



S.E.P. TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO
de Tuxtepec**

**"Desarrollo de una botana extrudida con
mezcla de suero de leche deshidratado y
residuo de piña a base de almidón de maíz"**

TESIS

Para Obtener el Grado de

MAESTRA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS

PRESENTA:

BIOL. MARÍA ISABEL RIVERA MIRÓN

DIRECTOR:

DR. JESÚS RODRÍGUEZ MIRANDA

CO-DIRECTOR:

DR. JUAN GABRIEL TORRUCO UCO.

MCA-2019/02

Tuxtepec, Oaxaca, México.

Mayo, 2019

COMITÉ TUTORIAL:

DR. JESÚS RODRÍGUEZ MIRANDA

DR. JUAN GABRIEL TORRUCO UCO

DRA. ROSELIS CARMONA GARCÍA

DRA. ARACELI PÉREZ SILVA



S.E.P. TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS

**“Desarrollo de una botana extrudida con
mezcla de suero de leche deshidratado y
residuo de piña a base de almidón de
maíz”**

TESIS

Para Obtener el Grado de

MAESTRA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS

PRESENTA

BIOL. MARÍA ISABEL RIVERA MIRÓN

DIRECTOR

DR. JESÚS RODRÍGUEZ MIRANDA

CO-DIRECTOR

DR. JUAN GABRIEL TORRUCO UCO.

MCA-2019/02

Tuxtepec, Oaxaca, México.



Mayo, 2019



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Tuxtepec

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
División de Estudios Profesionales

Procedimiento para la Titulación
Autorización de Presentación del Trabajo Profesional
Referencia a la Norma ISO 9001:2015 8.5.1

SUBDIRECCION ACADÉMICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS
PROFESIONALES

Tuxtepec, Oaxaca **11/ABRIL/2019**
OFICIO: No. 1964

BIOL. MARÍA ISABEL RIVERA MIRÓN
EGRESADA DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS
CON NÚMERO DE CONTROL M17350001
PRESENTE.

POR MEDIO DE LA PRESENTE ME PERMITO COMUNICARLE QUE LA COMISIÓN REVISORA INTEGRADA POR LOS C.C. DR. JESÚS RODRÍGUEZ MIRANDA, DR. JUAN GABRIEL TORRUCO UCO, DRA. ROSELIS CARMONA GARCÍA Y DRA. ARACELI PÉREZ SILVA, REVISÓ Y APROBÓ EN SU TOTALIDAD EL TRABAJO PROFESIONAL DENOMINADO "DESARROLLO DE UNA BOTANA ESTRUDIDA CON MEZCLA DE SUERO DE LECHE DESHIDRATADO Y RESIDUOS DE PIÑA A BASE DE ALMIDÓN DE MAÍZ" PRESENTADO POR USTED COMO PRODUCTO DE TESIS DEL LINEAMIENTO DE TITULACIÓN CORRESPONDIENTE, PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS.

POR LO ANTERIOR Y DE ACUERDO A LOS LINEAMIENTOS INSTITUCIONALES, SE LE DA TRÁMITE LEGAL PARA QUE PROCEDA A LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO PROFESIONAL.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®

L.I. MARTHA MÓNICA HERNÁNDEZ CRUZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

C.c.p.-Coord. de titulación
MMHC/has



REGISTRO SGC
Código: ITTUX-EG-PO-001-06
Revisión: 2
Fecha de Autorización: 28/Abril/2018



Av. Dr. Víctor Bravo Ahúja S/N, Col. 5 de Mayo CP. 68350, Tuxtepec, Oax. México.
Tel. 01 (287) 8751044, Ext. 117 e-mail: it_tuxtepec@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.itux.edu.mx



ISSC
RECISO
RECERTIFICACIÓN
TURNADO: 2018 07 30
2018 04 23
2018 07 30
2018 07 30

Desarrollo de una botana extrudida con mezcla de suero de leche deshidratado y residuo de piña a base de almidón de maíz”

Por:

María Isabel Rivera Mirón

Tesis propuesta al

Instituto Tecnológico de Tuxtepec

Como requerimiento para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Alimentos

Mayo 2019

DEDICATORIAS

Este trabajo está dedicado con mucho amor a Dios, a mis padres, gracias por mostrarme el camino hacia la superación, a mis hijos que son el motor de mi vida, a mi esposo por apóyame durante mi formación y a toda mi familia, amigos y maestros que me apoyaron durante mi formación.

AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca otorgada para la realización de los estudios de la Maestría en Ciencias en Alimentos

Mis agradecimientos al Dr. **Jesús Rodríguez Miranda** por compartirme sus conocimientos, su experiencia, por sus consejos que motivaron a conseguir mis metas, así como también le agradezco su confianza depositada en mí y sin duda su infinita paciencia al apoyarme en mi formación como profesionista.

Al Dr. **Juan Gabriel Torruco Uco**, Dra. **Roselis Carmona García** y la Dra. **Araceli Pérez Silva**, gracias por el apoyo y asesoría en la realización de este trabajo de investigación.

A mis profesores de la **Maestría en Ciencias en Alimentos** les agradezco el apoyo brindado, paciencia, el compartir sus conocimientos, así como también sus observaciones y sugerencias durante mi formación profesional

Mi agradecimiento a **Norma Carrera Epifanio** por su apoyo, la paciencia y la entrega para realizar en conjunto esta investigación, así como también a mis amistades y compañeros que me apoyaron de distintas formas para llegar a culminar esta investigación.

RESUMEN

Rivera-Mirón, M. I., Tecnológico Nacional de México campus Tuxtepec. Abril, 2019. “Desarrollo de una botana extrudida con mezcla de suero de leche deshidratado y residuos de piña a base de almidón de maíz”. Director: Dr. Jesús Rodríguez Miranda, Co-director: Dr. Juan Gabriel Torruco Uco.

La extrusión es ampliamente utilizada en la industria alimentaria, debido a la capacidad de diseñar procesos continuos de cocción en cortos tiempo y tiene el potencial de producir una amplia variedad de productos, entre ellos las botanas. El objetivo de esta investigación fue el desarrollo y caracterización de una botana extrudida con mezcla de suero de leche dulce deshidratado y residuo de piña a base de almidón de maíz. La harina de residuo de piña (RP) se obtuvo mediante un proceso de secado a 65 °C/8 h. Las harinas fueron caracterizadas por un análisis químico, pH y color (L^* , a^* , b^* , C^* , h° y ΔE). El proceso de extrusión se realizó en un extrusor de tornillo simple, con una relación de compresión 3:1 con un dado de salida de 4 mm. Se utilizó un diseño de experimentos central compuesto con cuatro variables independientes: temperaturas de extrusión (TE) (120 - 180 °C), contenido de humedad (CH) (18 - 25 g/100 g), proporción de suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) (0 – 59.5 g/100 g) y concentración de RP (0 - 30 g/100 g). Como variables de respuesta se tuvieron la energía mecánica específica (EME), torque, tiempo de residencia (TR), índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), textura (Tex), Índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), color (L^* , a^* , b^* y ΔE), contenido de proteína (CP), contenido de fibra (CF) y la aceptación general (AG). Se realizó la optimización numérica utilizando los valores experimentales buscando el mínimo de EME, máximo IE, menor DA, mínimo textura, mayor contenido de fibra y proteína, así como aceptación general para optimización del proceso obteniendo el mejor tratamiento. Los resultados del análisis químico de las harinas del SLDD, RP y almidón de maíz (AM) fueron: lípidos 0.62, 0.76 y 1.35 (g/100 g), ceniza 9.38, 3.55 y 0.49 (g/100 g), carbohidratos 79.44, 63.09 y 98.93 (g/100 g) respectivamente. En

proteína para SLDD 9.35 y RP 10.42 (g/100 g), fibra cruda para RP = 22.66 (g/100 g). El SLDD presentó mayor $L^* = 88.89$ y posteriormente el AM = 86.54 y el de menor L^* fue el RP = 64.45. En los treinta tratamientos se obtuvieron intervalos en los valores de las siguientes respuestas : TR = 12.50 a 45.70 g/min, torque = 2.97 a 10 N/m, presión = 4.37 a 201.56 N/m², EME = 13.51 - 591.13 J/g, IE = 0.73 -166, DA =1.60 – 15.05 Kg/m³, Tex = 25.22 – 115.97 N, IAA = 2.18 a 5.37 g/g, ISA = 14.92 a 40.68 , pH=5.29 a 6.24, $L^* = 54.91$ a 82.92, CP = 1.87 a 6.61%, CF = 1.28 a 5.15% y AG = 3.32 a 5.86. Los coeficientes de regresión lineal múltiple de los parámetros de los productos muestran que el contenido de humedad presentó efecto significativo ($p < 0.05$) positivo y el SLDD/AM efecto significativo ($p < 0.05$) negativo sobre el IAA, la disminución del SLDD/AM y el aumento del CH genera mayor IAA y aumenta C^* , por otro lado, el contenido de RP presentó efecto significativo ($p < 0.05$) positivo sobre AG, CF, ΔE , b^* , L^* , pH, ISA y TR. El contenido de SLDD/AM mostró efecto significativo ($p < 0.05$) positivo para el TR, Tex, ISA y el CP tuvo efecto significativo ($p < 0.05$) negativo IE, IAA, DA. Sin embargo, la TE presentó efecto significativo ($p < 0.05$) positivo para el IE, TR tuvo efecto significativo ($p < 0.05$) negativo para la EME y CP. Se obtuvo la optimización numérica del producto con parámetros óptimos a CH = 22.95 g/100 g, TE = 165 °C, SLDD/AM = 48.86 g/100 g, RP = 22.5 g/100 para obtener un EME = 74.95 J/g, IE = 1.48 y AG = 4.25. Se demostró que se puede tener una botana extrudida aceptable por el consumidor ricos en proteína y fibra con una incorporación de SLDD y RP de 48.86 y 22.5 g/100 g, respectivamente sin afectar las propiedades fisicoquímicas.

ABSTRACT

Rivera-Mirón, M. I., Technological National of Mexico campus Tuxtepec. April, 2019. "Development of an extruded snack with a mixture of dehydrated whey and pineapple residues based on corn starch". Director: Dr. Jesús Rodríguez Miranda, Co-director: Dr. Juan Gabriel Torruco Uco.

Extrusion is widely used in the food industry, due to the ability to design continuous cooking processes in a short time and has the potential to produce a wide variety of products, including snacks. The objective of this research was the development and characterization of a snack extruded with mixture of whey dehydrated sweet milk and pineapple residue based on corn starch. The pineapple residue flour (RP) was obtained by a drying process at 65 °C/8 h. The flours were characterized by a chemical analysis, pH and color (L^* , a^* , b^* , C^* , h° and ΔE). The extrusion process was carried out in a single screw extruder, with a 3:1 compression ratio with a 4 mm die. A central composite experiment design was used with four independent variables: extrusion temperatures (TE) (120 - 180 °C), moisture content (CH) (18 - 25 g/100 g), proportion of dehydrated sweet whey/corn starch (SLDD/AM) (0 - 59.5 g/100 g) and RP concentration (0 - 30 g/100 g). The specific mechanical energy (EME), torque, residence time (TR), expansion index (IE), apparent density (DA), texture (Tex), water absorption index (IAA), were taken as response variables. water solubility index (ISA), color (L^* , a^* , b^* and ΔE), protein content (CP), fiber content (CF) and general acceptance (AG). The numerical optimization was performed using the experimental values looking for the minimum of EME, maximum IE, lower DA, minimum texture, higher fiber and protein content, as well as general acceptance for process optimization obtaining the best treatment. The results of the chemical analysis of SLDD, RP and corn starch (AM) flours were: lipids 0.62, 0.76 and 1.35 (g/100 g), ash 9.38, 3.55 and 0.49 (g/100 g), carbohydrates 79.44, 63.09 and 98.93 (g/100 g) respectively. In protein for SLDD 9.35 and RP 10.42 (g/100 g), crude fiber for RP = 22.66 (g/100 g). The SLDD presented higher L^* = 88.89 and later the AM = 86.54 and the lower L^* was the RP = 64.45. In the thirty treatments, intervals were obtained in the values of the following responses: TR = 12.50 to 45.70 g/min, torque = 2.97 to 10 N/m, pressure = 4.37 to 201.56 N/m², EME = 13.51 - 591.13 J/g, IE = 0.73 -166, DA = 1.60 - 15.05 Kg/m³, Tex = 25.22 - 115.97 N, IAA = 2.18 to 5.37 g/g, ISA = 14.92 to 40.68, pH = 5.29 to 6.24, L^* = 54.91 to 82.92, CP = 1.87 to 6.61%, CF = 1.28 to 5.15% and AG = 3.32 to 5.86. The multiple linear regression coefficients of the parameters of the products show that the moisture content presented a significant effect ($p < 0.05$) positive and the SLDD/AM significant effect ($p < 0.05$) negative on the IAA, the decrease of the SLDD/AM and the increase of CH generates higher IAA and increases C^* , on the other hand, the content of RP presented significant effect ($p < 0.05$) positive on AG, CF, ΔE , b^* , L^* , pH, ISA and

TR. The content of SLDD/AM showed a significant effect ($p < 0.05$) positive for TR, Tex, ISA and CP had significant effect ($p < 0.05$) negative IE, IAA, DA. However, TE presented significant effect ($p < 0.05$) positive for IE, TR had significant effect ($p < 0.05$) negative for EME and CP. The numerical optimization of the product was obtained with optimal parameters at CH = 22.95 g/100 g, TE = 165 °C, SLDD / AM = 48.86 g/100 g, RP = 22.5 g/100 to obtain an EME = 74.95 J/g, IE = 1.48 and AG = 4.25. It was demonstrated that we can have an extruded snack acceptable by the consumer rich in protein and fiber with an incorporation of SLDD and RP of 48.86 and 22.5 g/100 g, respectively without affecting the physicochemical properties.

