



Universidad Autónoma de Sinaloa
Facultad de Ciencias Químico Biológicas
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

**Optimización del Proceso de Extrusión de
Semillas de Chía (*Salvia hispanica* L). Efecto
sobre Valor Nutricional, Compuestos
Bioactivos y Actividad Antioxidante**

T E S I S

que presenta

IBQ Alfa Hatzue Ley Osuna

para obtener el grado de

Maestra en Ciencia

y

Tecnología de Alimentos

Directores de Tesis

Dr Roberto Gutiérrez Dorado

Dr Cuauhtémoc Reyes Moreno

Culiacán de Rosales, Sinaloa, México

Abril 2018

Presentación

El presente trabajo de investigación, titulado “**Optimización del Proceso de Extrusión de Semillas de Chía (*Salvia hispanica* L). Efecto sobre Valor Nutricional, Compuestos Bioactivos y Actividad Antioxidante**” se desarrolló en el “Laboratorio de Bioprocesos y Alimentos Funcionales”, Programa Regional de Posgrado en Biotecnología, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa. Los C Dr Jorge Milán Carrillo, Dr Roberto Gutiérrez Dorado y Dr Cuauhtémoc Reyes Moreno, participaron como Asesores Académicos. Los dos últimos investigadores fungieron como Directores de Tesis. Alfa Hatzue Ley Osuna recibió Beca Nacional para la realización de estudios de Posgrado (Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Culiacán, Sinaloa el día 10 de junio del 2020, la que suscribe Alfa Hatzue Ley Osuna alumna del Programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de los alimentos con número de cuenta 0437894-6, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias Químico Biológica, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Roberto Gutiérrez Dorado y Dr. Cuauhtémoc Reyes Moreno y cede los derechos del trabajo titulado “Optimización del Proceso de Extrusión de Semillas de Chía (*Salvia hispanica* L). Efecto sobre Valor Nutricional, Compuestos Bioactivos y Actividad Antioxidante”, 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.

Alfa Hatzue Ley Osuna

Nombre completo y firma

Agradecimientos

Al Programa “Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos”, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, por abrirme sus puertas y permitirme realizar estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el otorgamiento de Beca Nacional para la realización de estudios de posgrado.

A los Profesores-Investigadores del Programa de “Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, FCBQ-UAS, por compartir sus conocimientos y experiencias para ayudar a mi formación académica.

A mis Asesores Académicos (Dr Roberto Gutiérrez Dorado, Dr Cuauhtémoc Reyes Moreno, Dr Jorge Milán Carrillo) por depositar su confianza en mi y brindarme la oportunidad de trabajar bajo su asesoría.

A mis Compañeros de Generación 2014-2016 por los momentos compartidos. En especial al “Equipo de Extrusión” con el que disfruté de buenos momentos de convivencia y deliciosas comidas y postres; ahí encontré no sólo a una compañera de laboratorio, sino a una amiga, Laura Celeste, con la que compartí muchas cosas, desde maratones de extrusión y ABTS hasta una boda en Los Mochis. Luis Ángel, muchas gracias por tu amistad y apoyo.

A mis Compañeros de Laboratorio (Brenda, Jorge, Denise, Julieta) por orientarme y compartir sus experiencias. A Mónica, Orlando, Malenny, Fernanda y Melissa les agradezco por los gratos momentos de convivencia. Yuri y Dulce: me dio mucho gusto coincidir con ustedes y tener la oportunidad de conocerlas y desarrollar una amistad.

A Saúl, Alejandra y Librado les agradezco por apoyarme en gran manera, gracias a su apoyo este trabajo pudo concluirse. Xiomara: gracias por tu excelente disposición a ayudar en todo momento, por estar al pendiente y por tu orientación y guía, además de compartir con nosotros tu delicioso sazón. Mario, fue muy grato coincidir de nuevo, después de 5 años, gracias por tu paciencia y por ayudarme desde un inicio, así como hacerme partícipe de un momento muy importante en tu vida. Daniel y Fernando: les agradezco la ayuda brindada en el laboratorio y los agradables momentos compartidos.

A mis amigos por apoyarme en momentos difíciles y por escucharme y darme ánimos y por confiar en mí en todo momento. En especial a mi tía Malena, por orientarme y compartir conmigo su experiencia, por pasar incontables tardes ayudándome y no desesperarse conmigo. A mi maravillosa familia porque son un pilar fundamental en mi vida. A mis padres, que han estado conmigo desde que tengo memoria. A mis hermanas: la gente dice que nos parecemos y siempre lo negamos; somos más parecidas de lo que decimos e invariablemente estamos ahí como los mosqueteros “una para todas y todas para una”.

A todos los que han hecho posible la realización de este trabajo.

INDICE GENERAL

	Pág.
INDICE GENERAL	iii
INDICE DE CUADROS	vi
INDICE DE FIGURAS	vii
I RESUMEN	1
ABSTRACT	2
II INTRODUCCIÓN	3
III REVISIÓN DE LA LITERATURA	6
A CHÍA (<i>Salvia hispanica</i> L)	6
1 Generalidades	6
2 Taxonomía / Características agronómicas	9
a Clasificación taxonómica	9
b Aspectos agronómicos	12
3 Estadísticas de producción	13
4 Nutrientes en semilla de chía (<i>Salvia hispanica</i> L)	15
a Proteínas	15
b Lípidos	15
c Carbohidratos	15
d Minerales y vitaminas	18
5 Valor nutricional de la semilla de chía (<i>Salvia hispanica</i> L)	18
a Valor biológico de las proteínas	18
1) Aminoácidos esenciales (AAE)	21
2) Digestibilidad proteínica	21
3) Indicadores del valor biológico de las proteínas	23
a) Relación de eficiencia proteínica (PER)	23
b) Digestibilidad proteínica corregida por contenido de aminoácidos esenciales (PDCAAS)	24
b Ácidos grasos esenciales	25
c Fibra dietaria	28
6 Fitoquímicos en semilla de chía (<i>Salvia hispanica</i> L)	29
a Compuestos fenólicos totales	29
7 Propiedades nutraceuticas de la semilla de chía (<i>Salvia hispanica</i> L)	29
a Actividad antioxidante (AAox)	29
e Otras propiedades	29
8 Oferta y demanda actuales, tendencia	35
B PROCESO DE EXTRUSIÓN	36
1 Generalidades	36
2 Efecto de la extrusión sobre la composición química	44
3 Efecto de la extrusión sobre el valor nutricional	48
4 Efecto de la extrusión sobre niveles y perfiles de fitoquímicos	49
5 Efecto de la extrusión sobre actividad antioxidante y propiedades	50

	nutracéuticas	
	6 Efecto de la extrusión sobre factores antinutricionales	53
IV	JUSTIFICACIÓN	56
V	HIPOTESIS	57
VI	OBJETIVOS	58
	A OBJETIVO GENERAL	58
	B OBJETIVOS ESPECÍFICOS	58
VII	MATERIALES Y MÉTODOS	59
	A MATERIALES	59
	B MÉTODOS	59
	1 Características físicas de las semillas de chía	59
	a Dimensiones	59
	b Peso de 1,000 semillas	59
	c Peso hectolítrico	59
	2 Propiedades fisicoquímicas de las semillas de chía	59
	a Diferencia total de color (ΔE)	59
	b Actividad acuosa (a_w)	61
	3 Optimización del proceso de extrusión cocción de semillas de chía para obtener harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO)	61
	a Diseño experimental	61
	b Obtención de harinas de chía desgrasada extrudida (HCDE)	62
	c Evaluación del contenido de compuestos fenólicos totales (CFT), actividad antioxidante (AAox) y digestibilidad proteínica in vitro (DPIV) a las harinas de chía desgrasada extrudida (HCDE)	62
	1) Extracción de fitoquímicos libres	62
	2) Extracción de fitoquímicos ligados	65
	3) Compuestos fenólicos totales (CFT)	65
	4) Actividad antioxidante (AAox)	66
	5) Digestibilidad proteínica in vitro (DPIV)	66
	d Optimización	67
	4 Composición química de la harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO)	68
	a Humedad	68
	b Proteína	68
	c Lípidos	68
	d Cenizas	68
	e Fibra dietaria	69
	f Carbohidratos	70
	5 Propiedades fisicoquímicas de HCDEO	70
	a Diferencia total de color (ΔE)/ Actividad acuosa	70
	b pH	70
	c Densidad aparente	70
	d Índice de absorción (IAA) y solubilidad en agua (ISA)	70

	e Dispersabilidad	71
	f Índice de absorción de aceite	71
	g Capacidad de formación (CFE) y estabilidad de espuma (CEE)	71
	h Capacidad emulsificante (CE) y estabilidad de emulsión (EE)	72
	6 Propiedades nutricionales de harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO)	72
	a Digestibilidad proteínica <i>in vitro</i>	72
	b Perfil de aminoácidos esenciales (AAE)	72
	c Relación de eficiencia proteínica calculada (C-PER)	74
	7 Fitoquímicos en HCDEO	74
	a Compuestos fenólicos totales (CFT)	74
	8 Propiedades nutraceuticas de HCDEO	74
	a Actividad antioxidante (ABTS, DPPH)	74
	b Potencial antihipertensivo (IC50) de harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO)	75
	9 Análisis estadístico	76
VIII	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
	A CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y FISCOQUÍMICAS DE LAS SEMILLAS DE CHÍA	77
	B CONTENIDO NUTRIMENTAL Y DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES EN SEMILLAS DE CHIA MÁXIMOS DE ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE, COMPUESTOS FENÓLICOS TOTALES Y DIGESTIBILIDAD PROTEÍNIC <i>IN VITRO</i> (AAox, CFT, DPIV)	77
	C MEJORES CONDICIONES DE EXTRUSIÓN PARA OBTENER HARINA DE CHÍA DESGRASADA EXTRUDIDA OPTIMIZADA (HCDEO) CON AAox, CFT y DPIV ALTOS	80
	1 Modelos de predicción para las variables de respuesta	82
	a Actividad antioxidante (AAox)	82
	b Compuestos fenólicos totales (CFT)	84
	c Digestibilidad de proteína <i>in vitro</i> (DPIV)	86
	2 Optimización	88
	D EFECTO DE LA EXTRUSIÓN COCCIÓN EN CONDICIONES OPTIMIZADAS SOBRE COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES FISCOQUÍMICAS DE LA SEMILLA DE CHÍA DESGRASADA	90
	E EFECTO DE LA EXTRUSIÓN COCCIÓN EN CONDICIONES OPTIMIZADAS SOBRE VALOR NUTRICIONAL, CONTENIDO DE FITOQUÍMICOS Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE SEMILLA DE CHIA DESGRASADA	93
IX	CONCLUSIONES	95
X	BIBLIOGRAFIA	96
	Abreviaturas	

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Pág.
1	Contenido de proteínas en semilla de chía y diversos cereales	16
2	Composición química (%) de las semillas de chía	17
3	Contenido de minerales en semillas de chía	19
4	Contenido de vitaminas (por 100 g) en semillas de chía	20
5	Contenido de aminoácidos esenciales de semillas de chía integrales, sin procesar	22
6	Contenido de fibra dietaria total en chía y otros alimentos	30
7	Concentración de antioxidantes fenólicos presentes en extractos de semilla de chía	31
8	Compuestos bioactivos identificados en <i>Salvia hispanica</i> L., estructura química y actividad que presentan	32
9	Productos a base de chía en supermercados locales	37
10	Productos alimenticios obtenidos a través de la extrusión	40
11	Efecto de las condiciones de extrusión-cocción sobre compuestos bioactivos y propiedades nutracéuticas de algunos granos y mezclas de granos	54
12	Diseño experimental utilizado para la obtención de diferentes combinaciones de temperatura de extrusión (TE) / velocidad de tornillo (VT) para la producción de harinas de chía desgrasada extrudida (HCDE)	63
13	Características físicas y fisicoquímicas de semillas de chía (<i>Salvia hispanica</i> L)	78
14	Contenido nutrimental y de aminoácidos esenciales en semillas de chía (<i>Salvia hispanica</i> L)	79
15	Diseño experimental empleado para obtener diferentes combinaciones de temperatura de extrusión y velocidad de tornillo (TE, VT) para la producción de harinas de chía desgrasada extrudida (HCDE), y resultados experimentales de las variables de respuesta (AAox, CFT, DPIV).	81
16	Coeficientes de regresión y análisis de varianza de los modelos experimentales de predicción mostrando la relación entre las variables de respuesta (AAox, CFT, DPIV) y variables del proceso (TE, VT) para la producción de harinas de chía desgrasada extruida (HCDE)	83
17	Composición química y propiedades nutricionales y fisicoquímicas de harinas de chía	92
18	Actividad antioxidante y compuestos fenólicos en harinas de chía	94

INDICE DE FIGURAS

Fig	Descripción	Pág
1	Dispersión del cultivo de chía durante la época prehispánica	7
2	Planta de Salvia hispanica	8
3	Planta de Salvia hispanica	10
4	Taxonomía de la Chía	11
5	Producción Nacional de Chía	14
6	Valores de PDCAAS de diversas fuentes de proteína	26
7	Estructura química de los antioxidantes presentes en semilla de chía	32
8	Interacción de las propiedades del material, variables del proceso de extrusión y características del producto final	42
9	Componentes principales de un extrusor	43
10	Formas diferentes de gránulos de almidón de diversas fuentes	47
11	Dimensiones características (a) vista frontal, (b) vista de perfil y (c) geometría tridimensional de la semilla de chía	60
12	Obtención de harinas de chía desgrasada extrudida (HCDE)	64
13	Gráficas de superficie de respuesta (A) y de contorno (B) mostrando el efecto de las variables de proceso [TE (°C), VT (rpm)] sobre AAox ($\mu\text{mol ET}/100 \text{ g bs}$) de las harinas de chía desgrasada extrudida (HCDE).	85
14	Gráficas de superficie de respuesta (A) y de contorno (B) mostrando el efecto de las variables de proceso [TE(°C), VT(rpm)] sobre el contenido de compuestos fenólicos totales [CFT (mg EAG/100 g muestra, bs)] de las harinas de chía desgrasadas extrudidas (HCDE)	87
15	Gráficas de superficie de respuesta (A) y de contorno (B) mostrando el efecto de las variables de proceso [TE (°C), VT (rpm)] sobre la digestibilidad proteínica in vitro [DPIV (%)] de las harinas de chía desgrasadas extrudidas (HCDE)	89
16	(A) Deseabilidad global (D=0.815) para obtener la mejor combinación de variables de proceso (TE=146.95°C/VT=236.68 rpm) y (B) Deseabilidades individuales (di) para las variables de respuesta (AAox, CFT, DPIV)	91

I RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue optimizar las condiciones de extrusión para semillas de chía parcialmente desgrasadas para maximizar la actividad antioxidante (**AAox**), compuestos fenólicos totales (**CFT**) y digestibilidad proteínica *in vitro* (**DPIV**). Se aplicó la metodología de superficie de respuesta (**MSR**), maximizando para tres variables (**AAox**, **CFT**, **DPIV**), para optimizar el proceso de extrusión. Se utilizó un diseño central compuesto rotatable (**CCR**) con dos factores [Temperatura de extrusión (**TE**), 50-160°C / Velocidad del tornillo (**VT**), 50-240 rpm] y cinco niveles (13 tratamientos). Los extrudidos de cada tratamiento (13) se secaron (50°C/8h) y molturaron para obtener harinas de chía extrudida (**HCE**). Como técnica de optimización se aplicó la *función de deseabilidad*. Los modelos de predicción desarrollados para cada variable de respuesta mostraron coeficientes de determinación altos, demostrando ser adecuados para explicar las variaciones observadas en los datos experimentales. Las variables de respuesta tuvieron las siguientes deseabilidades individuales (**d**): $d_{AAox}=0.77$, $d_{CFT} = 0.70$, $d_{DPIV} = 1.00$; estas deseabilidades se utilizaron para calcular la deseabilidad global (**D**=0.81) que correspondió a condiciones óptimas de extrusión: **TE**=147°C/**VT**=237 rpm. Se aplicaron estas condiciones para obtener harina de chía desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**) con valores altos de **AAox** [ABTS: 28,916 / DPPH: 9,805 μ mol equivalentes de Trolox (ET)/100 g, dw], **CFT** [600.5 mg equivalentes de ácido Gálico (EAG) /100 g, dw] y **DPIV** [86.7%]. La **HCDEO** tuvo mayor contenido de proteínas, aminoácidos esenciales, relación de eficiencia proteínica calculada (**C-PER**), fibra dietaria total, **AAox**, **CFT** que la harina de semillas de chía sin procesar (**HCSP**). La **HCDEO** puede ser utilizada como una fuente natural de proteínas, fibra dietaria y antioxidantes para el desarrollo de bebidas y alimentos funcionales.

Palabras clave: Chía, extrusión, optimización, actividad antioxidante, compuestos fenólicos, alimentos funcionales

I ABSTRACT

The purpose of this study was to optimize the extrusion conditions of defatted chia seed that would maximize antioxidant activity (**AoxA**), total phenolic content (**TPC**), and *in vitro* protein digestibility (**IVPD**). Response surface methodology (RSM) was applied over three response variables (**AoxA**, **TPC**, **IVPD**) to optimize the extrusion process. A central composite rotatable (CCR) experimental design with two factors [Extrusion temperature (**ET**, 50-160°C), screw speed (**SS**, 50-240 rpm)] in five levels was used (13 treatments). The extruded from each treatment were dried (50°C/8h) and ground to obtain extruded chia flours (**ECF**). The desirability function was applied as the optimization technique. The prediction models developed for each response variable showed high coefficients of determination, demonstrating their adequacy to explain the variations in experimental data. The response variables had individual desirabilities (**d**) as follows: $d_{AoxA}=0.77$, $d_{TPC}=0.70$, $d_{IVPD}=1.00$; these desirabilities were used to evaluate the global disability (**D**=0.81). The **D**=0.81 corresponded to optimal extrusion conditions **ET**=147°C/**SS**= 237 rpm. The application of these optimal conditions allow us to obtain optimized defatted extruded chia flour (**ODECF**) with highest values of **AoxA** [ABTS: 28,916 / DPPH: 9,805 μ mol Trolox equivalents (TE)/100 g, dw], **TPC** [600.1 mg Galic acid equivalents (GAE)/100 g, dw], and **IVPD** [86.7%].. **ODECF** had higher protein content, essential amino acids, calculated protein efficiency ratio (**C-PER**), total dietary fiber (**TDF**), **AoxA**, and **TPC** than raw unprocessed chia flour (**RUCF**). The **ODECF** could be utilized as a natural source of proteins, dietary fiber, and antioxidants in the development of new functional beverages and foods.

Keywords: Chia, Extrusion, Optimization, Antioxidant activity, Phenolic compounds, Functional foods

II INTRODUCCIÓN

La chía es originaria de los valles centrales de México y el Norte de Guatemala, donde se concentran las especies de la familia *Labiaceae*. La chía se cultiva en México desde hace miles de años. Su consumo acarrea efectos benéficos notables para la salud. Las semillas de chía eran conocidas como un importante alimento/medicina desde 3,500 años antes de Cristo (AC), adquirieron importancia como cultivo básico en el Centro de México entre 1,500 y 900 AC. (Muñoz y col., 2013).

Los Mayas y Aztecas usaban las semillas de chía en distintos preparados nutricionales y medicinales. Combinadas con granos de maíz eran fuente de energía para viajes largos y alimento sagrado para los guerreros; las semillas de chía, enteras, y molturadas, se consumían como alimento. También se presionaban para extraer su aceite, utilizado como base para la elaboración de pinturas para cara y cuerpo. Los ceramistas y pintores utilizaban el aceite de chía para la preparación de barnices y pinturas, que se destacaban por su brillo y resistencia al envejecimiento derivada de su poder antioxidante alto (Ayerza y Coates, 2005; Orona-Tamayo y col., 2016).

En 2009, las semillas de chía (*Salvia hispanica* L) se aprobaron como “nuevo alimento” por dos organismos internacionales: Parlamento y Consejo Europeo (Mohd Ali y col., 2012). La semilla de chía contiene, en base seca, 15-24% de proteína, 26-41% de carbohidratos y 25-40% de lípidos. Estos últimos están constituidos, principalmente, por ácidos grasos insaturados [55-60% linolénico (Omega 3), 18-20% linoleico (Omega 6), 6% oleico (ω -9)] y 10% de saturadas. El 35% de la semilla de chía está constituido por fibra dietaria, soluble e insoluble, y es una buena fuente de vitaminas del complejo B y minerales. Contiene 6 veces más calcio, 11 veces más fósforo, y 4 veces más potasio que 100 g de leche, además de poseer magnesio, hierro, zinc y cobre (Ayerza y Coates, 2009). Adicionalmente, Las semillas de chía son una buena fuente de antioxidantes debido a la presencia de polifenoles, como los ácidos Clorogénico y Caféico, y flavonoides, de hecho flavonoles, como Quercetina, Kaempferol y Miricetina que protegen a los consumidores contra las enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (Reyes-Caudillo y col., 2008, Mohd Ali y col., 2012; Martínez-Cruz y Paredes-López, 2014; Ullah y col., 2015; Orona-Tamayo y col., 2016).

Las semillas de chia se promueven para su consumo como un producto saludable, y se utilizan como suplemento o ingrediente en diversos productos alimenticios. Los aspectos de salud y el valor nutricional son las principales razones para que los consumidores adquieran semillas de chia. En

el mercado hay diferentes presentaciones de semillas de chia; el uso recomendado es de alrededor de 15-25 g/día. Se promueven, como beneficios del consumo diario, la disminución del colesterol y la presión arterial, pérdida de peso, disminución de dolores en articulaciones, mayor resistencia, y efectos antioxidantes. En ensayos experimentales algunos investigadores han encontrado efectos benéficos de la ingesta diaria de 35-37 g de semillas chia; pueden ejercer una reducción de la presión sanguínea (Vuksan y col., 2007; Toscano y col., 2014). En el mercado se puede encontrar chia en diferentes presentaciones. Éstas incluyen semillas crudas, cápsulas del aceite como suplementos, harina de semilla e ingredientes para alimentos. Las semillas crudas y la harina de chia son las más populares y se agregan a cereales para el desayuno, pan, galletas, bebidas, papa fritas, mantequilla de cacahuete, fruta, diversas mezclas de la semilla, postres (Ayerza y Coates, 2005; Peperkamp, 2014)

La extrusión-cocción es una de las tecnologías de procesamiento de alimentos más importantes que se ha utilizado desde mediados de la década de 1930 para la producción de cereales para el desayuno, alimentos listos para comer, harinas precocidas y otros alimentos texturizados. A lo largo de los años, la extrusión-cocción se ha convertido en el principal método de procesamiento para las industrias de alimentos y piensos, y está evolucionando rápidamente de un arte a una ciencia (Riaz y col., 2009).

En la década pasada, la cocción por extrusión se ha estudiado extensamente para producir diversos alimentos especiales, incluyendo productos de pasta y cereales para el desayuno listos para comer, alimentos infantiles, meriendas, proteínas vegetales texturizadas, alimentos para mascotas, harinas precocidas, sopas secas y mezclas de bebidas secas. No sólo mejora la digestibilidad (Singh y col., 2007) sino que también mejora la biodisponibilidad de los nutrientes (Gu y col., 2008) en comparación con la cocción convencional. Además de estas propiedades, se prefiere la cocción por extrusión en comparación con las técnicas convencionales de cocción / procesado debido a su capacidad para desarrollar una gama de productos con ventajas texturales distintas, incluyendo expansión, crujiente y sensación en boca general; siendo versátil, alta productividad, costos de bajo costo, eficiencia energética y tiempos de cocción más cortos (Brennan y col., 2011).

La incorporación de compuestos bioactivos como vitaminas, probióticos, péptidos bioactivos, antioxidantes, etc. en los sistemas de alimenticios proporciona una forma para desarrollar nuevos

alimentos nutraceuticos que pueden tener beneficios fisiológicos o de reducir los riesgos de enfermedades (Chen y col, 2006). En vista de la abundante población a la que se enfrentan estos países en desarrollo, las semillas de chía (*Salvia hispanica* L), si se utilizan racionalmente, pueden contribuir, en gran medida, a combatir la escasez en el suministro de alimentos y puede ser útil también en las industrias alimentarias para las formulaciones de nuevos alimentos y bebidas funcionales.

La extrusión se considera, como un proceso multifuncional y un proceso térmico/mecánico, que ha permitido un número grande de aplicaciones en los alimentos. El fundamento del proceso es combinar las operaciones unitarias de transferencia de calor, amasado y presión en una sola, lo que produce cambios significativos en la textura de cereales y oleaginosas. Los materiales sometidos a este proceso, en general, sufren transformaciones químicas, estructurales y nutricionales como desnaturalización parcial de las proteínas, oxidación de lípidos, degradación de las vitaminas y fitoquímicos, formación de sabores, aumento de la biodisponibilidad de minerales, la solubilidad de la fibra dietética y gelatinización parcial del almidón. La calidad de los productos obtenidos depende de las condiciones de operación (Milán-Carrillo y col, 2002; Camire, 2003; Fellows, 2007; Zhao y col, 2011; Reyes-Moreno y col., 2012; Maskan y Altan, 2016).

Existen pocos reportes que estudian el efecto del proceso de extrusión sobre el valor nutricional y nutraceutico de semillas de chía; no hay investigaciones sobre la optimización del proceso de extrusión para incrementar la actividad antioxidante (**AAox**), contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**) y digestibilidad proteínica *in vitro* (**DPIV**) de estas semillas. La metodología de superficie de respuesta (MSR) ha sido considerada una herramienta matemático estadística efectiva para la optimización de procesos (p. ej. extrusión) en la industria alimentaria.

El objetivo de la presente investigación fue optimizar las variables del proceso de extrusión – cocción (Temperatura de extrusión / Velocidad de tornillo), utilizando como material prima semillas de chía parcialmente desgrasadas, para obtener un alimento funcional (harina de chía desgrasada extrudida optimizada) con actividad antioxidante, contenido de compuestos fenólicos y digestibilidad proteínica altos que pueda utilizarse como ingrediente para el desarrollo de nuevos alimentos y bebidas funcionales.

III REVISIÓN DE LA LITERATURA

A CHIA (*Salvia hispanica* L.)

1 Generalidades

La chía comenzó a ser usada en la alimentación humana alrededor del año 3,500 a.C., y adquirió importancia como un cultivo esencial en el centro de México entre 1,500 y 900 AC. Esta semilla se origina en Mesoamérica y su mayor diversidad genética se presenta en la vertiente del océano Pacífico, desde el Centro de México hasta el Norte de Guatemala (**Fig 1**) (Muñoz y col., 2013).

Chía es el nombre común para algunas especies de *Salvia*, destacando entre ellas la *Salvia columbariae*, la *Salvia hispanica*, y la *Salvia polystachya* como las más importantes. Carolus Linnaeus (1707-1778) encontró la chía como un cultivo silvestre en el nuevo mundo lo confundiendo con una planta nativa de España, razón por la que se denominó a esta especie *Salvia hispanica*. Nativa de México la chía fue introducida a España después de que Hernán Cortés conquistó este país (Valdivia-López y Tecante, 2015).

Las fuentes indígenas disponibles antes de 1519, fecha de la llegada de los españoles a territorio mexicano, muestran una fuerte relación etnobotánica entre la chía y varias culturas mesoamericanas. Si bien ninguna fuente afirma de manera categórica que la chía sea originaria de un lugar específico, existe una alta probabilidad que los primeros cultivos se dieron en los territorios que actualmente corresponden a la República Mexicana y Guatemala. La evidencia histórica muestra a la semilla de chía como uno de los alimentos empleados hacia el año 3,500 a.C. siendo cultivada en el Valle de México entre los años 2,600 y 900 a.C. por las civilizaciones teotihuacanas y toltecas (Muñoz y col., 2013).

En la ciudad de Tenochtitlán se solían cosechar alrededor de 3,350 ton de maíz, amaranto y chía. Los aztecas recibían como tributo hasta 15,000 ton de estos granos provenientes de 20 diferentes comunidades, información que se puede corroborar gracias a los registros del Códice de Mendoza. Asimismo, la chía fue uno de los principales componentes de la dieta de los Aztecas junto con el maíz, frijol y amaranto (Ixtaina, 2010).

La importancia de estos cuatro cultivos en la dieta Azteca está fundamentada en el Codex Florentino (**Fig 2**), escrito por Fray Bernardino de Sahagún, considerado por muchos como el



Fig 1. Dispersión del cultivo de chía durante la época prehispánica
Jamboonsri y col. (2012)



Fig 2. Planta de *Salvia hispanica*

primer antropólogo, quien entrevistó a ancianos indígenas sobre su vida cotidiana y escribió sus respuestas mucho tiempo después en el Códice Florentino. La **Fig 2** muestra la imagen extraída del Códice Florentino (escrito originalmente entre los años 1575-1577 o 1578-1580) representa una planta de *Salvia hispánica* así como un atole de semillas de chía molidas con maíz tostado, y una cola de oposum, recomendado para la mujer que deseaba inducir el trabajo de parto (Cahill, 2003).

1 Taxonomía/Características agronómicas

a Clasificación taxonómica

La chía (*Salvia hispánica* L.) es una planta herbácea anual de verano que pertenece a la familia *Lamiaceae*, aunque algunos autores nombran a la familia como *Labiatae*. En todo el mundo, la familia *Lamiaceae* está alcanzando una talla entre 1-1.5 m sus tallos son ramificados, de sección cuadrangular con pubescencias cortas y blancas como las hojas opuestas con bordes aserrados miden de 80 a 100 cm de longitud, y 40 a 60 mm de ancho. Sus flores de color azul intenso o blancas se producen en espigas terminales, éstas son pequeñas, con diminutas corolas que se encuentran fusionadas y contribuyen a la auto polinización (**Fig 3**) (Di Sapio y col., 2008).

