis de Doctorado]. The University of Arizona. 114 p.
- INEGI. 2018. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). Características de las Defunciones Registradas en México durante 2017. Comunicado de Prensa Núm. 525/18, 31 de octubre de 2018, página 1/3
- Inglett GE. 1970. Corn. In: "Culture, Processing Products", Inglett GE (ed), Wesport, CT, USA, AVI Publishing Co, Pp 123
- Iniestra-González JJ, Ibarra-Pérez FJ, Gallegos-Infante JA, Rocha-Guzmán NE, González-Laredo RF. 2005. Antinutritional factors and antioxidant activity in improved varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Agrociencia* 39: 603–610
- Inyang UE, Akindolu BE, Elijah AI. 2019. Nutrient composition, amino acid profile and antinutritional factors of nixtamalized maize flour supplemented with sprouted soybean flour. *European Journal of Nutrition and Food Safety* 9: 41-51
- Jiménez-Galindo J, Acosta-Gallegos J. 2012. Characterization of creole genotypes of tepary bean (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) and common (*Phaseolus vulgaris* L.) under rainfed. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3(8):1565-1577
- 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):884-889
- Johnson DL, Jha MN. 1993. Blue corn. En: "New Crops", Janick J, Simon JE (ed), Wiley, New York, NY, USA, pp 228-230
- Johnson BA, Rooney LW, Khan MN. 1980. Tortilla-making characteristics of micronized sorghum and corn flours. *Journal of Food Science* 46:671
- Juárez-López BA, Aparicio-Fernández X. 2012. Polyphenolics Concentration and Antiradical Capacity of Common Bean Varieties (*Phaseolus vulgaris* L.) after Thermal Treatment. In "Food Science and Food Biotechnology Essentials: A

- Contemporary Perspective”, 1st ed.; Nevárez-Moorillón GV, Ortega-Rivas E (ed), *Mexican Association of Food Science*, Durango, DGO, MEX, Pp 25–33
- Kaushik JK, Bhat R. 2003. Why is trehalose an exceptional protein stabilizer? An analysis of the thermal stability of proteins in the presence of the compatible osmolyte trehalose. *Journal of Biological Chemistry* 278(29):26458-26465
- Khanal R, Howard L, Prior R. 2009. Procyanidin content of grape seed and pomace, and total anthocyanin content of grape pomace as affected by extrusion processing. *Journal of Food Science* 74(6):H174–H182
- Krieger KM, Pollak LM, Brumm TJ, White PJ. 1998. Effects of pollination method and growing location on starch thermal properties of corn hybrids. *Cereal Chemistry* 75: 656-659
- León-López L, Reyes-Moreno C, Perales-Sánchez JXK, Milán-Carrillo J, Cuevas-Rodríguez EO, Gutiérrez-Dorado R. 2019. Supplementation of commercial nixtamalized maize with optimized extruded defatted chia seed flour to improve the nutritional and functional properties of tortillas. *Biotechnia XXI* (3): 56-66
- Leyva-Corral J, Quintero-Ramos A, Camacho-Dávila A, de Jesús Zazueta-Morales J, Aguilar-Palazuelos E, Ruiz-Gutiérrez MG, Meléndrez-Pizarro CO. 2016. Polyphenolic compound stability and antioxidant capacity of apple pomace in an extruded cereal. *LWT - Food Science and Technology* 65:228-236
- Lindeboom N, Chang PR, Tyler RT. 2004. Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: A review. *Starch / Starke* 56:89-99
- Liu RH. 2004. Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: Mechanism of action. *The Journal of Nutrition* 134(12):3479-3485
- Liu RH. 2007. Whole grain phytochemicals and health. *Journal of Cereal Science*. 46:207-219
- Llopart EE. 2011. Efectos de las Condiciones de Extrusión en las Propiedades Físicoquímicas y Funcionales de Productos Extrudidos de Sorgo Integral de Bajo Contenido de Taninos. Tesis de Maestría. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral. 141 p.
- López SJL, Ruiz CJA, Sánchez GJJ, Lépiz IR. 2005. Adaptación climática de 25 especies de frijol silvestre (*Phaseolus* spp) en la República Mexicana. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28:221-229
- López-Cervantes J, Sánchez-Machado DI, Rosas-Rodríguez JA. 2006. Analysis of free amino acids in fermented shrimp waste by high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography* 1105:106-110