CONTENIDO

DEDICATORIAS.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	V
LISTA DE TABLAS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 BOTANAS.....	3
2.1.2 <i>Tipos de botanas.....</i>	4
2.1.3 <i>Valor nutricional y enriquecimiento de botanas.....</i>	4
2.1.4 <i>Fuentes de almidones utilizados en extrusión.....</i>	5
2.2 MAÍZ (ZEA MAYS L.).....	5
2.2.1 <i>Descripción botánica.....</i>	6
2.2.2 <i>Composición química del maíz.....</i>	7
2.2.3 <i>Producción mundial, nacional y estatal.....</i>	7
2.2.4 <i>Utilización del maíz en la industria alimentaria.....</i>	8
2.2.5 <i>Almidón de maíz.....</i>	8
2.2.6 <i>Utilización del almidón en la industria alimentaria y botanas.....</i>	10
2.2.7 <i>Elaboración de botanas con almidón.....</i>	10
2.2.8 <i>Gelatinización del almidón.....</i>	11
2.3 PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	11
2.3.1 <i>Alimentos procesados por extrusión.....</i>	12
2.3.2 <i>Tipos de tornillos utilizados en la extrusión de alimentos.....</i>	12
2.3.3 <i>Cocción por extrusión.....</i>	14
2.3.4 <i>Parámetros que afectan el proceso de extrusión.....</i>	15
2.3.5 <i>Parámetros del proceso de extrusión.....</i>	18
2.3.6 <i>Beneficios del proceso de extrusión.....</i>	20
2.3.7 <i>Efectos del proceso de extrusión sobre el valor nutricional de las proteínas.....</i>	21
2.3.8 <i>Efectos del proceso de extrusión sobre la fibra dietaria.....</i>	22
2.4 RESIDUO AGROINDUSTRIAL.....	22
2.4.1 <i>Residuos o subproducto vegetales.....</i>	23
2.4.2 <i>Impacto ambiental negativo.....</i>	24
2.4.3 <i>Utilización de compuestos bioactivos de residuos.....</i>	25
2.4.4 <i>Residuos generados en México y en el distrito de Tuxtepec, Oaxaca.....</i>	27
2.5 PIÑA (ANANAS COMOSUS L.).....	28
2.5.1 <i>Morfología.....</i>	29
2.5.2 <i>Taxonomía.....</i>	31
2.5.3 <i>Producción mundial, nacional y estatal.....</i>	31
2.5.4 <i>Subproducto o residuo de piña.....</i>	33
2.5.5 <i>Beneficios de la fibra.....</i>	33

2.5.6	<i>Utilización en la industria alimentaria.</i>	34
2.6	SUERO DE LECHE.....	35
2.6.1	<i>Tipos de suero.</i>	35
2.6.2	<i>Composición química y valor nutricional.</i>	36
2.6.3	<i>Suero de leche deshidratado</i>	37
2.6.4	<i>Composición química y valor nutricional del suero deshidratado.</i>	39
2.6.5	<i>Beneficios del suero deshidratado</i>	40
2.6.6	<i>Usos en la industria alimentaria.</i>	40
2.7	PROPIEDADES FUNCIONALES.....	41
2.7.1	<i>Capacidad de absorción de agua.</i>	41
2.7.2	<i>Índice de solubilidad en agua</i>	42
2.7.3	<i>Densidad aparente</i>	42
2.7.4	<i>Cambio de color.</i>	43
2.8	PRUEBA DE ACEPTABILIDAD.....	43
2.9	OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA.....	44
3	ANTECEDENTES	45
4	JUSTIFICACIÓN	47
5	OBJETIVOS	48
5.1	OBJETIVO GENERAL.....	48
5.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	48
6	MATERIALES Y MÉTODOS	49
6.1	MATERIAS PRIMAS.....	49
6.2	ACONDICIONAMIENTO DEL RESIDUO AGROINDUSTRIAL DE PIÑA.....	49
6.3	PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS.....	49
6.4	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS HARINAS Y PRODUCTOS EXTRUDIDOS.....	50
6.4.1	<i>pH</i>	50
6.4.2	<i>Color.</i>	50
6.4.3	<i>Análisis químico proximal (AQP).</i>	51
6.5	CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	51
6.5.1	<i>Variables del proceso de extrusión.</i>	52
6.6	CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS.....	53
6.6.1	<i>Índice de expansión (IE)</i>	53
6.6.2	<i>Densidad aparente (DA).</i>	53
6.6.3	<i>Macroestructura.</i>	53
6.6.4	<i>Análisis de textura (Dureza)</i>	54
6.6.5	<i>Índice de absorción de agua e índice de solubilidad de agua</i>	55
6.7	PRUEBA DE ACEPTACIÓN.....	55
6.8	DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	56
6.9	OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA DE LOS EXTRUDIDOS OBTENIDOS.....	57
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
7.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	58
7.1.1	<i>Rendimiento de la cáscara de piña</i>	58
7.1.2	<i>Composición química de las materias primas</i>	58
7.1.3	<i>pH y color de harina de residuo de piña (RP), suero de leche dulce deshidratado (SLDD) y almidón de maíz (AM)</i>	62

7.2	. EFECTO DE LA TEMPERATURA, CONTENIDO DE HUMEDAD, SLDD /AM Y RP SOBRE EL PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	65
7.2.1.	<i>Tiempo de residencia (TR)</i>	65
7.2.2.	<i>Torque (N/m)</i>	69
7.2.3.	<i>Presión (N/m²)</i>	70
7.2.4.	<i>Energía mecánica específica (EME)</i>	72
7.3	. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS DE RESIDUO DE PIÑA Y SUERO DE LECHE DULCE DESHIDRATADO A BASE DE ALMIDÓN DE MAÍZ.	74
7.3.1.	MACROESTRUCTURAS.	74
7.3.2.	<i>Índice de expansión (IE)</i>	76
7.3.3.	<i>Densidad aparente (DA)</i>	80
7.3.4.	<i>Textura (N)</i>	82
7.3.5.	<i>índice de absorción de agua (IAA)</i>	85
7.3.6.	<i>Índice de solubilidad de agua (ISA)</i>	87
7.3.7.	<i>Potencial de hidrógeno (pH)</i>	89
7.4.	EFECTO DE LA TEMPERATURA DE EXTRUSIÓN, CONTENIDO DE HUMEDAD, SLDD/AM Y RP SOBRE EL DE COLOR DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS	90
7.4.1.	<i>Luminosidad (L*)</i>	92
7.4.2.	<i>Parámetro a*</i>	95
7.4.3.	<i>Parámetro b*</i>	96
7.4.4.	<i>Chromaticidad (C*)</i>	98
7.4.5.	<i>Ángulo hue (h°)</i>	99
7.4.6.	<i>Diferencia total del color (ΔE)</i>	101
7.5	EFECTO DE LAS VARIABLES DE PROCESO (TEMPERATURA DE EXTRUSIÓN, CONCENTRACIÓN DE HARINA DE RESIDUO DE PIÑA Y SUERO DE LECHE DULCE DESHIDRATADO) SOBRE LA ACEPTACIÓN GENERAL Y COMPOSICIÓN DE PROTEÍNA Y FIBRA.	102
6.5.1.	<i>Contenido de proteína (CP)</i>	104
7.5.2.	<i>Contenido de fibra (CF)</i>	106
7.5.3.	<i>Aceptación general (AG)</i>	107
7.6.	OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA	109
8	CONCLUSIONES	111
9	REFERENCIAS	113

LISTA DE TABLAS

No.	Descripción	pág.
1	Clasificación de botanas según su proceso de producción.	4
2	Composición química de la piña.	29
3	Clasificación taxonómica de la <i>Ananas comosus</i> L.	31
4	Composición química del suero de leche.	37
5	Contenidos en vitaminas del suero de leche.	37
6	Composición química (%) de las diferentes presentaciones del suero deshidratado.	38
7	Porcentaje de las proteínas típicas del suero de leche.	39
8	Niveles codificados de las variables del proceso de extrusión.	57
9	Composición química (base seca) del residuo de piña (RP), almidón de maíz (AM) y el suero de leche dulce deshidratado (SLDD).	58
10	Parámetros de Color y pH del residuo de piña (RP), almidón de maíz (AM) y el suero de leche dulce deshidratado (SLDD).	63
11	Parámetros del proceso de extrusión de los productos extrudido.	67
12	Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple del proceso de extrusión de productos extrudidos.	68
13	Parámetros de caracterización fisicoquímica de los productos extrudidos.	78
14	Coeficiente estimado por regresión lineal múltiple en la caracterización fisicoquímicas de los extrudidos obtenidos.	80
15	Parámetros de color de los productos extrudidos.	90
16	Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple de los parámetros de color de los productos extrudidos.	92
17	Contenido de proteína y fibra, así como la aceptación general de productos extrudidos.	102

18	Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple de la aceptación general y contenido de proteína y fibras en productos extrudidos.	104
19	Optimización numérica de los productos extrudidos.	110

LISTA DE FIGURAS

No.	Descripción	Pág.
1	Partes de la planta de maíz y mazorca de maíz (<i>Zea mays</i> L.).	6
2	Grano de maíz (<i>Zea mays</i> L.).	7
3	Gránulos de almidón de maíz.	9
4	Estructuras del almidón.	9
5	Representación esquemática de un extrusor incluyendo sus partes principales y zonas.	13
6	Crecimiento de burbuja en la fusión a la salida del dado .	13
7	Componentes de un extrusor simple.	14
8	Inflorescencia y partes del fruto compuesto (piña de la variedad Cayena lisa).	30
9	Estructura morfológica de la planta de la piña.	30
10	Fruto de piña (<i>Ananas comosus</i> L) de la variedad cayena lisa.	32
11	Fruto de piña (<i>Ananas comosus</i> L) de la variedad miel (MD2).	32
12	Estructura molecular de la amilopectina y de amarillo los grupos hidroxilos.	42
13	Fotografía del extrusor de tornillo simple.	51
14	Fotografía del texturómetro y la cuchilla Warner-Bratzler.	54
15	Tiempo de residencia (TR) durante el proceso de extrusión con el efecto del a) Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE), b) Residuo de piña (RP) y temperatura de extrusión (TE).	66
16	Efecto del contenido de humedad (CH) y el suero de leche dulce deshidratado/ almidón de maíz (SLDD/AM) sobre el torque en el proceso de extrusión.	70