Las semillas de chía son pequeñas (1.9-2 mm de largo y 1.2-1.34 mm de ancho) de color pardo-grisáceo a blancas con manchas oscuras. La semilla consiste en tres partes: testa, embrión, y endospermo. La testa sirve como una capa de protección al embrión y contienen el mucílago, una sustancia de polisacárido que se expande cuando hace contacto con el agua y forma una cápsula gelatinosa alrededor de la semilla y se adhiere fuertemente. Se desconoce la función real del mucílago; se cree que su presencia regula la pérdida de agua de la semilla lo que le permite crecer a la planta en regiones áridas (Guiotto y col., 2011; Valdivia-López y Tecante, 2015). En México está formada por 26 géneros y aproximadamente 512 especies, siendo las más abundantes la *Salvia polystachya* (chía, tepechía o chinettlacolo), *Salvia hispánica* de la que se produce la chía comercial e *Hyptis suaveolens* (chía gorda o grande) todas ellas agrupan más del 65% de las especies de la familia en el país. La chía, *Salvia hispánica* L., es una especie que pertenece a la familia de aromáticas como la menta, el tomillo, el romero y el orégano. Su jerarquía taxonómica se basa en el Sistema Integrado de Información Taxonómica (ITIS, por sus siglas en inglés, Integrated Taxonomic Information System) (**Fig 4**).



Fig 3. Planta de *Salvia hispanica*
Di Sapio y col. (2012)

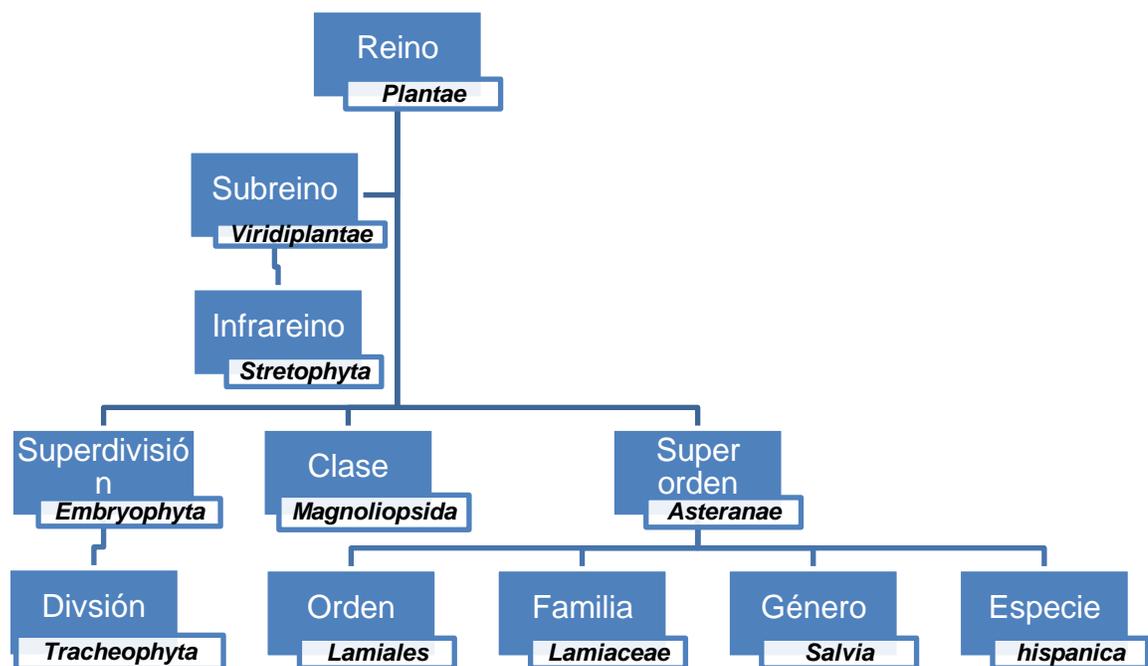


Fig 4. Taxonomía de la Chía

Sistema de Integrado de Información Taxonómica (2016)

Actualmente la chía ha sido redescubierta y revalorizada por sus propiedades nutraceuticas; su elevado contenido de fibra, proteínas y carbohidratos, contenido de ácidos grasos esenciales y alto contenido de polifenoles (que actúan como antioxidantes) la sitúan dentro de la categoría de los superalimentos (González-Jiménez, 2010).

En la década de los 1990's, el cultivo de chía experimentó un resurgimiento al ser promovida como una fuente potencial de antioxidantes por su contenido de compuestos fenólicos [ácidos Clorogénico y Cafeico, e isoflavonas (Miricetina, Quercetina y Kaempferol)] a los que se atribuyen efectos cardio y hepatoprotectores, de antienvjecimiento y anticancerígenos. La semilla es también una gran fuente de fibra dietaria que es benéfica para el sistema digestivo y el control de la *diabetes mellitus*. En su composición participan, además, ácidos grasos insaturados (Linolénico, Linoleico, Oleico), proteína libre de gluten, vitaminas (Riboflavina, Niacina, Tiamina), así como algunos minerales (Ca, P, K, Zn, Cu) (Orona-Tamayo y col., 2016).

Los efectos terapéuticos de la semilla de chía en el control de diabetes, dislipidemia, hipertensión, antiinflamatorio, antioxidante, anticoagulante, laxante, antidepresivo, antiansiedad, analgésico, han sido establecidos científicamente (Ullah y col., 2015). Diversos estudios epidemiológicos han demostrado la relación específica entre la alimentación deficiente en nutrientes esenciales y la aparición de enfermedades degenerativas, como las mencionadas. Por ello, el consumo de semillas de chía ha despertado mucho interés.

b Aspectos agronómicos

La chía es una planta herbácea de crecimiento anual con características desérticas, es decir, requiere poco riego, crece perfectamente en arena y suelos arcillosos, resiste los insectos, plagas y enfermedades. Su crecimiento se da en condiciones tanto en tropicales como subtropicales y es sensible a las heladas, es decir, no es tolerante a las mismas. Las temperaturas para el desarrollo del crecimiento se encuentran en el rango de 11-36°C con temperaturas óptimas de 16-26°C; la planta es muy sensible a temperaturas bajas (Bochicchio y col., 2015). En cuanto a las condiciones edáficas en las que se desarrolla, puede decirse que favorecen su crecimiento la disponibilidad de una amplia variedad de niveles de nutrientes y humedad, esta última sobre todo para la germinación. Sin embargo, un contenido bajo de nitrógeno puede ser un factor limitante para obtener buenos rendimientos. Una vez establecida, la plántula se comporta bien con

cantidades limitantes de agua. Por otro lado, los suelos donde mejor se desarrolla la planta son los arenosos-limosos, aunque también puede crecer en suelos arcillosos-limosos de buen drenaje, con pH de 6.0 a 8.5 (Yeboah y col., 2013). La planta tiene poca resistencia a la salinidad y si son cultivadas en suelos salinos pueden reducir significativamente el contenido de aceite en la semilla (Heuer y col., 2002).

El cultivo de chía es relativamente modesto en sus necesidades agrícolas, y es capaz de producir alimento esencial de manera eficiente. Por tal razón catalogado como un “cultivo noble”, de fácil manejo y es considerada una oportunidad para los productores de diversificar riesgo dado el crecimiento del mercado. Es una planta que no deteriora el suelo, como la caña, y, a diferencia de ésta, requiere cuidados permanentes, pero es altamente rentable.

Las semillas de chía contienen una amplia gama de compuestos fenólicos, con propiedades antioxidantes, que protegen a la semilla contra el deterioro químico y microbiano; por ello, es posible almacenarla por periodos largos de tiempo (p.ej. años) sin que pierda su valor nutricional, sabor y olor.

3 Estadísticas de producción

La producción comercial de chía ha estado concentrada en áreas específicas como Bolivia y Paraguay. En la última década, otros países como México, Australia y Argentina han tenido buenas experiencias en el cultivo de plantas de chía. En 2014, la especulación y los incrementos dramáticos en el precio de la semilla de chía propiciaron un incremento rápido en la producción de chía, con precios que alcanzaron los 8,000 a 12,000 dólares americanos por ton en 2013. Los precios de la chía fluctúan acorde a la calidad de la misma, la demanda y los volúmenes de producción. Sin embargo, carece de la retroalimentación continua de precios de una mercancía del mercado de valores como el café o el cacao (Peperkham, 2014). Bolivia se encuentra al frente de los productores mundiales de chía, con exportaciones significativas de esta semilla; el área de cultivo se ha incrementado en años recientes de 50,000 ha con una producción de 18,000 ton a 80,000 ha cultivadas con una producción de 30,000 ton (Peperkham, 2014).

En México, en el año 2013, la producción de semilla de chía fue de 6,961 ton; los principales estados productores fueron Jalisco, Puebla y Sinaloa, quienes aportaron 6,164 (89%), 307 (4%) y 234 (3%) ton respectivamente. Ver **Fig 5**.

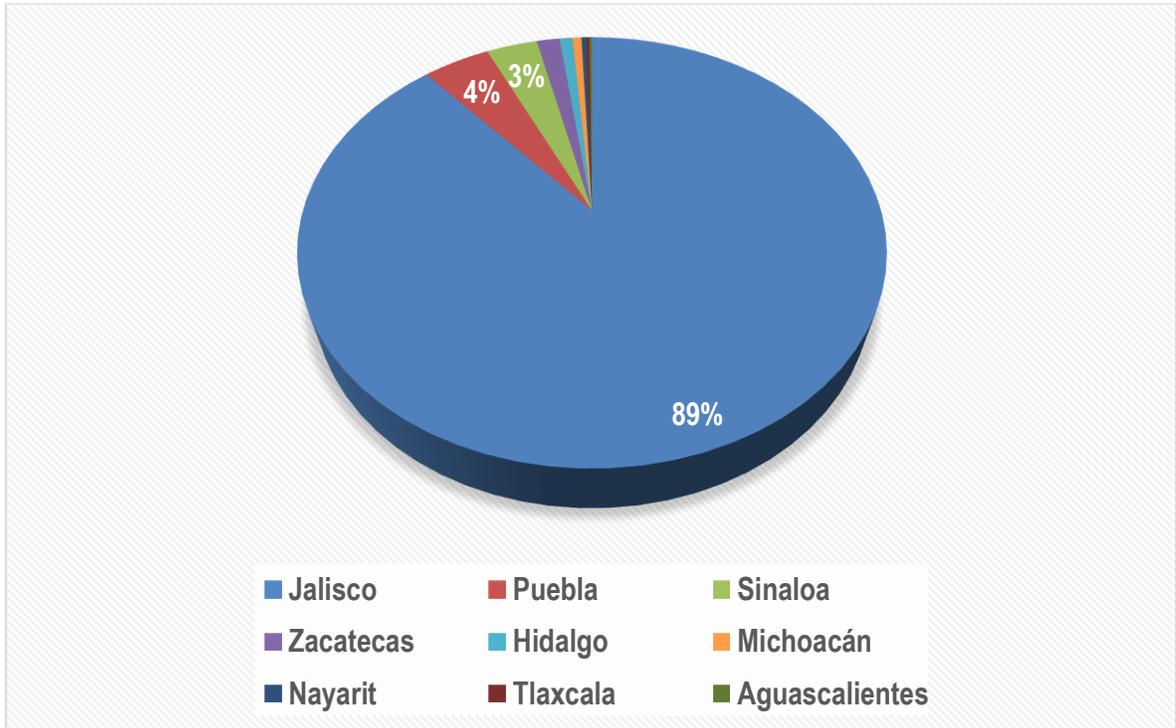


Fig 5. Producción Nacional de Chía
SAGARPA (2015)

4 Nutrimientos en semilla de chía (*Salvia hispanica* L.)

a Proteínas

Todos los animales, incluyendo al ser humano, deben tener un consumo adecuado de proteína para crecer y mantenerse, es por ello que se vuelve de sumo interés el conocer el contenido, y la calidad, de las proteínas de los diversos alimentos que consumimos. En el caso de la semilla de chía su contenido de proteína varía entre el 15 % y el 23 % dependiendo la posición geográfica del cultivo y condiciones de crecimiento, rebasando el contenido de los cereales tradicionales como el trigo (13,7%), maíz (9,4%), arroz (6,5%), avena (16,9%), y cebada (12,5%), así como el de otras semillas como el amaranto y quinoa (Ayerza y Coates, 2005).

En el **Cuadro 1** se muestra el contenido de proteína de semillas de chía comparadas con otros cereales se amplio consumo. La chía no contiene gluten, por esta razón es un alimento ideal para ser consumida por personas con enfermedad celíaca (Contreras-Jiménez y col., 2014).

b Lípidos

La semilla de chía es considerada una semilla no convencional, puesto que no forma parte de la dieta normal de ninguna población en el mundo. Su contenido alto del ácido graso esencial α -Linolénico (58-66% del contenido total del aceite en la semilla), de la familia del Omega 3, ha despertado un enorme interés por lo que resulta cada vez más frecuente encontrarla dentro de la oferta alimentaria en tiendas especializadas en nutrición (Orona-Tamayo y col., 2016).

La semilla de chía es, de hecho, la fuente vegetal con el contenido más alto de ácido graso α -Linolénico (ALA), precursor para los ácidos grasos poliinsaturados Omega 3 de cadena larga (PUFAs), eicosapentaenoico (EPA) y docosapentaenoico (DPA). A su vez, los ácidos EPA y DPA dan origen a ciertas prostaglandinas, Leucotrienos y Tromboxano con actividad antiinflamatoria, anticoagulante y antiagregante; por ello, EPA y DPA han sido correlacionados con beneficios a la salud (Muñoz y col., 2013). En el **Cuadro 2** se presenta la composición química, y el contenido de lípidos, de las semillas de chía.

c Carbohidratos

El contenido de carbohidratos, en semillas de chía, varía entre 34.57 y 42.12 % de los cuales entre 34.4 – 37.5 % corresponden a fibra dietaria.

Cuadro 1. Contenido de proteínas en semilla de chía y diversos cereales

Grano	% de Proteína
Chía	20.70
Avena	16.89
Trigo	13.68
Cebada	12.48
Maíz	9.42
Arroz	6.50

Ayerza y Coates (2005)

Cuadro 2. Composición química (%) de las semillas de chía

Investigador(es)	Proteína	Lípidos	Cenizas	Fibra	CHO
Weber y col. (1991)	18-23.6	24.3-34.1	4.6-5.1	33.36	-----
Ayerza y Coates (2009)	19.92-24.43	25.8-27.23	-----	-----	-----
Muñoz y col. (2013)	15.95-26.03	29.98-33.5	-----	34.4	42.12
Sargi y col. (2013)	21.52	21.69	3.63	-----	45.30
da Silva-Marineli y col., (2014)	25.32	30.22	4.07	37.50	34.57
Porras Loaiza y col. (2014)	18.49-22.32	21.49-32.68	4.8-4.87	-----	7.85-12.65
Ayerza (2016)	18.3-25.2	27.7-36.3	-----	-----	-----
da Silva-Pereira y col. (2017)	18.9	31.2	-----	35.3	-----

d Minerales y Vitaminas

La semilla de chía es una fuente excelente de minerales, lo cual es de suma importancia debido a que no somos capaces de sintetizarlos en nuestro organismo y debemos tomarlos del exterior a través de la alimentación para que nuestro organismo funcione correctamente. Algunos de los minerales presentes en la semilla son Ca, P, Mg, K, Fe, Zn, Cu. Ver **Cuadro 3**.

Una de las grandes ventajas de esta semilla es su bajo contenido en sodio, además de que contiene 6 veces más calcio, 11 veces más fósforo, y 4 veces más potasio que 100 g de la leche, además de contener magnesio, hierro, zinc, y cobre (Ayerza y Coates, 2009). La chía contiene 13-354 veces más Ca, 2-12 veces más P, y 1.6-9 veces más K que 100 g de trigo, arroz, avena y maíz. Los niveles de Fe encontrados en las semillas de chía y en la harina remanente después de extraer el aceite son muy elevados y representan una cantidad inusual para la semilla que, comparada con otros productos tradicionales conocidos como fuentes ricas de Fe, presenta, cada 100g de porción comestible, 6, 1.8 y 2.4 veces más Fe que la espinaca, lentejas e hígado vacuno, respectivamente (Jaramillo-Garcés, 2013; Muñoz y col., 2013).

Por otro lado, las vitaminas son sustancias químicas no sintetizables por el organismo humano; el cuerpo las necesita para crecer y desarrollarse normalmente, ya que Intervienen como catalizadores en reacciones bioquímicas, es decir, su función consiste en facilitar la transformación que siguen los sustratos a través de las vías metabólicas.

Las semillas de chía se caracterizan por ser una buena fuente de vitaminas del complejo B (Niacina, Tiamina, ácido Fólico) así como vitamina A (**Cuadro 4**). Comparado con otros granos, las semillas de chía contienen mayor cantidad de Niacina que el maíz, la soya y el arroz. En cuanto a su contenido de Tiamina y Riboflavina, es similar al encontrado en arroz y maíz.

5 Valor nutricional de la semilla de chía (*Salvia hispánica* L)

a Valor biológico de las proteínas

La calidad de proteína describe las características de una proteína en relación con su capacidad de alcanzar acciones metabólicas definidas. Tradicionalmente, esto se ubica en el contexto de la capacidad de una proteína de alimentos de proporcionar el perfil específico de aminoácidos para satisfacer las demandas de la síntesis de proteína y otro metabolitos.

Cuadro 3. Contenido de minerales en semillas de chía

Mineral	mg/100 g
<i>Macroelementos</i>	
Calcio	631
Potasio	407
Magnesio	335
Fósforo	860
<i>Microelementos</i>	
Cobre	0.92
Hierro	7.72
Manganeso	2.72
Molibdeno	0.20
Sodio	16.00
Zinc	4.58
Selenio (µg / 100 g)	55.20

USDA (2016)

Cuadro 4. Contenido de vitaminas (por 100 g) en semillas de chía

Vitaminas (mg/100g)	Cantidad
Vitamina C (ácido ascórbico total)	1.60
Tiamina	0.62
Riboflavina	0.17
Niacina	8.83
Folato	49.00
Vitamina A (UI)	54.00
Vitamina E (α -Tocoferol)	0.50

UI= Unidad Internacional

USDA (2016)

Como la comprensión de las acciones de la proteína se amplía más allá de su papel en el mantenimiento de la masa de proteína de cuerpo y la satisfacción de demandas metabólicas de rutas biosintéticas, es claro que el concepto de calidad de proteína debe ampliarse para incorporar estas acciones recién emergentes de proteína.

1) Aminoácidos esenciales (AAE)

Las proteínas, formadas por cadenas de aminoácidos, además de proporcionar calorías juegan un papel fundamental en la diaria alimentación. Los músculos del cuerpo, así como cartílagos, ligamentos, piel, cabello y uñas están básicamente compuestos de proteínas. Los consumo no sólo es esencial para la reparación de tejidos, la oxigenación del organismo y el favorable funcionamiento del sistema inmunológico de ahí que surja la necesidad de analizar su composición a detalle, ya que de los veintidós aminoácidos que se combinan para constituir la mayor parte de las proteínas, algunos pueden ser producidos por el ser humano (aminoácidos no esenciales) mientras que hay otros, los denominados aminoácidos esenciales o indispensables (Isoleucina, Leucina, Lisina, Metionina, Cisteína, Fenilalanina, Tirosina, Treonina, Triptófano, Valina) que obligadamente tienen que ser suministrados a través de la dieta.

Si la proteína ingerida contiene todos los aminoácidos esenciales (**AAE**) en las proporciones necesarias para el ser humano, se dice que es de calidad alta. Por el contrario, si sólo tiene pequeñas cantidades de uno o varios de ellos, será de calidad menor. Si se examina el contenido de aminoácidos en la semilla de chía (**Cuadro 5**), se puede observar que esta semilla posee todos aminoácidos esenciales, lo que la convierte en una proteína de alta calidad. Además cabe resaltar que su aporte de Lisina (3.52-3.89 g/100 g proteína) es relativamente alto y su contenido de Met+Cys (2.75-2.95 g /100 g proteína) es superior al patrón FAO (2.30 g/100 g proteína). (FAO, 2013).

2) Digestibilidad proteínica

Monroy-Torres y col. (2008) evaluaron los efectos de diversos tratamientos (tostado, molido, combinación tostado – molido, remojo) sobre la semilla de chía partiendo de un contenido de 19.72% de proteína y un 29.01% de digestibilidad de proteína en la semilla cruda encontraron que la harina tostada y la semilla cruda mostraron valores de digestibilidad bajos: 29.01% y 34.18%, respectivamente, que podría ser relacionado con contenido alto de fibra, pero descontando la

Cuadro 5. Contenido de aminoácidos esenciales de semillas de chía integrales, sin procesar

Propiedad	Semilla de chía integral sin procesar ¹	Semilla de chía integral sin procesar ²	Requerimientos FAO ³
AAE⁴ (g/100 g protein)			
His	2.06±0.02	2.10±0.02	1.60
Ile	3.31±0.03	3.24±0.03	3.00
Leu	5.42±0.04	5.30±0.04	6.10
Lys	3.80±0.03	3.52±0.02	4.80
Met+Cys	2.95±0.04	2.75±0.05	2.30
Phe+Tyr	4.51±0.04	4.49±0.04	4.10
Thr	2.39±0.03	2.49±0.03	2.50
Trp	1.77±0.01	1.80±0.02	0.66
Val	3.83±0.02	3.73±0.01	4.00
Total	30.04	29.42	29.06
Calificación química	79	73	---
AAE limitante	Lys	Lys	---
DPIV⁵ (%)	79.1±1.5	79.1±1.2	---
C-PER⁶	1.54	1.51	---

¹ Argüelles-López y col. (2018)

² Gómez-Favela y col. (2017)

³ Requerimientos de aminoácidos esenciales para niños (3 años y mayores), adolescentes y adultos de acuerdo a FAO (2013)

⁴ **AAE** = Aminoácido esencial,

⁵ **DPIV** = Digestibilidad proteínica *in vitro*

⁶ **C-PER** = Relación de eficiencia proteínica calculada

interferencia debido a la formación de gel.

En estudios recientes Gómez-Favela y col., (2017) y Argüelles-Lopez y col. (2018) reportaron valores de digestibilidad proteínica *in vitro*, para harina de semillas de chía crudas, sin procesar, de 79.1%. De acuerdo con los resultados, la digestibilidad proteínica mejoró después de la molienda de la semilla cruda; la molienda mejora la digestibilidad si se considera que este proceso divide y expone los componentes de la semilla, permitiendo la acción de las enzimas. Los autores (Monroy-Torres y col., 2008) concluyeron que la digestibilidad de la proteína podría ser mejorada utilizando la biotecnología como herramienta.

b Indicadores de valor biológico de las proteínas

1) Relación de eficiencia proteínica (PER)

La relación de eficiencia proteínica (PER, por sus siglas en inglés) fue el primer método adoptado para evaluar la calidad de la proteína de los alimentos. El PER es un método estandarizado en el cual una dieta de prueba y una dieta de control de caseína, ambas con un contenido de proteína del 10 %, son alimentadas a ratas destetadas por un periodo de 4 semanas. Los valores del PER se calculan dividiendo el peso ganado de las ratas entre la cantidad de proteína consumida durante este período. Para comparar valores de PER de dietas decididas por laboratorios diferentes, los valores son corregidos a un valor asumido de 2.5 para el control de caseína. El fracaso del ensayo PER para correctamente acreditar la proteína usada para mantenimiento es la crítica principal del método, sobre todo por el hecho de que mientras más pobre la calidad de la proteína dietética, más grande es el error que es presentado debido a esta falla de hacer la concesión para el mantenimiento. Por esta razón, los valores PER no son proporcionales a la calidad de la proteína, p. ej., un PER de 2.0 no es dos veces mejor que un PER de 1.0.

Pereira da Silva y col. (2016) evaluaron la calidad de la proteína de semillas de chía cruda (semilla y harina) que se sometieron a tratamiento térmico (90°C/20min), en 36 ratas Wistar macho, destetadas, divididas en seis grupos que recibieron dieta control (caseína), dieta libre de proteína (aproteica) y cuatro dietas de prueba (semilla de chía; semilla de chía con tratamiento térmico; harina de chía y harina de chía con tratamiento térmico) durante 14 días. Los valores de PER observados en los grupos alimentados con chía variaron de 1.73 a 1.92 y concluyendo que la

chía presentó la digestibilidad de proteína buena independientemente del tratamiento térmico y la molienda. La eficacia de conversión de proteína chía para promover el beneficio de peso fue aproximadamente del 50 % en relación con la caseína, como puede ser observado mediante los valores PER.

Aunque algunos autores reportan que la digestibilidad de proteína *in vitro* de chía aumenta cuando es sujeta a tratamiento térmico; Pereira da Silva y col. (2016) contradicen este argumento porque en su estudio la digestibilidad de proteína no se diferenció entre los grupos alimentados por la semilla de chía, semilla de chía con tratamiento térmico, harina de chía y harina chía con tratamiento térmico.

b) Digestibilidad proteínica corregida por contenido de aminoácidos esenciales (PDCAAS)

Los métodos que miden la calidad de proteínas comunes evalúan el crecimiento del animal (la proporción de eficacia de proteína) o, en la gente, el equilibrio de nitrógeno, donde tanto la digestibilidad como la conveniencia del patrón de aminoácidos de los aminoácidos absorbidos (el valor biológico) determinan la utilización de proteína neta.

Las dificultades prácticas y la sensibilidad pobre del método de equilibrio de nitrógeno han conducido a la adopción de la digestibilidad de proteína corregida por contenido de aminoácidos por (PDCAAS). El PDCAAS se presentó por primera vez por la Organización, de las Naciones Unidas, para los Alimentos y la Agricultura y la Organización Mundial de la Salud (FAO/WHO, por sus siglas en inglés) en 1991. En la actualidad, el PDCAAS es el método oficial internacionalmente aprobado para evaluar la calidad de la proteína. El PDCAAS está basado en la combinación de un modelo de referencia de aminoácido relacionado con la edad que es representativo de exigencias humanas más las estimaciones de la digestibilidad de la proteína. La cantidad de aminoácidos potencialmente restrictivos en la proteína de prueba es comparada con su contenido respectivo en el modelo de referencia apropiado, identificando el aminoácido solo más restrictivo que determina la cuenta de aminoácido (Abelilla y col., 2018).

El acuerdo general actual es aquel de reunir los requisitos mínimos para Lisina, Metionina, y Triptófano, los aminoácidos más restrictivos en proteínas de baja calidad, determinan que la calificación del aminoácido y conducirá a una meseta de retención de nitrógeno. En la meseta de equilibrio de nitrógeno, más lejos aumente en aminoácidos plasma estimularía la oxidación

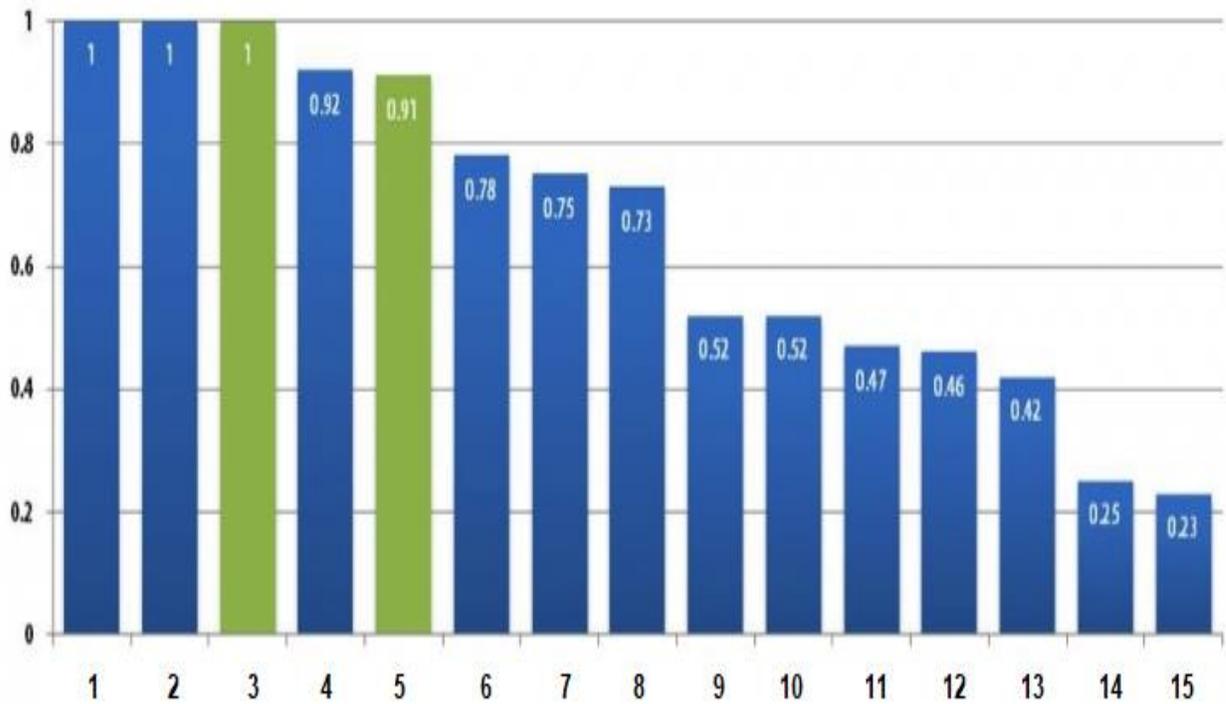
aumentada y la eliminación de los aminoácidos de exceso, implicando que la calidad de proteína encima de exigencias no importa. Esta cuenta es asumida para predecir el valor biológico, o la capacidad esperada de la proteína absorbida de prueba de realizar exigencias de aminoácido humanas. La cuenta entonces es corregida para la digestibilidad que da al valor de PDCAAS, que es asumido para predecir la utilización de proteína neta.