- López-Martínez LX, Parkin KL, García HS. 2011. Phase II-inducing, polyphenols content and antioxidant capacity of corn (*Zea mays* L.) from phenotypes of white, blue, red and purple colors processed into masa and tortillas. *Plant Foods for Human Nutrition* 66:41-47.
- Lu TJ, Jane JL, Keeling PL, Syngletary GW. 1996. Maize starch fine structure affected by ear developmental temperature. *Carbohydrate Research* 282:157-170
- Luna-Vital DA, González de Mejía E, Mendoza S, Loarca-Piña G. 2015. Peptides present in the non-digestible fraction of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) inhibit the angiotensin-I converting enzyme by interacting with its catalytic cavity independent of their antioxidant capacity. *Food and Function* 5:1470-1479
- Luthria DL, Pastor-Corrales MA. 2006. Phenolic acids content of fifteen dry edible bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties. *Journal of Food Composition and Analysis* 19:205–211
- Maldonado-Saavedra O, Jiménez-Vázquez EN, Guapillo-Vargas MRB, Ceballo-Reyes GM, Méndez-Bolaina M. 2010. Radicales libres y su papel en enfermedades crónico-degenerativas. *Rev Med Universidad Veracruzana* 1-8
- Manzocco L, Calligaris S, Mastrocola D, Nicoli MC, Lerici CR. 2000. Review of nonenzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. *Trends in Food Science and Technology* 11(9-10): 340-346
- Martínez FH. 1997. Estudios Bioquímicos y Nutricionales en Tortillas de Maíz Elaboradas por un Proceso de Extrusión. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), Instituto Politécnico Nacional (IPN), Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, México, DF, MEX, pp: 7-35.
- Martínez PAH, Naranjo FA, Nugaray AJ. 2003. Anthocyanins, Flavonoids and Phenolic Acids Present in Querétaro and Mayocoba Black Beans and their Stability during Industrial Cooking. En: "Proceedings of the X National Congress of Biotechnology and Bioengineering", Puerto Vallarta, JAL, MEX, September 8-12
- Martínez-Flores S, González-Gallego J, Culebras JM, Tuñón MA. 2002. Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes. *Nutrición Hospitalaria* XVII (6) 271-278
- Martirosyan DM, Singh J. 2015. A new definition on functional food by FFC: what makes a new definition unique?. *Functional Foods in Health and Disease* 5:209-223
- Marzo F, Alonso R, Urdaneta E, Arricibita F, Ibañez F. 2002. Nutritional quality of extruded kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L. var. Pinto) and its effects on growth and skeletal muscle nitrogen fractions in rats. *Journal of Animal Science* 80:875-879

- Massaretto IL, Madureira-Alves MF, Mussi de Mira NV, Carmona AK, Lanfer-Marquez, UM. 2011. Phenolic compounds in raw and cooked rice (*Oryza sativa* L.) and their inhibitory effect on the activity of angiotensin I-converting enzyme. *Journal of Cereal Science* 54:263-240
- Mattila P, Kumpulainen J. 2002. Determination of free and total phenolic acids in plant-derived food by HPLC with diode-array detection. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50(13): 3660-3667
- Mendoza FC. 1977. Method for obtaining nixtamaled flours. United States 3859452. Washington, DC: United States Patent and Trademark Office
- Messina V. 2014. Nutritional and health benefits of dried beans. *American Journal of Clinical Nutrition* 100 (Suppl. 1):437S–442S
- Miguel MA, Arellano-Vázquez JL, García de los Santos G, Miranda-Colin S, Mejía-Contreras J, González-Cosío FV. 2004. Variedades criollas de maíz azul raza chalqueño. Características agronómicas y calidad de la semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27:9-15
- Milán-Carrillo J, Gutiérrez-Dorado R, Cuevas-Rodríguez EO, Garzón-Tiznado JA, Reyes-Moreno C. 2004. Nixtamalized flour from quality protein maize (*Zea mays* L). Optimization of alkaline processing. *Plant Foods for Human Nutrition* 59:35-44
- Milán-Carrillo J, Gutiérrez-Dorado R, Perales-Sánchez JXK, Cuevas-Rodríguez EO, Ramírez-Wong R, Reyes- Moreno C. 2006. The optimization of the extrusion process when using maize flour with a modified amino acid profile for making tortillas. *International Journal of Food Science and Technology* 41:727-736
- Milán-Carrillo J., Reyes-Moreno C., Camacho-Hernández IL., Rouzaud-Sandez O. 2002. Optimization of extrusion process to transform hardened chickpeas (*Cicer arietinum* L) into a useful product. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82: 1718-1728
- Mishra S, Raid T. 2006. Morphology and functional properties of corn, potato and tapioca starches. *Food Hydrocolloids* 20:557-566
- Molina MR, Letona M, Bressani R. 1977. Drum-drying for the improved production of instant tortilla flour. *Journal of Food Science* 42:432-1434
- Montoya-Rodríguez A, Milán-Carrillo J, Reyes-Moreno C, Día V, González de Mejía E. 2014. Pepsin-pancreatin protein hydrolysates from extruded amaranth inhibit markers of atherosclerosis in LPS-induced THP-1 macrophages-like human cells by reducing expression of proteins in LOX-1 signaling pathway. *Proteome Science* 12,30
- Montoya-Rodríguez A, González de Mejía E, Dia VP, Reyes-Moreno C, Milán-Carrillo J. 2014. Extrusion improved the anti-inflammatory effect of amaranth (*Amaranthus*