17	Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/ AM) y contenido de humedad (CH) sobre la presión durante el proceso de extrusión.	71
18	Energía mecánica específica (EME) utilizada durante el proceso de extrusión con el efecto del a) Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE), b) Residuo de piña (RP) y temperatura de extrusión (TE).	73
19	Se observa los treinta tratamientos obtenidos en el proceso de extrusión.	75
20	Macroestructura de extrudidos en cortes transversal y tangencial.	75
21	Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE) sobre el índice de expansión (IE).	78
22	Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE) sobre la densidad aparente (DA)	82
23	Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE) sobre la textura (Tex).	84
24	Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y el contenido de humedad sobre índice absorción de agua (IAA).	86
25	Efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) sobre índice solubilidad de agua (ISA).	88
26	Efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/almidón maíz (SLDD/AM) sobre pH.	90

27	Efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) sobre luminosidad (L^*).	94
28	Efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) sobre enrojecimiento (a^*).	96
29	El efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) sobre el parámetro b^*	98
30	El efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y contenido de humedad (CH) sobre C^* .	99
31	El efecto del contenido de humedad (CH) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el h°	100
32	El efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratada/almidón de maíz (SLDD/AM) sobre ΔE .	102
33	Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE).	
34	Efecto del residuo de piña (RP) y de la temperatura de extrusión (TE) sobre el contenido de fibra (CF).	107
35	Gráficos de superficie de respuesta para la aceptación general de los productos extrudidos obtenidos con efectos de las variables independientes a) Residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM), b) Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y contenido humedad (CH). c) Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión.	109

1 INTRODUCCIÓN

Las botanas son bocadillos prácticos y rápidos para su consumo, donde el principal constituyente de los aperitivos extrudidos es el almidón y es responsables de la mayoría de sus atributos estructurales y sensoriales. Por otra parte, estos bocadillos son densos en energía y son nutricionalmente pobres (Dehghan-Shoar et al., 2010) sin embargo su elevado consumo puede causar obesidad, enfermedades cardiovasculares y diabetes tipos 2 (Yang et al., 2019). Debido a ello la industria alimentaria busca nuevas fuentes para incrementar el contenido nutrimental de las botanas que carecen de proteínas, fibra, vitaminas y minerales (Valenzuela-Lagarda et al., 2017), así como también la utilización de tecnologías que tengan el potencial para desarrollar nuevos productos, como es el proceso de extrusión. La extrusión de alimentos es un proceso por el cual el material es forzado a fluir bajo diferentes condiciones de calor y corte a través de una determinada abertura con diseño específico para formar o expandir la mezcla de los ingredientes. La extrusión puede ser considerada un reactor continuo de altas temperaturas a corto tiempo, que permite el desarrollo y transformación de una gran variedad de productos (Kowalski et al., 2018; Llopart et al., 2014) como pueden ser los ingredientes no convencionales como el residuo de piña (*Ananas comosus* L). El residuo o subproducto que es originado por la extracción de jugo o pulpa de las frutas, constituye el 20 al 25% del peso del fruto fresco (Selani et al., 2014), donde el 76% de fibra dietaria del residuo de piña se obtiene de la cáscara y corazón del fruto, de la cual el 99.2% es fracción insoluble y el 0.8% es la fracción soluble por lo que se busca una alternativa de utilización (Martínez et al., 2012). Otro subproducto es el suero de leche el cual es obtenido de la elaboración de queso, sin embargo, es considerado como altamente contaminante por lo que, en la actualidad es utilizado como fuente de compuestos bioactivos el cual está relacionado con la prevención de enfermedades del sistema cardiovascular, sistema nervioso, sistema gastrointestinal, entre otros beneficios (Madureira et al., 2010; Hernández-Rojas y Vélez-Ruiz, 2014), por lo que, son una alternativa para el enriquecimiento de botanas extrudidas. El residuo de piña (RP) y el suero de leche dulce deshidratado

(SLDD) son ricos en fibra y proteína, respectivamente y estos pueden incrementar el contenido nutrimental de las botanas, así como darles valor agregado a estos materiales, además de ser materias primas económicas lo que conllevaría a la disminución del impacto ambiental en la región de Tuxtepec.

Por lo que, el objetivo de esta investigación fue el desarrollo y caracterización de una botana extrudida con mezcla de suero de leche dulce deshidratado y residuo de piña a base de almidón de maíz. Que puedan ofrecer una alternativa de botanas nutritivas que aporte proteína y fibra a nuestra dieta diaria, brindando confort y satisfacción al igual que las botanas convencionales, pero aumentando el contenido nutricional, mayor índice de expansión, menor dureza y menor energía mecánica específica, ya que son características importantes que se buscan en una botana lista para comer.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Botanas.

Según la Norma Mexicana NOM-187-SSA1/SCFI-2002 las botanas son los productos de pastas de harinas de cereal, leguminosa, tubérculos o féculas; así como de granos, frutas, frutos, semillas o leguminosas con o sin cáscara o cutícula, tubérculos; productos nixtamalizados y piel de cerdo que pueden estar fritos, horneados, explotados, cubiertos, extrudidos o tostados, adicionados o no con sal y otros ingredientes opcionales y aditivos para alimentos. De acuerdo a Holban y Grumezescu (2018) definen a las “botanas” o su sinónimo en inglés “snack” como un producto que se consume con ciertas bebidas o antes de una comida completa. Las botanas se pueden clasificar de acuerdo a su fabricación, tipo de materia prima utilizadas, sabor y calidad. El consumo de botanas ha ido incrementando, a nivel mundial se espera ventas de botanas que superen los 630 mil millones de dólares en el 2020. Los mexicanos en el 2012 consumieron 1.6 botanas por día, que contribuyen con 343 kcal, aproximadamente el 17% de energía total. Por lo que, la industria alimentaria busca botanas con mejores cualidades nutritivas debido a que la mayoría de las botanas se producen principalmente de maíz y trigo los cuales son deficientes a nivel nutricional debido a la falta de proteínas, vitaminas, minerales y fibra por otro lado, se ven afectados por la adición de azúcar, grasa saturadas, sal y aderezos (Hess et al., 2018). Existen diversas investigaciones sobre el impacto a la salud por el alto consumo de botanas se ha demostrado que afecta el sistema cardiovascular, sobrepeso y obesidad. Debido a esto se busca botanas que cumpla con los requisitos saludables las cuales deben poseer un equilibrio en su contenido nutricional (Holban y Grumezescu, 2018; Matte et al., 2018).

2.1.2 Tipos de botanas.

Como se mencionó anteriormente las botanas se pueden clasificar por las materias primas o proceso de elaboración, a continuación, se muestra en la Tabla 1 la clasificación de acuerdo a Holban y Grumezescu (2018).

Tabla 1. Clasificación de botanas según su proceso de producción.

Proceso	Botanas
Fritos	Patatas, plátanos, zanahorias, chicharrones y buñuelos de harina derivados de la papa.
Extrudidos	Extrudidos compuestos, gránulos de harina, maíz extrudido (por ejemplo, palitos de maíz y chips de maíz) y pinzas.
Troquelado	Botanas de tortillas.
Saburral	Cacahuets y palomitas de maíz.
Explotados	Palomitas de maíz.
Tostados	Cacahuets, almendras, frijoles, semillas, semillas de girasol, semillas de calabaza y garbanzos.
Horneado	Pretzels, muffins y galletas.
Materia prima	
Vegetales	Las verduras enumeradas arriba.
Animales	Insectos, camarones, vieiras y carne.
Sabor y calidad nutricional	
Salado	Cacahuates, papas fritas y pretzels.
Dulce	Galletas y pasteles.
Nutritivos	Frutas, vegetales, alimentos bajos en calorías y alimentos bajos en grasa.

Fuente: Holban y Grumezescu (2018).

2.1.3 Valor nutricional y enriquecimiento de botanas.

Las botanas no son saludables debido a que carecen de nutrientes necesarios para los seres humanos por ejemplo proteína, fibra y vitaminas, por lo que se busca producir un refrigerio saludable incorporando ingredientes naturales como frutas y

verduras para aumentar la cantidad de fibra y micronutrientes en el producto. Por lo que, se ha buscado aumentar el valor nutricional mediante el enriquecimiento de diversas materias primas como la incorporación de aislados de soja, guisantes, arroz y leche (caseína y lactoalbúminas) esto es posible debido a la versatilidad del equipo de extrusión que es capaz de permitir incorporar una amplia gama de ingredientes para la producción de las botanas con beneficios hacia la salud (Holban y Grumezescu, 2018; Hess et al., 2018; Makowska et al., 2018).

2.1.4 Fuentes de almidones utilizados en extrusión.

Almidón de tubérculos (papa), leguminosas (frijol carioca, *Phaseolus vulgaris*, L. de la familia Fabaceae) son ricos en proteínas y minerales, así como cereales (arroz, maíz, trigo) (Rodríguez-Miranda et al., 2011; Da Silva et al., 2014; Navarro-Cortez et al., 2016).

2.2 Maíz (*Zea mays* L.).

El maíz (*Zea mays* L.) es la planta más domesticada y evolucionada del reino vegetal, el género *Zea* están conformado por cuatro especies dentro de las cuales *mays* L. es la más importante comercialmente, el género *Zea* es nativa de México y Centroamérica. Existen varias especies de maíz de color blanco, amarillo, rojo, morado, café y azul. Estos maíces pigmentados están en las 41 razas de maíz descritas en México, y sus colores negros, morados y rojos se deben a las antocianinas, compuestos presentes en el pericarpio y en la capa de aleurona o en ambas estructuras del grano. Los carbohidratos son los componentes principales de los cereales y representan 50 a 70% del peso seco del grano; de éstos, el almidón y otros polisacáridos (fibra dietética) son los principales constituyentes. Aproximadamente 86 a 89% del endospermo del maíz es almidón (Agama-Acevedo et al., 2005; Rouf et al., 2016).

2.2.1 Descripción botánica.

La planta del maíz (Figura 1) es de porte robusto con tallo simple, erecto; puede alcanzar 4 m de altura, no tiene ramificación ni entrenudos, pero si una médula espinosa. Presenta inflorescencia masculina y femenina separada dentro de la misma planta; la primera tiene una panícula (conocida como espigón o penacho) de coloración amarilla que posee una cantidad muy elevada de polen, en el orden de 20 a 25 millones de granos; en cada florecilla que compone la panícula se presenta tres estambres donde se desarrolla el polen. La inflorescencia femenina tiene un contenido menor en granos de polen (alrededor de 800 o 1000 granos) que se forman en sus estructuras vegetativas denominadas espádices, las cuales se disponen de forma lateral (SAGARPA, 2017; SIAP 2016).

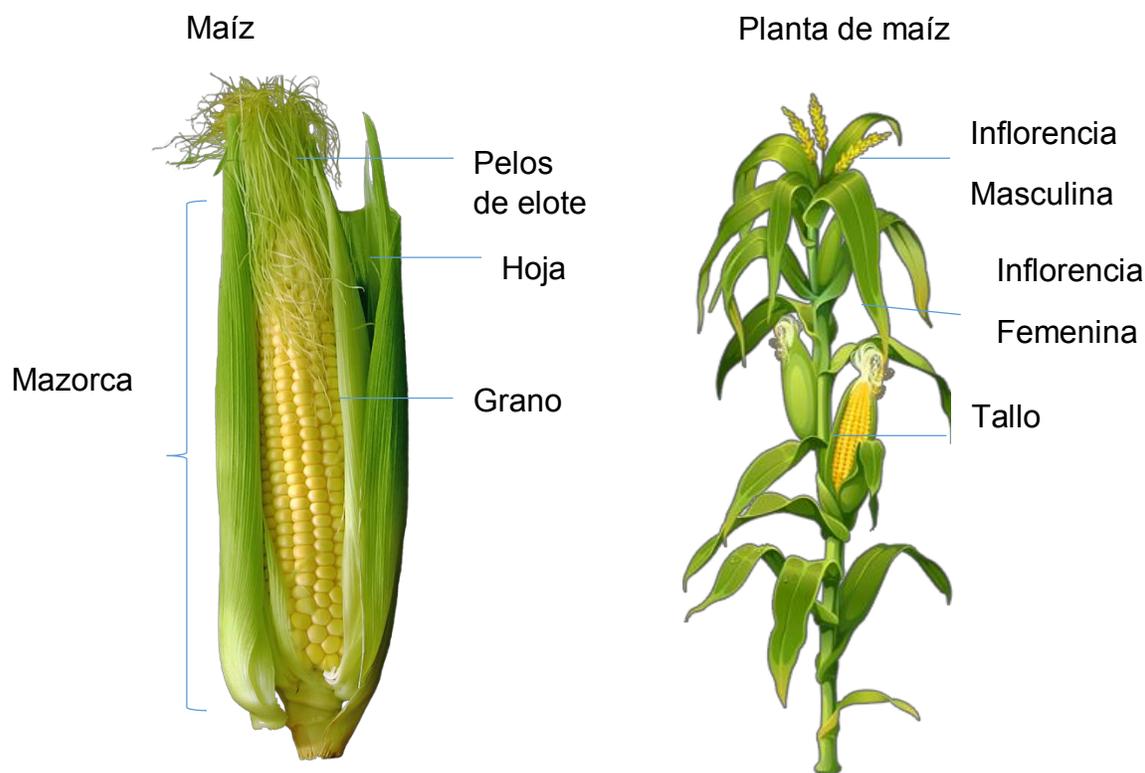


Figura 1. Partes de la planta de maíz y mazorca de maíz (*Zea mays* L.) (SAGARPA, 2017).