El PDCAAS es un método universal de evaluar la calidad de proteína en términos de la capacidad de un humano de digerirlo y por lo tanto, su efecto eventual sobre el cuerpo. La cuenta se extiende de 0 como el más bajo a 1 el más alto. La leche de la vaca, huevos, caseína, proteína de soya y suero tienen un 1 perfecto. La proteína de chícharo entra ligeramente más abajo en 0.89. Otras fuentes de proteína comunes incluyen res en 0.92, soya en 0.78, y cacahuates en 0.52 (**Fig 6**).

b Ácidos grasos esenciales

La más importante característica de las semillas de chía es su contenido alto de ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs, por sus siglas en inglés). La semilla contiene alrededor de 25-40% de lípidos, los cuales comprenden 55-60 de ácido α -Linolénico (Omega 3) y 18-20% de ácido Linoleico (Omega 6). El cuerpo humano requiere estos ácidos grasos esenciales para mantener una buena salud (Ayerza y Coates, 2011; Jamboonsri y col., 2012; Martínez-Maqueda y col., 2012; Mohd Ali y col., 2012). La semilla de chía contiene el porcentaje más elevado que cualquier otra fuente de ácido α -Linolénico (ALA). Este ácido graso es el precursor de PUFAs de cadena larga y es considerado esencial porque el cuerpo humano no es capaz de producirlo. Las semillas de chía contienen concentraciones altas de PUFAs que proporcionan potentes antioxidantes lipídicos (Ayerza y Coates, 2011; Marineli y col., 2015).

Dentro de los lípidos existe un grupo de ácidos grasos poli-insaturados que se denominan ácidos grasos esenciales (AGE); son muy importantes para la nutrición humana ya que no pueden sintetizarse en el organismo humano y deben ser incorporados a partir de la dieta. Los AGE para el hombre son: los ácidos grasos Omega-3 (ácido α -Linolénico y sus derivados de cadena larga) y los ácidos grasos Omega-6, cuyo precursor es el ácido Linoleico. La evidencia sugiere que los ácidos grasos Omega-3 juegan un rol importante en la membrana celular, el de aportar mayor flexibilidad a la misma, permitiendo el movimiento de proteínas en su superficie y dentro de la



(1) Leche (incluyendo caseína y proteína de suero de leche), (2) Clara de huevo, (3). Concentrado de proteína de soya, (4). Res, (5). Soya, (6). Garbanzo, (7).Frijol negro, (8). Concentrado de proteína de chícharo, (9). Lentejas, (10). Cacahuates, (11). Aislado de proteína de arroz integral, (12). Proteína de hemp, (13). Trigo integral, (14). Seitan / Gluten de trigo, (15). Almendras

Fig 6. Valores de PDCAAS de diversas fuentes de proteína

bicapa lipídica (Ayerza y Coates, 2011; Marineli y col., 2015).

Las cantidades necesarias de ácidos grasos Omega-3 van a depender del ciclo de vida de cada persona y de su estado fisiológico o patológico que pueden llevar a un aumento en las necesidades de ácidos grasos. Se estima en promedio que es necesaria una ingesta del 1 % de otras dos fuentes de Omega-3 disponibles que son de origen marino: las algas y el aceite de pescado, el cual presenta el problema de que las poblaciones mundiales de peces están en declive a causa de la sobre pesca y la contaminación de vías fluviales. Una solución parcial puede ser encontrada en la acuicultura, sin embargo, el valor nutricional de los peces de granja depende de lo que se alimentan, de ahí que las ventajas de comer más pescado pueden ser mínimas, dependiendo de con lo que ellos han sido alimentados (Ayerza y Coates, 2002).

Es por ello que en años recientes ha habido un creciente interés en el estudio y la aplicación de las semillas de chía, lo cual ha tenido como consecuencia que las investigaciones sobre la chía cobraran mayor relevancia, en particular por una de sus características más importantes, su contenido en ácidos grasos poliinsaturados los cuales están presentes en concentraciones altas. Los ácidos grasos presentes en el aceite de chía son altamente insaturados, tales como el ácido Linoleico (17-26%) y Linolénico (50-57%), cabe mencionar que el contenido de aceite y la cantidad de ácidos Oleico, Linoleico y Linolénico está en función de la región de cultivo (Jaramillo-Garcés, 2013).

Se han realizado un buen número de estudios sobre la composición en ácidos grasos del aceite de semillas de chía. Se ha encontrado que 970 g/kg del aceite de chía está compuesto por lípidos neutros y 574 g/kg de éstos, son ácido Linolénico, éste es un ácido graso con tres insaturaciones conocido como omega 3 y cuyo consumo repercute en importantes beneficios como en la reducción del riesgo de sufrir sobre todo enfermedades cardio-coronarias. También se reportan 172 g/kg de Linoleico, 93 g/kg de Oleico y sólo el 10 g/kg o menos de ácidos grasos saturados (Palmítico, Esteárico y Araquídico principalmente). La importancia de los omega 3 radica en que son precursores de los ácidos eicosapentanoico EPA (C20:5) y docosahexanoico DHA (C22:6) que se sabe tienen un importante papel en la coagulación sanguínea, en la disminución de la agregación plaquetaria y de los niveles de triglicéridos en sangre (Vázquez-Ovando y col., 2009; Valdivia-López y Tecante, 2015).

También se ha ensayado la inclusión de semillas de chía (ricas en omega 3) en alimentación animal; demostrando que pueden ser incorporados en dietas de gallinas sin afectar el sabor del producto, como ocurre de forma convencional cuando se aumenta el contenido de ácidos grasos con dos y tres insaturaciones. Además de que los huevos de gallinas alimentadas con chía presentaron un contenido más alto de ω -3 ALA comparado con gallinas alimentadas con linaza o semilla de colza (Mohd Ali y col., 2012).

La semilla de chía contiene el porcentaje más alto conocido de ácido graso α -Linolénico (ALA); el cual junto con el ácido Linolénico, son considerados como ácidos grasos esenciales porque no pueden ser producidos por el cuerpo humano. Estos ácidos grasos son precursores de los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs, por sus siglas en inglés) Omega 3 de cadena larga los ácidos eicosapentaenoico (EPA) y docosapentaenoico (DPA), los cuales son, a su vez, precursores de ciertas prostaglandinas, Leucotrienos y Tromboxano con actividad antiinflamatoria, anticoagulante y antiagregante. Es por ello que estos ácidos grasos recientemente han sido correlacionados con beneficios a la salud (Muñoz y col., 2013).

c Fibra dietaria

La fibra dietaria es un componente importante en la dieta diaria debido a sus efectos benéficos sobre la salud. Algunos de estos efectos son la reducción de los niveles de colesterol, modificación de las respuestas glicémica e insulinémica, cambios en la función intestinal, disminución del riesgo de enfermedad cardiovascular coronaria, *diabetes mellitus* tipo II, varios tipos de cáncer y también actividad antioxidante. El consumo de fibra dietaria se ha asociado a un incremento en la saciedad postprandrial y un decremento en la sensación de hambre (Borderías y col., 2005; Esposito y col., 2005; Muñoz y col., 2013). El mucílago de las semillas de chía contiene, aproximadamente, 48% de azúcar total, 4% proteínas, 8% minerales, y 1% de lípidos. La fibra es un polisacárido de peso molecular elevado, su estructura básica es un tetrasacárido con residuos de 4-O-methyl- α -D-glucuronopyranosyl con ramificaciones β -D-xylopyranosyl en la estructura de la cadena principal. La composición del monosacárido es 16% D-xylosa 1 D-mannosa, 2% D-arabinosa, 6% D-glucosa, 3% ácido galacturónico y 12% de ácido glucurónico. Las semillas de chía producen entre 35 y 40 g de fibra dietaria por cada 100 g, equivalentes al 100% de las recomendaciones para la población adulta (Vázquez-Ovando y col., 2009; Capitani y col., 2012; Kaczmarczyk y col., 2012).

El contenido de fibra de la chía es más alto que quinoa, linaza y amaranto, y mucho mayor comparado con otros productos secos (**Cuadro 6**).

6 Fitoquímicos en semillas de chía

a Compuestos fenólicos totales

El **Cuadro 7** muestra los compuestos polifenólicos presentes en extractos hidrolizados y no hidrolizados obtenidos a partir de la semilla de chía. Los ácidos Clorogénico y Cafeico son los antioxidantes más importantes en la semilla chía, aunque también se ha encontrado que contiene flavonoles tales como Quercetina, Miricetina y Kaempferol (**Fig 7**).

7 Propiedades nutraceuticas de semillas de chía

a Actividad antioxidante (AAox)

Da Silva (2014) obtuvo resultados que sugieren que las semillas de chía chilenas y su aceite pueden ser considerados como ingredientes funcionales con potencial de antioxidante alto en productos de alimentación con usos comerciales; la metodología utilizada en sus investigaciones le proporcionaron resultados bastantes similares a los obtenidos por Capitani (2013) para semillas de chía Argentina (557 TEAC, mmol/g) y fracciones fibrosas (446 TEAC, mmol/g), obtenido por extracción apremiante, y por Vázquez-Ovando y col. (2009) para una fracción de semillas de chía mexicana fibrosa (489 TEAC, mmol/g). Las muestras también mostraron la actividad de antioxidante más alta que la observada en extractos de harinas de trigo, cebada y sorgo (8.3, 14.9 y 51.7 TEAC, mmol/g) (Vázquez-Ovando y col., 2009; Capitani, 2013).

b Otras propiedades

En las semillas de chía se han identificado varios compuestos bioactivos, dentro de los cuales se incluyen los compuestos fenólicos y los ácidos grasos esenciales. El consumo de estos compuestos bioactivos proporciona beneficios a la salud pues poseen efectos antioxidante, antiagregante plaquetario, antiinflamatorio, antimutagénico, anticarcinogénico, antiviral, laxante, hipotensor, hipocolesterolemia, hipoglucemiantes, inmunoestimulante, cardioprotector suppressed (**Cuadro 8**) (Muñoz y col., 2013, Martínez-Cruz y Paredes-López, 2014; Orona-Tamayo y col., 2015; Orona-Tamayo y col., 2016).

En el **Cuadro 9** se observan algunos compuestos bioactivos identificados en la semilla de chía

Cuadro 6. Contenido de fibra dietaria total en chía y otros alimentos

Alimento	g/ 100g de producto
Chía	34.4
Linaza	27.3
Quinoa	7.0
Almendra	12.2
Cacahuete	8.5
Soya	9.6
Ciruela pasa	7.1
Higo deshidratado	9.8
Manzana deshidratada	8.7
Plátano deshidratado	9.9
Durazno deshidratado	8.2
Pera deshidratada	7.5

USDA (2016)

Cuadro 7. Concentración de antioxidantes fenólicos presentes en extractos de semilla de chía

Compuesto	g/kg de semilla de chía
<i>Extracto no hidrolizado</i>	
Flavonoles	Nd
Ácidos cinámicos	
Ácido cafeico	6.6×10^{-3}
Ácido clorogénico	7.1×10^{-3}
<i>Extracto hidrolizado</i>	
Flavonoles	
Mircetina	3.1×10^{-3}
Quercitina	0.2×10^{-3}
Kaempferol	1.1×10^{-3}
Ácidos cinámicos	
Ácido cafeico	13.5×10^{-3}

Taga y col (1984)

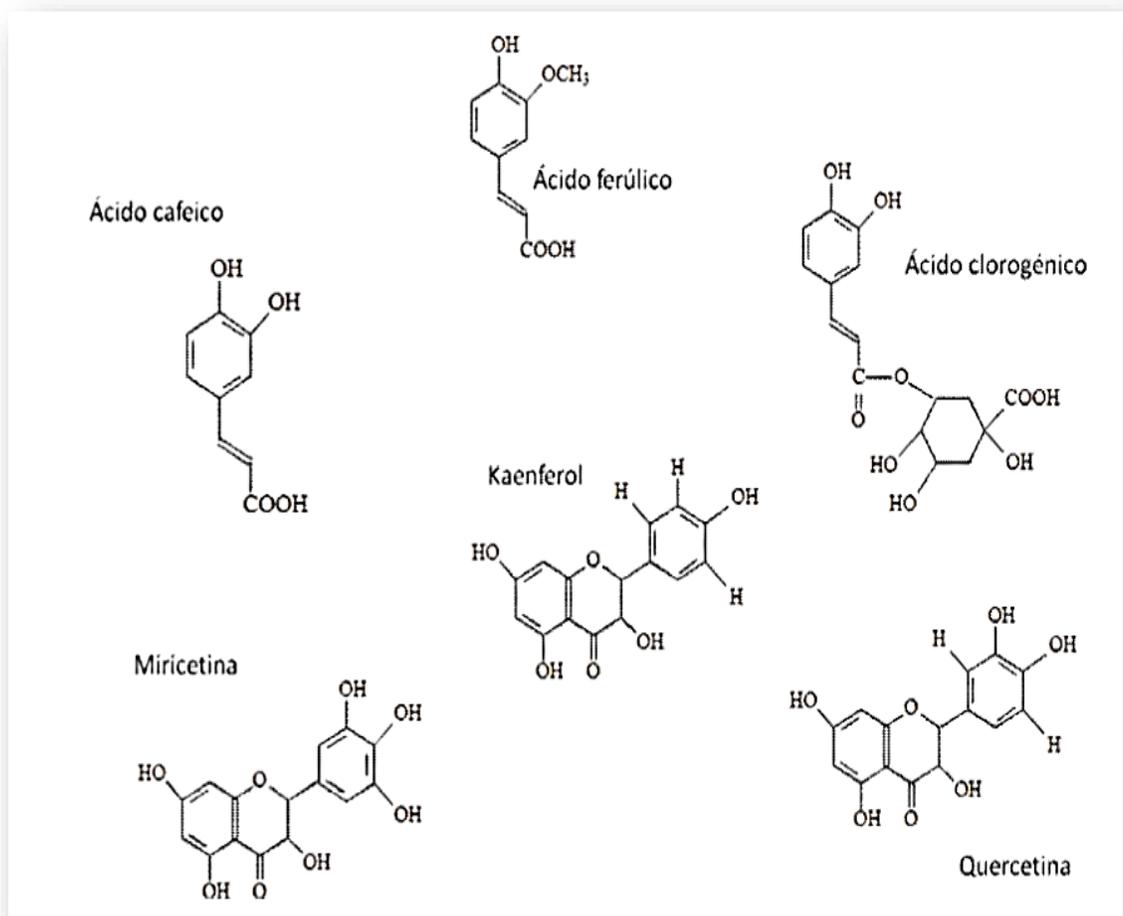
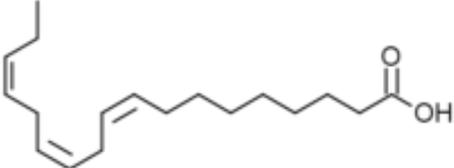
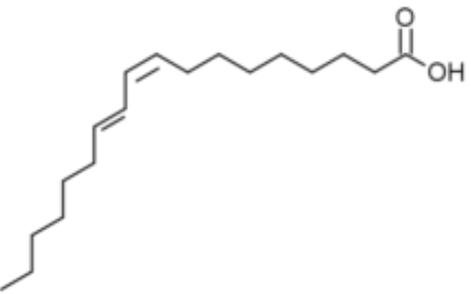
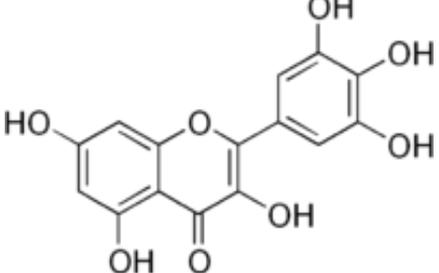
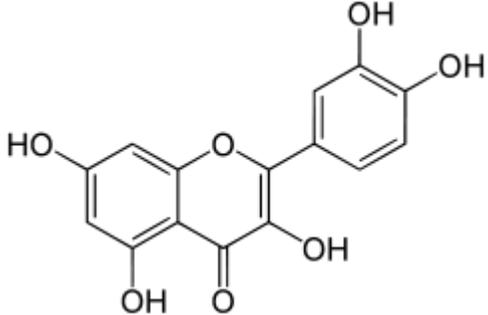
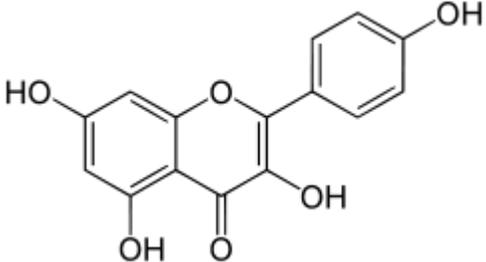
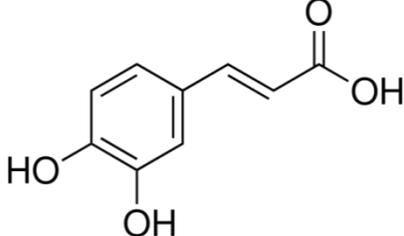


Fig 7. Estructura química de los antioxidantes presentes en semilla de chía
 Jaramillo-Garcés (2013)

Cuadro 8. Compuestos bioactivos identificados en *Salvia hispanica* L., estructura química y actividad que presentan

Compuestos activos	Estructura química	Actividad
<p>Omega 3 Ácido α linolénico; ω-3 ALA (18:3) Ácido graso poliinsaturado</p>		<p>Ácido graso esencial: Linolénico Beneficios: (1) Disminución de los niveles de triglicéridos y colesterol. Reducción de la presión sanguínea y menor incidencia de enfermedades cardiacas, (2) Actividad antiinflamatoria, (3) Actividad cardio y hepato protectora debido a redistribución de lípidos de la grasa visceral y hepática., (4) Acción antidiabética, (5) Protección contra la artritis, enfermedad autoinmune y cáncer.</p>
<p>Omega 6 Ácido linoleico; ω-6 LA (18:2) Ácido graso poliinsaturado</p>		<p>Ácido graso esencial: Linoleico Este ácido graso tiene actividad inflamatoria, hipertensiva y trombótica. Los eicosanoides producidos a partir del LA han sido asociados con enfermedades cardiovasculares y cáncer. Funciona inversamente al ALA; por lo que una relación balanceada de ALA y LA es importante para mantener una buena salud.</p>
<p>Miricetina (Flavolones y ácidos fenólicos)</p>		<p>Actividad antioxidante, antiinflamatoria, anticáncer y antitrombótica.</p>
<p>Quercetina (Flavolones y ácidos fenólicos)</p>		<p>Actividad antioxidante, antiinflamatoria, anticáncer y antitrombótica.</p>

<p>Kaempferol (Flavolones y ácidos fenólicos)</p>		<p>Actividad antioxidante, antiinflamatoria, anticáncer y antitrombótica.</p>
<p>Ácido Cafeico (Flavolones y ácidos fenólicos)</p>		<p>Actividad antioxidante, antiinflamatoria, anticáncer y antitrombótica.</p>

Muñoz y col., 2013, Martínez-Cruz y Paredes-López, 2014; Orona-Tamayo y col., 2015; Orona-Tamayo y col., 2016

junto con su estructura química y los beneficios que éstos le confieren en base a la actividad que presentan.

8 Oferta y demanda actuales, tendencia

Hoy día, la semilla de chía es usada para diversos propósitos en diferentes países, como México, Argentina, Chile, Nueva Zelanda, Japón, los Estados Unidos, Canadá, y Australia. En 2009, fue aprobado como un Alimento Novedoso por el Parlamento Europeo y el Consejo de Europa. Según la opinión científica, la chía no causa ningún efecto adverso alergénico, antinutricional o tóxico. Algunos usos más importantes de las semillas incluyen su empleo como un suplemento alimenticio y como un ingrediente en barras de cereal, bizcochos, pastas, pan, botanas, yogurt, entre otros, que incluyen su empleo incluso en formulaciones de pasteles (Mohd Ali y col., 2012; Peperkamp, 2014).

Otra característica importante de esta semilla es su empleo en la producción del aceite. Es ligero en colores y tiene la ventaja de contener una gran cantidad de aceites esenciales. El uso principal de este producto está en la producción de las cápsulas que proporcionan un suplemento alimenticio de Omega 3. El aceite también puede ser extraído de hojas de chía, y puede ser consumido como un condimento o usado como fragancia.

La semilla es rica en fibra, haciéndola ideal para el funcionamiento apropiado del intestino, y contiene proteínas sumamente nutritivas, más que los cereales tradicionales. Si bien la semilla de chía una buena fuente de vitaminas del complejo B además de minerales como Ca, Mg, P, Zn, K y otros. Las compañías que la comercializan suelen exagerar sus virtudes al utilizar frases sensacionalistas tales como: **(1)** Los guerreros aztecas podían sostenerse todo el día con una cucharada de chía, **(2)** Ayuda a controlar el apetito, crea un balance físico y mental, aumenta la energía del cuerpo, fuente de antioxidantes y acelera el metabolismo, **(3)** La mayor fuente vegetal de omega 3, **(4)** Los guerreros Aztecas eran capaces de enfrentar batallas y expediciones alimentándose con semillas de chía, **(5)** 1000% más omega 3 que el salmón, 300% más fibra que el cereal, 500% más calcio que la leche, 100% más potasio que el plátano, 1500% más magnesio que el brócoli, 200% más hierro que la espinaca.

Algunas de esas frases están basadas en información verdadera; sin embargo, presentan a las semillas de chía como algo casi milagroso sin recomendaciones apropiadas para su consumo, ya que desafortunadamente las sugerencias de uso escritas en el empaque suelen ser ambiguas. Es

común encontrar la frase: “Agregue al yogur, cereales, ensaladas, bebidas, aderezos y postres” sin considerar los problemas que puede causar la falta de hidratación de las mismas. Algunos productos encontrados en la localidad se muestran en el **Cuadro 10**.

Debido a que las semillas de chía puede absorber y expandir 27 veces su peso en agua, ésta se debe de consumir solamente hasta que se ha remojado lo suficiente para provocar la expansión total de la semilla y evitar así que esta se expanda dentro del esófago causando así un atasco en él. Si el esófago ya se ha obstruido con las semillas, la extracción de estas puede ser muy complicado y sería necesaria la intervención de herramientas de extracción endoscópica.

B EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

1 Generalidades

La tecnología de extrusión es un proceso continuo que combina el corte mecánico y calor para obtener productos plastificados y reestructurados con nuevas formas y texturas. El fundamento del proceso es combinar las operaciones unitarias de transferencia de calor, amasado y presión en una sola, lo que produce cambios significativos en la textura de cereales y oleaginosas (Zhao y col, 2011). Los materiales sometidos al proceso de extrusión, en general, sufren transformaciones químicas, estructurales y nutricionales como: **(1)** Gelatinización parcial del almidón, **(2)** Desnaturalización parcial de proteína, **(3)** Oxidación de lípidos, **(4)** Degradación de vitaminas y fitoquímicos, **(5)** Aumento en biodisponibilidad de minerales, **(6)** Incremento en contenido de fibra dietaria soluble, **(7)** Formación de sabores. A partir de este tipo de procesamiento se obtienen productos de valor nutricional alto, con propiedades fisicoquímicas específicas. La extrusión se ha utilizado para la fabricación de varios tipos de alimentos, como botanas, cereales para desayuno, pastas, productos de confitería, harinas precocidas, bebidas y proteínas vegetales texturizadas (**Cuadro 11**). Con los años, la extrusión se ha convertido en el método de mayor procesamiento de alimentos y las industrias de alimentación, y está evolucionando rápidamente de un arte a una ciencia (Serna-Saldívar y col, 1988; Milán-Carrillo y col, 2000; 2005; Riaz y col., 2009; Zhao y col, 2011; Reyes-Moreno y col., 2002, 2012). En la última década la extrusión ha sido estudiado ampliamente para producir una gran variedad de alimentos incluyendo productos de pasta y listos para comer, cereales para el desayuno, alimentos infantiles, botanas, proteínas vegetales texturizados, sopas secas y mezclas de bebidas. La extrusión mejora la digestibilidad y biodisponibilidad de los nutrimentos comparado con la cocción convencional. El uso de harinas de

Cuadro 9. Productos a base de chía en supermercados locales



<http://www.benmart-ag.com/>



<http://www.plantavit.mx/>



<http://www.plantavit.mx/>

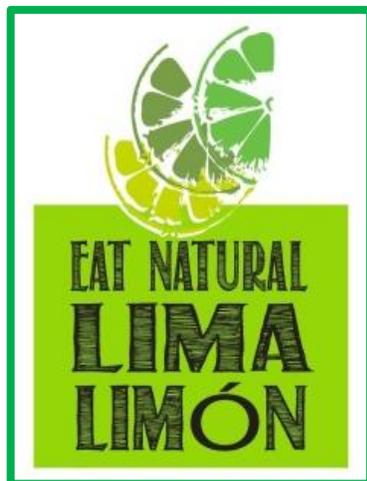
Productos
Alimenticios
de Los Altos
SPR de RL de
CV



<https://natuvit.com.mx/inicio/72-semilla-de-chia-natural-metzli-370gr.html>



<http://xiomega3.com/>



<http://www.lala.com.mx/semillas/>



<http://www.lala.com.mx/semillas/>



<http://www.chiamia.com.mx/>

Cuadro 10. Productos alimenticios obtenidos a través de la extrusión

Tipo	Ejemplo
Directamente expandido	Cereales para desayuno, churritos de maíz
Sin expandir	Pasta
Semi-Producto	Pellets de papa
Co-extrudidos	Cereal a base de fruta o relleno de fruta
Modificado	Almidón, sustituto de grasa
Texturizado	Productos tipo carne
Dulces	Licorice, goma de mascar

Karwe (2003)

granos extrudidos para la elaboración de algunos productos alimenticios tiene varias ventajas. El proceso de extrusión es acompañado por la gelatinización parcial de los gránulos de almidón, resultando en la pérdida del orden molecular y la degradación de polímeros con la formación de fragmentos altamente solubles. El uso de la extrusión en el procesamiento de alimentos ha aumentado su popularidad debido a su versatilidad, rentabilidad, respeto al medio ambiente y generación de productos extrudidos con una mejor digestibilidad y valor biológico de las proteínas que la materia prima (granos, mezclas de granos, etc) sin procesar (cruda) (Guy, 2001; Singh y col, 2010; Garzón-Tiznado y col., 2013).

Un extrusor de alimentos es considerado un biorreactor a temperaturas altas y tiempos cortos, que transforma una variedad de ingredientes crudos en intermediarios modificados y productos terminados. Este desarrollo se ha dado en función de los requerimientos en el procesamiento de alimentos: **(1)** Procesamiento continuo, **(2)** Eficiencia de energía, **(3)** Procesamiento de materiales viscosos relativamente secos, **(4)** Textura y sabor al alimento, **(5)** Control de cambios térmicos de constituyentes alimenticios y **(6)** uso de ingredientes no convencionales. Al aplicar la extrusión se obtiene una amplia variedad de productos, por modificación en los ingredientes y las condiciones de operación del extrusor. El proceso es extremadamente flexible y tiene la capacidad de satisfacer la demanda de los consumidores por nuevos productos. Dentro de los factores que contribuyen a la versatilidad se encuentran: **(1)** Diseños específicos del extrusor, **(2)** Variables de operación, **(3)** Variedad de materias primas a procesar y **(4)** Las diferentes características que pueden obtenerse en los productos terminados. La extrusión tiene costos de procesamiento muy bajos y una productividad más alta que cualquier otro proceso de cocimiento y moldeado; sus requerimientos de espacio por unidad de producción son más pequeños (Harper, 1988). (Ver **Fig 8 y 9**).

En la extrusión se alcanzan tasas de producción de más de 315 kg/h para alimentos tipo botana, 1,200 kg/h para alimentos de densidad baja a base de cereales y 9,000 kg/h para alimentos expandidos para mascotas. No produce efluentes en el proceso, con lo que disminuye la contaminación por aguas residuales. A su vez, la extrusión minimiza la degradación de nutrimentos por la acción del calor y mejora la digestibilidad por la gelatinización de almidón y la desnaturalización de proteínas. También destruye la mayoría de los factores antinutricionales del alimento. Por otro lado, los extrusores operan a humedades relativas bajas lo cual permite que la cantidad de energía requerida para la cocción del alimento sea mínima (Fellows, 2007).