- hypochondriacus*) hydrolysates in LPS-induced human THP-1 macrophage-like and mouse RAW 264.7 macrophages by preventing activation of NF- κ B signaling *Molecular Nutrition and Food Research* 58:1028–1041
- Montoya-Rodríguez A, Milán-Carrillo J, Reyes-Moreno C, González de Mejía E. 2015. Characterization of peptides found in unprocessed and extruded amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) pepsin / pancreatin hydrolysates. *International Journal of Molecular Sciences* 16:8536-8554
- Mora-Escobedo R, Paredes-López O, Gutiérrez-López GF. 1994. Effect of germination on the rheological and functional properties of amaranth seed. *LWT – Food Science and Technology* 24:241-246
- Mora-Rochín S, Gaxiola-Cuevas N, Gutiérrez-Urbe JA, Milán-Carrillo J, Milán-Noris EM, Reyes-Moreno C, Cuevas-Rodríguez EO. 2016. Effect of traditional nixtamalization on anthocyanin content and profile in Mexican blue maize (*Zea mays* L.) landraces. *LWT - Food Science and Technology* 68:563-569
- Mora-Rochín S, Gutiérrez-Urbe JA, Serna-Saldivar SO, Sánchez-Peña P, Reyes-Moreno C, Milán-Carrillo J. 2010. Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization or extrusion cooking. *Journal of Cereal Science* 52(3):502-508
- Moreno-Franco B, León-Latre M, Andrés-Esteban EM, Ordovás JM, Casasnovas JA, Peñalvo JL. 2014. Soluble and insoluble dietary fibre intake and risk factors for cvd and metabolic syndrome in middle-aged adults: The AWHS cohort. *Atherosclerosis* 235:e279–e280
- Mudryj AN, Yu N, Aukema HM. 2014. Nutritional and health benefits of pulses. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism* 39:1197–1204
- Nayak B, Liu RH, Tang J. 2015. Effect of processing on phenolic antioxidants of fruits, vegetables, and grains - A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 55(7):887-918
- Nicoli M, Anese M, Parpinel M. 1999. Influence of processing on the antioxidant properties of fruit and vegetables. *Trends in Food Science and Technology* 10(3):94-100
- NOM 2010. Norma Oficial Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002.
- Olivas-Aguirre FJ, Wall-Medrano A, González-Aguilar GA, López-Díaz JA, Álvarez-Parrilla E, De la Rosa LA, Ramos-Jiménez A. 2015. Taninos hidrolizables; bioquímica, aspectos nutricionales y analíticos y efectos en la salud. *Nutrición Hospitalaria* 31(1):55-66
- Ombra MN, d'Acierno A, Nazzaro F, Spigno P, Riccardi R, Zaccardelli M, Pane C, Coppola R, Fratianni F. 2018. Alpha-amylase, α -glucosidase and lipase inhibiting

- activities of polyphenol-rich extracts from six common bean cultivars of Southern Italy, before and after cooking. *International Journal of Food Science and Nutrition* 7:824-834
- OMS 2015. Preguntas y respuestas sobre la hipertensión. Disponible de: www.who.int Consultado el 26 de abril de 2018.
- OMS. 1985. Informe de una Reunión Consultiva Conjunta FAO/OMS/UNU de Expertos. Necesidades de Energía y Proteínas. 58-74 127-138. Serie de Informes Técnicos nº 724 Ginebra 1985
- OMS. 2018. Organización Mundial de la Salud. Departamento de Nutrición. Disponible de: www.who.int . Consultado el 11 de abril de 2018.
- Ordorica-Falomir C. 1988. Obtención de Aislados Proteicos por Micelización y Precipitación Isoeléctrica a partir de Pasta de Cártamo. Tesis de Doctorado CINVESTAV-IPN Unidad Irapuato, Guanajuato, GTO, México
- Ospina-Machado JE. 2002. Características Físico Mecánicas y Análisis de Calidad de Granos. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Paredes-López O, Saharópulos-Paredes ME. 1983. Maize - A review of tortilla production technology. *Bakers Digest* 13:16-25
- Paredes-López O, Guevara-Lara F, Bello-Pérez LA. 2006. Los Alimentos Mágicos de las Culturas Indígenas Mesoamericanas. Fondo de Cultura Económica, México, MEX, ISBN: 978 968 16 7567 2, Pp 196
- Paredes-López O, Serna-Saldívar SO, Guzmán-Maldonado HS. 2000. Los Alimentos Mágicos de las Culturas Indígenas de México- El Caso de la Tortilla. Primera edición, Colegio de Sinaloa, Culiacán, SIN, MEX, pp 7-21
- Paredes-López O., Guevara-Lara F., Bello-Pérez LA. 2009. La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Revista Ciencias* 92-93. Disponible en: www.revistaciencias.unam.mx. Consultado el 17 de abril de 2018
- Pastor-Cavada E, Drago S, González R, Juan R, Pastor J, Alaiz M, Vioque J. 2011. Effects of the addition of wild legumes (*Lathyrus annuus* and *Lathyrus clymenum*) on the physical and nutritional properties of extruded products based on whole corn and brown rice. *Food Chemistry* 128:961-967
- Patil B, Jayaprakasha G, Chidambara K, Vikram A. 2009. Bioactive compounds: Historical perspectives, opportunities, and challenges. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57 (18): 8142 – 8160
- Pedreschi R, Cisneros-Zevallos L. 2007. Phenolic profiles of Andean purple corn (*Zea mays* L.). *Food Chemistry* 100:956-963