2.2.2 Composición química del maíz.

El maíz se encuentra en forma de mazorca; el grano es una cariósida de forma aplastada. Su alto contenido en carbohidratos y proteínas lo hacen el cereal ideal para todos los días (SAGARPA, 2016).

El grano de maíz tradicional está compuesto por un 70 a 75% de almidón, 8 a 10% de proteína y 4 a 5% de aceite, contenidos en tres estructuras: el germen (embrión), el endospermo y el pericarpio (Figura 2). El germen constituye el 10 al 12% del peso seco y contiene el 83% de los lípidos y el 26% de la proteína del grano. El endospermo constituye el 80% del peso seco y contiene el 98% del almidón y el 74% de las proteínas del grano. El pericarpio constituye el 5 al 6% del peso seco e incluye todos los tejidos de cobertura exterior, con un 100% de fibras vegetales (Alvares, 2006).

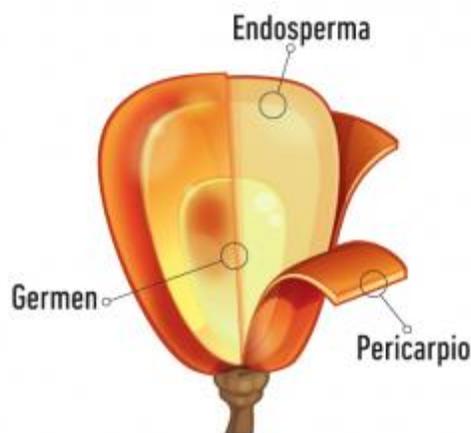


Figura 2. Grano de maíz (*Zea mays* L.) (Alvares, 2006).

2.2.3 Producción mundial, nacional y estatal.

La producción del grano de maíz es dividido en blanco y amarillo. El maíz blanco representa 86.94% de la producción y se destina principalmente al consumo humano. Esa producción satisface al total del consumo nacional. El maíz amarillo se destina a la industria o a la fabricación de alimentos balanceados para producción

pecuaria. Esta producción satisface solo 24% de los requerimientos nacionales. El maíz es el cultivo más representativo de México por su importancia económica, social y cultural, con un consumo promedio per cápita al año de 196.4% de maíz blanco, especialmente en tortillas representa 20.9% del gasto total en alimentos, bebidas y tabaco realizado por las familias mexicanas (SAGARPA, 2016). La producción de maíz en el 2016 a nivel mundial fue de 129,194.4967 ton y en México se obtuvo 28,250 ton, así como en el estado de Oaxaca 722,496.80 ton (SIAP, 2016; FAOSTAT, 2017). La piña en el distrito de Tuxtepec es el segundo cultivo después de la caña de azúcar con una mayor producción de toneladas en el 2018 según SIAP, 2018 se produjeron 103,862 ton.

2.2.4 Utilización del maíz en la industria alimentaria.

Se utiliza para la elaboración de jarabes (fructosa y maltodextrinas) y almidón; este último tiene aportes energéticos importantes para los seres humanos y es un proveedor de materias primas para la industria alimenticia, tanto humanas como pecuarias. El maíz blanco es utilizado especialmente en la elaboración de totillas en México (SAGARPA, 2016) es considerado como un alimento de primera necesidad para el 94% de la población principalmente para zonas rurales, también puede consumirse como elote, tamales, bebidas fermentadas (Gonzalez-Cortes et al., 2016); el germen de maíz es utilizado para la producción de aceites, aderezos, salsas, mayonesas, margarinas y farmacéutico (Alvares, 2006).

2.2.5 Almidón de maíz.

El almidón un polímero semicristalino, está compuesto de dos polisacáridos: amilosa 20.59 – 32.86% y amilopectina 67.14 – 79.41%. (Agama-Acevedo et al., 2012 y 2013; Jiménez-Hernández et al., 2007; Robutti et al., 2002; Soykeabkaew et al., 2015). La Amilosa, una cadena principalmente lineal, típicamente consta de hasta 3,000 moléculas D-glucosa interconectadas principalmente por enlaces glucosídicos α -1,4 y contiene algunas redes ramificadas. La amilopectina es un gran polímero ramificado con enlaces de α -1,4 que sirven como la columna vertebral y α -1,6 puentes en los puntos de ramificación (Figura 4). Cuando el almidón es

calentado en presencia de suficiente agua, se pierde la cristalinidad y la organización se descompone para formar regiones amorfas, este trastorno molecular se llama gelatinización (Beninca et al., 2008; Soykeabkaew et al., 2015).

Los gránulos de almidón (Figura 3), se presentan en todas las formas y tamaños (esferas, elipsoides, polígonos, plaquetas, túbulos irregulares); sus dimensiones normalmente oscilan entre 2 -100 μm , dependiendo de la fuente botánica y tipo. (Beninca *et al.*, 2008). El almidón es el principal constituyente del maíz (*Zea mays* L.) y las propiedades físico, químicas y funcionales de este polisacárido están estrechamente relacionadas con su estructura

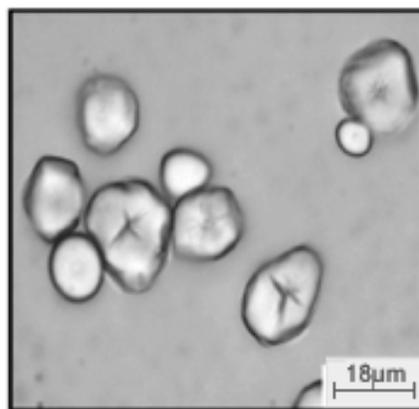


Figura 3. Gránulos de almidón de maíz (Beninca *et al.*, 2008).

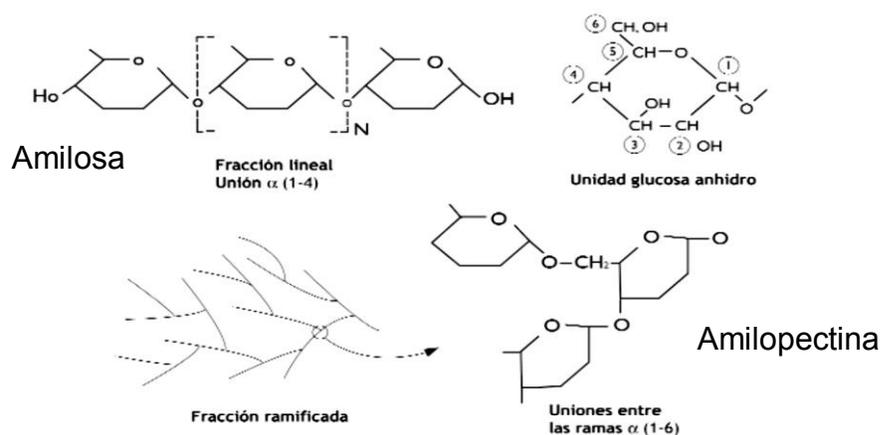


Figura 4. Componentes del almidón (Alvares, 2006).

2.2.6 Utilización del almidón en la industria alimentaria y botanas.

El almidón de maíz es un ingrediente valioso para la industria alimentaria, que se usa ampliamente como espesante, agente gelificante, agente de carga y agente de retención de agua (Berrinca et al., 2008). El Jarabe de glucosa: es un jarabe obtenido por hidrólisis incompleta ácida o enzimática del almidón de maíz, Se lo utiliza principalmente en la fabricación de caramelos, chicles, dulce de leche, jarabes medicinales, etc. En general es usado como un inhibidor de la cristalización. Dextrosa: se obtiene por despolimerización completa del almidón y posterior refinamiento y cristalización. Es un polvo blanco o cristalizado soluble en agua. Se la utiliza en toda la industria alimenticia como fuente de carbohidratos de alta pureza y como vehículo para sabores y colores. Se emplea en productos cárnicos, mermeladas, conservas, fermentación, helados y también en la industria farmacéutica (Alvares, 2006). Debido a las propiedades fisicoquímicas, funcionales y nutricionales que da al producto el almidón es utilizado en la elaboración de botanas, cereales para desayunos y postres (Agama-Acevedo et al., 2005).

2.2.7 Elaboración de botanas con almidón.

Para la elaboración de botanas se han utilizado diversas fuentes de almidón como son los tubérculos (por ejemplo almidón de papa) proporcionan una gran cantidad de almidón, pero un bajo valor nutritivo, otras nuevas alternativas son las leguminosas que pueden aumentar el contenido de proteína y minerales (Drago et al., 2007), tradicionalmente se conoce a cereales el almidón de trigo, arroz y maíz debido a sus buenas características de expansión sin embargo tienden a tener bajo contenido de proteínas y muchos otros nutrientes, por lo que el valor nutricional del almidón de maíz no satisface las necesidades de los consumidores conscientes de la salud (Rodríguez-Miranda et al., 2011; Da Silva et al., 2014; Iwe et al., 2001) debido a esto se busca otras alternativas para el enriquecimiento de compuestos bioactivos como puede ser de fibra o proteínas de productos extrudidos.

2.2.8 Gelatinización del almidón.

La gelatinización es un trastorno molecular, debido a que los gránulos de almidón se calientan conduce a la despolimerización, este fenómeno ocurre a diversas temperaturas, dependiendo del contenido de agua permite una temperatura de gelatinización más baja y el aumento de temperatura conduce a la gelatinización (Beninca et al., 2008; Iwe et al., 2001).

2.3 Proceso de extrusión.

La extrusión de alimentos es un proceso en el que un material se ve obligado a fluir en diferentes condiciones, calor y cizalladura, pasa a través de un determinado espacio, formar o expande y mezcla los ingredientes. Puede ser considerado como un reactor continuo en el que a temperatura alta-corto tiempo proceso se desarrolla y transforma una variedad de ingredientes a productos intermedios o terminados. (Gonzalez et al., 2002; Singh y Heldman, 2014).

La extrusión es una opción atractiva debido a su versatilidad (amplia gama de aplicaciones de productos alimenticios), alta productividad, bajo costo relativo, eficiencia energética además, los productos cocidos por extrusión tienden a ser nutricionalmente pobres ya que son muy densos en energía y bajos en ingredientes que promueven la salud. El proceso de extrusión en sí mismo promueve la despolimerización del almidón, lo que lleva a un aumento en la cantidad de carbohidratos fácilmente digeribles y dando como resultado un producto con alto índice glucémico. Debido a las características de estos productos, algunos estudios han evaluado la adición de subproductos de procesamiento de alimentos en alimentos extrudidos como fuente de fibra y compuestos bioactivos. Como son cáscara de naranja, semilla de uva y orujo de tomate una mezcla de flóculos de coliflor, cuajada, tallo y hojas; y residuo de zanahoria. La adición de estos subproductos promueve alteraciones en las características de los extrudidos, sin embargo, en estudios se observó buena aceptación sensorial. Dado que el procesamiento de piña produce una cantidad significativa de residuo o subproducto

rico en fibra y el uso de este subproducto en la extrusión sería una opción interesante como el enriquecimiento de fibra. Además, beneficiaría las operaciones de procesamiento de la piña haciéndolas económicamente más sostenibles (Selani et al., 2014; Navarro et al., 2016; Ačkar et al., 2018).