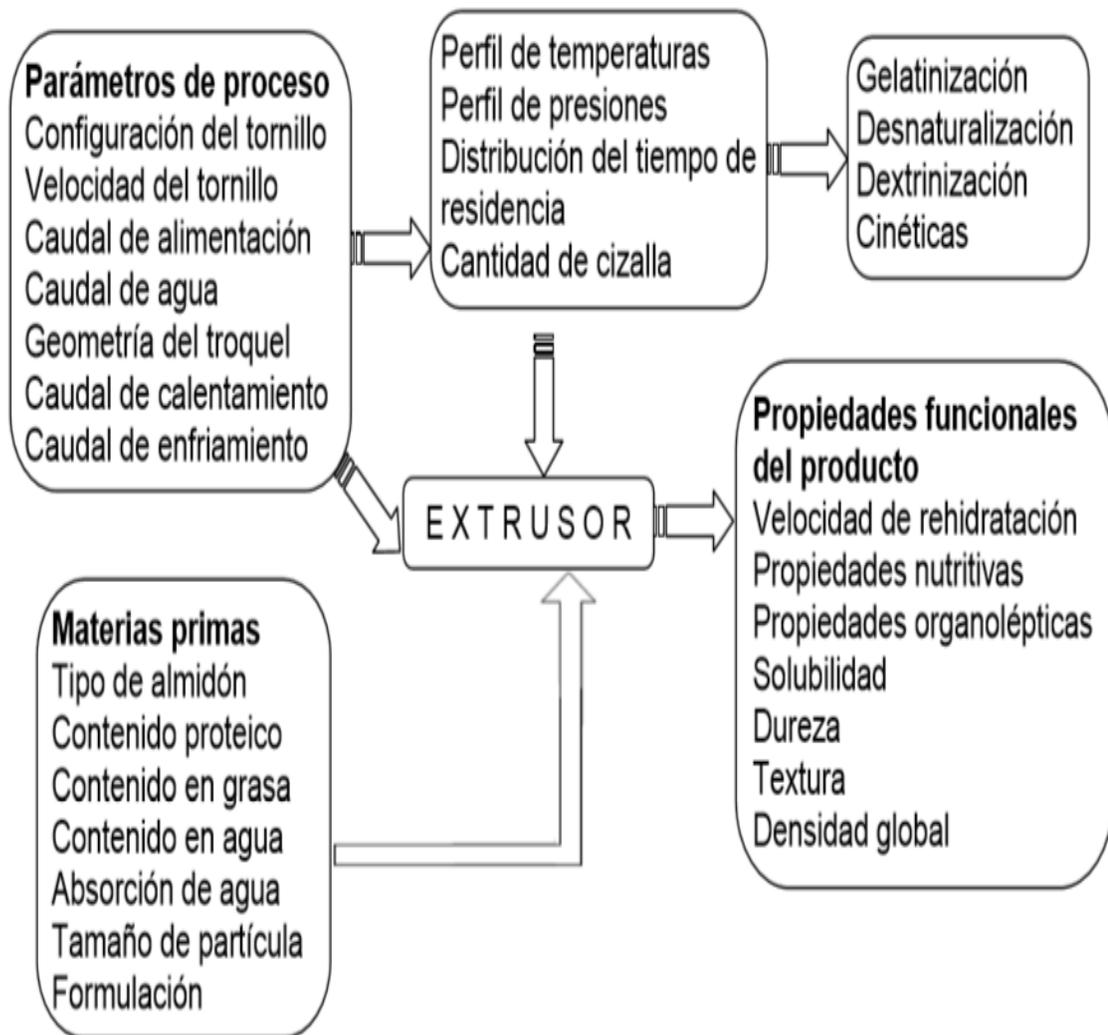


Fig 8. Interacción de las propiedades del material, variables del proceso de extrusión y características del producto final

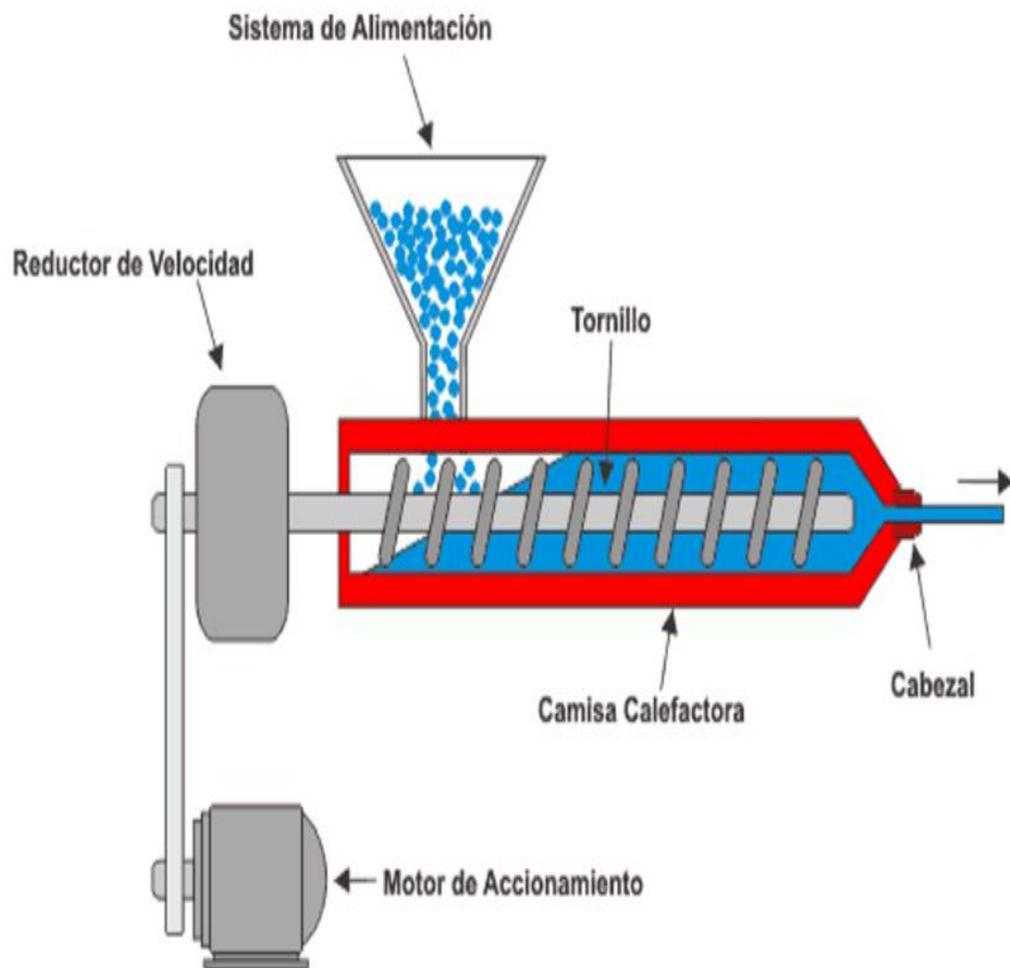


Fig 9. Componentes principales de un extrusor

Las condiciones del proceso de extrusión representan un papel muy importante en la calidad de los extrudidos. El control del proceso de extrusión del producto depende de los parámetros de los procesos primario y secundario. Los parámetros del proceso primario incluyen: **(1)** Velocidad de alimentación, **(2)** Velocidad del tornillo, **(3)** Temperatura del cilindro, **(4)** Contenido de agua, **(5)** Formulación de alimentación, y **(6)** Configuración de tornillo y matriz. Los parámetros del proceso secundario incluyen: **(1)** Temperatura de la matriz, **(2)** Presión y **(3)** Esfuerzo de torsión (Chessari y Sellahewa, 2001).

El tratamiento de pre-acondicionamiento de las materias primas con ayuda de agua caliente o vapor durante aproximadamente 4-5 min ayuda a la gelatinización parcial del almidón y la desnaturalización parcial de proteínas de las materias primas durante el proceso de extrusión (Bailey y col, 1995).

2 Efecto de la extrusión sobre composición química

Físicamente, la extrusión convierte los cuerpos proteínicos en una matriz homogénea. Químicamente, el proceso recombina las proteínas de reserva en fibras estructuradas. Además, estos procesos producen alteraciones nutrimentales en las proteínas. La extrusión térmica expone a las proteínas a temperaturas y presiones altas y esfuerzos mecánicos intensos, los que se combinan para convertir a los materiales proteínicos en una masa plástica continua. A medida que esta masa viaja a través del extrusor, las características del flujo hacen que las cadenas de proteínas se alineen en capas paralelas al tornillo, formando una matriz tridimensional de polipéptidos parcialmente asociados, entre la cual se encuentra atrapada el agua. Cuando la presión se libera a la salida del dado, se busca una vaporización de la humedad, lo que resulta en la formación de partículas de proteína fibrosas y porosas. Esta estructura conserva la capacidad de retener agua debido a la disposición de los grupos reactivos en el espacio (Stanley, 1998).

Las condiciones del procesamiento por extrusión (temperatura alta y contenido de humedad bajo) favorecen la reacción de Maillard de grupos amino con azúcares reductores que resultan en pérdidas de aminoácidos (p. ej. disminución de Lisina disponible) y formación de compuestos coloreados. Los cambios químicos durante el cocimiento por extrusión se deben en mayor parte a la forma e intensidad del tratamiento térmico (Ilo y Berghofer, 2003).

En relación a los cambios que suceden en lípidos, el producto extrudido sufre un proceso de emulsión debido a la fuerte presión a que son sometidas las finas gotas de grasa y son recubiertas por los almidones y proteínas, quedando la grasa encapsulada. Para realizar la determinación correctamente es necesario emplear el método de hidrólisis ácida y extracción posterior, ya que con el método de extracto etéreo no se consiguen los resultados que corresponden en realidad al producto. Generalmente las lipasas y peroxidasas son inactivadas durante el proceso de extrusión en condiciones normales, mejorando la estabilidad posterior del producto (Valls, 1993).

La extrusión incluye la aplicación de tratamientos térmicos, presiones altas y fuerza de cizalla en el alimento; este tratamiento termomecánico induce algunos cambios en la molécula de almidón, como la fusión de cristales, rompimiento de gránulos y disrupción molecular de amilopectina. El grado de degradación macromolecular es función de los parámetros de extrusión: temperatura, humedad del alimento, tipo de almidón y velocidad del tornillo dentro del extrusor; a su vez, el número de enlaces hidrolizados incrementa con el aumento de la temperatura de extrusión y la disminución de la humedad inicial en el alimento (Davidson y col, 1984).

La base física de la modificación molecular de amilosa y amilopectina está relacionada con el tiempo de exposición durante el canal del tornillo del extrusor, en donde se establecen efectos mecánicos de presión y fuerza de cizalla, los cuales prevalecen por encima de los efectos térmicos, para el fenómeno de despolimerización (Álvarez-Martínez y col, 1988). Por otra parte, la modificación molecular es menos intensa en almidones cuando se acompañan de lípidos. Éstos actúan como lubricantes durante la extrusión de almidón; cada tipo de lípido tiene un distinto efecto (Colonna y col, 1981). Los polímeros de almidón extrudidos son degradados en compuestos de menor peso molecular. El análisis de contenido de β -dextrina límite, obtenida de la hidrólisis del almidón por α -amilasa, en almidón extrudido, revela que la distribución de tamaño es diferente, indicando una variación muy grande en la estructura interna de la amilopectina sometida a extrusión (Colonna y col, 1989). Además, se ha encontrado que se conserva la proporción de enlaces α -1-6 y α -1-4 en los componentes amilosa y amilopectina del almidón extrudido en comparación con el almidón nativo. Tanto la amilosa como la amilopectina tienen la misma susceptibilidad a degradación macromolecular; se sugiere que los puntos extremos de ramificación de amilopectina son los más susceptibles a ruptura hidrolítica en almidones extrudidos con un contenido de

humedad de 20-25% a temperaturas dentro del extrusor de 121-127°C (Davidson y col, 1984). Ver **Fig 10**.

Las moléculas de amilosa tienen una gran tendencia a reasociarse y formar puentes de hidrógeno, más que las moléculas de amilopectina. Si ocurre retrogradación, la pasta de almidón se vuelve opaca y forma un gel. Con el tiempo, el gel se vuelve gomoso y con tendencia a perder agua (Raymond y Lloyd, 2002). Estos cambios ocurren principalmente durante y después de la extrusión; este fenómeno afecta significativamente la textura y otras propiedades de alimentos extrudidos. Las películas formadas dependen del contenido de agua, el tipo de almidón y su interacción con otros ingredientes dentro del sistema. La retrogradación se mide en base a la cristalinidad del producto extruido, mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) y difracción de rayos X (Dendy y Dobraszczyk, 2001).

El método analítico para determinar la calidad del producto procesado en forma cuantitativa es el método enzimático de la glucoamilasa. Este método mide el porcentaje de gelatinización (grado de cocción), que es la cantidad de almidón gelatinizado en la muestra expresada como un porcentaje del total del almidón. El cambio sufrido en la estructura de los cereales durante la extrusión es de tal magnitud, que el producto resultante es un nuevo producto. Cuando se extruye el salvado el contenido en fibra soluble se incrementa significativamente. Varias observaciones indican que las paredes de las celulosas del producto extruido se adelgazan y la superficie es más rugosa que la inicialmente de partida. Para conseguir efectos significativos sobre la fibra hay que procesar los productos bajo condiciones muy severas, cosa que no ocurre en condiciones de trabajo normales (Dendy y Dobraszczyk, 2001; Raymond y Lloyd, 2002).

En cuanto a lo que sucede a las vitaminas durante la extrusión es importante indicar que 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 y temperaturas y presiones altas (Valls, 1993). 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, nivel de humedad alto en el proceso da más vitaminas retenidas. Las vitaminas hidrosolubles, como la vitamina C o del grupo B, pueden perder estabilidad durante la extrusión. La extrusión húmeda produce una pérdida de vitamina C y Tiamina (Valls, 1993).

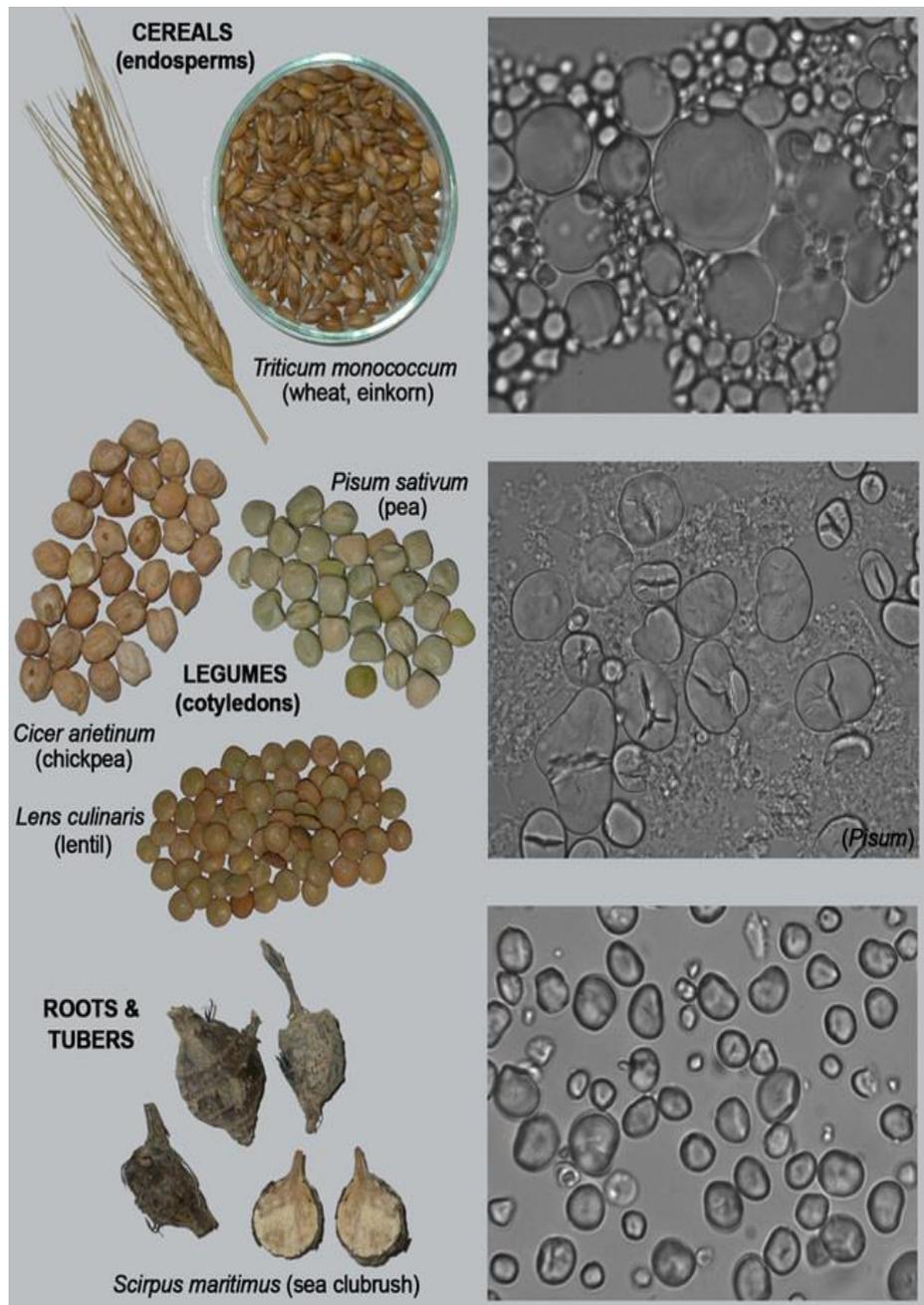


Fig 10. Formas diferentes de gránulos de almidón de diversas fuentes
(Fuente: <http://archaeobotany.dept.shef.ac.uk>)

Los cereales y productos basados de cereales también son una fuente rica de vitaminas (Tiwari y Cummins, 2009). La extrusión tiene un profundo efecto en la estabilidad de las vitaminas en alimentos extrudidos. Temperaturas de extrusión más altas y contenidos bajos de humedad en la alimentación favorecen la degradación de ácido ascórbico durante la extrusión (Killeit, 1994). La estabilidad de vitaminas durante la extrusión ha sido extensivamente estudiado (Camire y col, 1990; 2002; Killeit, 1994; Riaz y col, 2009). Athar y col. (2006) estudiaron el efecto de procesamiento de las condiciones de extrusión sobre la estabilidad de las vitaminas. Observaron que las piezas extrudidas obtenidas de extrusores de barril corto (90 mm) tenían una mayor tasa de retención del grupo vitamina B (44-62%) en comparación con 20% para extrusores de barril largo.

Anuonye y col. (2010) estudiaron la estabilidad de las vitaminas durante la extrusión de una mezcla de Acha (*Digitaria exilis*) / frijol de soya; observaron una disminución de 6% de Riboflavina (B₂), una disminución de 86.36% de Piridoxina (B₆), y un cambio significativo en contenido de ácido ascórbico (Brennan y col, 2011).

3 Efecto de la extrusión sobre valor nutricional

El valor nutricional de los cereales/pseudocereales ha sido estudiado después de ser sometidos al proceso de extrusión. Chávez-Jauregui y col. (2000) evaluaron el perfil de aminoácidos en amaranto extrudido encontrando que el proceso de extrusión no disminuía los contenidos de ácido Aspártico, ácido Glutámico, Glicina y Lisina comparándolo con el crudo. Sin embargo, otros autores tales como Bressani y col. (1983) mencionan que el proceso de extrusión disminuye la biodisponibilidad de Lisina.

Reyes-Moreno y col. (2002) estudiaron el efecto del proceso de extrusión, acompañado de un acondicionamiento previo denominado descascarillado / suavización [eliminación de testa / remojo previo del grano en disolución de sales monovalentes de sodio], proceso que denominaron descascarillado / suavización / extrusión (DSE), sobre el valor nutricional de granos de garbanzo (*Cicer arietinum* L), fresco (recién cosechado) y endurecido (almacenado en condiciones de temperatura y humedad relativa altas). Ellos observaron que el proceso DSE tuvo un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre el valor nutricional de los granos. El proceso DSE mejoró digestibilidades proteínicas aparente (de 78.9-81.7% a 84.0- 87.1%) y verdadera (de 82.5-84.8% a 87.3-91.2%), relación de eficiencia proteínica (de 1.30-1.47 a 1.78-1.87) relación neta de proteína

(de 2.63-2.82 a 2.97-2.99) de los granos de garbanzo. Ellos concluyeron que el proceso DSE podría ser aplicado para mejorar las características de calidad nutricional de granos de garbanzo fresco y endurecido. Este proceso, o una adaptación del mismo, podría ser aplicado a cereales / pseudocereales que contengan factores antinutricionales en cubierta seminal (p. ej. saponinas en cascarilla de semilla de quinoa).

4 Efecto de la extrusión sobre niveles y perfiles de fitoquímicos

Los compuestos bioactivos en alimentos y productos alimentarios desempeñan un papel vital en el humano proporcionando protección contra enfermedades crónico - degenerativas (Van Dokkum y col., 2008). Aparte de los beneficios para la salud, los compuestos fenólicos naturales en alimentos y productos alimentarios también actúan como atrapadores de radicales libres, quelantes de catalizadores metálicos y retardadores de oxidación lipídica; esto, sin duda alguna, mejora la vida útil y la aceptación del consumidor por los productos extrudidos. Viscidi y col., (2004) observaron que la adición de ácidos Ferúlico y Benzoico a niveles igual o superior a 1.0 g/kg resultó en un inicio retrasado de la oxidación en avena basada en piezas extrudidas.

Los granos de cereales / pseudocereales 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; Dehghan-Shoar y col., 2010).

Varias variables de proceso de extrusión pueden influir en la composición de los productos extrudidos. Estos incluyen las características de las materias primas, mezcla y acondicionamiento de materia prima, temperatura del barril, presión, velocidad del tornillo, contenido de humedad, velocidad de alimentación, entrada de energía, tipo de residencia, configuración de tornillo, etc. influyen en las propiedades fisicoquímicas de las piezas extrudidas. Las variables de proceso de extrusión crítico tales como temperatura, velocidad del tornillo y el contenido de humedad pueden inducir modificaciones deseables, mejorando la palatabilidad y propiedades tecnológicas de productos extrudidos (Brennan y col., 2011).

Estas condiciones tienen la capacidad de producir influencias tanto positivas o negativas en los compuestos bioactivos de los productos extrudidos. Varios estudios han demostrado que el

proceso de extrusión reduce significativamente mensurables compuestos bioactivos en los productos alimenticios. Korus y col. (2007) investigaron el efecto de la extrusión sobre la actividad antioxidante y el contenido de compuestos fenólicos en frijol común; ellos observaron disminuciones significativas tanto en **AAox** como en **CFT**.

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, México, para la elaboración de tortillas. Ellos reportaron que el proceso de extrusión-cocción disminuyó ($p < 0.05$) 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 extrudidos con potencial nutracéutico.

5 Efecto de la extrusión sobre la actividad antioxidante y propiedades nutracéuticas

Korus y col. (2007) observaron una menor actividad antioxidante (**AAox**) para frijol rojo oscuro comparado con frijoles negro marrón y crema coloreada, aunque las piezas oscuro-frijoles rojos extrudidos exhibieron mayor contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**) al compararse con frijoles marrón negro y crema extrudidos. En algunas instancias se ha reportado que la **AAox** se incrementa en productos extrudidos al compararse con granos sin procesar; además se ha reportado que **AAox** se incrementa al aumentar la temperatura de extrusión (**TE**). White y col. (2010) observaron un aumento en los valores de **AAox** evaluada por ORAC (6-30%) con un incremento en **TE**. El aumento en los valores ORAC podría deberse a los productos formados durante la reacción de Maillard.

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 oxígeno (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 ($p < 0.05$) [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 ($p < 0.05$) [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 Dewanto y col., 2002), **(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 (Fares y Menga, 2012). Estos resultados muestran que los compuestos fenólicos ligados son los principales contribuyentes (56-71%) a la AAox hidrofílica, tanto en harinas de amaranto crudo como extrudido. Los compuestos bioactivos existen en formas libre, soluble-conjugada y ligada; los fitoquímicos ligados, mayormente presente en materiales de pared celular, son difíciles de digerir en la parte alta del intestino y podrían ser digeridos por las bacterias del colon proporcionando beneficios a la salud y reduciendo el riesgo de cáncer de colon (Adom y Liu, 2002; Liu, 2007).

Garzón-Tiznado y col. (2013) evaluaron el efecto del proceso de extrusión-cocción, aplicando condiciones optimizadas previamente, sobre propiedades antioxidantes y antimutagénicas de tres cultivares de garbanzo desi (café ICC3512, rojo ICC13124, negro ICC 3761) del Banco Mundial de Germoplasma del ICRISAT (International Crop Research Institute for the Semiarid Tropics). La extrusión se realizó en un extrusor de tornillo simple; se aplicaron condiciones de operación del extrusor previamente optimizadas para obtener harina de garbanzo extrudido con AAox máxima: Temperatura de extrusor (TE)=155°C / Velocidad del tornillo (VT)=240 rpm. El proceso de extrusión en condiciones optimizadas incrementó el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT), AAox y la actividad antimutagénica (AAM) en 5.3-9.2%, 9.9-12.2% y 17.5-21.9%, respectivamente. El proceso de extrusión en condiciones óptimas es una tecnología susceptible de ser recomendada para incrementar actividades antioxidante y antimutagénica en garbanzo desi, el cual puede ser utilizado como "alimento funcional".

Montoya-Rodríguez y col. (2014a) investigaron el efecto del proceso de extrusión-cocción, aplicando condiciones optimizadas previamente, sobre el potencial antiinflamatorio de amaranto. La extrusión se realizó en un extrusor de tornillo simple; se aplicaron condiciones de operación del extrusor previamente optimizadas para obtener harina de amaranto extrudido con AAox máxima: Contenido de humedad de alimentación: 20% / Temperatura de extrusor (TE)=127°C / Velocidad

del tornillo (VT)=130 rpm. El objetivo de la investigación fue comparar el potencial antiinflamatorio de hidrolizados proteínicos de harinas de amaranto crudo y extrudido; los hidrolizados proteínicos de ambas harinas inhibieron la inflamación inducida en células de macrófagos, humano y ratón, mediante la prevención de la activación de la señalización NF- κ B. El proceso de extrusión cocción mejoró sustancialmente el efecto antiinflamatorio de los hidrolizados proteínicos de harina de amaranto en ambas células, fenómeno que puede atribuirse a la producción de péptidos bioactivos durante el procesamiento.

Sarawong y col (2014) estudiaron el efecto de las variables del proceso de extrusión (CH =29 y 50%, VT =200 y 400 rpm), utilizando extrusor de tornillo doble con temperatura de extrusión constante, sobre propiedades fisicoquímicas, almidón resistente, propiedades de pasta y actividad antioxidante de harina de plátano verde. Al comparar la harina de plátano verde nativa (sin procesar) con la harina de plátano verde extrudido se observó que el proceso de extrusión causó cambios significativos en todas las propiedades estudiadas, excepto en fibra dietaria soluble y actividad antioxidante [ABTS, DPPH] de los compuestos fenólicos ligados.

Rochín-Medina y col. (2015) optimizaron los procesos de extrusión de maíz y garbanzo para obtener harinas de maíz y garbanzo extrudidos (HME, HGE), con actividad antioxidante ($AAox$) y contenido de compuestos fenólicos (CFT) altos. Las condiciones óptimas de extrusión [Maíz: TE =109°C/ VT =158 rpm / Garbanzo: TE =127°C/ VT =151 rpm] provocaron un incremento en la $AAox$ y contenido de compuestos fenólicos totales (CFT), en ambos granos, al compararse con granos crudos. A partir de estas harinas prepararon una mezcla (60% HME + 40% HGE) la cual se utilizó como ingrediente principal para la preparación de una "Bebida funcional". Esta "Bebida funcional" tuvo una $AAox$ =1,994 mmol ET/ porción 200 mL. El consumo de una porción (200 mL) de esta bebida contribuye con 39.80-66.44% de los requerimientos diarios de antioxidantes recomendados (3,000-5,000 mmol ET/día) por USDA (2010). El valor nutricional, potencial antioxidante y aceptabilidad (sensorial) de esta bebida pueden ser atribuidos al empleo de granos integrales y al uso de condiciones óptimas de extrusión. Esta bebida nutracéutica podría ser usada para la promoción de salud y la prevención de enfermedades (principalmente las asociadas al estrés oxidativo) y como una alternativa a las bebidas con bajo valor alimenticio / nutracéutico y a contenido calórico alto que son las que abundan en el mercado (Rochín-Medina y col., 2012, 2015).

Montoya-Rodríguez y col. (2014b) investigaron el efecto del proceso de extrusión-cocción, aplicando condiciones optimizadas previamente, sobre el potencial antiaterosclerótico de amaranto. La extrusión se realizó en un extrusor de tornillo simple; se aplicaron condiciones de operación del extrusor previamente optimizadas para obtener harina de amaranto extrudido con AAox máxima: Contenido de humedad de alimentación: 20% / Temperatura de extrusor (TE)=127°C / Velocidad del tornillo (VT)=130 rpm. El objetivo de la investigación fue comparar el potencial antiaterosclerótico de hidrolizados proteínicos de harinas de amaranto crudo y extrudido. El hidrolizado proteínico de harina de amaranto extrudido mostró potencial antiaterosclerótico en células de macrófagos a través de reducción de la expresión de proteínas asociadas con la ruta de señalización de LOX-1.

Espinoza-Moreno y col. (2016) optimizaron las condiciones del proceso de extrusión – cocción para, a partir de una mezcla (70% maíz mejorado con amarantina + 30% frijol común negro), preparar una “botana expandida optimizada”, reconocida como “botana saludable de tercer generación”, con actividad antioxidante (**AAox**) y contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**) altos; además de textura e índices de expansión que correspondieran a “botanas expandidas” presentes en el mercado. Encontraron las mejores condiciones de extrusión (CH=15% / TE=157°C / VT=238 rpm) para producir una botana saludable con **AAox** alta (AAox= 13,681 µmol ET/ 100 g botana, bs). Las condiciones óptimas de extrusión causaron incremento en **AAox** (ORAC: +18 %, ABTS:+20 %) y **CFT** en relación a la mezcla de granos sin procesar.

Corrales-Bañuelos y col. (2016) reportaron que el proceso de extrusión-cocción disminuyó ($p < 0.05$) la actividad antioxidante lipofílica (ORAC-L, por sus siglas en inglés) de maíces criollos amarillos al compararse con granos crudos. Las tortillas elaboradas con harina de maíces extrudidos retuvieron el 60.3-75.5% de la actividad antioxidante lipofílica presente en grano entero. Estos investigadores sugieren que los maíces amarillo criollos originarios de Sinaloa, México pueden ser considerados para la elaboración de productos alimenticios extrudidos con potencial nutracéutico. Ver **Cuadro 12**.