- Perales RH, Golicher D. 2011. Modelos de Distribución para las Razas de Maíz en México y Propuesta de Centros de Diversidad. Informe Técnico preparado para la CONABIO. ECOSUR. Chiapas, MEX, 108 pp
- Pérez-Navarrete C, Cruz-Estrada RH, Chel-Guerrero L, Betancur-Ancona D. 2006. Caracterización física de extrudidos preparados con mezclas de harina QPM (*Zea mays* L.) y frijol lima (*Phaseolus lunatus* L.). *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 5: 145-155
- Pineda-Hidalgo KV, Méndez-Marroquín KP, Vega-Alvarez E, Chávez-Ontiveros J, Sánchez-Peña P, Garzón-Tiznado JA, Vega- García MO, López-Valenzuela JA. 2013. Microsatellite-based genetic diversity among accessions of maize landraces from Sinaloa in Mexico. *Hereditas* 150:53–59
- Porch TG, Cichy K, Wang W, Brick M, Beaver JS, Santana-Morant D, Grusa MA. 2017. Nutritional composition and cooking characteristics of tepary bean (*Phaseolus acutifolius* Gray) in comparison with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution* 64:935–953
- Ragae S, Seetharaman K, Abdel-Aal E-SM. 2014. The impact of milling and thermal processing on phenolic compounds in cereal grains. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 54(7):837-849
- Ramírez-Jaspeado R, Palacios-Rojas N, Funes J, Pérez S, Donnet ML. 2018. Identification of potential areas in Mexico for intervention with biofortified high-zinc maize. *Revista Fitotecnia Mexicana* 4:327–337
- Ramírez-Torres G, Ontiveros N, Lopez-Teros V, Ibarra-Diarte JA, Reyes-Moreno C, Cuevas-Rodríguez EO, Cabrera-Chávez F. 2017. Amaranth protein hydrolysates efficiently reduce systolic blood pressure in spontaneously hypertensive rats. *Molecules* 22:1905
- Rathod RP, Annapure US. 2016. Effect of extrusion process on antinutritional factors and protein and starch digestibility of lentil splits. *LWT - Food Science and Technology* 66:114-123
- Raya-Pérez JC, Gutiérrez-Benicio GM, Pimentel JGR, Prieto JC, Aguirre-Mancilla CL. 2013. Characterization of proteins and mineral content of two bean landraces from Mexico. *Agronomía Mesoamericana* 25:1–11
- Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine* 26:1231-1237
- Reiners RA, Wall JS, Inglett GE. 1973. Industrial Uses of Cereals, Symposium Proceedings, Pomeranz Y (ed), *American Association of Cereal Chemists*, St Paul, MN, USA, Pp 85