2.3.1 Alimentos procesados por extrusión.

Este proceso representa una de las tecnologías con mayor impacto en la industria alimentaria; tales como: bocadillos (salados y dulces), comida para bebés, sopas instantáneas, pan rallado y cobertura, proteína vegetal texturizada, confitería, pasta (fideos), bebidas en polvo, galletas, cereales para el desayuno (copos de maíz, inflado de arroz), bebidas instantáneas, análogos de carne, alimentos para mascotas, entre otros (González *et al.*, 2002; Navarro-Cortez *et al.*, 2016).

2.3.2 Tipos de tornillos utilizados en la extrusión de alimentos.

Los procesos de extrusión nacen en la industria de polímeros sintéticos, generando una gran cantidad de investigaciones e información, provocando con el paso de los años que se fueran descubriendo más posibilidades de aplicación de esta tecnología en los procesos de fabricación, siendo inevitable finalmente la transferencia tecnológica hacia la producción de alimentos. Dentro de las ventajas que se pueden destacar, y que han llevado al proceso de extrusión a crecer de forma importante dentro del área alimentaria estos últimos 20 años, se puede mencionar su gran versatilidad para la creación de nuevos productos, con un amplio rango de materias primas posibles de utilizar en el mismo equipamiento base, además de poseer una eficiencia energética alta y la casi nula producción de efluentes contaminantes (Shihani *et al.*, 2006).

Los extrusores se componen de cinco partes principales: (i) el sistema de pre-acondicionamiento; (ii) el sistema de alimentación; (iii) el tornillo o el gusano; (iv) el barril; (v) dado de salida y el mecanismo de corte. Pueden variar con respecto a configuración de tornillo, cilindro y matriz. La selección de cada uno de estos artículos dependerá de la materia prima utilizado y el producto final deseado. La figura 5 muestra la representación esquemática de un extrusor incluyendo sus

partes principales y zonas. La alimentación (derretimiento) es alimentado en un extremo de una estructura tubular que aloja el tornillo. Dentro de esta cámara se trabaja sobre el derretimiento para formar una masa semi-sólida, la cual es forzada a pasar a través de una abertura restringida (dado) en el extremo de descarga del tornillo. La mezcla sale se expande a medida que toca la atmósfera, esta expansión se debe a la burbuja crecimiento en la masa semi-sólida debido a la humedad que contiene. La expansión del producto es que los productos extrudidos se pueden consumir tal cual o después del procesamiento deseado. La figura 6 muestra la burbuja crecimiento en las fusiones en la salida del dado (Navale et al., 2015).

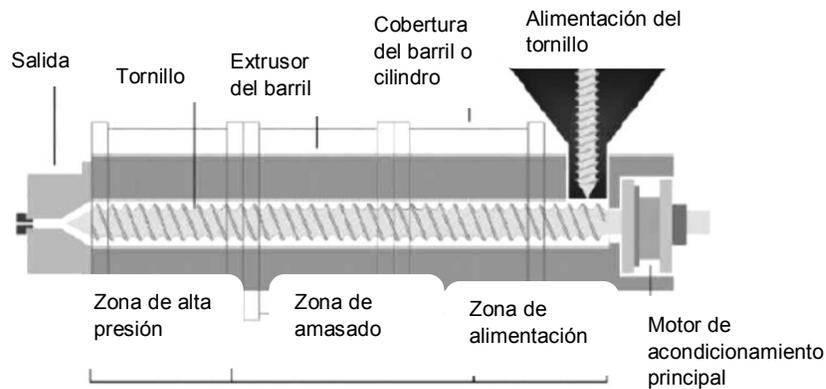


Figura 5. Representación esquemática de un extrusor incluyendo sus partes principales y zonas (Navale et al., 2015).

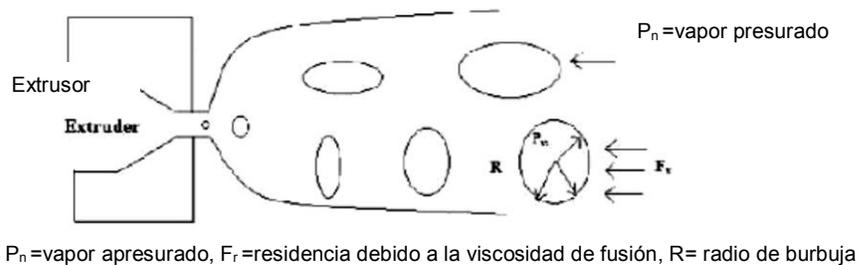


Figura 6. Crecimiento de burbuja en la fusión a la salida del dado (Navale et al., 2015).

2.3.3 Cocción por extrusión.

La cocción por extrusión es cuando la energía térmica se convierte en una parte del proceso de extrusión, el proceso se conoce como cocción por extrusión. Se puede agregar energía térmica al producto extrudido durante el proceso desde una fuente externa o puede ser generado por la fricción en las superficies internas de la extrusora en contacto con el extrudido como se ilustra en la Figura 7, la adición de la energía ocurre en la superficie del barril del sistema de extrusión. La energía térmica se puede transferir a través de las paredes y superficies del cilindro a los ingredientes usados para crear el producto extrudido. En adición, energía mecánica creada por fricción entre superficies e ingredientes dentro del barril se disipa como energía térmica en el producto extrudido. El proceso de "cocción" durante la extrusión es único desde la mayoría de los otros procesos térmicos. A medida que se introducen los ingredientes para formar el producto extrudido, están expuestos a presiones elevadas, así como a temperaturas. La geometría del cilindro de extrusión está diseñada para aumentar la presión en los ingredientes a medida que avanza el movimiento desde la entrada hasta la salida. La salida del cañón es el "dado", una apertura con mucho más pequeño área de sección transversal que la del cilindro (Singh y Heldman, 2014).



Figura 7. Componentes de un extrusor simple (Singh y Heldman, 2014).

Alam et al. (2015) menciona que existen tres tipos de extrusores que se utilizan en la industria alimentaria 1) extrusor de pistón, 2) extrusor de rodillo 3) extrusor de tornillo, dentro de extrusores de tornillo se pueden clasificar como extrusores de tornillo simple y doble.

Las extrusoras de tornillo simple son las más comunes extrusoras aplicadas en la industria alimentaria se usa con mayor frecuencia para cocinar continuamente por su fácil manejo y menor costo (es un proceso factible para producir fideos instantáneos no fritos y fideos de arroz (Cuj-Laines et al., 2018; Alam et al., 2015). La clasificación de extrusoras de tornillo simple se puede definir basado en los parámetros del proceso o del equipo como condicionamiento del contenido de humedad (seco o húmedo), sólido o tornillo segmentado, grado deseado de cizallamiento y calor. Desde un punto de vista práctico, la principal clasificación utilizada considera el grado de corte y la fuente de calor. La configuración del tornillo comprende que hay tornillos formados por una sola pieza o tornillos de múltiples piezas. Los extrusores de doble husillo están compuestos por dos ejes que giran dentro de un solo barril, generalmente el interno la superficie del cilindro de extrusoras de doble tornillo es lisa. Dependiendo de la posición de los tornillos y su dirección de rotación, cuatro tipos diferentes de las configuraciones son posibles: (i) co-rotación tornillos engranados; (ii) co-rotación sin enmarañamiento empulgueras; (iii) tornillos engranados contrarrotatorios; y (iv) tornillos que no engranan entre sí. Aunque los tornillos entrelazados dan como resultado un mayor tiempo de residencia del material en el extrusor, no entrelazado los tornillos causan mayores grados de corte, especialmente si rotan en direcciones opuestas. Sin embargo, el tipo de extrusora de doble husillo es poco utilizado en la industria alimentaria, a pesar de que presentan más propiedades de desplazamiento eficiente (Navale et al., 2015)

2.3.4 Parámetros que afectan el proceso de extrusión.

Podemos decir que la extrusión combina varias operaciones unitarias, mezclado, amasado, cocinado, formado, enfriado y/o cortado y la combinación de estas operaciones es posible gracias a la cantidad de variables tales como velocidad de alimentación, humedad, velocidad del tornillo, temperaturas y la configuración de la boquilla. Entonces para producir una variedad de productos se deberá tener en

cuenta el material de alimentación, las condiciones de extrusión y la configuración del tornillo, cañón y boquilla (González et al., 2002; Navale et al., 2015).

2.3.4.1 Temperatura.

La temperatura de extrusión en caliente varía de 99 a 200 °C, según el tipo de extrusor. Por lo tanto, los extrusores de menor capacidad de alimentación, tiene una relación directa con la temperatura del producto. Por otra parte, los extrusores de grandes capacidades pueden ser inversos, pues al calentar la pared, disminuye la viscosidad de la masa, el esfuerzo cortante y la capacidad de bombeo del tornillo, en tanto que la conducción de calor al interior de la masa es muy pequeña por la presencia de flujos laminares. La temperatura del barril tiene un efecto positivo en el grado de gelatinización del almidón y la expansión extrudida, mientras que tiene un efecto negativo en el color del producto, especialmente a temperatura elevada. La temperatura de la zona de alimentación debe ser bajo para evitar taponamientos y retroceso del material viaja por el tornillo (Huber, 2001; Navale et al., 2015).

2.3.4.2 Humedad.

El agua es un medio importante en la extrusión, es necesaria para la gelatinización del almidón y es el ingrediente dispersión. En la formación de un fluido viscoso, es transportado y cocinado. La humedad siempre figura como una variable separada además de los ingredientes de la alimentación porque a menudo se controla por separado en la extrusora. La humedad se puede agregar directamente a la alimentación, inyectada en el barril, o agregado en forma de vapor al pre-acondicionador o cilindro; también afectará la temperatura del material de alimentación (Navale et al., 2015).

2.3.4.3 Velocidad de tornillo.

La velocidad de avance del extrusor depende de los tipos de tornillo elemento, velocidad del tornillo, tipo de elemento de alimentación y humedad de alimentación

(Navale et al., 2015) la velocidad del tornillo es un factor principal en el proceso de extrusión, ya que afecta el tiempo de residencia del producto, la cantidad de calor generado por fricción, las velocidades de transmisión de calor y las fuerzas de cizalladura en el producto. El incremento en la velocidad del tornillo causa también un incremento en la relación de expansión para extrudidos (Coggino, 2008).

2.3.4.4 Presión.

En el proceso de extrusión las presiones altas generan pérdida de agua por vaporización, obteniendo un producto con baja actividad de agua, por lo tanto, más duradero. Por el contrario, si se trabaja con baja presión, el producto que sale del troquel será de alto contenido en humedad y alta densidad, sin embargo, precisará otros tratamientos como el secado (Huber, 2001).

2.3.4.5 Expansión.

La expansión de los extrudidos, es una propiedad fundamentalmente importante que describe la calidad del producto y directamente relacionada con el grado de cocción. Se han propuesto muchas teorías y modelos para describir la expansión de los extrudidos. Algunos investigadores usan regresiones empíricas a través de parámetros de operación del proceso y composiciones de materiales para explicar la expansión de los extrudidos han estudiado la cocción por extrusión de una mezcla maíz/soya y factores que afectan las características del producto expandido y la viscosidad de la dispersión de la harina. La extrusión de cocción de la mezcla de maíz/soya dio como resultado productos expandidos con buenas características físicas, las mejores condiciones de extrusión son las correspondientes a intermedias temperatura (170 °C) y humedad alrededor del 16%. En otro estudio, la adición de 5-20% de un concentrado de proteína de soya resultó en un menor gasto de energía mecánica específica, la expansión y mayor resistencia mecánica de los productos extrudidos (Alam et al., 2015).

2.3.4.6 Diámetro de orificio.

La extrusión a menor diámetro de orificio de los dados, incrementa el grado de expansión del producto; la humedad de la mezcla es importante para la expansión o textura, el incremento del contenido de proteína en la mezcla reduce las posibilidades de una extrusión con expansión (Cadena, 2010).

2.3.4.7 Composición del alimento.

Es un parámetro dominante que influye en las variables de proceso intermedias. Condiciones de extrusión, características del gránulo de almidón y presencia de otros componentes tales como proteínas, fibras y azúcares afectan directamente el grado de transformación (Alam *et al.*, 2015).