6 Efecto de la extrusión sobre factores antinutricionales

La extrusión de frijoles y chícharos con **TE**=180°C y contenido de humedad (**CH**) de la alimentación de 22% favoreció la eliminación completa de los inhibidores de tripsina (EI-Hady y

Cuadro 11. Efecto de las condiciones de extrusión-cocción sobre compuestos bioactivos y propiedades nutraceuticas de algunos granos y mezclas de granos

Materia prima	Condiciones de extrusión	Observaciones / Referencia
Amaranto	CH=20% / TE =127°C / VT=130 rpm	Incremento en AAox y CFT de 3,475 a 3,903 mmol ET/100 g muestra, bs y de 56.6 a 69.50 mg EAG/ 100 g muestra, bs / (1)
Maíz de calidad proteínica / frijol com.	Maíz de calidad proteínica: TE=98°C / VT=218 rpm Frijol común: TE= 105°C / VT= 83 rpm	Optimizó proceso de extrusión para obtener mezcla (60% harina de maíz extrudido +40% de frijol común extrudido) que se utilizó para preparar “bebida mexicana”. Incrementos en AAox , CFT de ambas harinas por efecto de extrusión / (2)
3cultivares garbanzo	CH= 20% / TE=155°C VT= 240 rpm	Incrementos en CFT, AAox, Actividad antimutagénica en 5.3-9.2%, 9.9-12.2% y 17.5-21,9%, respectivamente / (3)
Maíz criollo azul	CH=23.8-25.2% TE=120-126°C VT=80 rpm	Se elaboró “botana expandida” de tercera generación utilizando mezcla maíz azul y almidón. Contenido de antocianinas totales decreció (70-85%) , en relación a grano crudo, por efecto de las condiciones de extrusión / (4)
Amaranto	CH=20% / TE=127°C VT=130 rpm	Se observó incremento en AAox y en potencial antiinflamatorio al comparar harina de amaranto extrudido vs harina de amaranto crudo / (5)
Amaranto	CH=20% / TE=127°C VT=130 rpm	Se observó incremento en AAox y en potencial antiateroesclerótico al comparar harina de amaranto extrudido vs harina de amaranto crudo / (6)
Maíz / garbanzo	Maíz TE=109°C/VT=158 rpm Garbanzo TE=127°C/VT=151 rpm)	Se optimizó el proceso de extrusión para obtener mezcla (60% harina de maíz extrudido +40% harina de garbanzo extrudido) que se utilizó como ingrediente principal para “bebida mexicana”. Se observaron incrementos en AAox , CFT de ambas harinas por efecto de extrusión / (7)
08 maíces Mexicanos pigmentados	CH=28% p/p / TE=85°C VT=240 rpm	El proceso de extrusión provocó disminución en carotenoides totales y en AAox lipofílica total; las tortillas de harina de maíz extrudido retuvieron 68.8-79.5%, 60% y 60.3-75.5% de carotenoides totales , Luteína y AAox lipofílica total, respectivamente / (8)
70% MCP + 30% frijol común negro	CH=15% / TE=157°C VT=238 rpm	Se elaboró “botana saludable” elaborada a partir de la mezcla 70% harina maíz calidad proteínica + 30% harina frijol común negro (AAox= 13,681 µmol ET/ 100 g botana, bs) Las condiciones de extrusión utilizadas causaron incremento en AAox (ORAC: +18 %, ABTS:+20 %) y CFT en relación a la mezcla de granos sin procesar / (9)
02 maíces criollos (A.B)	CH=28% p/p / TE=85°C VT=240 rpm	En comparación con la AAox celular encontrada en granos crudos, el porcentaje de retención para tortillas elaboradas con harina de maíces extrudidos fue de 72.8-77.5% / (10)

¹ Milán-Carrillo y col. (2012), ² Reyes-Moreno y col. (2012), ³ Garzón-Tiznado y col. (2013), ⁴ Camacho-Hernández y col. (2014), ⁵ Montoya-Rodríguez y col. (2014a), ⁶ Montoya-Rodríguez y col. (2014b), ⁷ Rochín-Medina y col. (2015), ⁸ Corrales-Bañuelos y col. (2016), ⁹ Espinoza-Moreno y col. (2016), ¹⁰ Gaxiola-Cuevas y col. (2017)

Habiba, 2003). El contenido de inhibidores de tripsina en habas y chícharos extrudidos se redujo significativamente después del proceso de extrusión. La inactivación de lectinas e inhibidores de tripsina se incrementó al aumentar la **TE** y el **CH** de alimentación de la materia prima (Björck y Asp, 1983).

El-Hady y Habiba (2003) reportaron que el remojo de frijoles y chícharos durante un periodo de 16 h, seguido de procesamiento por extrusión, dio como resultado una mayor eliminación de factores antinutricionales al comparar los granos extrudidos con la materia prima.

Camire (2005) también ha resumido el efecto de la extrusión sobre factores antinutricionales contra diversos parámetros de extrusión. La eliminación de los inhibidores de la proteasa se puede lograr con éxito mediante el proceso de extrusión a temperaturas más altas mientras que la inhibición completa del gossipol se puede lograr aumentando el contenido de agua de la alimentación durante el proceso de extrusión (Camire, 2005).

La extrusión de cereales también se estudió extensamente (Kaur y col., 2013). La extrusión de trigo, arroz y cebada a 140°C y contenido de agua (20%) dio como resultado una reducción de más del 50% en el contenido de fitatos, inhibidores de tripsina y oxalatos en los bocadillos de cereal extruido.

IV JUSTIFICACIÓN

1. Las semillas de chía (*Salvia hispánica* L) contienen, bs, 15-24 % proteínas, 18-30% fibra dietaria, 25-40% lípidos [55-60% ácido Linolénico (Omega 3), 18-20% ácido Linoleico (Omega 6), 6% ácido Oleico (Omega 9), 10% ácidos grasos saturados]. Por otro lado, las semillas son una buena fuente de vitaminas del complejo B y minerales. Contienen 6 veces más Ca, 11 veces más P y 4 veces más K que 100 g de leche. Adicionalmente contienen Mg, Fe, Zn, Cu. Además, poseen una gran cantidad de antioxidantes naturales, como compuestos fenólicos, los cuales protegen contra enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer. Otra importante característica de esta semilla es que no contiene gluten y puede ser consumida por personas con enfermedad celiaca.
2. Condiciones optimizadas de extrusión incrementan valor biológico y digestibilidad proteínica, compuestos fenólicos y potenciales antioxidante y antihipertensivo de semillas chía.
3. Existe un creciente interés, en la industria alimentaria y farmacéutica, por generar alimentos, bebidas e ingredientes funcionales que podrían ser incluidos en diversos sistemas alimenticios y/o medicamentos para lograr un efecto terapéutico en el organismo del consumidor.

V HIPÓTESIS

Condiciones óptimas del proceso de extrusión-cocción incrementan el valor nutricional / nutracéutico de la semilla de chía. Al procesar semillas de chía, parcialmente desgrasadas, aplicando condiciones optimizadas del proceso de extrusión-cocción se logra una mejora sustancial en digestibilidad proteínica, potencial nutracéutico y propiedades fisicoquímicas. Es posible desarrollar nuevos productos alimenticios (bebidas, alimentos), empleando como ingrediente principal harina de chía desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**), dirigidos a diversos nichos poblacionales (niños, adultos, embarazadas, tercera edad) para reducir la incidencia de enfermedades crónico degenerativas asociadas al estrés oxidativo.

VI OBJETIVOS

A OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto del proceso de extrusión – cocción, en condiciones optimizadas, sobre el valor nutricional, compuestos bioactivos y actividad antioxidante de semillas de chía

B OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (1) Optimizar el proceso de extrusión cocción para producir, a partir de semillas de chía parcialmente desgrasada, una harina funcional (harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO) con valor nutricional / nutracéutico alto
- (2) Evaluar composición química (proteínas, lípidos, carbohidratos, fibra dietaria) de **HCDEO**
- (3) Conocer el contenido de fitoquímicos (compuestos fenólicos totales, flavonoides totales) de la **HCDEO**
- (5) Conocer el valor nutricional [aminoácidos esenciales, digestibilidad proteínica *in vitro* (DP_{IV}), relación de eficiencia proteínica calculada (**C-PER**)] de la **HCDEO**
- (6) Evaluar la actividad antioxidante (ORAC, ABTS, DPPH) de la **HCDEO**
- (7) Evaluar el potencial antihipertensivo de la **HCDEO**

VII MATERIALES Y MÉTODOS

A MATERIALES

Como material de estudio se utilizaron semillas de chía (*Salvia hispanica* L.) obtenidas en el Mercado Rafael Buelna de la Ciudad de Culiacán de Rosales, Sinaloa, México.

B MÉTODOS

1 Características físicas de las semillas de chía

a Dimensiones

A partir de 25 semillas seleccionadas al azar se determinó el tamaño de la semilla a través de la medición por triplicado de sus dimensiones características: largo (L), ancho (W) y espesor (T), según se indica en la **Fig 11**. Se utilizó un microscopio estereoscópico Motic Digital Microscope DM143 y un vernier.

b Peso de 1,000 semillas

Para determinar el peso de 1,000 semillas, éstas se seleccionaron al azar de un lote de semillas limpias y se pesaron en una balanza analítica (Sartorius Weighing Technology GmbH, Germany). La prueba se realizó por triplicado. Esta característica está dada en función del tamaño y la densidad de la semilla.

c Peso hectolítrico

Para la determinación del peso hectolítrico se utilizará el procedimiento 55-10 de la AACC (1995) utilizando una microescala. Un recipiente de volumen conocido (100 mL) se llenó de semillas y se pesó en una balanza analítica. El peso hectolítrico se obtuvo al dividir el peso de las semillas entre el volumen del recipiente y relacionándolo a un volumen de 100 L (kg/hL). Se realizaron 10 repeticiones al azar.

2 Propiedades fisicoquímicas de las semillas de chía

a Diferencia total de color (ΔE)

Se utilizó la metodología reportada por Reyes-Moreno y col (2002). El color de las muestras se determinó con un colorímetro Minolta Chromameter mod CR-210 (Minolta LTD, Japón).

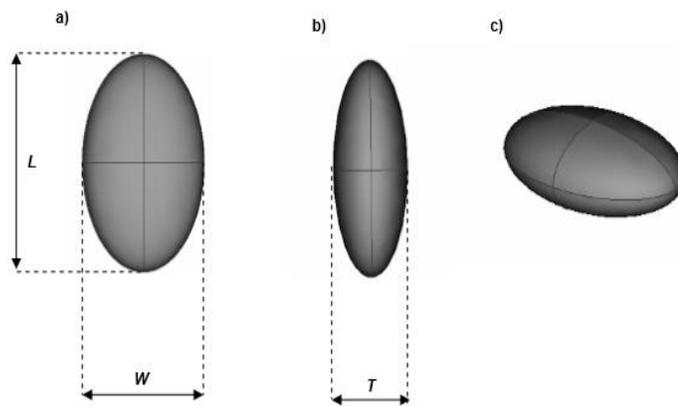


Fig 11. Dimensiones características **(a)** vista frontal, **(b)** vista de perfil y **(c)** geometría tridimensional de la semilla de chía

Ixtaina (2010)

Sobre la base de la teoría en color, el color Hunter **L**, **a**, **b** es un espacio tridimensional rectangular, donde la **L** (brillantez) indica tanto la luminosidad como la oscuridad del color y varía de 0 para negro a 100 para blanco. Las dimensiones de cromaticidad son dadas por los parámetros **a** y **b**. Siendo **a** el eje rojo-verde con valores positivos (rojos) y negativos (verdes), y **b** el eje amarillo-azul con valores positivos (amarillos) y negativos (azules).

Para la evaluación del color se utilizaron aproximadamente 100 g de muestra, la cual se colocó en una tapa de caja Petri de vidrio Kimax de 15 cm de diámetro y se midieron los parámetros **L**, **a** y **b**. Se utilizó un mosaico blanco como referencia (estándar) de valores **L**, **a** y **b** conocidos (**L**=97.63, **a**=-0.78 y **b**= 2.85). La diferencia total de color (ΔE) de las muestras 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 y los valores de la muestra. Las determinaciones se llevaron a cabo por triplicado.

b Actividad acuosa (a_w)

Se utilizó un equipo marca Aqualab modelo CX2 (Decagon Devices Inc, Pullman, WA, EUA). Se colocó una muestra de 2 g en la celda porta-muestras del equipo hasta alcanzar el equilibrio (40-60 min). El instrumento se calibró con una disolución saturada de cloruro de Potasio ($a_w=0.876$). Las mediciones se realizaron por triplicado a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ (Milán-Carrillo y col., 2002).

3 Optimización del proceso de extrusión cocción de semillas de chía para obtener harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO)

El proceso de extrusión cocción de semillas de chía se optimizó con el propósito de obtener harina de chía desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**) con valor nutricional / nutracéutico alto.

a Diseño experimental

Datos reportados en la literatura, y ensayos preliminares, se tomaron en consideración para selección el número y niveles de variación de las variables del proceso de extrusión. El proceso

de extrusión se optimizó para encontrar la mejor combinación de variables de proceso [Temperatura de extrusión (**TE**) / Velocidad del tornillo (**VT**)] para obtener harina de chía desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**) con contenido de compuestos fenólicos totales (**CFT**), actividad antioxidante (**AAox**) y digestibilidad proteínica *in vitro* (**DPIV**) altos. Se aplicó la metodología de superficie de respuesta (MSR) (Montgomery, 1991) sobre tres variables de respuesta: **CFT**, **AAox**, **DPIV**. Se utilizó un diseño central compuesto rotatable con dos factores [**TE**, 50-160°C, **VT**, 50-240 rpm] en cinco niveles de variación (2 factoriales, 2 axiales y 1 central); el diseño generó 13 tratamientos (**Cuadro 13**).

b Obtención de harinas de chía desgrasada extrudida (HCDE**)**

Para la obtención de **HCDE**, las semillas de chía se desgrasaron previamente utilizando una prensa extractora de aceite (Modelo DL-ZYJ05), posteriormente se utilizó el proceso descrito por Milán-Carrillo y col. (2012). La extrusión se llevó a cabo en un extrusor de tornillo simple modelo 20DN (CW Brabender Instruments, Inc., NJ, USA) con un diámetro de tornillo de 19 mm; relación longitud – diámetro 20:1; relación de compresión 1:1 y dado de salida de 5 mm. Se corrieron los 13 tratamientos, con diferentes combinaciones **TE/VT**, anotados en el **Cuadro 13**. Los extrudidos proveniente de cada tratamiento se colectaron en charolas de aluminio perforadas, se enfriaron a medio ambiente y se secaron en estufa (50°C/08 h) con circulación forzada de aire. Los extrudidos secados se enfriaron a temperatura ambiente, se molturaron (UD Cyclone Sample Mill, UD Corp, Boulder, CO, EUA) hasta pasar por 80 (0.180 mm), se envasaron herméticamente en bolsas de polietileno y se almacenaron a 4°C hasta su utilización (**Fig 12**). A las harinas de chía desgrasada extrudida (**HCDE**) provenientes de cada uno de los 13 tratamientos se les evaluó **CFT**, **AAox** y **DPIV**.

c Evaluación del contenido de compuestos fenólicos totales (CFT**), actividad antioxidante (**AAox**) y digestibilidad proteínica *in vitro* (**DPIV**) a las harinas de chía desgrasada extrudida (**HCDE**)**

1) Extracción de fitoquímicos libres

La extracción de fitoquímicos libres se realizó acorde a la metodología descrita por Adom y Liu

Cuadro 12. Diseño experimental utilizado para la obtención de diferentes combinaciones de temperatura de extrusión (**TE**) / velocidad de tornillo (**VT**) para la producción de harinas de chía desgrasada extrudida (**HCDE**)

Tratamiento		Variables de proceso	
Orden estándar	Orden de corrida	TE (°C)	VT (rpm)
1	5	66	78
2	4	144	78
3	11	66	212
4	7	144	212
5	8	50	145
6	6	160	145
7	13	105	50
8	3	105	240
9	10	105	145
10	2	105	145
11	12	105	145
12	1	105	145
13	9	105	145

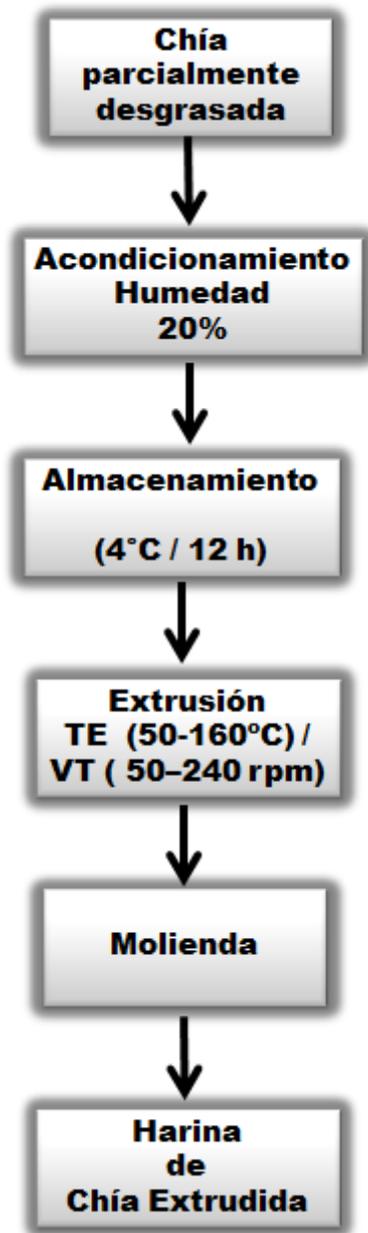


Fig 12. Obtención de harinas de chía desgrasada extrudada (*HCDE*)

(2002). A 0.5 g de muestra se le adicionaron 10 mL de etanol al 80% (v/v); la suspensión se agitó en un rotator (OVAN Noria R, EUA) a 25 rpm durante 10 min. La suspensión se centrifugó (3,000xg/10°C/10 min) y el sobrenadante se colectó en un tubo cónico. El sobrenadante se concentró a 45°C a presión baja (Apud Vac Concentrator, Thermo Elector Corporation) hasta un volumen final de 2 mL. El concentrado se almacenó a -20°C hasta su utilización. El precipitado se utilizó para la extracción de fitoquímicos ligados.

2) Extracción de fitoquímicos ligados

Los fitoquímicos ligados se extrajeron según la metodología sugerida por Adom y Liu (2002) con algunas modificaciones (Mora-Rochín y col, 2010). Se utilizó el precipitado obtenido de la extracción de fitoquímicos libres. El precipitado se sometió a hidrólisis alcalina con 10 mL de NaOH 2M, se eliminó el O₂ con inyección de N₂ y la muestra se sometió a tratamiento térmico (95°C/30 min) en baño María. Posteriormente, la suspensión se agitó, a temperatura ambiente, durante una hora, se neutralizó con 2 mL de HCl, se agitó por 10 min y se le agregaron 10 mL de hexano para remover los lípidos presentes. La suspensión se agitó en rotator, a velocidad 25, por 10 min, se centrifugó (3,000xg/10°C/10 min) y se eliminó el sobrenadante. El precipitado obtenido se lavó con 10 mL de acetato de sodio, se agitó en vortex por 2 min, se agitó en rotator (velocidad 25 / 10 min) y se centrifugó (5,000xg/10°C/10 min). Se realizaron 5 lavados y en todos los casos se recolectó el sobrenadante. Los sobrenadantes recolectados se evaporaron a sequedad (Apud Vac Concentrator, Thermo Elector Corporation). El residuo resultante se reconstituyó con 2 mL de metanol al 100% (fitoquímicos libres y ligados) y se almacenaron a -20°C hasta su utilización.

3) 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 NaCO₃ al 7% y se dejó reposar durante 8 min. Una vez transcurridos los 8 min, se agregaron 380 µL de agua destilada hasta a 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) / 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.

4) Actividad antioxidante (AAox)

Se estimó 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 $ABTS^{\bullet+}$ 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 solución reguladora de fosfatos (PBS, por sus siglas en inglés) pH = 7.4 (45 mL de PBS + 500 μ L de la solución de ABTS) hasta alcanzar una absorbancia de 0.7 ± 0.02 a 734 nm. Se tomaron 20 μ l del blanco (PBS) y se mezclaron con 1980 μ l de la solución de $ABTS^{\bullet+}$, 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 la absorbancia requerida, se colocaron 20 μ l de cada muestra por triplicado en tubos eppendorf de 2 mL y se le añadieron 1980 μ l del radical agitando el tubo para mezclar. La lectura de las muestras se realizó a los 5 min de haber colocado el radical en la primera muestra. La actividad antioxidante de las muestras se expresó en μ mol equivalentes de Trolox (ET)/100g de muestra, base seca (bs).

5) Digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV)

Se determinó de acuerdo al procedimiento reportado por Rathod y col (2016) con modificaciones. Se pesó un gramo de muestra, se incubó (15 mg 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 por 24 h, luego se agregaron 700 μ L de ácido TCA (tricloroacético) y se centrifugó a 5,000xg/10 min. Se descartó el sobrenadante y 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:

$$\text{DPIV (\%)} = [(\text{Proteína total}-\text{Residuo de Proteína})/(\text{Proteína total})] \times 100$$

d Optimización

La relación entre las variables de proceso o independientes para la elaboración de harinas de chíá extrudidas [X_1 =Temperatura de extrusión (**TE**) y X_2 =Velocidad del tornillo (**VT**)] y las variables de respuesta o dependientes [Compuestos fenólicos totales (**CFT**), actividad antioxidante (**AAox**), digestibilidad proteínica *in vitro* (**DPIV**)] mediante un polinomio de segundo orden se muestra en el siguiente modelo:

$$Y_k = \beta_{k0} + \sum_{i=1}^2 \beta_{ki} X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{kii} X_i^2 + \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1+1}^2 \beta_{kij} X_i X_j + \epsilon$$

Variables de proceso $X_1 = \text{TE}$
 $X_2 = \text{VT}$

Variables de respuesta
 $Y_1 = \text{CFT}$
 $Y_2 = \text{AAox}$
 $Y_3 = \text{DPIV}$

La expresión dentro de la “caja negra” representa a **CFT**, **AAox**, **DPIV** cuando el valor de “k” cambia de 1 a 3; β_0 , β_i y β_{ij} , representan la constante y los coeficientes de los efectos lineal, cuadrático y de interacción, respectivamente. X_i , X_i^2 y $X_i X_j$ representan los efectos lineal, cuadrático y de interacción de las variables independientes, respectivamente y “ ϵ ” representa el error experimental primariamente considerado por la incapacidad para determinar el modelo verdadero. Se aplicó el análisis de regresión a las variables de respuesta obtenidas experimentalmente, los términos no significativos ($p > 0.1$) se eliminaron del polinomio de segundo orden, y se recalculó un nuevo polinomio (modelo de predicción) para cada una de las variables de respuesta (Myers, 1971). A partir de cada modelo de predicción se construyeron gráficas de superficie de respuesta y de contorno, las cuales se utilizaron para representar gráficamente el sistema.

Se aplicó el método convencional gráfico para obtener valores máximos de **CFT**, **AAox** y **DPIV**. La sobreposición de gráficas de contorno de cada una de las variables de respuesta permitió obtener una gráfica de contorno para la observación y selección de la mejor (óptima) combinación de **TE** y **VT** para la producción de harina de chíá desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**) con **CFT**, **AAox** y **DPIV** altos.

4 Composición química de la harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO)

a Humedad

Para la cuantificación de la humedad de las muestras se aplicó el método 925.09B de la AOAC (1999). Se calculó la pérdida de peso de 2 g de muestra, después de calentar a 130°C durante 1 h en una estufa de circulación de aire forzado (FELISA mod 142^a, México). Las determinaciones se hicieron por triplicado.

b Proteína

Se utilizó el método 960.52, microKjeldahl, de la AOAC (1999) para la determinación de nitrógeno en un sistema Kjeltex (Mod 1009 y 1002, Tecator, Suecia). Este método se basa en el pasaje del Nitrógeno orgánico a ion NH_4^+ mediante una digestión de la muestra en caliente en medio sulfúrico concentrado. El ion NH_4^+ es neutralizado y el NH_3 liberado se destila y cuantifica mediante una titulación. El Nitrógeno cuantificado se convierte a contenido de proteínas por medio de un factor. Se digirieron 0.2 g de muestra, 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 25 mL de agua, 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 cuantificaron de acuerdo al método 920.39 de la AOAC (1999). Las extracciones se realizaron en muestras de 3-4 g de harina. Se utilizó un equipo Soxtec System HT 1043 Extraction Unit (Tecator, Suecia); como disolvente se empleó éter de petróleo. Las determinaciones se hicieron por triplicado.

d Cenizas

Para llevar a cabo la determinación de cenizas se utilizó el método 934.01 de AOAC (1999). La muestra (3-5 g) se colocó en un crisol de porcelana, y se sometió a incineración en mufla a 550°C hasta obtener una ceniza gris luminosa con peso constante. Las muestras incineradas se enfriaron

en desecador hasta alcanzar temperatura ambiente (25°C), posteriormente se pesaron. La prueba se realizó por triplicado.

e Fibra dietaria

Se determinó de acuerdo al método oficial 985.29 de la AOAC (1999), con ayuda de un kit de análisis de fibra dietaria total (TDF-100A, Sigma). Se realizaron cuatro réplicas utilizando 1 g de muestra en cada una, previamente desgrasadas. Las muestras se colocaron en un vaso de precipitado de 300 mL y se le agregaron 50 mL de una solución reguladora de fosfatos (pH 6) a cada muestra. A cada vaso con la muestra se adicionaron 100 µL de α-amilasa. Las muestras se sometieron a tratamiento térmico (95°C/15 min) en agitación constante. Después de este tiempo, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente, y el pH se ajustó a 7.5 con NaOH 0.275 M o HCl 0.325 M. Se adicionaron 100 µL de una solución de proteasa (5 mg proteasa) a cada muestra y se sometieron a baño María a 60°C por 30 min y posteriormente se enfriaron. Se ajustó el pH entre 4-4.6, y se adicionaron 100 µL de amilogucosidasa, las muestras se colocaron a 60°C por 30 min.

Finalmente, las muestras se enfriaron y filtraron (filtros Gooch #2, previamente secos con 0.5 g de celita, a peso constante), se hicieron tres lavados de 20 mL con etanol al 78%, dos lavados de 10 mL con etanol al 95% y dos lavados de 10 mL con acetona. El residuo de filtrado se secó en una estufa a 70°C por 12 h. Esta parte del residuo se denominó fracción insoluble.

A la solución del filtrado de la fracción insoluble se le adicionaron cuatro veces el volumen de la solución filtrada (280 mL aprox.) con etanol al 95% y se dejó reposar (12h/ 25°C), para posteriormente filtrar (filtros Gocch #2, previamente secos con 0.5g de celita) y se hicieron los mismos lavados descritos en la fracción insoluble. Al residuo de este filtrado se le denominó fracción soluble.