- Rendón-Villalobos R, Ortiz-Sánchez A, Solorza-Feria J, Trujillo-Hernández CA, 2012. Formulation, physicochemical, nutritional and sensorial evaluation of corn tortillas supplemented with chía seed (*Salvia hispanica* L.). *Czech Journal of Food Science* 30(2):118–125
- Repo-Carrasco-Valencia R, de La Cruz AA, Alvarez JCI, Kallio H. 2009. Chemical and functional characterization of kaniwa (*Chenopodium pallidicaule*) grain, extrudate and bran. *Plant Foods for Human Nutrition* 64(2):94-101
- Reyes-Moreno C, Ayala-Rodríguez AE, Milán-Carrillo J, Mora-Rochín S, López-Valenzuela JA, Valdez-Ortiz A, Paredes López O, Gutiérrez-Dorado R. 2013. Production of nixtamalized flour and tortillas from amarantin transgenic maize lime-cooked in a thermoplastic extruder. *Journal of Cereal Science* 58 (3):465-471
- Reyes-Moreno C, Reyes-Fernández PC, Cuevas-Rodríguez EO, Milán-Carrillo J, Mora-Rochín S. 2018. Changes in Nutritional Properties and Bioactive Compounds in Cereals During Extrusion Cooking, En: “Extrusion of Metals, Polymers, and Food Products”, Chapter 6, Sayyad Zahid Qamar (ed), IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.68753
- Reyes-Rivas E. 2008. Historia, naturaleza y cualidades alimentarias del frijol. *Revista Investigación Científica* 4(3) ISSN 1870–8196.
- Reynoso-Camacho R, González de Mejía E, Loarca-Piña G. 2003. Purification and acute toxicity of a lectin extracted from tepary bean (*Phaseolus acutifolius*). *Food and Chemical Toxicology* 41:21-27.
- Reynoso-Camacho R, Guerrero-Villanueva G, de Dios Figueroa J, Gallegos-Corona MA, Mendoza S, Loarca-Piña G, Ramos-Gomez M. 2015. Anticarcinogenic effect of corn tortilla against 1, 2-Dimethylhydrazine (DMH)-induced colon carcinogenesis in Sprague–Dawley rats. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70(2):146-152
- Reynoso Camacho R, Ríos-Ugalde MC, Torres-Pacheco I, Acosta-Gallegos JA, Palomino-Salinas AC, Ramos-Gómez M, González-Jasso E, Guzmán-Maldonado SH. 2007. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) consumption and its effects on colon cancer in Sprague–Dawley rats. *Agricultura Técnica de México* 33:43–52
- Riaz M, Asif M, Ali R. 2009. Stability of vitamins during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 49:361-368
- Rodríguez-Castellanos W, Martínez-Bustos F, Jiménez-Arévalo O, González-Niñez R, Galicia-García T. 2013. Functional properties of extruded and tubular films of sorghum starch-based glycerol and *Yucca schidigera* extract. *Industrial Crops and Products* 44:405-412

- Rodríguez-Miranda J, Ramírez-Wong B, Vivar-Vera M, Solis-Soto M, Gómez-Aldapa C, Castro-Rosas J, Medrano-Roldan H, Delgado-Licon E. 2014. Effect of bean flour concentration (*Phaseolus vulgaris* L.), moisture content and extrusion temperature on the functional properties of aquafeeds. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 13:649-663
- Rosado JL, Camacho-Solís R, Bourges H. 1999. Adición de vitaminas y minerales a harinas de maíz y de trigo en México. *Salud Pública de México* 41(2):130-137
- Ruiz-Gutiérrez MG, Sánchez-Madrigal MA, Quintero-Ramos A. 2018. The Extrusion Cooking Process for the Development of Functional Foods, Extrusion of Metals, Polymers and Food Products, Sayyad Zahid Qamar, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.68741
- SAGARPA 2016. Aumenta producción de maíz 12.7 por ciento en cuatro años. Disponible en: www.sagarpa.gob.mx Consultado el 27 de abril de 2018.
- Salas-López F. 2015. Efecto de la Germinación sobre la Actividad Antioxidante y Compuestos Bioactivos de Frijol Tépari (*Phaseolus acutifolius*). Optimización del Bioproceso. Tesis de Maestría en Ciencias, Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, SIN, MEX
- Salas-López F, Gutiérrez-Dorado R, Milán-Carrillo J, Cuevas-Rodríguez EO, Perales-Sánchez JJK, Mora-Rochín S, Reyes-Moreno C. 2018. Nutritional and bioactive potential of a desert underutilized legume (*Phaseolus acutifolius* L). Optimization of bioprocess conditions to improve antioxidant activity and phenolics. *Food Science and Technology* (Campinas) 38(Suppl. 1): 254-2
- Salas-López F. 2020. Identificación de Compuestos Bioactivos y Propiedades Nutracéuticas de Frijol Tépari (*Phaseolus acutifolius*) Bioprocesado en Condiciones Óptimas de Germinación. Tesis doctoral (Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos). Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, SIN, MEX
- Salinas-Moreno Y. 2000. Antocianinas en el Grano de Maíces Criollos Mexicanos. Tesis de Doctorado. Instituto de Recursos Genéticos y Productividad. Fisiología Vegetal. Colegio de Posgraduados. México. 92 p
- Salinas-Moreno Y, Cruz-Chávez FJ, Díaz-Ortiz SA, Castillo- González F. 2012. Granos de maíces pigmentados de Chiapas, características físicas, contenido de antocianinas y valor nutracéutico. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:33–41