2.3.5 Parámetros del proceso de extrusión.

Un rol cada vez más importante de los extrusores de alimentos está asegurado en la industria de alimentos de procesamiento después de una creciente población mundial y la disminución suministro de energía convencional. Estas tendencias se centran en la necesidad de transformar productos agrícolas crudos compuestos por almidón, proteína vegetal y grasa, eficientemente en alimentos de alta aceptabilidad. La capacidad de los extrusores para combinar, cocinar y texturice componentes de alimentos de forma rápida, continua y lo hace ideal para esta tarea, especialmente en países menos desarrollado. Determinado grado de transformación del almidón puede obtenerse mediante varios conjuntos de los parámetros del proceso, lo que dificulta las comparaciones. Un valor único que refleja la transformación del producto energía específica absorbida por el producto cuantificará la gravedad de tratamiento en extrusoras de tornillo simple y doble. La entrada de energía por unidad de masa durante la cocción por extrusión puede ser experimental medido y calculado teóricamente, y ha demostrado validez. La entrada de energía al sistema de extrusión se separa en energía mecánica, proporcionado por el motor, y la energía térmica, que proviene del sistema de calefacción (Iwe *et al.*, 2001).

2.3.5.1 Energía mecánica específica (EME).

En extrusores de un solo tornillo, la entrada EME varía de aproximadamente 100 a 600 KJ/kg, dependiendo del extrudido. La entrada de las EME está relacionada con la transformación del producto que conduce a la variación en la expansión, densidad y características geométrica. correlacionaron la entrada de energía específica con transformación del producto medida por el índice de solubilidad y la viscosidad intrínseca. La temperatura y presión del producto se estudian con sondas que pasan por el cilindro de la extrusora o situado en el extremo de la matriz. En diversas investigaciones se estudió el fenómeno que ocurre a diversas temperaturas dependiendo del contenido de agua; un alto contenido de agua permite una temperatura de gelatinización más baja efecto de un cambio en la temperatura es la modificación de la propiedad reológica, que generalmente induce un cambio en el tiempo de residencia (Iwe et al., 2001).

La energía mecánica específica (EME) se utiliza como un parámetro del sistema para modelar propiedades de extrudido. Se ha descubierto que las EME disminuyen con el aumento de humedad y temperatura y el aumento de velocidad de tornillo. Energía mecánica específica (Wh/kg) se calculó a partir de la velocidad nominal del tornillo, potencia del motor clasificación, velocidad real del tornillo % de torque del motor y masa velocidad de flujo (kg/h). Humedad, velocidad del tornillo y la temperatura tuvo efectos significativos en las EME. Un el efecto lubricante es producido por la humedad alta lo que resulta en un menor consumo de energía y, posteriormente, se reduce la EME. El aumento en la velocidad del tornillo da como resultado una mayor cizalla que da una EME más alta. Energía mecánica específica definida como la entrada total de energía mecánica para obtener 1 g de producto extrudido (J/g) (Navale et al., 2015).

2.3.5.2 Tiempo de residencia (TR).

El tiempo de residencia se considera un parámetro del sistema que vincula las variables del proceso, como la velocidad del tornillo y el contenido de humedad. El

tiempo de residencia de los alimentos durante el proceso de extrusión determina el alcance de las reacciones químicas y en última instancia, la calidad de los productos (Rodríguez-Miranda et al., 2012).

2.3.5.3 Torque (T_0)

El torque (T_0) es requerido para girar el tornillo de extrusión está relacionado con la velocidad del extrusor, llenado, y la viscosidad del material alimenticio en el canal del tornillo. Si cargan la medición del torque del sistema se resta del torque operacional mediciones para medir con precisión el impacto de la operación del extrusor. El torque se relaciona con el consumo de potencia del extrusor. La entrada de torque al tornillo se determina en el acoplamiento que conecta a la unidad de extrusión al tornillo con transductores. La entrada de torque también se puede obtener de la pantalla digital en el panel de control de extrusor. El torque se ve afectado por la relación de avance durante cocción por extrusión de mezclas de garbanzos y arroz debido al aumento del contenido de almidón (Iwe et al., 2001).

2.3.6 Beneficios del proceso de extrusión.

Algunos beneficios que se tiene por la utilización de extrusor en los alimentos son: texturización de proteínas, gelatinización del almidón y modificación de la estructura molecular almidón, fibra y proteína (aumenta el contenido de fibra dietaría soluble, mejorar la digestibilidad de proteína y el almidón), reducción de la oxidación de lípidos, formación de complejos entre amilosa y lípidos, degradación de pigmentos biodisponibilidad de minerales, inactiva algunos anti-nutrientes, dextrinización del almidón además del equipo de extrusión favorecen la calidad, la alta productividad y el bajo costo referencia (Cuj-Laines et al., 2018; Teba et al., 2017).

2.3.7 Efectos del proceso de extrusión sobre el valor nutricional de las proteínas.

Cuando las proteínas se someten a extrusión, experimentan un cambio conformacional llamado desnaturalización, que favorece la exposición de las proteínas a las proteasas, aumentando así la biodisponibilidad de las proteínas al organismo. La baja proporción de proteína (57.52%) para harina de frijoles crudos (*Canavalia ensiformis*), que aumentó a 89.46% después de la extrusión. Las proteínas se fraccionan durante el proceso extrusión que conduce a la pérdida de estructuras cuaternarias, terciarias y secundarias, lo que afecta sus propiedades fisicoquímicas (por ej., solubilidad). Dos fenómenos físicos, fragmentación y agregación, Durante la extrusión, la estructura cuaternaria de la soja se pierde, de modo que la humedad y la temperatura hacen que la estructura se despliegue y reoriente. Esto causa enlaces intermoleculares para polimerizar para proporcionar una apariencia similar a la carne en producto final (Yada, 2018).

Enzimas como ureasa (que reduce la vida útil del producto), lipoxigenasa (que produce sabores indeseables debido a la oxidación de la soja aceite), y los inhibidores de la tripsina (que reducen la digestibilidad de las proteínas) se destruyen. Ha sido demostrado que el proceso de extrusión aumenta la digestibilidad de las proteínas y el almidón en la extrusión harina de guisantes en comparación con harina sin extrusión; sin embargo, tiene se informó que las altas temperaturas, bajo contenido de humedad y alto contenido de los azúcares disminuyen la disponibilidad de aminoácidos esenciales en la leche y los huevos. Esto fue principalmente atribuido a la reacción de Maillard, que se lleva a cabo en presencia de proteínas y azúcares reductores sin embargo en una investigación utilizando soja (fuente de proteína) como ingrediente en extrusión concluyeron que no pierde la calidad proteica debido a que las proteínas reducen la cizalla dentro del extrusor reduciendo así la presión de la boquilla y crean un diferencial de presión más bajo entre la matriz y la atmósfera. Esto reduce la cantidad de humedad y registra una vaporización instantánea para que la expansión se reduce mayores

contenidos de amilosa pueden requerir temperaturas de extrusión más altas (Teba et al., 2017; Abd El-Salam et al., 2013)

El aumento del contenido de humedad puede disminuir la dextrinización del almidón lubricando el tornillo, que reduce la fuerza de corte, la fricción y la temperatura del producto. Esto disminuye la concentración de azúcares reductores disponibles para participar en la reacción Maillard (Yada, 2018).

2.3.8 Efectos del proceso de extrusión sobre la fibra dietaría.

La extrusión reduce el peso molecular de pectina y moléculas de hemicelulosa, lo que resulta en aumento de la solubilidad en agua de la fibra de pulpa de remolacha azucarera. Cambios insignificantes en el contenido de fibra dietética en extrudidos con tornillo doble. Aumento en el contenido de fibra dietética de harinas de trigo con aumento de la temperatura del producto (150 - 200 °C) fue reportado. La cocción por extrusión aumentó fibra dietética total de harinas de cebada. El aumento fibra total dietaría de en la cebada cerosa fue el resultado de un aumento en la fibra dietaría soluble (Navale et al., 2015) también con residuos de limón se indicó que la extrusión es un proceso que tiene la capacidad de transformar fibra insoluble a fibra soluble (Alam et al., 2015).

2.4 Residuo agroindustrial.

La agroindustria es la rama de industrias que transforman los productos de la agricultura, ganadería, riqueza forestal y pesca, en productos elaborados. En este proceso de transformación, también son generados residuos vegetales. Los que llegan a causar contaminación, pero actualmente son utilizados estos residuos ya que tienen compuestos bioactivos (fibra dietaría, compuestos polifenólicos, ácido ascórbico, ácido abscísico, pigmentos y azúcares) los cuales pueden ser utilizados para la producción fermentativa de metabolitos de interés, bioetanol y productos con alto contenido de fibra. La utilización de los residuos reduce el impacto ambiental; ya que en la actualidad pueden ser potencialmente útiles cuando se les transforma

mediante tratamientos químicos o microbiológicos en productos de elevado su valor agregado (Barragán et al., 2008; Saval, 2012).

2.4.1 Residuos o subproducto vegetales.

El residuo o subproducto que es originado por la extracción de jugo o pulpa de las frutas, donde constituye el 20 - 35% del peso del fruto fresco, sin embargo, se trata de un desecho industrial poco valorado económicamente y es utilizado a menudo como alimento para animales o es utilizado como fertilizante (Paraman et al., 2015; Selani et al., 2014).

En la industria de la transformación se pueden utilizar distintos términos como son subproducto, residuo y desecho. El primero es un producto secundario, bien conocido, generalmente útil, comercializable y por lo tanto con valor agregado, que resulta de un proceso industrial. El término “residuos”, se aplica a aquellos que pueden tener o no un valor comercial, porque son poco comunes o porque se generan en bajas cantidades, sin embargo, algunos de sus constituyentes aún en baja proporción, le pueden conferir algún interés para su utilización. Desde este punto de vista, los términos “subproducto” y “residuo” podrían utilizarse como sinónimos. Sin embargo, el término “desecho” está referido aquellos materiales que no tienen ningún valor comercial ni poseen algún atributo de interés para ser utilizados en el proceso, porque se consideran como basura (Saval, 2012).

En tal sentido es necesario definir el termino residuo, el cual, de acuerdo a Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en México, es “material o producto cuyo propietario desecha y que puede ser susceptible de ser valorizado o someterse a tratamiento o disposición final conforme a lo previsto en la misma ley”. Este marco referencial, permite enunciar que, los residuos agroindustriales son productos orgánicos sólidos, semisólidos y líquidos generados a partir del uso directo de productos primarios o de su industrialización, no útiles para el proceso que los generó, pero si susceptibles de un aprovechamiento o

transformación que genere otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social (Mejías-Brizuela et al 2016).

2.4.2 Impacto ambiental negativo.

Una de las principales problemáticas ambientales en nuestro medio es la alta producción de residuos agroindustriales, los cuales, en la mayoría de los casos, son quemados o arrojados a los basureros, fosas y ríos sin ningún tratamiento previo y contribuyen de esta manera a la degradación del ecosistema (Motator et al., 2006), produciendo una gran liberación de dióxido de carbono y proliferación de ratas, moscas y otros insectos (Barragan et al., 2008) no existe una clara conciencia ambiental para su manejo, además de que falta capacidad tecnológica y recursos económicos para darles un destino final, así como una legislación específica para promover la gestión de este tipo de residuos, que asegure un buen manejo desde su generación hasta su disposición final. Los problemas de dispersión de contaminantes derivados de la disposición de residuos a la intemperie pueden afectar directamente a los recursos naturales: suelo, agua y aire, además de plantas y animales de los alrededores (Saval, 2012).

Contaminación de suelo y subsuelo por presencia de residuos iniciarán su degradación por el proceso microbiano que se inicia se generan lixiviados, éstos migrarán en forma vertical hacia el subsuelo y podrían alcanzar los mantos acuíferos; además, los microorganismos presentes podrían ser arrastrados por las corrientes de aire para ser depositados en otros sitios. Si la degradación natural que se inicia es promovida por bacterias anaerobias pudieran generarse malos olores (Saval, 2012).

Los frutos frescos contienen una gran cantidad de agua y azúcares fermentables que al ser arrojados al suelo crea daños ambientales debido a la fermentación incontrolada lo cual lleva a una demanda alta de oxígeno durante la degradación del residuo lo cual causa la eliminación de oxígeno directa del suelo (Paraman et al., 2015).