El filtro con el residuo se secó en una estufa a 70°C por 12 h. Se registraron los pesos de la fracción insoluble y soluble; de las cuatro réplicas, se tomaron dos de ellas para cuantificar proteínas y las otras dos para cenizas. El porcentaje de fibra de la fracción insoluble y soluble se calculó de la siguiente manera:

$$\%FI \text{ y/o } FS = \{[PRFS\text{-Proteína-Cenizas})\text{-B}] / PMI\} \times 100$$

Donde: **FI**= Fibra insoluble; **FS**= Fibra soluble; **PRFS**= Peso del residuo final seco; **B**= Blanco; **PMI**= Peso de la muestra inicial

f Carbohidratos (CHO)

El contenido de carbohidratos (**CHO**) en la muestra se calculó por diferencia con el resto de nutrimentos utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{CHO} = 100 - \% \text{ Proteínas} - \% \text{ Lípidos} - \% \text{ Minerales} - \% \text{ Fibra dietaria total}$$

5 Propiedades fisicoquímicas de HCDEO

a Diferencia total de color (ΔE) / Actividad acuosa

Se evaluaron acorde a la metodología propuesta en las secciones **VII.B.2.a** y **b** del capítulo **VII**

MATERIALES Y MÉTODOS

b pH

Se determinó acorde a metodología de AOAC (1999). A 10 g de muestra se les adicionaron 100 mL de agua desionizada hervida y enfriada y se homogenizaron con una varilla de vidrio. La suspensión se agitó en agitador orbital (240 rpm / 10 min) y posteriormente se midió el pH de la misma. La evaluación se realizó por triplicado.

c Densidad aparente

Se determinó de acuerdo a la norma oficial mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002 (NOM, 2007). En una probeta graduada se adicionaron 100 mL de harina, vaciada con ayuda de un embudo; se golpeó suavemente 5 veces para favorecer el acomodo de las partículas. Se midió el volumen y el peso de la harina y la densidad aparente se calculó con esos datos. La determinación se realizó por triplicado.

d Índices de absorción y de solubilidad en agua (IAA, ISA)

Para estas evaluaciones se utilizó el método descrito por Anderson y col (1969). Una muestra de harina de 2.5 g se suspendió en 30 ml de agua a 30°C en un tubo para centrifuga de 50 mL previamente tarado. La suspensión se agitó en agitador orbital a velocidad moderada (250 rpm /

30 min) y posteriormente se centrifugó (3000xg / 30°C/10 min). El precipitado y el líquido sobrenadante se utilizaron para el cálculo de **IAA** e **ISA**, respectivamente. El gel formado se pesó para calcular el **IAA**, expresado como gramos de gel por gramo de muestra seca. El líquido sobrenadante se decantó cuidadosamente en un recipiente tarado para la determinación de sólidos. El **ISA**, expresado como gramos de sólidos por gramo de sólidos originales, se calculó a partir del peso de sólidos secos recuperados mediante evaporación del sobrenadante (110°C / 12 h). Ambos índices se determinaron por triplicado.

e Dispersabilidad

Se determinó de acuerdo a Mora-Escobedo y col (1994). Se suspendió 1 g de muestra en 10 mL de agua desionizada, en un tubo cónico graduado; las muestras se homogenizaron en un homogenizador Ultra Turrax (10,000 rpm x 5 min). La separación de fases se midió después de 30 min de reposo.

f Índice de absorción de aceite

La absorción de aceite de las harinas se determinó utilizando la metodología reportada por Ordorica-Falomir (1988). Muestras de 0.5 g de harina adicionadas con 3 mL de aceite vegetal se colocaron en un tubo graduado para centrifuga, se agitaron en vortex durante 1 min, se dejaron reposar 30 min y, finalmente, se centrifugaron (1,600 x g / 25°C/ 25 min). Se midió el volumen de aceite libre. La cantidad de aceite absorbido se calculó restando el volumen de aceite libre al volumen de aceite inicial y se expresó como mL de aceite absorbido/g de harina. La prueba se realizó por triplicado.

g Capacidad de formación y estabilidad de espuma (CFE, CEE)

Se evaluaron acorde a los procedimientos propuestos por Hauffman y col (1975). En una probeta de 100 mL se colocaron 0.5 g de muestra a la que se le adicionaron 50 mL de una solución reguladora 0.1M (Citrato: pH 2 y 4; Fosfato: pH 6 y 8; Carbonato: pH 10). La mezcla se agitó en un ultraturrax (12,000 rpm / 1 min). Se midió el volumen de espuma formado. La capacidad de formación de espuma se reportó como porcentaje (% **CFE**); se calculó acorde a la ecuación:

$$\% \text{ CFE} = [(\text{Vol después agitación} - \text{Vol antes agitación}) / \text{Vol antes agitación}] \times 100$$

La probeta con la suspensión agitada, a la cual se le evaluó el % **CFE**, se dejó reposar 30 min; al final de este tiempo se midió el volumen de la espuma residual y la estabilidad de espuma, reportada como porcentaje (% **EE**), se calculó acorde a la ecuación:

$$\% \text{ CEE} = [(\text{Vol espuma después reposo})/(\text{Vol total de espuma})] \times 100$$

h Capacidad emulsificante (CE) y estabilidad de emulsión (EE)

Para la determinación de capacidad emulsificante y estabilidad de emulsión de **HCDEO** se utilizó la metodología reportada por Hauffman y col (1975). Se pesaron 0.7 g de muestra y se le adicionaron 10 mL de una solución reguladora 0.1 M (Citrato: pH 2 y 4; Fosfato: pH 6 y 8; Carbonato: pH 10) y 10 mL de aceite de olivo. La suspensión se homogenizó por agitación en ultraturrax (12,000 rpm / 1 min). La suspensión homogenizada se distribuyó en tubos cónicos graduados para centrifuga y se centrifugó (1,300xg/25°C/5 min). Se midió el volumen de la emulsión formada. La capacidad de formación de emulsión se evaluó relacionando la capa emulsificada formada y el volumen total y se reportó como porcentaje de capacidad emulsificante (% **CE**). La estabilidad de emulsión se evaluó con los mismos tubos utilizados en la determinación de % **CE**. Los tubos se sometieron a tratamiento térmico en baño María (80°C/30 min), se enfriaron y centrifugaron (1,300xg/25°C/5 min). Se midió el volumen de la emulsión. La estabilidad de emulsión, reportada como porcentaje (% **EE**), se expresó como porcentaje de emulsión retenido después del tratamiento térmico. La prueba se realizó por triplicado.

6 Propiedades nutricionales de harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO)

a Digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV)

La **DPIV** de **HCDEO** se evaluó acorde a la metodología propuesta en la sección **VII.B.3.c.5** del capítulo **VII MATERIALES Y MÉTODOS**.

b Perfil de aminoácidos esenciales (AAE)

Se determinó acorde a la metodología descrita por López-Cervantes y col (2006) para llevar a cabo la cuantificación de aminoácidos totales, Tirosina y Triptófano totales. Para la cuantificación de aminoácidos totales, 50 g de muestra se sometieron a hidrólisis ácida con 10 mL de HCl 6 N, a 100 °C por 24 h. Posteriormente se dejó enfriar y se filtró con filtro Whatman 41. El filtrado se aforó a 250 mL con agua MilliQ. Se tomó una alícuota de 3 mL y se aforó a 25 mL con agua MilliQ. Se

utilizó una alícuota de 300 μL , se colocó en un vial con capacidad de 1.5 mL y se sometido a secado a vacío ($60^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$). Posteriormente se sometió a derivatización, tomando 300 μL de solución muestra y depositándola en un vial con capacidad de 1.5 mL. Se adicionaron 300 μL de reactivo FMOC (9-fluorenilmetilcloroformato) y se agitó en un vórtex por 90 s; transcurrido ese tiempo se agregaron 180 μL de reactivo Cleavage y se mezcló en vórtex durante 15 s. Se dejó reposar por 5 min. Posteriormente, se agregaron 420 μL de reactivo Quench, se mezcló en vórtex durante 15 s y se filtró a través de una membrana MiliPore de 0.45 μm a un vial. Los viales se colocaron dentro de la cámara del sistema de HPLC a 34°C para su posterior inyección a la columna (20 μL). Finalmente se tomaron las lecturas correspondientes utilizando el programa SPSS 11.0 para Windows (SPSS Inc., Chicago, IL).

La cuantificación de Tirosina y Triptófano totales se realizó mediante hidrólisis alcalina. Se pesaron muestras de 25 mg (bs) y se colocaron en tubos para centrifuga adicionando 3 mL de NaOH 4.2 M. Se introdujeron los tubos (destapados) al sonificador por 2 min. Posteriormente se les inyectó N_2 , se sellaron herméticamente y se colocaron en un horno ($120^{\circ}\text{C}/4\text{ h}$). Los tubos se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se colocaron en baño de hielo a 4°C . Se ajustó el pH de las muestras a $\text{pH}=9$ con HCl concentrado, se lavaron y filtraron a vacío con solución reguladora de boratos ($\text{pH } 9$). La muestra, lavada y filtrada, se aforó a 50 mL con solución reguladora de boratos y se tomaron alícuotas que serán centrifugadas (1,500g, 20 min) a temperatura ambiente. Posteriormente, se tomaron alícuotas del sobrenadante y se inyectaron en viales de 2 mL utilizando un filtro de 0.45 μm . Los viales se colocaron dentro de la cámara del sistema de HPLC a 34°C para su posterior inyección a la columna (20 μL). Finalmente, se tomaron las lecturas correspondientes utilizando el programa SPSS 11.0 para Windows (SPSS Inc., Chicago, IL).

Se utilizó el sistema de HPLC equipado con un auto inyector LC 1650, solvente degasificador en línea LC 1460, sistema controlador con WinChrom para análisis de datos cromatográficos, bomba LC 1150, columna oven LC 1150, inyection loop de 20 μL (Rheodyne, Cotati, CA, USA) y detector de fluorescence LC 5100. El análisis cromatográfico se llevó a cabo usando una columna de escala analítica (4.6 mm x 250 mm) SGE Hypersil ODS C18 con un tamaño de partícula de 5 μm (SGE, Dandenong, Australia). Las condiciones del HPLC fueron: fase móvil A a 30 mM de fosfato de amonio ($\text{pH } 6.5$) en 15:85 (v/v) de metanol:agua; fase móvil B 15:85 (v/v) de metanol:agua; fase móvil C 90:10 (v/v) de acetonitrilo/agua. Velocidad de flujo constante a 1.2

mL/min y columna a 38 °C. La detección se llevó a cabo por fluorescencia usando longitudes de onda de excitación y emisión a 270 y 316 nm, respectivamente. El tiempo total entre inyecciones será de 43 min.

c Relación de eficiencia proteínica calculada (C-PER)

Se utilizó la metodología reportada por Satterlee y col (1979). El perfil de aminoácidos y la digestibilidad proteínica *in vitro* de la harina de chía desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**) se utilizaron para el cálculo. Como proteína patrón de referencia se empleó Caseína. El **C-PER** se calculó empleando la siguiente ecuación de regresión:

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

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 (2013) para aminoácidos esenciales.

7 Fitoquímicos en HCDEO

a Compuestos fenólicos totales (CFT)

El contenido de **CFT** en **HCDEO** se evaluó acorde a la metodología propuesta en la sección **VII.B.3.c.3)** del capítulo **VII MATERIALES Y MÉTODOS**.

8 Propiedades nutracéuticas de HCDEO

a Actividad antioxidante (ABTS, DPPH)

La actividad antioxidante **ABTS** de **HCDEO** se evaluó acorde a la metodología propuesta en la sección **VII.B.3.c.4)** del capítulo **VII MATERIALES Y MÉTODOS**.

Para cuantificar la capacidad captadora de radicales libres de los extractos se determinó el grado de decoloración que provocan sus componentes a una solución metanólica y etanólica de **DPPH** mediante el método de 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 del 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 más 800 µL de PBS más 1000 µL de radical **DPPH** ajustado a 1 (por triplicado). Se incubó a temperatura ambiente durante 30 min en la oscuridad y se midió la absorbancia a 517 nm. Los resultados se expresaran como µmol equivalente de Trolox /g muestra, bs.

b Potencial antihipertensivo (IC_{50}) de harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO)

Los extractos de fitoquímicos libres y ligados obtenidos para la evaluación de la actividad antioxidante se utilizaron para medir el potencial antihipertensivo *in vitro*. 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-hidroxi-butílico (3HB) generado a partir del 3-hidroxi-butiril-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-butílico, 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 3HB-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:

$$\% \text{ Inhibición} = (\text{Abs}_{\text{blanco 1}} - \text{Abs}_{\text{muestra}}) / (\text{Abs}_{\text{blanco 1}} - \text{Abs}_{\text{blanco 2}})$$

Donde: $\text{Abs}_{\text{sample}} = \text{Abs SRE} + \text{Indicador}$ conteniendo el inhibidor-ECA; $\text{Abs}_{\text{control}} = \text{Abs SRE} + \text{Indicador}$ 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 IC_{50} se calculó

como la concentración de extractos fenólicos que causaron el 50% de la inhibición de la actividad de la ECA.

9 Análisis estadístico

Los resultados de esta investigación se analizaron aplicando un diseño experimental unifactorial usando el paquete estadístico Statgraphics Plus 6.0. Para evaluar la diferencia mínima significativa entre las medias de los diferentes tratamientos se aplicó la Prueba de Rangos Múltiples de Duncan ($p \leq 0.05$).

VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y FISICOQUÍMICAS DE LAS SEMILLAS DE CHÍA

Las características físicas y fisicoquímicas de las semillas de chía (**Cuadro 14**) son importantes indicadores de su calidad; ofrecen una pauta para el manejo y almacenamiento de las mismas. Las semillas de chía presentaron tres semiejes desiguales, cuyas dimensiones promedio fueron las siguientes: Largo=2.36 cm , ancho=1.57 cm y grosor=0.67 cm (**Cuadro 14**); estos datos coinciden con lo reportado por otros investigadores (Ixtaina, 2008; González, 2010; Porrás-Loaiza y col., 2014).

El peso de 1,000 semillas es un indicador del tamaño de las semillas; el peso hectolítrico es una medida indirecta de la densidad de las mismas. Ambos son indicadores de la calidad del grano. Las semillas de chía presentaron pesos de 1,000 semillas y hectolítrico de 1.33 g y 63.56 kg/hL, respectivamente (**Cuadro 14**). El peso de 1,000 semillas se encuentra dentro del rango de 1.20 a 1.37g reportado otros investigadores (Ixtaina, 2008; Ayerza y Coates, 2009; Amato y col., 2015). Este parámetro es necesario para la estimación del volumen de una semilla, así como para la realización de la limpieza de las semillas a través del uso de fuerzas aerodinámicas.

Las semillas de chía tuvieron un valores Hunter "L" y ΔE de 33.47 y 63.05, respectivamente (**Cuadro 14**). El valor ΔE representa la diferencia total de color en referencia a un estándar de color blanco, valores mayores al ΔE significan materiales más oscuros; debido a que las semillas de chía son de color oscuro, el valor de este parámetro es alto, alejado de "cero" (significa color blanco). Los valores de actividad acuosa y el pH de las semillas de chía fueron de 0.53 y 6.22, respectivamente (**Cuadro 14**). Ese valor de actividad acuosa favorece una vida de anaquel prolongada; se encuentra en el rango de los valores (<0.6) donde el crecimiento microbiano, las reacciones químicas y la actividad enzimática se realizan de manera lenta (Fennema, 2001).

B CONTENIDO NUTRIMENTAL Y DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES EN SEMILLAS DE CHIA

El contenido de proteínas y lípidos, en base seca (% , bs), de las semillas de chía fue de 20.30% y 33.18%, respectivamente (**Cuadro 15**). Los resultados obtenidos, en lo que respecta a contenido de proteínas, coinciden con lo reportado previamente por otros investigadores (Ayerza y Coates, 2009; Sargi, 2013; Porrás-Loaiza, 2014; Ayerza, 2016). Su contenido de proteínas es superior al de los cereales (promedio 10%,bs) y muy similar al de las leguminosas (promedio 20%). Las

Cuadro 13. Características físicas y fisicoquímicas de semillas de chía (*Salvia hispanica* L)

Característica	
Físicas	
Dimensiones físicas (mm)	
Largo	2.36±0.58
Ancho	1.57±0.68
Grosor	0.67±0.08
Peso de 1,000 semillas (g)	1.33±0.67
Peso hectolítrico (kg/hL)	63.56±0.35
Fisicoquímicas	
Color	
Diferencia total de color (ΔE)	63.05±0.58
Valor Hunter "L"	33.47±0.36
Actividad acuosa (a_w)	0.53±0.005
pH	6.22 ± 0.19

Cuadro 14. Contenido nutrimental y de aminoácidos esenciales en semillas de chía (*Salvia hispanica* L)

Propiedad	Contenido	Requerimientos AAE FAO/WHO ¹
Composición química (% bs)		
Proteínas	20.30±0.95	
Lípidos	33.18±1.64	
Minerales	4.66±0.006	
Fibra dietaria		
Soluble	4.81±0.30	
Insoluble	31.20±1.50	
Total	36.01±1.45	
Carbohidratos	5.85±0.2	
Nutricional		
AAE² (g/100 g protein)		
His	2.06±0.03	1.60
Ile	3.41±0.02	3.00
Leu	5.96±0.04	6.10
Lys	4.53±0.04	4.80
Met+Cys	2.84±0.03	2.30
Phe+Tyr	5.27±0.02	4.10
Thr	2.54±0.02	2.50
Trp	1.69±0.01	0.66
Val	4.17±0.02	4.00
Total	32.47	29.06
Calificación química	94.38	
AAE limitante	Lys	
DPIV ³ (%)	77.9	
C-PER ⁴	1.96	

¹ Requerimientos de **AAE** para niños (tres años y mayores), adolescentes y adultos de acuerdo con la Organización para los Alimentos y la Agricultura / Organización Mundial de la Salud (2013)

² **AAE** = Aminoácido(s) esencial(es), ³**DPIV** = Digeribilidad proteínica in vitro, ⁴ **C-PER** = Relación de eficiencia proteínica calculada

proteínas de las semillas de chía son de calidad alta, ya que su suma de aminoácidos esenciales (AAE) es mayor que la de los requerimientos hechos por la Organización para los Alimentos y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) / Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés) para niños (tres años y mayores), adolescentes y adultos (FAO/WHO, 2013) (**Cuadro 16**); presentan una ligera deficiencia en Lisina y poseen una calificación química de 94.38 (muy cercana a 100). La demanda actual de proteínas vegetales es muy alta debido a factores tales como su mayor disponibilidad en la naturaleza, bajo costo de producción y también debido a la preferencia de algunos consumidores basados en sus creencia religiosas y exigencias dietéticas (Timilsena y col., 2015).

El contenido de lípidos en semillas de chía (33.18%) coincide con lo reportado por otros investigadores (Weber, 1991; Ayerza y Coates, 2009; Muñoz, 2013; Porras-Loaiza, 2014; Ayerza, 2016). Las semillas de chía son la fuente natural más rica en ácidos grasos Omega 3, pueden compararse al aceite de Menhaden (especie de Róbalo) y de algas, los cuales, sin embargo, tienen la desventaja de olor desagradable característico de algunos productos del mar (Ayerza, 2016).

Las semillas de chía tuvieron un contenido de minerales de 4.66 %, bs (**Cuadro 16**). Este contenido es similar al reportado por Weber (1991) y Porras-Loaiza y col. (2014). Los minerales en semillas de chía están representados, principalmente, por Fe, Ca, K y Mg.

Los contenidos de fibra dietaria insoluble (**FDI**), fibra dietaria soluble (**FDS**) y fibra dietaria total (**FDT**) en semillas de chía fueron 4.81%, 31.20% y 36.01%, respectivamente (**Cuadro 16**). Muñoz (2013), Da Silva (2014) y da Silva-Pereira (2017) reportaron contenidos de fibra dietaria total 34.4%, 37.5% y 35.3%, respectivamente. Estos valores son muy cercanos al contenido de **FDT** (36.01%) observado en la presente investigación. La fibra dietaria es un componente importante de una dieta saludable; contribuye a la reducción del colesterol LDL y la presión arterial y protege contra aterosclerosis y enfermedades cardiovasculares. Adicionalmente, varios estudios han evidenciado el efecto benéfico de la fibra dietaria en la prevención de enfermedades crónicas y en la reducción de la incidencia de algunos tipos de cáncer (colorectal, próstata, mama) (Zhu y col., 2015).

C MEJORES CONDICIONES DE EXTRUSIÓN PARA OBTENER HARINA DE CHÍA DESGRASADA EXTRUDIDA OPTIMIZADA (HCDEO) CON AAox, CFT y DPIV ALTOS

Las diferentes combinaciones de variables del proceso de extrusión [Temperatura de Extrusión

Cuadro 15. Diseño experimental¹ empleado para obtener diferentes combinaciones de temperatura de extrusión y velocidad de tornillo (**TE**, **VT**) para la producción de harinas de chía desgrasada extrudida (**HCDE**), y resultados experimentales de las variables de respuesta (**AAox**, **CFT**, **DPIV**).

Tratamiento ²	Variables de proceso		Variables de respuesta		
	TE (°C)	VT (rpm)	AAox ³	CFT ⁴	DPIV ⁵
1	66.11	77.82	18,131	526.68	81.83
2	143.89	77.82	22,613	561.58	84.56
3	66.11	212.18	21,572	551.78	81.48
4	143.89	212.18	24,968	575.06	83.56
5	50.00	145.00	18,629	541.99	80.92
6	160.00	145.00	23,483	597.54	84.43
7	105.00	50.00	24,443	541.42	84.94
8	105.00	240.00	28,949	558.60	84.06
9	105.00	145.00	26,910	573.33	82.23
10	105.00	145.00	26,196	577.93	81.22
11	105.00	145.00	25,883	568.19	82.84
12	105.00	145.00	24,318	564.10	81.99
13	105.00	145.00	25,107	581.56	81.66

¹ Diseño central compuesto rotatable con dos factores y cinco niveles; 13 tratamientos.

² No corresponde al orden de procesamiento. ³ **AAox** = Capacidad antioxidante expresado en: $\mu\text{mol ET}/100 \text{ g}$, bs.

⁴ **CFT** = Contenido de fenolicos totales expresado en: $\text{mg EAG}/100 \text{ g}$, bs.

⁵ **DPIV** = Digestibilidad de proteína *in vitro* expresado en: %.

(*TE*) / Velocidad de Tornillo (*VT*)] utilizadas para la producción de harinas de chía desgrasada extrudida (*HCDE*), y los valores experimentales de las variables de respuesta (*AAox*, *CFT*, *DPIV*) para cada uno de los trece tratamientos, generados por el diseño experimental, se muestran en el **Cuadro 16**.

1 Modelos de predicción para las variables de respuesta

A partir de los datos experimentales de *AAox*, *CFT* y *DPIV* de las *HCDE* (**Cuadro 16**) se obtuvieron modelos de predicción, para cada una de ellas, como resultado de ajustar el polinomio " $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2$ ", que relaciona las variables de respuesta (*AAox*, *CFT*, *DPIV*), evaluadas a las *HCDE*, con las variables de proceso de extrusión (*TE*, *VT*). A estos modelos de predicción se les probó su idoneidad y ajuste por análisis de varianza (ANOVA) (**Cuadro 17**). Un buen modelo de predicción debe tener una R^2 ajustada (coeficiente de determinación) ≥ 0.80 , un nivel de significancia de $P < 0.05$, un coeficiente de varianza (CV) $\leq 10\%$ y prueba de falta de ajuste > 0.01 (Montgomery, 2014). Se utilizaron estos criterios para decidir el nivel de satisfacción de los modelos de predicción de cada una de las variables de respuesta.

a Actividad antioxidante (*AAox*)

Los valores de *AAox* de la harinas de chía desgrasada extrudida (*HCDE*), provenientes de los diferentes tratameintos, se encuentran entre 18,131 y 28,949 $\mu\text{mol ET}/100 \text{ g}$ de muestra bs (**Cuadro 16**). La *AAox* de la harina de chía cruda fue de 24, 199 $\mu\text{mol ET}/100 \text{ g}$ de muestra (bs).

El análisis de varianza mostró un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$) para *AAox*. Este análisis también mostró que la *AAox* de las *HCDE* fue significativamente dependiente de los términos lineales de la temperatura de extrusión (*TE*) y la velocidad de tornillo (*VT*), así como del término cuadrático de temperatura de extrusión ($(TE)^2$) ($p < 0.0001$) (**Cuadro 17**). El modelo de predicción para la *AAox* de las *HCDE* fue:

Usando variables codificadas

$$Y_{AAox} = 26,676.63 + 1,842.86X_1 + 1,522.86X_2 - 2,825.46X_1^2$$

Usando variables no codificadas fue:

$$AAox = -3,181.49 + 439.68TE + 22.67VT - 1.86 (TE)^2$$

Este modelo de predicción explicó el 88.8% de la variabilidad total ($p < 0.0001$) de los valores

Cuadro 16. Coeficientes de regresión y análisis de varianza de los modelos experimentales de predicción mostrando la relación entre las variables de respuesta (**AAox**, **CFT**, **DPIV**) y variables del proceso (**TE**, **VT**) para la producción de harinas de chía desgrasada extruida (**HCDE**)

Coeficientes	AAox ($\mu\text{mol ET}/100\text{ g, bs}$)		CFT ($\text{mg EAG}/100\text{g, bs}$)		DPIV (%)	
	Codificado	Sin codificar	Codificado	Sin codificar	Codificado	Sin codificar
Intercepto						
β_0	25,676.63	-3,181.49	570.83	448.91	81.99	84.60
Lineal						
β_1	1,842.86***	439.68	17.09***	0.4394	1.22***	0.0182
β_2	1,522.86***	22.67	7.86**	0.9281	-0.32 ^{NS}	-0.0672
Cuadrático						
β_{11}	-2,825.46***	-1.86	NS	NS	0.16 ^{NS}	1.0601E-004
β_{22}	NS	NS	-12.62***	-2.79E-003	1.07***	2.3793E-004
Interacciones						
β_{12}	NS	NS	NS	NS	-0.16 ^{NS}	-6.2543E-005
P_{modelo}	0.0001		0.0001		0.0029	
P_{falta de ajuste}	0.2987		0.5059		0.4910	
CV	5.00		1.26		0.73	
R²	0.8880		0.8969		0.8910	
R²_{ajustada}	0.8506		0.8625		0.8132	
R²_{predicha}	0.6950		0.7630		0.5757	

* Nivel de significancia a $P \leq 0.10$ ** Nivel de significancia a $P \leq 0.05$ *** Nivel de significancia a $P \leq 0.01$
^{NS} No significativo

de **AAox** de las **HCDE**. El coeficiente de determinación R^2 ajustada del modelo fue 0.8506 y la falta de ajuste no fue significativa (0.2987). Además, la dispersión relativa de los puntos experimentales con respecto a los valores predichos con el modelo.

En la **Fig 13** se observa que las variables de proceso (**TE**, **VT**) tuvieron un efecto significativo en el comportamiento de la **AAox** en sus términos lineales para ambas, así como el término cuadrático de **TE**. El valor más bajo de **AAox** (18,131 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$) se localizó a una **TE**=66°C /**VT**=78 rpm. Además, se observa que al incrementar **TE** se incrementa **AAox** hasta llegar a un máximo y posteriormente se presenta un decremento en esta variable.

En general, se cree que los tratamientos térmicos son la causa principal de disminución en el contenido de antioxidantes naturales (Kaur y Kapoor, 2001); sin embargo, las temperaturas altas pueden inducir la formación de compuestos con propiedades antioxidantes. Esto ocurre durante el desarrollo de “productos de la Reacción de Maillard” (MRP, por sus siglas en inglés). Korus y col. (2007) reportaron una disminución en actividad antioxidante y contenido de polifenoles durante la extrusión de frijol común y mezcla frijol/maíz respectivamente; se lo atribuyeron principalmente a las condiciones del proceso. Ellos no llevaron a cabo optimización del proceso de extrusión.

b Compuestos fenólicos totales (CFT)

Las harinas de chía desgrasadas extrudidas (**HCDE**) tuvieron contenido de **CFT** entre 526.68 y 581.56 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/ 100 g (bs) (**Cuadro 16**). El contenido de **CFT** en la harina de chía cruda fue 548.1 mg EAG/100 g (bs).

En el **Cuadro 17** se muestra la estimación de los coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo de predicción para **CFT** de las **HCDE**, el cual muestra la relación entre esta variable de respuesta y las variables del proceso de extrusión (**TE**, **VT**). En análisis de varianza mostró un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$) para **CFT**. Este análisis también mostró que el contenido de **CFT** de las **HCDE** fue dependió significativamente tanto de los términos lineales de la temperatura de extrusión (**TE**) ($p < 0.0001$) y la velocidad de tornillo (**VT**) ($p = 0.0122$), así como el término cuadrático de velocidad de tornillo (**VT**)². El modelo de predicción para el contenido de **CFT** de las **HCDE** fue:

Usando variables codificadas:

$$Y_{CFT} = 570.83 + 17.09X_1 + 7.86X_2 - 12.62X_2^2$$

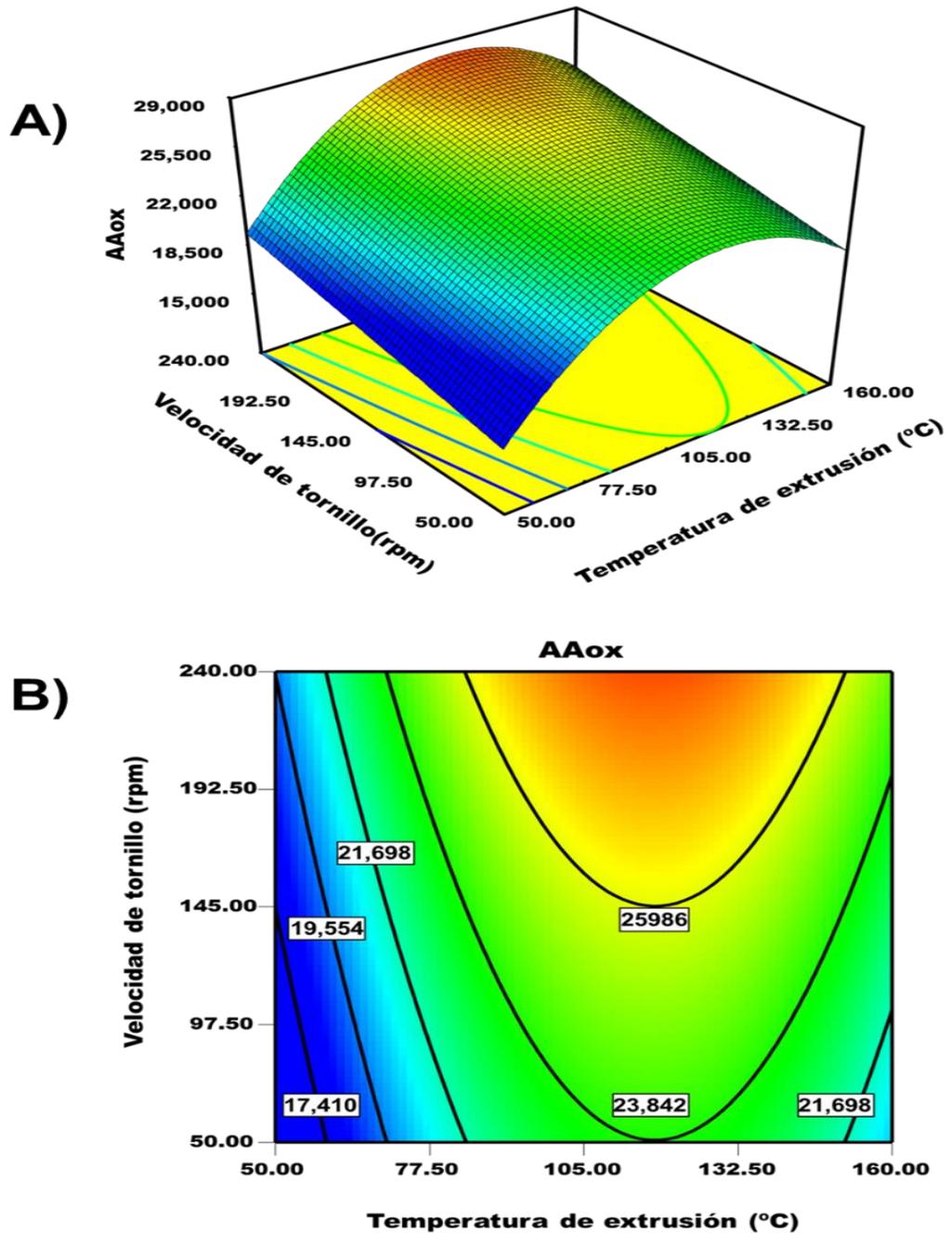


Fig 13. Gráficas de superficie de respuesta (A) y de contorno (B) mostrando el efecto de las variables de proceso [TE ($^{\circ}C$), VT (rpm)] sobre $AAox$ (μmol ET/100 g bs) de las harinas de chía desgrasada extrudida (HCDE).