- Salinas-Moreno Y, Martínez-Bustos F, Soto-Hernández M, Ortega- Paczka R, Arellano-Vázquez JL. 2003. Effect of alkaline cooking process on anthocyanins in pigmented maize grain. *Agrociencia* 37:617-628
- Salinas-Moreno Y, Soria-Ruiz J, Espinoza-Trujillo E. 2010. Aprovechamiento y Distribución del Maíz Azul en el Estado de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto Técnico Núm. 42 Pp 56. Disponible en: www.inifap.gob.mx. Consultado el 13 de abril de 2018.
- Salunke DK, Kadan SS, Chavan JK. 1985. Postharvest Biotechnology of Food Legumes. CRC Press Inc (ed). Boca Ratón, FL, USA,
- Sánchez JJ. 1989. Relationships Among the Mexican Races of Maize. Tesis Doctorado. North Caroline State University, Department of Crop Science. Raleigh, NC, USA, pp 187
- Sánchez-Almaraz R, Martín-Fuentes M, Palma-Milla S, López-Plaza B, Bermejo-López LM., Gómez-Candela C. 2015. Indicaciones de diferentes tipos de fibra en distintas patologías. *Nutrición Hospitalaria* 31(6):2372-2383
- Sánchez-Madrigal MA, Quintero-Ramos A, Martínez-Bustos F, Meléndez-Pizarro CO, Ruiz-Gutiérrez MG, Camacho-Dávila A, Torres-Chávez P, Ramírez-Wong B. 2015. Effect of different calcium sources on the bioactive compounds stability of extruded and nixtamalized blue maize flours. *Journal of Food Science and Technology* 52(5):2701-2710
- Sarwar MH, Sarwar MF, Sarwar M, Qadri NA, Moghal S. 2013. The importance of cereals (*Poaceae*: Gramineae) nutrition in human health: A review. *Journal of Cereals and Oilseeds* 4(3):32-35
- Sathe S, Deshpande S, Alunkhe D. 1984. Dry beans of *Phaseolus*: A review Part 2. Chemical composition: Carbohydrates, fiber, minerals, vitamins and lipids. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 21(1):41-93
- Schrimshaw NS., Altschul AM. 1999. Amino acid fortification of protein foods. Cambridge, MASS, MIT Press, Pp 184-204
- SE. 2012. Secretaría de Economía. Análisis de la Cadena de Valor Maíz-Tortilla: Situación Actual y Factores de Competencia Local. Dirección General de Industrias Básicas. Distrito Federal, México, 38 p.
- Şensoy Í, Rosen RT, Ho C-T, Karwe MV. 2006. Effect of processing on buckwheat phenolics and antioxidant activity. *Food Chemistry* 99(2):388-393
- Serna-Saldívar SO. 1996. Química, Almacenamiento e Industrialización de los Cereales. AGT Editor SA. México, DF, MEX, Pp 519
- Serna-Saldívar SO, Cannet R, Vargas J, González M, Bedolla S, Medina C. 1988. Effect of soybean and sesame addition on the nutritional value of maize and

- decorticated sorghum tortillas produced by extrusion cooking. *Cereal Chemistry* 65(1):44-48
- Serna-Saldívar SO, Gutiérrez-Urbe JA, Mora-Rocín S, García-Lara S. 2013. Potencial nutracéutico de los maíces criollos y cambios durante el procesamiento tradicional y con extrusión. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(3):295-304
- Sharma P, Gujral H, Singh B. 2012. Antioxidant activity of barley as affected by extrusion cooking. *Food Chemistry* 131:1406-1413.
- Sheerens J, Tinsley A, Abbas I, Weber C, Berry J. 1983. The nutritional significance of tepary bean consumption. *Desert Plants* 5:11-14
- Siddiq M, Uebersax MA. 2013. Dry Beans and Pulses Production, Processing and Nutrition. Wiley-Blackwell, Iowa, USA, <https://doi.org/10.1002/9781118448298>
- Silva-Cristobal L, Osorio-Díaz P, Tovar J, Bello-Pérez LA. 2010. Chemical composition, carbohydrate digestibility, and antioxidant capacity of cooked black bean, chickpea, and lentil Mexican varieties. *C y TA Journal of Food* 8:7–14
- Singh S, Gamlath S, Wakeling L. 2007. Nutritional aspects of food extrusion: A review. *International Journal of Food Science and Technology* 42(8):916-929
- Singleton VL, Orthofer R, Lamuela-Raventos RM. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology* 299:152-178
- Singkhornart S, Edou S, Ryu G. 2013. Influence of germination and extrusión with CO2 injection on physicochemical properties of wheat extrudates. *Food Chemistry* 143: 122-131
- Sproston MJ, Akoh CC. 2016. Antioxidative Effects of a glucose-cysteine maillard reaction product on the oxidative stability of a structured lipid in a complex food emulsion. *Journal of Food Science* 81(12):2923-2931
- Stojceska V, Ainsworth P, Plunkett A, Ibanoglu S. 2009. The effect of extrusion cooking using different water feed rates on the quality of ready-to-eat snacks made from food by-products. *Food Chemistry* 114:226–232
- Stojceska V, Ainsworth P, Plunkett A, İbanođlu Ş. 2010. The advantage of using extrusion processing for increasing dietary fibre level in gluten-free products. *Food Chemistry* 121(1):156-164
- Sun-Waterhouse D, Zhao M, Waterhouse GI. 2014. Protein modification during ingredient preparation and food processing: Approaches to improve food processability and nutrition. *Food and Bioprocess Technology* 7(7):1853-1893
- Tester RF, Karkalas J, Qi X. 2004. Starch-composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science* 39:151-165