El suero de leche es otro residuo generado en la producción de queso en la producción de 450 g de queso se produce 4 kg de suero (Paraman et al., 2015). El suero de leche es uno de los materiales más contaminantes de la industria alimentaria, debido a su elevado contenido en materia orgánica, siendo su riqueza en lactosa la principal responsable del mismo, por su capacidad para actuar como sustrato de fermentación microbiana porque tiene un elevado consumo de oxígeno. En otras palabras, cerca de 0.25 a 0.30 litros de suero sin depurar equivalen a las aguas negras producidas en un día por una persona (Navas, 2015).

El suero de leche, por ser altamente contaminante, se ha categorizado como un desperdicio, aunque, en la actualidad se realizan estudios (utilizando tecnologías como el fraccionamiento, la deshidratación, la fermentación, etc.) con el fin de transformarlo en producto útil de alto valor agregado (Navas, 2015; Motator et al., 2006).

2.4.3 Utilización de compuestos bioactivos de residuos.

Como se ha mencionado anteriormente los residuos agroindustriales son fuente de compuestos bioactivos por ello se han desarrollado diversas investigaciones buscando su utilización de acuerdo a sus componentes del residuo como se puede mencionar el residuo de manzana (cáscara, corazón y pulpa) son utilizados como fuente de ácido abscísico (fitohormona), pectina, fibra dietaria, fitoquímico, enzimas y para la producción de alcohol, bioadsorbentes, biocombustibles (Paraman et al., 2015). El residuo de hojas de plátano (*Musa paradisiaca*) como sustrato para la producción del hongo (*Pleurotus djamor*) (Motator et al., 2006); el bagazo de tequila (*Agave tequilana* W. var. Azul) para la producción de alimentos para rumiantes (bovinos, ovinos, equinos) con mezcla de betabel ó melaza de azúcar (Ramírez-Cortina et al., 2012); la cascarilla de café y de bagazo de caña para la elaboración de carbón activado (Solís-Fuentes et al., 2012); y los desechos de uva pomace (*P. fino variety*) se han utilizado como fuente de nutritiva para la fermentación y producción de enzimas hidrolíticas (Celulasa, xilanasas y pectinasas) usando *Aspergillus awamori* con aplicación en la industria textil, química y de alimentos

(Botella et al., 2005); así como la obtención de biogás de residuos de la industria alimentaria y la agroindustria con la digestión de bacterias anaerobias de materia orgánica de dichos residuos (González-Sánchez et al., 2015).

Los residuos de frutas tienen la posibilidad de utilizarlo como fuente de fibra alterna a los cereales más utilizados como el salvado de trigo, cascarilla de arroz, maíz y sorgo así como también hojuelas de avena y leguminosas con alto contenido de fibra, sin embargo la fibra de la fruta tiene un alto contenido de fibra total, soluble e insoluble que las fuentes anteriormente mencionada; por lo que, puede tener un mayor interés debidos a sus beneficios que puede tener fisiológicas y funcionales que puede tener en el organismo humano (Rasgado et al., 2016; Selani et al., 2014) Debido a esto se han utilizado diversas fuentes como cáscara de plátano, jícama, tuna, mango, piña, manzana, zanahoria, albedo de toronja y hojas de maguey; las cuales pueden utilizarse en productos cárnicos como fuente de fibra además de que pueden contener compuestos polifenólicos (Chávez-Zepeda et al., 2009).

Sin embargo, el uso de residuo de frutas para aplicaciones alimentarias ha sido estudiado más de dos décadas y no ha alcanzado la comercialización debido a sus impactos negativos sobre sus atributos sensoriales del producto final (Paraman et al., 2015).

Los residuos vegetales son una fuente rica de compuestos bioactivos como la fibra dietética, está constituida principalmente de biopolímeros, como lo es la hemicelulosa, celulosa, lignina, pectina y otras gomas que varían en proporción dependiendo de la fuente (Rasgado et al., 2016). Por ello, se han utilizados en diversos alimentos como fuente de fibra como en los productos extrudidos se han utilizado diversos como son los residuos de manzana, uva, toronja, bayas azules, tomate, zanahoria, piña y salvado de trigo (Paraman et al., 2015; Sharma et al., 2016; Selani et al., 2014;) han sido utilizados en la elaboración de extrudidos donde se ha observado el efecto de la adición de residuo en las cualidades de los extrudidos (sensoriales, nutritivas, tratamientos al residuo, fuente del residuo, etc.)

así como las condiciones del equipo de extrusión donde debido a los parámetros de extrusión son afectados por las cualidades de extrusión (Paraman et al., 2015).

2.4.4 Residuos generados en México y en el distrito de Tuxtepec, Oaxaca.

En México se generan anualmente cerca de 76 millones de ton de residuos orgánicos de frutas (limón, peras, manzanas, papaya, piña, plátano, naranja) y vegetales (maíz, caña de azúcar, frijol, col, zanahoria, tomate, lechuga, papa) (González-Sánchez et al., 2015). Algunos datos que sirven para tener una idea del volumen de residuos que generan diferentes tipos de industrias en México son los siguientes: la industria de la cerveza solamente utiliza el 8% de los componentes del grano, el resto 92%, es un residuo; la industria del aceite de palma utiliza el 9%, el 91% restante es un residuo; la industria del café utiliza el 9.5%, el 90.5% restante es un residuo y la industria del papel utiliza menos del 30%, el resto es un residuo (Saval, 2012).

En el Distrito de Tuxtepec se producen diversos cultivos sean de temporal o de riego por lo que se cultiva en todas las estaciones del año, así como también cultivos perennes (viven más años) por que se obtienen diversos cultivos como son ajonjolí, chile verde, frijol, grano de maíz, sandía, grano de sorgo, cereza de café, caña de azúcar, limón, mango, naranja, papaya, plátano, toronja (pomelo) y piña (variedades de piña miel (MD2), champaka y Cayena Lisa) por que se tiene una producción total de 3,994,383 ton de los diversos cultivos sobresaltando la caña de azúcar (3,704,489 ton) con mayor producción y la piña ocupando el segundo lugar con 130,436.59 ton (SIAP, 2019). Teniendo en cuenta que el procesamiento de piña en las agroindustrias o artesanal se obtiene grandes cantidades de residuos (cáscara y bagazo) que corresponde del 25 - 35% del peso del fruto (Selani et al., 2014).

La piña que se produce en el país tiene tres usos como destino final. El primero es el consumo de fruto fresco como principal destino con aproximadamente el 70%; la segunda es la industrialización del fruto dedicada a la elaboración de almíbar y jugo representando alrededor del 23 - 25% de la producción; y finalmente la tercera con

el 5 - 7% destinada al mercado de exportación de piña en fresco (Hernández et al., 2015). Debido a esto se tiene una producción de residuos que son arrojados al suelo sin el tratamiento adecuado a este residuo o son utilizados como alimento para rumiantes. Debido a esto es necesario, el aprovechamiento de los residuos y desecho del cultivo y procesamiento no se ha explotado comercialmente en México. En este sentido, es importante impulsar la explotación comercial de nuevos productos y subproductos de piña (SAGARPA, 2012).

2.5 Piña (*Ananas comosus* L.)

Es una fruta exótica con orígenes de América del Sur, con buenas características sensoriales y nutritivas. Es fuente de compuestos fitoquímico como: ácido ascórbico, flavonoides, compuestos polifenólicos por lo que presentan actividad antioxidante, la piña presenta mayor actividad de atrapamiento de radicales libres que la banana y la guayaba (Sharma et al., 2016), en Tabla 2 se observa la composición química de la piña es importante resaltar que poseer un alto contenido en vitaminas C que puede contener 31% del requerimiento diario, además de contener vitaminas A, B, E, K, betacaroteno, ácido fólico y ácido pantoténico, también es una fuente útil de minerales hierro, calcio, cobre, potasio y como fuente excelente fuente magnesio (hasta 2.6 mg), la piña cruda puede contener hasta un 76% del requerimiento diario de minerales, puede contener 4 al 18% de azúcar dependiendo del estado de madurez. También se puede considerar fuente de fibra hasta 13 g (Wijeratnam, 2016; SAGARPA, 2012).

Tabla 2. Composición química de la piña.

Componentes	Piña (g/100 g materia seca)
Proteína	4.0
Ceniza	4.5
Grasa	1.3
Humedad	9.3
Carbohidratos	14.4
Fibra total dietaria	75.8
Fibra insoluble	75.2
Fibra soluble	0.6

Fuente: Martínez et al. (2012)

2.5.1 Morfología.

La piña, *Ananas comosus* L. es una monocotiledónea, perteneciente al gran género *Ananas* de la familia Bromeliaceae, que incluye muchas plantas ornamentales. La planta produce inflorescencia (Figura 8) que da origen a una fruta múltiple (sosis del griego “monton” que es un fruto compuesto, carnoso y derivado de una inflorescencia) no es climatérica que produce pequeñas cantidades de etileno en términos para la maduración después de la maduración del fruto la planta desarrolla nuevos brotes a partir de yemas axilares que facilitan la reproducción vegetativa de la planta, produciendo así otra fruta. La misma planta puede dar una secuencia de varios ciclos de producción. en la mayoría de las plantaciones comerciales, las plantas no pueden producir más de dos o tres cultivos debido a que se debe establecer una reducción del fruto. En la Figura. 9 se muestran las partes de la planta de la piña (Wijeratnam, 2016; Hernández et al., 2015).

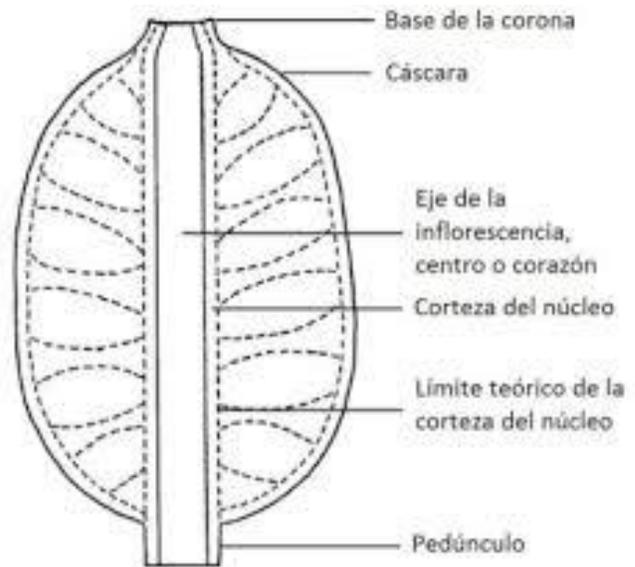


Figura 8. Inflorescencia y partes del fruto compuesto (piña de la variedad Cayena lisa) Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Ananas_comosus; (Sanewski *et al.*, 2018).

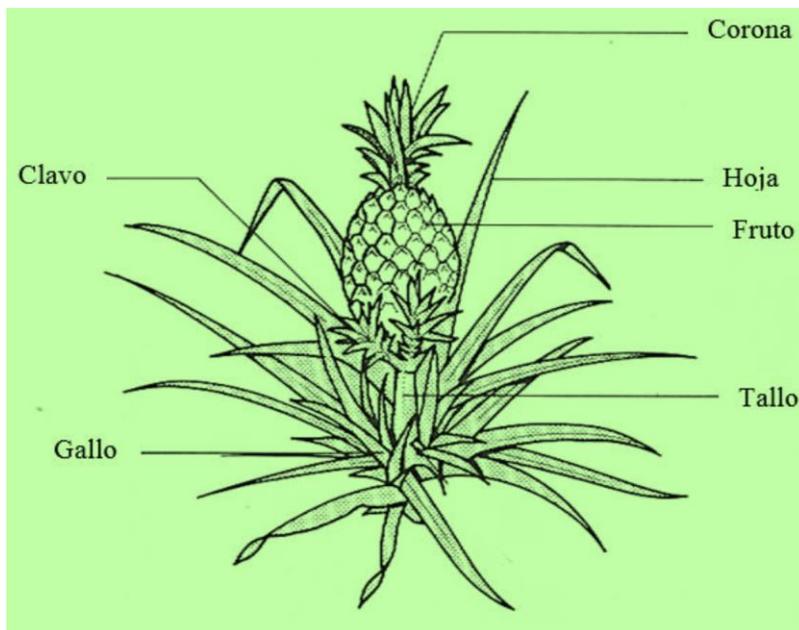


Figura 9. Estructura morfológica de la planta de la piña Fuente: <http://lapiniatropical.blogspot.com/2015/04/taxonomia-botanica-y-fisiologia-de-la.html>

2.5.2 Taxonomía

Existen 8 especies para el género *Ananas* sin embargo la especie reportada para México *Comosus* la cual es una especie con frutos grande, espiga corta y gruesa en Tabla 3 se muestra su clasificación (Hernández et al., 2015).