Usando variables decodificadas:

$$CFT = 448.91 + 0.4394TE + 0.9281VT - 2.7969E-003(VT)^2$$

Este modelo de predicción explicó el 89.69% de la variabilidad total ($p < 0.0001$) de los valores de **CFT** de las **HCDE**. El coeficiente de determinación R^2 ajustada del modelo fue 0.8969 y la falta de ajuste fue no significativa (0.5136). Además, la dispersión relativa de los puntos experimentales con respecto a los valores predichos con el modelo (CV) fue de 1.26%. Estos valores indican que el modelo experimental para el contenido de **CFT** de las **HCDE** fue adecuado y reproducible.

A partir de los modelos matemáticos de predicción se construyeron gráficos de superficie de respuesta y de contorno (**Fig 14**) en los cuales se observa el efecto de las variables del proceso de extrusión (**TE**, **VT**) sobre el contenido de **CFT** de las **HCDE**. Ambas variables de proceso (**TE**, **VT**) tuvieron un efecto significativo en los valores de contenido de **CFT**. El valor de **CFT** más bajo (526.68 mg EAG/100 g de **HCDE**, bs) se localizó a **TE**=66°C / **VT**=78 rpm. Los valores mayores de **CFT** se observaron a **TE** altas y **VT** intermedias (**TE**=160°C / **VT**=145rpm).

De acuerdo a algunos investigadores (Hirth y col., 2015) durante el proceso de extrusión, al aumentar la velocidad de tornillo, el tiempo de residencia puede ser disminuido hasta en un 50%; un menor tiempo de procesamiento puede traer como consecuencia una retención mayor de compuestos termolábiles, como algunos compuestos fenólicos. Sin embargo, al aumentar la velocidad del tornillo se incrementa la energía mecánica específica, lo que resulta en un aumento en la temperatura y, si bien se disminuye el tiempo de procesamiento, este aumento de temperatura podría afectar la retención de compuestos termolábiles. Esos comportamientos se observan en la **Fig 14**. Conforme se incrementa la velocidad del tornillo aumenta el contenido el contenido de **CFT**. Sin embargo, al rebasar las 145 rpm se observa una disminución en los niveles de **CFT**, el cual se atribuye al incremento de temperatura debido al aumento del esfuerzo de corte producido por una mayor velocidad de tornillo.

Sarawong y col. (2014) sugieren que la disrupción de los compuestos fenólicos unidos a la matriz de la pared celular por el efecto de temperatura elevada, durante el proceso de extrusión, se traduce en el aumento de la liberación de compuestos fenólicos ligados; en la **Fig 14** se observa que al aumentar la **TE** el contenido de **CFT** también se incrementa.

c Digestibilidad de proteína *in vitro* (DPIV)

Las harinas de chía desgrasada extrudidas (**HCDE**) presentaron valores de **DPIV** entre 80.92 y

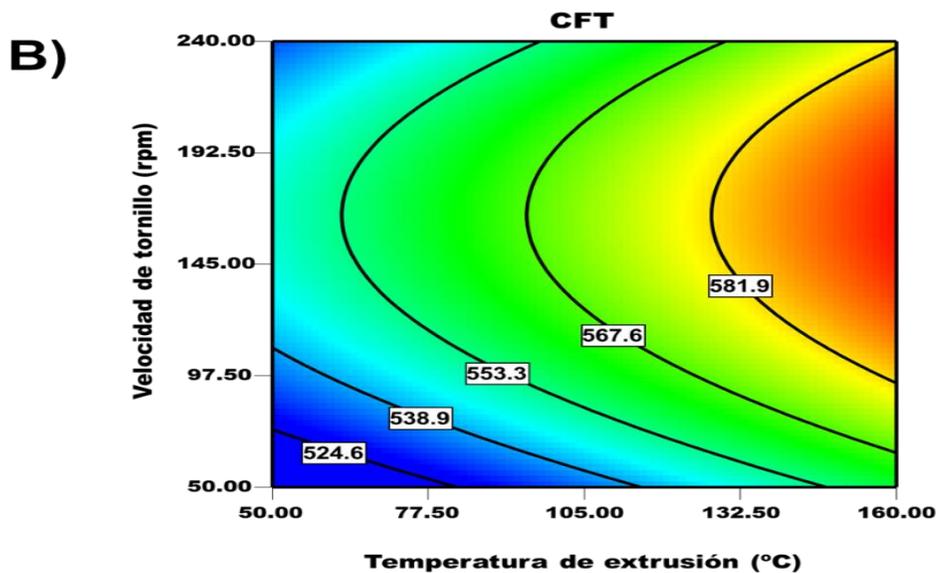
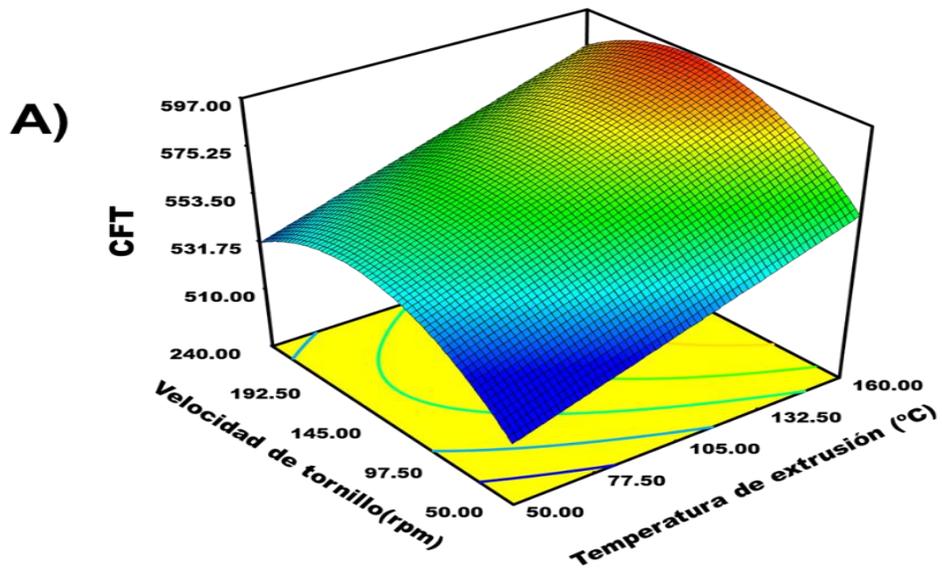


Fig 14. Gráficas de superficie de respuesta (A) y de contorno (B) mostrando el efecto de las variables de proceso [$TE(^{\circ}C)$, $VT(rpm)$] sobre el contenido de compuestos fenólicos totales [CFT (mg EAG/100 g muestra, bs)] de las harinas de chía desgrasadas extrudidas (HCDE).

84.94% (**Cuadro 16**). En el **Cuadro 17** se muestra la estimación de los coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo de predicción para **DPIV** de las **HCDE**, el cual muestra la relación entre esta variable de respuesta y las variables del proceso de extrusión (**TE**, **VT**). El análisis de varianza mostró un modelo cuadrático significativo ($p = 0.0002$) para **DPIV**. Este análisis también mostró que la **DPIV** de las **HCDE** dependió significativamente tanto de los términos lineales de la temperatura de extrusión (**TE**) y la velocidad de tornillo (**VT**), como de su interacción (**TE**)(**VT**) y de los términos cuadráticos de temperatura de extrusión (**TE**)² y velocidad de tornillo (**VT**)². El modelo de predicción para **DPIV** de las **HCDE** fue:

Usando variables codificadas:

$$Y_{DPIV} = 81.99 + 1.22X_1 - 0.32X_2 - 0.16 X_1 * X_2 + 0.16X_1^2 + 1.07 X_2^2$$

Usando variables decodificadas:

$$DPIV = 84.60 + 0.0182TE - 0.0672VT - 6.2543E-005(TE)(VT) + 1.0601E-004(TE)^2 + 2.3793E-004(VT)^2$$

Este modelo de predicción explicó el 46.20% de la variabilidad total ($p = 0.0001$) de los valores de **DPIV** de las **HCDE**. El coeficiente de determinación R^2 ajustada del modelo fue 0.8385 y la falta de ajuste fue no significativa (0.6355). Además, la dispersión relativa de los puntos experimentales con respecto a los valores predichos con el modelo (CV) fue de 0.68%. Estos valores indican que el modelo experimental para la **DPIV** de las **HCDE** fue adecuado y reproducible.

A partir de los modelos matemáticos de predicción se construyeron gráficos de superficie de respuesta y de contorno (**Fig 15**) en los cuales se observa el efecto de las variables del proceso de extrusión (**TE**, **VT**) sobre la **DPIV** de las **HCDE**. En la **Fig 15** se puede observar que ambas variables de proceso (**TE**, **VT**) tuvieron un efecto significativo en el comportamiento de **DPIV**. El valor más bajo (80.92%) de **DPIV** se localizó a **TE**=50°C/**VT**=145 rpm. El área con los valores mayores de **DPIV** se encuentra a **TE** altas y a **VT** tanto altas como bajas (**Fig 15**).

2 Optimización

En el gráfico de deseabilidad global (**D**) (**Fig 16A**) se muestran los valores predichos máximos posibles de **D** en la zona roja, para cada respuesta (**AAox**, **CFT**, **DPIV**), entre los cuales se seleccionó un valor óptimo (**D**=0.81) con las condiciones de extrusión (**TE/VT**) que dieron como resultado valores de **AAox**, **CFT** y **DPIV** máximos posibles. Los valores de deseabilidad individual para cada respuesta, asociados con este valor **D** máximo seleccionado fueron: $d_{AAox} = 0.77$,

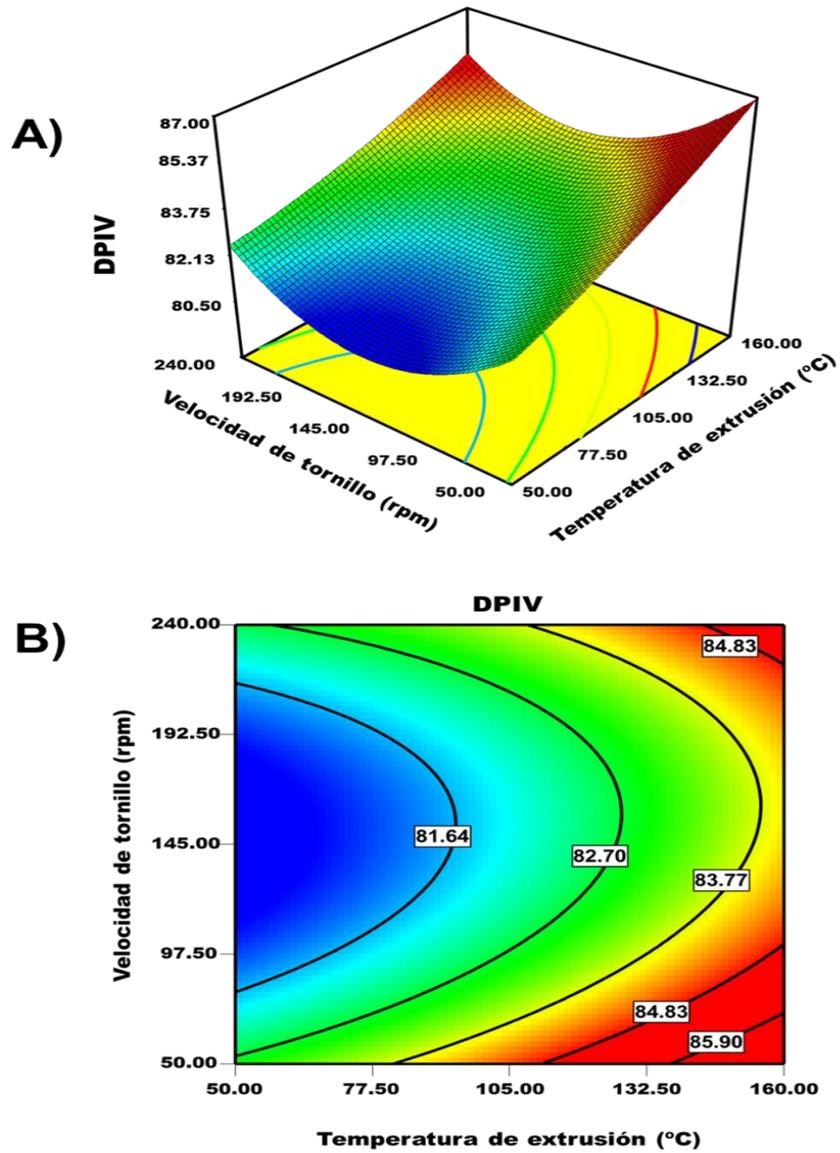


Fig 15. Gráficas de superficie de respuesta (A) y de contorno (B) mostrando el efecto de las variables de proceso [TE (°C), VT (rpm)] sobre la digestibilidad proteínica *in vitro* [DPIV (%)] de las harinas de chía desgrasadas extrudidas (HCDE)

$d_{CFT}=0.70$, $d_{DPIV}=1.00$ (**Fig 16B**). Los valores de las variables de proceso de extrusión asociados con la deseabilidad global máxima obtenida fueron: $TE=147^{\circ}C/VT=237$ rpm. La D obtenida en esta investigación fue mayor que la considerada aceptable ($0.6 < D < 0.8$) de acuerdo a De la Vara y Domínguez (2002). Los valores predichos de $AAox$, CFT y $DPIV$ usando los modelos de predicción de cada variable de respuesta y las condiciones óptimas de extrusión fueron $AAox=30,416$ $\mu\text{mol ET}/100$ g (bs), $CFT=576.72$ mg EAG/100 g (bs) y $DPIV=84.94$ %. Aplicando la mejor combinación de las variables de proceso de extrusión ($TE=147^{\circ}C/VT=237$ rpm) se produjo harina de chía desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**); se efectuaron tres repeticiones.

D EFECTO DE LA EXTRUSIÓN COCCIÓN EN CONDICIONES OPTIMIZADAS SOBRE COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LA SEMILLA DE CHÍA DESGRASADA

En el **Cuadro 18** se muestra la composición química y propiedades fisicoquímicas de la harina de chía desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**), obtenida al aplicar las condiciones óptimas de proceso de extrusión ($TE=147^{\circ}C/VT=237$ rpm) a semillas de chía previamente acondicionada ($CH=28\%$).

El contenido de proteína de **HCDEO** fue mayor ($p < 0.05$) que el de la harina de semillas de chía integral sin procesar (**HCSP**) (30.62% vs 20.30%). Las semillas de chía se desgrasaron previo a la extrusión; materiales con contenidos de lípidos $< 6\%$ favorecen el proceso de extrusión cocción cuando se utiliza extrusor de tornillo simple con las características del empleado en esta investigación (Singh y col. 2007). El contenido de lípidos de la **HCDEO** fue estadísticamente igual ($p < 0.05$) que el de la harina de chía desgrasada (**HCD**) que fue sometida al proceso de extrusión (5.03% vs 5.35 %) (**Cuadro 18**). El contenido de minerales en **HCSP** y **HCDEO** fue de 4.66 y 6.87%, bs, respectivamente (**Cuadro 18**). El proceso de desgrasado de semillas de chía cruda, generó un cambio en la composición química debido al cambio de proporciones por la eliminación parcial de la parte lipídica, manifestándose un efecto de “concentración” del resto de nutrimentos (proteínas, minerales, fibra dietaria, carbohidratos).

Las harinas **HCSP** y **HCDEO** tuvieron valores Hunter “L” de 40.61 y 43.77, respectivamente; mientras que los valores de ΔE fueron de 58.18 y 55.94, respectivamente (**Cuadro 18**). El proceso de extrusión de semillas de chía provocó incremento ($p < 0.05$) en valor Hunter “L” y una disminución ($p < 0.05$) en ΔE ; esto significó un aumento en luminosidad y un “aclaramiento” de la materia prima.

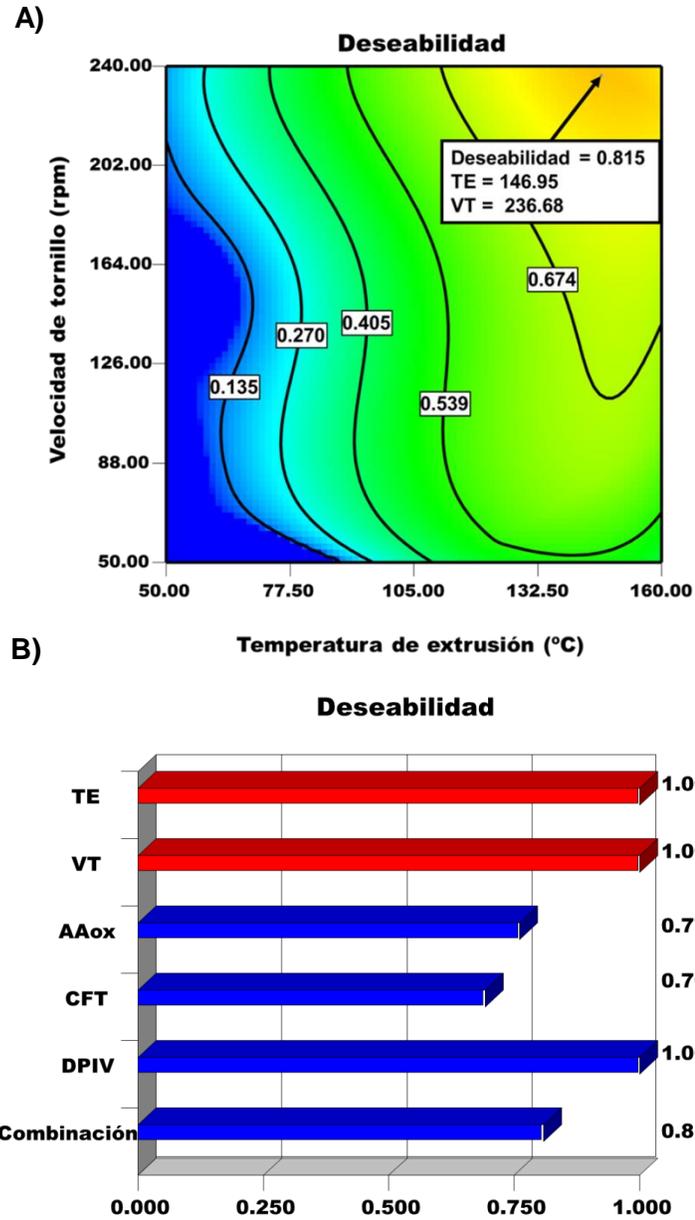


Fig 16. (A) Deseabilidad global ($D=0.815$) para obtener la mejor combinación de variables de proceso ($TE=146.95^{\circ}\text{C}/VT=236.68$ rpm) y (B) Deseabilidades individuales (d_i) para las variables de respuesta (AAox, CFT, DPIV)

Cuadro 17. Composición química y propiedades nutricionales y fisicoquímicas de harinas de chía

Propiedad	Harina de chía sin procesar (HCSP)	Harina de chía desgrasada (HCD)	Harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO)
Composición química (%, bs)			
Proteínas	20.30±0.95 ^b	31.19±0.50 ^a	30.62±1.38 ^a
Lípidos	33.18±1.44 ^a	5.27±0.06 ^b	5.17±0.09 ^b
Minerales	4.66±0.006 ^b	6.90±0.016 ^a	6.87±0.005 ^a
Fibra dietaria total	36.01±1.27 ^c	49.04±1.21 ^b	51.10±1.30 ^a
Carbohidratos	5.85±0.03 ^c	7.60±0.03 ^a	6.24±0.02 ^b
Nutricionales			
DPIV ¹	76.9±1.4	76.5±0.52	86.7±1.2
Fisicoquímicas			
Color			
Valor Hunter "L"	40.61±0.61 ^b	40.38±0.12 ^b	43.77±0.83 ^a
ΔE^2	58.18±0.59 ^a	58.44±0.11 ^a	55.94±0.77 ^b
Actividad acuosa (a_w)	0.56±0.016 ^a	0.48±0.02 ^c	0.41±0.023 ^b
pH	6.22±0.19 ^b	6.47±0.01 ^a	6.35±0.04 ^{ab}
Dispersabilidad (%)	100	100	100
IAA ³	9.31±0.20 ^b	9.26±0.04 ^b	9.90±0.26 ^a
ISA ⁴	3.65±0.36 ^c	4.49±0.12 ^b	7.84±0.42 ^a
CAA ⁵	1.65±0.07 ^c	1.88±0.07 ^b	2.17±0.05 ^a

† Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar;

^{a-b} Medias con letra diferente en el mismo renglón son diferentes (Duncan, $p < 0.05$);

¹ *DPIV* = Digestibilidad proteínica *in vitro* (%) ² ΔE = Diferencia total de color

³ *IAA* = índice de absorción de agua, (g gel/g muestra)

⁴ *ISA* = Índice de solubilidad en agua (g sólidos/100g muestra);

⁵ *CAA* = Capacidad de absorción de aceite (mL aceite absorbido/g de muestra).

Los valores de actividad de agua (0.56–0.41) para harinas de chía sin procesar (**HCSP**) y desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**) (**Cuadro 18**) se encuentran en un rango en donde el crecimiento de microorganismos, las reacciones químicas y enzimáticas ocurren lentamente, lo que significa una larga vida de anaquel (Fennema, 2010).

La **HCDEO** presentó un menor ($p < 0.05$) índice de absorción de agua (IAA) que la **HCSP** (9.31 vs 3.90 g gel/g muestra).

La capacidad de ingredientes de alimentos para unirse al agua es un rasgo importante que cada vez más está siendo explorado para la fabricación de productos de alimentación nuevos. La medida de la capacidad de los ingredientes para ligar el agua y que no esté disponible para reacciones químicas y crecimiento microbiano es una determinación importante al estudiar propiedades funcionales, es por ello que se recomienda la evaluación de la actividad de agua en los alimentos (Kinsella y Melachouris, 1976).

E EFECTO DE LA EXTRUSIÓN COCCIÓN EN CONDICIONES OPTIMIZADAS SOBRE VALOR NUTRICIONAL, CONTENIDO DE FITOQUÍMICOS Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE SEMILLA DE CHIA DESGRASADA

La **AAox** de harinas de chía sin procesar, desgrasada y desgrasada extrudida optimizada (**HCSP**, **HCD**, **HCDEO**), evaluada por ABTS, fue de 23,759, 24,950 y 28,916 $\mu\text{mol ET}/100\text{g}$ muestra, bs, respectivamente (**Cuadro 19**). La **AAox** de **HCDEO** fue mayor que la de las otras dos harinas. En todas las harinas la mayor contribución a la **AAox** correspondió a los fitoquímicos ligados (86.50-94.29%); la contribución de los fitoquímicos libres fue mucho menor (5.79-13.49%). Al evaluar la **AAox** de las harinas de amaranto aplicando el método DPPH se observó una tendencia similar. El proceso de extrusión de chía, llevado a cabo bajo condiciones óptimas (**TE**=147 °C / **VT**= 237 rpm), causó un incremento en la **AAox** de semillas de chía desgrasada, al compararse con semillas de chía cruda, evaluada mediante el método ABTS. Esto podría ser un resultado de la combinación de diversos factores tales como: **(1)** Liberación de compuestos fenólicos con actividad antioxidante durante la extrusión, **(2)** Prevención de oxidación de compuestos fenólicos producto de la inactivación enzimática durante el tratamiento y **(3)** Presencia de productos de reacción Maillard con actividad de antioxidante, generada durante la extrusión de las materias primas que contienen aminoácidos y azúcares reductores (Espinoza-Moreno y col., 2016).

Cuadro 18. Actividad antioxidante y compuestos fenólicos en harinas de chía

Propiedad	Harina de chía sin procesar (HCSP)	Harina de chía desgrasada (HCD)	Harina de chía desgrasada extrudida optimizada (HCDEO)
Actividad antioxidante¹			
<i>ABTS</i>			
Fitoquímicos libres	1,486±142 ^b	1,446±133 ^b	3,903±234 ^a
Fitoquímicos ligados	22,273±2,174 ^a	23,504±2,506 ^a	25,013±2,323 ^a
Total	23,759±2,015 ^b	24,950±2,037 ^b	28,916±2,185 ^a
<i>DPPH</i>			
Fitoquímicos libres	1,117±38 ^b	1,226±32 ^a	1,662±33 ^a
Fitoquímicos ligados	7,447±76 ^a	7,406±70 ^a	7,423±149 ^a
Total	8,564±43 ^a	8,632±100 ^a	9,085±182 ^a
Compuestos fenólicos²			
Fitoquímicos libres	235.8±11.1 ^b	223.2±14.1 ^b	321.7±16.7 ^a
Fitoquímicos ligados	312.3±1.0 ^a	313.5±2.9 ^a	278.8±4.8 ^b
Totales	548.1±12.0 ^b	536.8±13.8 ^b	600.5±14.2 ^a

† Los resultados se expresan como promedio ± desviación estándar

^{a-b} Medias con letra diferente en el mismo renglón son diferentes (Duncan, $p < 0.05$)

¹ μmol Equivalentes de Trolox (ET) / 100 g muestra, bs

² mg Equivalentes de ácido gálico (EAG) / 100 g muestra, bs.

IX CONCLUSIONES

La extrusión cocción de semillas de chía desgrasadas, en condiciones optimizadas, permitió producir una harina funcional [harina de chía desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**)] con características nutrimentales, fisicoquímicas, nutricionales y nutracéuticas aceptables.

La metodología de superficie de respuesta es una herramienta útil para la optimización de procesos (extrusión-cocción) que involucran diversas condiciones de procesamiento y varias variables de respuesta.