- Thachil MT, Chouksey MK, Gudipati V. 2014. Amylose-lipid complex formation during extrusion cooking: Effect of added lipid type and amylose level on corn-based puffed snacks. *International Journal of Food Science and Technology* 49(2):309-316
- Thompson HJ, McGinley JN, Neil ES, Brick MA. 2017. Beneficial effects of common bean on adiposity and lipid metabolism. *Nutrients* 9(9) doi: 10.3390/nu9090998
- Tran QD, Hendriks WH, Van der Poel AFB. 2008. Effects of extrusion processing on nutrients in dry pet food. *Journal Science and Food Agricultural* 88:1487-1673.
- Treviño-Mejía D, Luna-Vital DA, Gaytán-Martínez M, Mendoza S, Loarca-Piña G. 2016. Fortification of commercial nixtamalized maize (*Zea mays* L) with common bean (*Phaseolus vulgaris* L) increased the nutritional and nutraceutical content of tortillas without modifying sensory properties. *Journal of Food Quality* 39:569–579
- Uriarte-Aceves PM, Cuevas-Rodríguez EO, Gutiérrez-Dorado R, Mora-Rochín S, Reyes-Moreno C, Puangraphant S, Milán-Carrillo J. 2015. Physical, compositional, and wet-milling characteristics of Mexican blue maize (*Zea mays* L.) landrace. *Cereal Chemistry* 92(5):491-496
- Urias-Lugo DA, Heredia JB, Serna-Saldívar SO, Muy-Rangel MD, Valdéz-Torres JB. 2015a. Total phenolics, total anthocyanins and antioxidant capacity of native and elite blue maize hybrids (*Zea mays* L.). *CyT A – Journal of Food* 13:336–339
- Urias-Lugo DA, Heredia JB, Muy-Rangel MD, Valdez-Torres JB, Serna-Saldívar SO, Gutiérrez-Urbe JA. 2015b. Anthocyanins and phenolic acids of hybrid and native blue maize (*Zea mays* L.) extracts and their antiproliferative activity in mammary (MCF7), liver (HepG2), colon (Caco2 and HT29) and prostate (PC3) cancer cells. *Plant Foods for Human Nutrition* 70:193–199
- Urias-Peraldí M, Gutiérrez-Urbe JA, Preciado-Ortiz RE, Cruz- Morales AS, Serna-Saldívar SO, García-Lara S. 2013. Nutraceutical profiles of improved blue maize (*Zea mays*) hybrids for subtropical regions. *Field Crop Research* 141:69–76
- Utrilla-Coello RG, Agama-Acevedo E, Barba R, Martínez-Salgado JL, Rodríguez-Ambríz SL, Bello-Pérez LA. 2009. Blue maize: Morphology and starch synthase characterization of starch granule. *Plant Foods for Human Nutrition* 64: 18-24.
- Valencia-Mejía E, Batista KA, Fernández JJA, Fernandes KF. 2019. Antihyperglycemic and hypoglycemic activity of naturally occurring peptides and protein hydrolysates from easy-to-cook and hard-to-cook bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Research International* 121:238-246
- Valls PA. 1993. El Proceso de Extrusión en Cereales y Habas de Soja I. Efecto de la Extrusión sobre la Utilización de Nutrientes. IX Curso de Especialización FEDNA. Barcelona, España.

- 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
- Vaz L, Arêas JAG. 2010. Recovery and upgrading bovine rumen protein by extrusion: Effect of lipid content on protein disulphide cross-linking, solubility and molecular weight. *Meat Science* 84(1):39-45
- Véles-Medina JJ. 2004. Caracterización de Tostadas Elaboradas con Maíces Pigmentados y Diferentes Métodos de Nixtamalización. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Aplicada (CICATA), Instituto Politécnico Nacional (IPN) de Querétaro, Santiago de Querétaro, QRO, MEX Pp 205
- Venereo-Gutiérrez JR. 2002. Daño oxidativo, radicales libres y antioxidantes. *Revista Cubana de Medicina Militar* 31(2):126-33
- Verhoeckx KC, Vissers YM, Baumert JL, Faludi R, Feys M, Flanagan S, Herouet-Guicheney C, Holzhauser T, Shimojo R, van der Bolt N, Wichers H, Kimber I. 2015. Food processing and allergenicity. *Food and Chemical Toxicology* 80:223-240
- Viscidi KA, Dougherty MP, Briggs J, Camire ME. 2004. Complex phenolic compounds reduce lipid oxidation in extruded oat cereals. *LWT - Food Science and Technology* 37(7): 789-796
- Wang T, He F, Chen G. 2014. Improving bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds in cereal grains through processing technologies: A concise review. *Journal of Functional Foods* 7:101-111
- Watson SA. 1987. Structure and composition corn, chemistry and technology. *Cereal Chemistry* 53-82.
- Wellhausen EJ, Roberts LM, Hernández X, Mangelsdorf PC. 1951. Razas de Maíz en México. Su Origen, Características y Distribución. Oficina de Estudios Especiales-Secretaría de Agricultura y Ganadería. Folleto Técnico Núm. 55. México DF, México
- WHO. 2017. Organización Mundial de la Salud. Enfermedades no transmisibles. Available from: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs355/es/>
- WHO. 2019. Organización Mundial de la Salud. Enfermedades no transmisibles. Available from: <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/noncommunicable-diseases>
- Wellhausen EJ. 1990. Algunas reflexiones sobre el Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos y Animales (PCCMCA). *Agronomía Mesoamericana* 1:97-106
- Wolf MJ, Buzan CL, MacMasters MM, Rist CE. 1952. Structure of the mature corn kernel. I Gross anatomy and structural relationships. *Cereal Chemistry* 29:321-333

- Wrolstad RE, Durst RW, Giusti MM, Rodriguez-Saona LE. 2002. Analysis of Anthocyanins in Nutraceuticals. En: "Quality Management of Nutraceuticals", Ho CT, Zheng QY (ed), Washington, DC, *American Chemical Society*
- Wu M, Arntfield S. 2016. Influence of added soy presscake and soy flour on some physical and sensory properties of corn tortillas. *Journal of Food Science* 81(10):s2552-s2558
- Zazueta-Morales JJ, Jacobo-Valenzuela N, Aguilar-Palazuelos E, Limón-Valenzuela V, Camacho-Hernández IL. 2011. Extrusión Cocción en el Procesamiento de Maíz: Cambios Físicos, Químicos y Calidad del Producto. Simposio Internacional sobre Tecnologías Convencionales y Alternativas en el procesamiento del maíz. Chihuahua, CHI, MEX, 3-5 agosto.
- Zielinski H, Kozłowska H, Lewczuk B. 2001. Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 2(3):159-169

Abreviaturas

AACC	<i>American Association of Cereal Chemists</i> (Asociación Americana de Químicos en Cereales)
α	Alfa
AAE	Aminoácidos esenciales
AAox	Actividad antioxidante
ADN	Ácido desoxirribonucleico
AF	Ácidos fénolicos
Ant	Antocianinas totales
AOAC	<i>Association of Official Analytical Chemists</i> (Asociación Oficial de Químicos Analíticos)
aw	actividad de agua
bs	base seca
β	Beta
°C	grado (s) Celsius
Ca	Calcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Calcio
CFT	Compuestos fenólicos totales
cm	Centímetro(s)
col.	Colaborador(es)
C-PER	Relación de eficiencia proteínica calculada
CFT	Compuestos fenólicos totales
CQ	Calificación química
DPIV	Digestibilidad proteínica <i>in vitro</i>
EAG	equivalentes de ácido gálico
EtOH	Etanol
EUA	Estados Unidos de América
FAO	Food and Agriculture Organization (Organización para los Alimentos y la Agricultura)
FDT	Fibra dietaria total
Fig	Figura

FT	Flavonoides totales
g	gramo(s)
h	Hora(s)
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno
ha	Hectárea(s)
HCl	Ácido clorhídrico
HFTC	Harina de frijol tépari crudo
HFTEO	Harina de frijol tépari extrudida optimizada
hL	Hectolitro(s)
HMAC	Harina de maíz azul crudo
HMAEO	Harina de maíz azul extrudido optimizada
HMN	Harina de maíz nixtamalizado
HR	Humedad relativa
HTA	Hipertensión arterial
IAA	Índice de absorción de agua
ISA	Índice de solubilidad de agua
IIAA	Índice de inhibición de α -amilasa
IIAG	Índice de inhibición de α -glucosidasa
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
K	Potasio
kg	kilogramo(s)
L	Litro(s)
mg	miligramo(s)
μ g	microgramo (s)
μ L	microlitro (s)
mL	mililitro(s)
mm	Milímetro(s)
mM	milimolar
μ m	micromol
NaOH	Hidróxido de Sodio
NF	Nixtamalización fraccionada

O ₂	Superóxido
O ₂	Oxígeno
OH-	Radicales hidroxilo
OMS	Organización Mundial de la Salud
%	Porcentaje
P	Fósforo
pH	Potencial de hidrógeno
ROO-	Peróxido
ROS	Reactive oxygen species (Especies reactivas de oxígeno)
rpm	Revoluciones por minuto
TAN	Taninos
TE	Temperatura de extrusión
UNIMTAC	Unión Nacional de Industriales de Molinos y Tortillerías
VB	Valor biológico
VT	Velocidad de tornillo