La mejor combinación de variables de proceso de extrusión (**TE**, **VT**) para la producción de **HCDEO** con valores altos de **AAox** [ABTS= 28,916 μ mol ET/100g muestra (bs), DPPH=9,805 μ mol ET/100g muestra (bs)], **CFT** [600.5 mg EAG/100g muestra (bs)] y **DPIV** (86.7%) fue **TE=147°C/VT=237 rpm**

La harina de chía desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**), por efecto del desgrasado y extrusión-cocción en condiciones óptimas, incrementó **AAox** (ABTS: +21.70%, DPPH: +14.49%), **CFT** (+9.56%) y **DPIV** (+12.74%), contenido de proteínas (+50.84), fibra dietaria total +41.9) y disminuyó el contenido de lípidos (-84.53%), al compararse con la harina de semilla de chía sin procesar (**HCSP**)

La harina de chía desgrasada extrudida optimizada (**HCDEO**) tuvo mayor **IAA**, **ISA** y **CAA** que la harina de semilla de chía sin procesar (**HCSP**)

La **HCDEO**, por su contenido de proteína de buena calidad, fibra dietaria y compuestos fenólicos, así como por su actividad antioxidante alta puede ser utilizada para promoción de una buena salud y prevención de enfermedades crónico degenerativas al emplearse como ingrediente para la producción de tortillas funcionales, de mayor valor nutricional / nutracéutico que las tradicionales, y productos alimenticios de consumo alto (galletas, atoles, tamales, totopos, sopas, bebidas)

X BIBLIOGRAFIA

- Abelilla JJ, Liu Y, Stein HH. 2018. Digestible indispensable amino acid score (DIAAS) and protein digestibility corrected amino acid score (PDCAAS) in oat protein concentrate measured in 20 to 30 kilogram pigs. *Journal of the Science of Food and Agriculture*
- AACC. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, 1995. 9th Edn. St. Paul, MN: The Association
- Adom KF, Liu RH. 2002. Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50:6182-6187
- Álvarez-Martínez L, Kandury KP, Harper JM. 1988. A general model for expansion of extruded products. *Journal of Food Science* 53:609-615
- Amato M, Caruso MC, Guzzo F, Galgano F, Commisso M, Bochicchio R, Labella R, Favati F. 2015. Nutritional quality of seeds and leaf metabolites of Chia (*Salvia hispanica* L.) from Southern Italy. *European Food Research Technology* 241:615–625
- Anderson RA, Conway HFM, Pfeiffer VF, Griffin EJ. 1969. Gelatinization of corn grits by roll- and extrusion cooking. *Cereal Science Today*, 14, 4–12
- Anuonye JC, Onuh JO, Egwim E, Adeyemo SO. 2010. Nutrient and antinutrient composition of extruded acha/soybean blends. *Journal of Food Processing and Preservation* 34:680-691
- AOAC. 1999. Official Methods of Analysis, 16th edn. Washington, DC, USA: Association of Official Analytical Chemists
- Argüelles-López OD, Reyes-Moreno C, Gutiérrez-Dorado R, Sánchez-Osuna MF, López-Cervantes J, Cuevas-Rodríguez EO, Milán-Carrillo J, Perales-Sánchez JJK. 2018. Functional Beverages Elaborated from Amaranth and Chia Flours Processed by Germination and Extrusion. *Revista BIOTecnia*
- Athar N, Hardacre A, Taylor G, Clark S, Harding R, McLaughlin J. 2006. Vitamin retention in extruded food products. *Journal of Food Composition and Analysis* 19:379-383
- Ayerza R. 2016. Crop year effects on seed yields, growing cycle length, and chemical composition of chia (*Salvia hispanica* L) growing in Ecuador and Bolivia. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 28:196-200
- Ayerza R, Coates W. 2002. Dietary levels of chia: influence on hen weight, egg production and sensory quality, for two strains of hens. *British Poultry Science*, 43(2), 283-290
- Ayerza R, Coates W. 2005. Ground chia seed and chia oil effects on plasma lipids and fatty acids in the rat. *Nutrition Research* 25:995-1003
- Ayerza R, Coates W. 2011. Protein content, oil content and fatty acid profiles as potential criteria to determine the origin of commercially grown chia (*Salvia hispanica* L.). *Industrial Crops and Products*, 34(2), 1366-1371
- Ayerza R, Coates, W. 2009. Some quality components of four chia (*Salvia hispanica* L.) genotypes grown under tropical coastal desert ecosystem conditions. *Asian Journal of Plant Sciences* 8:1-7

- Bailey LN, Hauck BW, Sevatson ES, Singer RE. 1995. Ready-to-eat breakfast Cereal Production. En: "Food Technology International Europe", Turner A (ed), Sterling Publications International, London, pp. 127-32
- Björck I, Asp NG. 1983. The effects of extrusion cooking on the nutritional value - A literature review. *Journal of Food Engineering* 2:281-308
- Bochicchio R, Philips TD, Lovelli S, Labella R, Galgano F, Di Marisco A, Perniola M, Amato M. 2015. Innovative Crop Productions for Healthy Food: The Case of Chia (*Salvia hispanica* L.). En: "The Sustainability of Agro-food and Natural Resource Systems in the Mediterranean Basin", Vastola A (ed.), Springer International Publishing, pp. 29-45
- Borderías AJ, Sánchez-Alonso I, Pérez-Mateos M. 2005. New applications of fibres in foods: addition to fishery products. *Trends in Food Science & Technology*, 16(10), 458-465
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. 1995. Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT Food Science and Technology* 28:25-30
- Brennan C, Brennan MA, Derbyshire E, Tiwari BK. 2011. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. *Trends in Food Science and Technology* 22:570-575
- Bressani R. 1983. Guidelines for the development of processed and packed weaning foods. *Food Science and Nutrition Bulletin* 5:1-20
- Cahill JP. 2003. Ethnobotany of Chia, *Salvia hispanica* (Lamiaceae). *Economic Botany* 57:604-618
- Camacho-Hernández IL, Zazueta-Morales JJ, Gallegos-Infante JA, Aguilar-Palazuelos E, Rocha-Guzmán NE, Cortez-Navarro RO, Jacobo-Valenzuela N, Gómez-Aldapa CA. 2014. Effect of extrusion conditions on physicochemical characteristics and anthocyanin content of blue corn third-generation snacks. *CyTA – Journal of Food* 4:320-330
- Camire M. 2002. Extrusion Cooking. En: "The Nutrition Handbook for Food Processors", Henry CJK and Chapman C (ed), Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, pp 314-330
- Camire ME. 2003. Extrusion Cooking. In: "The Nutrition Handbook for Food Processors", Henry CJK, Chapman C (ed). Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, pp. 314–330
- Camire ME, Camire A, Krumhar K. 1990. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 29:35-57
- Camire ME, Camire A, Krumhar K. 1990. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 29:35-57
- Camire ME, Dougherty MP, Briggs JL. 2005. Antioxidant-rich foods retard lipid oxidation in extruded corn. *Cereal Chemistry* 82:666-670
- Capitani MI. 2013. Caracterización y Funcionalidad de Subproductos de Chía (*Salvia hispanica* L.). Aplicación en Tecnología de Alimentos. Tesis Doctoral (Doctor en Ciencias Exactas, área Química), Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Buenos Aires, ARGENTINA

- Chavez-Jauregui RN, Silva MEMP, Areas JAG. 2000. Extrusion cooking process for amaranth. *J Food Sci* 65:1009–15
- Chen L, Remondetto GE, Subirade M. 2006. Food protein-based materials as nutraceutical delivery systems. *Trends in Food Science and Technology* 17: 272–283
- Chessari CJ, Sellahewa JN. 2001. Effective process control.
- Colonna P, Buleon A, Mercier C. 1981. Psidium satuum and Vicia fabo carbohydrates: structural studies of starches. *Journal of Food Science* 46:88-93
- Colonna P, Tayeb J, Mercier C. 1989. Extrusion cooking of starch and starchy products. In: Extrusion Cooking (edited by C.Mercier, P.Linko & J.M.Harper). St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, Inc. 247–319.
- Contreras-Jiménez B, Morales-Sánchez E, Reyes-Vega ML, Gaytán-Martínez M. 2014. Propiedades funcionales de harinas de maíz nixtamalizado obtenidas por extrusión a baja temperatura. *C y TA - Journal of Food* 12:263-270
- Corrales-Bañuelos AB, Cuevas-Rodríguez EO, Gutiérrez-Irribé 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
- da Silva-Pereira B, Anunciação PC, Matyelka JCDS, Della Lucia CM, Martino HSD, Pinheiro-Sant'Ana HM. 2017. Chemical composition of Brazilian chia seeds grown in different places. *Food Chemistry* 221:1709-1716
- da Silva BP, Dias DM, de Castro Moreira ME, Toledo RC, daMatta SL, Lucia CM, Martino HS, Pinheiro-Sant'Ana HM. 2016. Chia seed shows good protein quality, hypoglycemic effect and improves the lipid profile and liver and intestinal morphology of Wistar rats. *Plants Foods for Human Nutrition* 71:225-230
- da Silva-Marineli R, Aguiar-Moraes E, Alves-Lenquise S, Teixeira-godoy A, Nogueira-Eberlin M, Maróstica MR Jr. 2014. Chemical characterization and antioxidant potential of Chilean chia seeds and oil (*Salvia hispanica* L). *LWT – Food Science and Technology* 59:1304-1310
- Davidson VJ, Patton D, Diosady LL, Larrocque G. 1984. Degradation of wheat starch in a single screw extruder: Characteristics of extruded starch polymers. *J. Food Sci.* 49:453–458
- De la Vara SR y Domínguez DJ. 2002. Métodos de superficie de respuesta; un estudio comparativo. *Revista de Matemáticas: Teoría y Aplicaciones* 1: 47-65
- Dehghan-Shoar Z, Hardacre AK, Brennan CS. 2010. The physico-chemical characteristics of extruded snacks enriched with tomato lycopene. *Food Chemistry*, 123(4), 1117-1122
- Dendy DAV, Dobraszczyk BJ. 2004. Cereales y Productos Derivados Química y Tecnología, Acribia
- Dewanto V, Wu X, Adom KK, Liu RH. 2002. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 3010–3014

- Di Sapio O, Bueno M, Busilacchi H, Severin C. 2008. Chía: Importante antioxidante vegetal. *Agromensajes (Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Rosario)* 24:1156-1158
- Di Sapio O, Bueno M, Busilacchi H, Quiroga M, Severin C. 2012. Caracterización morfoanatómica de hoja, tallo, fruto y semilla de *Salvia hispanica* L. (*Lamiaceae*). *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas (BLACPMA)*. 11:249-268
- 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, Bonifati AM, 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
- El-Hady EAA, Habiba RA. 2003. Effect of soaking and extrusion conditions on antinutrients and protein digestibility of legume seeds. *LWT - Food Science and Technology* 36:285-93
- FAO. 2013. Findings and Recommendations of the 2011 FAO Expert Consultation on Protein Quality Evaluation in Human Nutrition. In: "Dietary Protein Quality Evaluation in Human Nutrition: Report of an FAO Expert Consultation". FAO Food and Nutrition Paper 92. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, Chapter 4, pp. 29
- Fares, C. and Menga, V. (2012). Effects Fares C, Menga V. 2012. Effects of toasting on the carbohydrate profile and antioxidant properties of chickpea (*Cicer arietinum* L) flour added to durum wheat. *Food Chemistry* 131:1140-1148
- Fellows PJ. 2007. *Food Processing Technology: Principles and Practice*. 2nd Edition, Woodhead. Cambridge, RU
- Fennema OR. 2001. *Química de los alimentos* (2nd Ed). Editorial Acribia
- Fennema OR. 2010. *Química de los Alimentos*. 3ra edición. Editoria Acribia, Zaragoza, ESPAÑA, pp1166
- Formas diferentes de gránulos de almidón de diversas fuentes. (s.f.). Recuperado de: <http://archaeobotany.dept.shef.ac.uk>
- Garzón-Tiznado JA, Heiras-Palazuelos MJ, Espinoza-Moreno JR, Cano-Campos M, Delgado-Vargas F, Gutiérrez-Dorado R, Milán-Carrillo J, Reyes-Moreno C. 2013. Antioxidant and antimutagenic activities of optimized extruded desi chickpea (*Cicer arietinum* L) flours. *Journal of Pharmacy and Nutrition Sciences* 3:38-47
- 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 celular antioxidant activity in tortillas produced from pigmented maize processed by nixtamalization or lime extrusion. *Plant Foods for Human Nutrition* 72:314-320
- Gómez-Favela MA, Gutiérrez-Dorado R, Cuevas-Rodríguez EO, Canizalez-Román VA, del Rosario León-Sicairos C, Milán-Carrillo J, Reyes-Moreno C. 2017. Improvement of Chia Seeds with

- Antioxidant Activity, GABA, Essential Amino Acids, and Dietary Fiber by Controlled Germination Bioprocess. *Plant Foods for Human Nutrition*, 72(4), 345-352
- González-Jiménez F. 2010. Caracterización de Compuestos Fenólicos Presentes en la Semilla de Chía (*Salvia hispanica* L) Mediante Electroforesis Capilar. Tesis de Maestría (Maestría en Ciencias en Alimentos). Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, Cd México, MEX, México
- Gu L, House SE, Rooney LW, Prior RL. 2008. Sorghum extrusion increases bioavailability of catechins in weaning pigs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56:1283-1288
- Guiotto EN, Ixtaina VY, Tomás MC, Nolasco SM. 2011. Moisture-dependent physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Trans ASABE* 54:1-7
- Guy R. 2001. Snack Foods. En: "Extrusion Cooking Technologies and Applications", Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, UK, pp 161-181
- Harper JM. 1988. Effects of Extrusion Processing on Nutrients. En: "Nutritional Evaluation of Food Processing", Karmas E, Harris RS (ed), pp 360-365
- Hauffman VL, Lee CK y Burns EE. 1975. Selected functional properties of sunflower meal (*Heliantus anhus*). *Journal of Food Science* 40: 70-74
- Heuer B, Yaniv Z, Ravina I. 2002. Effect of late salinization of chia (*Salvia hispanica*), stock (*Matthiola tricuspidata*) and evening primrose (*Oenothera biennis*) on their oil content and quality. *Industrial Crops and Products* 15:163-167
- Hirth M, Preib R, Mayer-Miebach E, Schuchmann HP. 2015. Influence of HTST extrusion cooking process parameters on the stability of anthocyanins, procyanidins and hydroxycinnamic acids as the main bioactive chokeberry polyphenols. *LWT - Food Science and Technology*, 511-516
- Ilo S, Berghofer E. 2003. Kinetics of lysine and other amino acids loss during extrusion cooking of maize grits. *Journal of Food Science* 68:496-502
- Ixtaina Y, Nolasco SM, Tomas MC. 2008. Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Industrial Crops and Products* 28:286-293
- Ixtaina VY. 2010. Caracterización de la Semilla y el Aceite de Chía (*Salvia hispanica* L.) Obtenido Mediante Distintos Procesos. Aplicación en Tecnología de Alimentos. Tesis de Doctorado (Doctor en Ciencias Exactas, área Química), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de la Plata, ARGENTINA
- Jamboonsri W, Phillips TD, Geneve RL, Cahill JP, Hildebrand DF. 2012. Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L. - A new ω 3 source. *Genetic Resources and Crop Evolution* 59:171-178
- Jaramillo-Garcés Y. 2013. La Chía (*Salvia hispanica* L.), una Fuente de Nutrientes para el Desarrollo de Alimentos Saludables. Tesis de Licenciatura (Ingeniería en Alimentos – Especialista en Alimentación y Nutrición), Facultad de Ingenierías, Corporación Universitaria Lasallista, Caldas-Antioquía, COLOMBIA

- Kaczmarczyk MM, Miller MJ, Freund GG. 2012. The health benefits of dietary fiber: beyond the usual suspects of type 2 diabetes mellitus, cardiovascular disease and colon cancer. *Metabolism-Clinical and Experimental*, 61(8), 1058-1066
- Karwe M. 2003. Food Extrusion. En: "Food Engineering", Vol III, Barbosa-Cánovas GV (ed), EOLSS Publications, Oxford, UK pp 227-256
- Kaur C, Kapoor HC. 2001. Antioxidants in Fruits and Vegetables - The Millennium's Health. *International Journal of Food Science and Technology* 36:703-725
- Kaur S, Sharma S, Singh B, Dar BN. 2013. Effect of extrusion variables (temperature, moisture) on the antinutrient components of cereal brans. *Journal of Food Science and Technology* 1-7
- Killeit U. 1994. Vitamin retention in extrusion cooking. *Food Chemistry* 49:149-155
- Kinsella J, Melachouris N. 1976. Functional properties of proteins in foods: A survey. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 7:219-280
- Korus J, Gumul D, Czechowska K. 2007. Effect of extrusion on the phenolic composition and antioxidant activity of dry beans of *Phaseolus vulgaris* L. *Food Technology and Biotechnology* 45:139-146
- Liu RH. 2007. Whole grain phytochemicals and health. *Journal of Cereal Science* 46:207-219
- 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 A*, 1105(1-2), 106-110
- Marineli RDS, Lenquite SA, Moraes EA, Maróstica MR Jr. 2015. Antioxidant potential of dietary chia seed and oil (*Salvia hispanica* L.) in diet-induced obese rats. *Food Research International* 76:666-674
- Martínez-Cruz O, Paredes-López O. 2014. Phytochemical profile and nutraceutical potential of chia seeds (*Salvia hispanica* L.) by ultrahigh performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A* 1346:43-48
- Martínez-Maqueda D, Miralles B, Recio I, Hernández-Ledesma B. 2012. Antihypertensive peptides from food proteins: a review. *Food & function*, 3(4), 350-361
- Maskan M, Altan A. 2016. *Advances in Food Extrusion Technology*. Maskan M, Altan A (ed), CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA, pp 412
- Milán-Carrillo J, Reyes-Moreno C, Armenta-Rodelo E, Carábez-Trejo A y Mora-Escobedo R. 2000. Physicochemical and nutritional characteristics of extruded flours from fresh and hardened chickpeas (*Cicer arietinum* L). *LWT – Food Science and Technology* 33:17-123
- 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
- Milán-Carrillo J, Gutiérrez-Dorado R, Perales-Sánchez JXK, Cuevas-Rodríguez EO, Ramírez-Wong B, Reyes-Moreno C. 2005. The optimization of the extrusión process when using maize flour with a modified amino acid profile for making tortillas. *International Journal of Food Science and Tecnology* 40:1-11

- Milán-Carrillo J, Montoya-Rodríguez A, Gutiérrez-Dorado R, Perales-Sánchez JXK, Reyes-Moreno C. 2012. Optimization of extrusion process for producing high antioxidant instant amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L) flour using response surface methodology. *Applied Mathematics* 3:1516-1525
- Milán-Carrillo J, Montoya-Rodríguez A, Reyes-Moreno C. 2012. High Antioxidant Capacity Beverages from Roasted and Extruded Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) flours. En: "Hispanic Foods: Chemistry and Bioactive Compounds", Chapter 13, Tunick M y De Mejía-González E (ed), ACS Symposium Series, American Chemical Society, Washington, DC, USA, pp 199-216
- Mohd Ali N, Yeap SK, Ho WY, Beh BK, Tan SW, Tan SG. 2012. The promising future of chia, *Salvia hispanica* L. *Journal of Biomedicine and Biotechnology* ID 171956, 9 pages, doi.org/10.1155/2012/171956
- Monroy-Torres R, Mancilla-Escobar ML, Gallaga-Solórzano JC, Medina-Godoy S, Santiago-García EJ. 2008. Protein digestibility of chia seed *Salvia hispanica* L. *Revista de Salud Pública y Nutrición* 9:1-9
- Montgomery DC. 1991. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica,.
- Montgomery DC. 2014. Diseño y Análisis de Experimentos. México: Limusa-Wiley, Cd Mex, MEXICO
- Montoya-Rodríguez A, González de Mejía E, Díaz VP, Reyes-Moreno C, Milán-Carrillo J. 2014a. Extrusion improved the anti-inflammatory effect of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) hydrolysates in LPS-induced human THP-1 macrophage-like and mouse RAW264.7 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, Dia V, González de Mejía E. 2014b. 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
- Mora-Escobedo R, Paredes-López O y Gutiérrez-López GF. 1994. Effect of germination on the rheological and functional properties of amaranth seeds. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 24, 241–246
- Mora-Rochin 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
- Muñoz LA, Cobos A, Díaz O, Aguiler JM. 2013. Chia seed (*Salvia hispanica* L): An ancient grain and a new functional food. *Food Reviews International* 29:394-408
- Myers RH. 1971. Response Surfaces Methodology. Pp. 26–106. Boston, MA, USA: Allyn and Bacon
- Norma Mexicana para Maíces Destinados al Proceso de Nixtamalización, NMX–FF–034/I–SCFI–PARTE –1. 2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano—

- cereales–maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado. Especificaciones y Métodos de prueba. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Dirección General de Normas. México, D. F. 18 p
- 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 de Irapuato, Guanajuato, Gto, México
- Orona-Tamayo D, Valverde ME, Paredes-López O. 2016. Chia - The New Golden Seed for the 21st Century: Nutraceutical Properties and Technological Uses
- Orona-Tamayo D, Valverde ME, Nieto-Rendón B, Paredes-López O. 2015. Inhibitory activity of chia (*Salvia hispanica* L.) protein fractions against angiotensin I-converting enzyme and antioxidant capacity. *LWT-Food Science and Technology*, 64(1), 236-242
- Peperkamp M. 2014. Chia from Bolivia: A modern super seed in a classic pork cycle. CBI Market Intelligence. Netherland: Ministry of Foreign Affairs. www.cbi.eu/market-information/grains-pulses chia/..., pp 1-15
- Porrás-Loaiza P, Jiménez-Munguía MT, Sosa-Morales ME, Palou E, López-Malo A. 2014. Physical properties, chemical characterization and fatty acid composition of Mexican chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *International Journal of Food Science and Technology* 49:571–577
- 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
- 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 Radic Biol Med* 26:1231–1237
- Reyes-Caudillo E, Tecante A, Valdivia-López M. 2008. Dietary fibre content and antioxidant activity of phenolic compounds present in Mexican chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Food Chemistry* 107:656-663
- Reyes-Moreno C, Milán-Carrillo J, Rouzaud-Sandez O, Garzón-Tiznado JA, Mora-Escobedo R. 2002. Dehulling / softening / extrusion (DES): Technological alternative to improve nutritional quality of chickpea (*Cicer arietinum* L). *Agrociencia (México)* 36: 181-189
- Reyes-Moreno C, Milán-Carrillo J, Gutiérrez-Dorado R, Paredes-López O, Cuevas-Rodríguez EO, Garzón – Tiznado JA. 2003. Instant flour from quality protein maize (*Zea mays* L). Optimization of extrusion process. *LWT – Food Science and Technology* 36:685-695
- Reyes-Moreno C, Argüelles-López OD, Rochín-Medina JJ, Milán-Carrillo J, Rivera-López J, Valdez-Ortiz A, López-Valenzuela JA, Gutiérrez-Dorado R. 2012. High antioxidant activity mixture of extruded whole quality protein maize and common bean flours for production of a nutraceutical beverage elaborated with a traditional mexican formulation. *Plant Foods for Human Nutrition* 67:450-456
- Riaz M, Asif M, Ali R. 2009. Stability of vitamins during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 49:361-368

- Rochín-Medina JJ, Gutiérrez-Dorado R, Mora-Rochín S, Medina-Godoy S, Valdéz-Ortiz A, López-Valenzuela JA, Delgado-Vargas F, Milan-Carrillo J, Reyes-Moreno C. 2012. Nutraceutical beverage from a high antioxidant activity mixture of extruded whole maize and chickpea flours. *European International Journal of Science and Technology* 3:1-14
- Rochín-Medina JJ, Milán-Carrillo J, Gutiérrez-Dorado R, Cuevas-Rodríguez EO, Mora-Rochín S, Valdez-Ortiz A, Delgado-Vargas F, Reyes-Moreno C. 2015. Bebida funcional de valor nutricional / nutracéutico alto elaborada a partir de una mezcla de granos integrales (maíz + garbanzo) extrudidos. Optimización de procesos. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 2:51-65 ISSN 2334-2501
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (1980-2010). "Anuario Estadístico de la Producción Agrícola", Texto completo, URL: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/> Última consulta 18 de junio de 2015.
- Sarawong C, Schoenlechner R, Sekiguchi K, Berghofer E, Ng PK. 2014. Effect of extrusion cooking on the physicochemical properties, resistant starch, phenolic content and antioxidant capacities of green banana flour. *Food Chemistry* 143:33-39
- Sargi SS, Silva BC, Santos HMC, Monthanher PF, Boeing JS, Santos Jr OO, Souza NE, Visentainer JV. 2013. Antioxidant capacity and chemical composition in seeds rich in omega-3: Chia, flax, and perilla. *Food Science and Technology, Campinas* 33:541-548
- Serna-Saldívar SO, Canett R, Vargas J, Gonzales M, Bedolla S, Medina C. 1988. Effect on value of maize and decorticated sorghum tortillas produced by extrusión-cooking. *Cereal Chemistry* 65:44-48
- Satterlee LD, Marshall HF, Tennyson JM. 1979. An in vitro assay for the prediction of the protein efficiency ratio (PER) (q.v.) of food proteins. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 56:103-109
- Singh J, Dartois A, Kaur L. 2010. Starch digestibility in food matrix: A review. *Trends in Food Science and Technology* 21:168-180
- Singh S, Gamlath S, Wakeling L. 2007. Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology* 42:916–929
- Singleton VL, Orthofer R, Lamuela-Raventós RM. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods Enzymol* 299:152–178
- Stanley DW. 1998. Protein Reactions during Extrusión Processing. En: "Extrusion Cooking". Cap 10. Mercier C, Linko P, Harper JM (ed). St Paul, MN, EUA, *American Association of Cereal Chemistry*. pp 321-341.
- Sistema Integrado de Información Taxonómica. 2016
- Timilsena YP, Adhikari R, Kasapis S, Adhikari B. 2015. Rheological and microstructural properties of the chia seed polysaccharide. *International journal of biological macromolecules*, 81, 991-999

- Tiwari U, Cummins E. 2009. Nutritional importance and effect of processing on tocopherols in cereals. *Trends in Food Science and Technology* 20:511-520
- Toscano LT, da Silva CSO, de Almeida AEM, da Cruz Santos A, Silva AS. 2014. Chia flour supplementation reduces blood pressure in hypertensive subjects. *Plant Foods for Human Nutrition* 69:392-398
- Ullah R, Nadeem M, Khaliq A, Imran M, Mehmood S, Javid A, Hussain J. 2015. Nutritional and therapeutic perspectives of Chia (*Salvia hispanica* L.): A review. *Journal of Food Science and Technology – Mysore* 53:1750-1758 DOI 10.1007/s13197-015-1967-0
- USDA.2016. United States Department of Agriculture. Recuperado el 8 de Diciembre de 2017, de <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/3610?fgcd=&man=&facet=&count=&max=35&sort=&qlookup=12006&offset=&format=Full&new=&measureby=>
- Valdivia-López M, Tecante A. 2015. Chia (*Salvia hispanica*): A review of native Mexican seed and its nutritional and functional properties. *Advances in Food and Nutrition Research* 75:53-75
- Valls A. 1993. El proceso de extrusión en cereales y haba de soja. XI Curso de Especialización FEDNA. Barcelona, 8 y 9 de Noviembre
- Van Dokkum W, Frølich W, Saltmarsh M, Gee J. 2008. The health effects of bioactive plant components in food: Results and opinions of the USA COST 926 action. *Nutrition Bulletin* 33:133-139
- Vázquez-Ovando A, Rosado-Rubio G, Chel-Guerrero L, Betancur-Ancona D. 2009. Physicochemical properties of a fibrous fraction from chia (*Salvia hispanica* L.). *LWT - Food Science and Technology* 42:168-173
- Viscidi KA, Dougherty MP, Briggs J, Camire ME. 2004. Complex phenolic compounds reduce lipid oxidation in extruded oat cereals. *LWT – Food Science and Technology* 37:789-796
- Vuksan V, Whitham D, Sievenpiper JL, Jenkins AL, Rogovik AL, Bazinet RP, Vidgen E, Hanna A. 2007. Supplementation of conventional therapy with the novel grain Salba (*Salvia hispanica* L.) improves major and emerging cardiovascular risk factors in type 2 diabetes: Results of a randomized controlled trial. *Diabetes Care* 30:2804-2810
- Weber CW, Gentry HS, Kohlhepp EA, McCrohan PR. 1991. The nutritional and chemical evaluation of Chia seeds. *Ecology of Food and Nutrition* 26:119-125
- White BL, Howard LR, Prior RL. 2010. Polyphenolic composition and antioxidant capacity of extruded cranberry pomace. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 4037–4042
- Yeboah S, Owusu-Danquah E, Lamptey JNL, Mochiah MB, Lamptey S, Oteng-Darko P, Adama I, Appiah-Kubi Z, Agyeman, K. 2013. Influence of planting methods and density on performance of chia (*Salvia hispanica*) and its suitability as an oilseed plant. *Agricultural Science* 2:14-26
- Zhao X, Wei Y, Wang Z, Chen F, Ojokoh AO. 2011. Reaction kinetics in food extrusion: Methods and results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 51:835–854
- Zhu B, Sun Y, Qi L, Zhong R, Miao X. 2015. Dietary legume consumption reduces risk of colorectal cancer: evidence from a meta-analysis of cohort studies. *Scientific reports*, 5, 8797

Abreviaturas

AACC	American Association of Cereal Chemists
AAE	Aminoácidos esenciales
AAPH	2-2'-Azobis Amidinopropano
AAox	Actividad Antioxidante
ABTS	2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid)
ADH	Ácido docosahexaenoico
AEP	Ácido eicosapentaenoico
AGP	Ácidos grasos poliinsaturados
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
bs	Base seca
°C	Grados Celsius
Ca	Calcio
CaCl ₂	Cloruro de Calcio
Cal	Calorías
CE	Capacidad emulsificante
CEE	Capacidad de estabilidad de espuma
CFE	Capacidad de formación de espuma
CFT	Compuestos fenólicos totales
cm	Centímetro(s)
col.	Colaboradores
C-PER	Relación de eficiencia proteínica calculada
Cu	Cobre
DPPH	2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl
etc.	Etcétera
ECA	Enzima convertidora de angiotensina
ECD	Enfermedades crónico degenerativas
EE	Estabilidad de emulsión
FAO	Food and Agriculture Organization
FAO/WHO	Food and Agriculture Organization /World Health Organization
FDI	Fibra dietaria insoluble
FDS	Fibra dietaria soluble
FDT	Fibra dietaria total
Fe	Hierro
Fig	Figura
g	Gramo(s)
g	Gravedad
GAE	Equivalentes de Ácido Gálico
h	Hora(s)
ha	Hectárea(s)
HCSP	Harina de chia sin procesar

HCD	Harina de chia desgrasada
HCDEO	Harina de chia desgrasada extrudida optimizada
hL	Hectolitro
HR	Humedad relativa
HTA	Hipertensión arterial
IAA	Índice de Absorción de Agua
IC ₅₀	Concentración para disminuir 50% actividad enzimática
ISA	Índice de Solubilidad en Agua
K	Potasio
kDa	Kilodaltones
kg	Kilogramo(s)
L	Litro(s)
LC/MS/MS	Cromatografía líquida/ espectroscopia de masas-masas
m	Metro(s)
M	Molaridad
mg	Miligramo(s)
Mg	Magnesio
min	Minuto(s)
mL	Mililitro(s)
mm	Milímetro(s)
mM	Milimolar
mm Hg	Milímetro(s) de mercurio
μL	Microlitro(s)
μm	Micrómetro(s)
μmol	Micromol
μM	Micromolar
Mn	Manganeso
MSR	Metodología de superficie de respuesta
N ₂	Nitrógeno
N	Normalidad
Na	Sodio
NaOH	Hidróxido de Sodio
nM	Nanomolar
No.	Número
O ₂ ⁻	Anión Superóxido
P	Fósforo
pH	Potencial de hidrógeno
p/v	Peso/volumen
RL	Radicales libres
ROO'	Radicales peroxilo
rpm	Revoluciones por minuto
S.	Salvia
s	Segundo(s)

SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SOD	Superóxido dismutasa
TCA	Ácido Tricloroacético
TE	Temperatura de extrusión (°C)
ton	Tonelada(s)
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
v/v	Volumen/volumen
VT	Velocidad del tornillo (rpm)
Zn	Zinc