Tabla 3. Clasificación taxonómica de la *Ananas comosus* L.

Reino	Plantae
Subreino	Tracheobionta
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Subclase	Commelinidae
Orden	Bromeliales
Familia	Bromeliaceae
Subfamilia	Bromelioideae
Género	<i>Ananas</i>
Especie	<i>Comosus</i>

Fuente: Loibon-Cabot, (1992).

2.5.3 Producción mundial, nacional y estatal.

La piña contribuye a más del 20% de la fruta tropical producida en el mundo. Es nativo de América del Sur. La mayor parte de la producción es administrada por empresas multinacionales para el consumo en forma procesada, aunque existe una demanda cada vez más visible del producto fresco. La mayor parte de las piñas cultivadas en muchos países tropicales es para consumo interno. Las piñas son bajas en calorías y ricas en vitaminas, minerales y fibra. La fruta tiene muchos beneficios para la salud y es una fuente de bromelina, que se utiliza como un complemento alimenticio debido a sus muchas propiedades fitomedicas (Wijeratnam, 2016).

La producción comercial de piña comenzó en el siglo XIX en las Indias Occidentales, Brasil y México. Sin embargo, actualmente es cultivada en 85 países (Wijeratnam, 2016) con una producción mundial de piña de 29.53 millones de ton y México alcanza una producción 945 mil 210 de ton en 2018 (FAO, 2019).

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) indicó que la producción de este cultivo en México es de 945 mil 210 ton obtenidas durante 2018. Los principales estados productores de piña en México son Veracruz, Oaxaca, Tabasco, Quintana Roo y Jalisco Las cinco entidades antes referidas concentran el 92.3% del total de producción en el país. Oaxaca ocupa el segundo lugar en producción de piña en año 2016 según Servicios de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019); se produjeron 130,436.59 ton y en el distrito de Tuxtepec se producen 103,862 ton de este fruto, con dos tipos de variedades cayena lisa (Figura 10) y miel (MD2) (Figura 11) (Hernández *et al.*, 2015).



Figura 10. Fruto de piña (*Ananas comosus* L) de la variedad cayena lisa (Hernández *et al.*, 2015).



Figura 11. Fruto de piña (*Ananas comosus* L) de la variedad miel (MD2) (Hernández *et al.*, 2015).

La piña que se produce en el país tiene tres usos como destino final. El primero es el consumo de fruto fresco como principal destino con aproximadamente el 70%; la segunda es la industrialización del fruto dedicada a la elaboración de almíbar y jugo representando alrededor del 23 - 25% de la producción; y finalmente la tercera con el 5 - 7% destinada al mercado de exportación de piña en fresco (Hernández et al., 2015).

2.5.4 Subproducto o residuo de piña.

Durante el procesamiento de piña, se generan grandes cantidades de residuo, que consisten principalmente en cáscara y bagazo, que representan aproximadamente el 25 - 35% del peso del fruto. Dado que la mayoría de estos subproductos no tienen un destino específico, pueden desecharse de manera inapropiada causando problemas ambientales. En consecuencia, es de vital importancia reutilizar los subproductos industriales para mejorar la economía del proceso y su sostenibilidad (Selani et al., 2014). Alrededor del 76% del subproducto de piña (cáscara y corazón) es fibra, de la cual el 99.2% es la fracción insoluble y el 0.8% es la fracción soluble (Martínez et al., 2012).

2.5.5 Beneficios de la fibra

La definición de fibra dietética (FD) propuesta por la Asociación de Químicos de Cereales (AACC) define DF como hecho de partes comestibles de plantas o carbohidratos análogos que son resistente a la digestión y absorción en el intestino delgado humano con fermentación completa o parcial en el intestino grueso (AACC Informe, 2000). De acuerdo con la solubilidad en agua, fibra dietética total (FDT) se puede clasificar en dos grupos, a saber, la fibra dieta soluble (FDS) y fibra dietética insoluble (FDI). Muchos estudios han demostrado que FD desempeña diferentes funciones fisiológicas en la salud humana y aparece el FDS ser más efectivo que la FDI en muchos aspectos saludables, pero la mayor parte de la fibra dietaría cruda son fibras son FDI, mientras que el contenido de FDS es muy bajo. Por lo tanto,

tiene una importancia especial para mejorar el contenido de FDS de la fibra dietaría cruda (Jing y Chi, 2013).

A la FD se le atribuyen propiedades tan diversas como: ser un regulador intestinal al actuar como laxante; representa un factor preventivo del cáncer de colon: es un absorbente de ácidos biliares y retarda la absorción intestinal, también favorece la disminución del colesterol y de la glucosa en la sangre (Bach, 2001).

La FDI (Celulosa, hemicelulosas y lignina) actúa como un agente de carga, normalizando la motilidad intestinal, previniendo el estreñimiento relevante en las modernas sociedades víctimas de la ingesta compulsiva y la obesidad; mientras que la FDS (pectinas, gomas, mucílagos y algunas hemicelulosas) principal característica es su capacidad para atrapar agua y formar geles viscosos lo que determina su poder laxante. Se asocia a la disminución de la absorción intestinal de absorción de hidratos de carbono, colesterol y glucosa (Rodríguez et al., 2003). Debido a todos estos beneficios de la ingesta de fibra dietética, ya se ha observado durante algún tiempo una tendencia en el desarrollo de productos enriquecidos con fibra o con declaraciones de fibra específicas. Según la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, 2013), para tener un producto con una "alta fuente de fibra" y una "buena fuente de fibra", debe contener, respectivamente, 20% o más de fibra y 10 - 19% de fibra del valor diario recomendado para fibra dietética en un tamaño de porción. El subproducto de piña (cáscara y corazón) contiene el 76% de fibra total conteniendo las dos fracciones insoluble y soluble (Martínez et al., 2012).

2.5.6 Utilización en la industria alimentaria.

El residuo de piña contiene valiosas fuentes de fibra dietaría, podrían usarse como un posible ingrediente alimentario para mejorar la calidad nutricional de los alimentos. Además, las fibras tienen propiedades tecnológicas, como capacidad de retención de agua (CRA), capacidad de hinchamiento (CH) y capacidad de retención de aceite, que pueden ser útiles en productos que requieren hidratación, para evitar

la sinéresis, mejorar el rendimiento, estabilizar productos alimenticios altos en grasa y emulsiones, y también para modificar la textura y la viscosidad (Elleuch et al., 2011).

2.6 Suero de leche.

El suero de leche o lactosuero es obtenido mediante la adición de renina (vegetal o animal) o ácidos orgánicos (bacterias) en la leche los cuales causan la proteólisis de las caseínas (heteroproteínas) provocando la coagulación de la leche donde se forman dos fases la parte sólida es obtenida para la elaboración de queso y la parte líquida es el suero de leche o lactosuero el cual tiene un color amarillo verdoso translúcido y considerado como un subproducto en la industria quesera (Ramírez-Navas, 2012).

2.6.1 Tipos de suero

El suero de leche se puede clasificar en dos tipos dependiendo de sus propiedades fisicoquímicas.

Suero dulce: Es el más producido en la industria quesera y es producido con enzimas de origen vegetal o animal (renina) teniendo un pH por encima de 5.6 - 6 con una acidez titulable, 0.10 - 0.15% y se obtiene al producir quesos tipo panela, doble crema, ranchero, cheddar y mozzarella y su composición química de este tipo de suero es: lactosa 40 - 50%, proteína cruda 9 - 14%, grasa 0 - 5%, cenizas 4 - 6% donde se encuentra en mayor proporción los cloruros y potasio (Hernández et al., 2012; Reis de Souza et al., 2007).

Suero ácido: Por la adición de ácidos orgánicos (bacterias que producen ácido láctico) teniendo un pH debajo de 5.1, tipo de quesos Oaxaca, cottage y crema el suero obtenido del proceso de elaboración de queso tiene la siguiente composición

química: lactosa 40 - 50%, proteína cruda 7 - 12%, grasa 0 - 5%, cenizas 6 - 8% donde se encuentra en mayor proporción el ácido láctico y cloruros (Hernández et al., 2012; Reis de Souza et al., 2007).

El suero de leche en polvo comercialmente se puede encontrar en diversas presentaciones para su utilización como son suero reducido en lactosa, desmineralizado, concentrado de proteína a 34, 50 y 80% así como también aislados de proteínas 92% (Yada, 2018).

2.6.2 Composición química y valor nutricional.

El suero contiene el 20% de las proteínas hidrosolubles de la leche dentro de las proteínas que se encuentran son β -LG, α -LA, inmunoglobulinas, BSA, lactoferrina bovina (BLF) y lactoperoxidasa, además a otros componentes proteínicos menores, tales como glycomacropeptide (GMP), que se libera de κ -caseína en el primer paso de la fabricación enzimática del queso. Estas proteínas poseen importantes propiedades nutricionales y biológicas, particularmente con respecto a la promoción de salud y prevención de enfermedades y condiciones de salud. La hidrólisis controlada de proteínas de suero libera péptidos bioactivos, Sin embargo, el suero de leche contiene péptidos que desempeñan un papel importante en como parte de la prevención y enfoques de salud terapéutica, debido a la favorable combinación de varios productos bioquímicos y fisiológicos que son características. las proteínas del suero se pueden hidrolizar a través de proteasas gástricas, pancreáticas y microbianas, y por lo tanto, generar péptidos que pueden desempeñar funciones fisiológicas (sistema inmunológico, sistema cardiovascular, sistema nervioso, sistema gastrointestinal) (Madureira et al., 2010). A continuación, se muestra composición química del suero en la Tabla 4 y 5.

Tabla 4. Composición química del suero de leche.

Componentes	Lactosuero dulce (g/L)	Lactosuero ácido (g/L)
Sólidos totales	63 - 70	63 - 70
Lactosa	46 - 52	44 - 46
Proteína	6 - 10	6 - 8
Calcio	0.4 - 0.6	1.2 - 1.6
Fosfato	1 - 3	2 - 4.5
Lactato	2	6.4
Cloruros	1.1	1.1

Fuente: Madureira et al, (2010)

Tabla 5. Contenidos en vitaminas del suero de leche.

Vitaminas	Concentración (mg/mL)	Necesidades diarias (mg)
Tiamina	0.38	1.5
Riboflavina	1.2	1.5
Ácido nicotínico	0.85	10-20
Ácido pantoténico	3.4	10
Piridoxina	0.42	1.5
Cobalamina	0.03	2
Ácido ascórbico	2.2	10-75

Fuente: Madureira et al, (2010)

2.6.3 Suero de leche deshidratado.

El suero es una corriente de nutrientes diluida. Su composición es 94% de agua esta corriente diluida puede ser secado para obtener un producto llamado suero en polvo. El contenido de lactosa del suero se puede reducir y el producto resultante

se seca para producir un producto llamado suero de lactosa reducido en polvo. Del mismo modo, procesos como la electrodiálisis pueden reducir el contenido mineral del suero de leche para obtener suero de leche desmineralizado, que en su forma seca es llamado suero de leche desmineralizado en polvo. La próxima etapa del procesamiento del suero de leche es concentrar las proteínas mediante la eliminación de minerales y lactosa. El suero en polvo contiene un aproximado del 25% cuando este contenido aumenta, es llamado concentrado de proteína de suero de leche que puede ser del 35, 55, 80% y hasta mayor a 90% cuando se realizan una purificación más alta produciendo aislados de proteína de suero de leche en base al peso seco (Abd El-Salam et al., 2013)

Los subproductos de la concentración de proteínas, lactosa y minerales de leche ricos en calcio, son cada vez más útiles en los suplementos farmacéuticos y dietéticos mercados. La lactosa se utiliza principalmente como un excipiente en el proceso de formación de comprimidos y los minerales de leche se usan para fortificar varios alimentos y bebidas con calcio (Yada, 2018). A continuación, se presenta la tabla 6 con las distintas presentaciones de suero en polvo y su composición química, así como su composición de proteínas en el suero de leche en la tabla 7.

Tabla 6. Composición química (%) de las diferentes presentaciones del suero deshidratado.

Productos	Proteína	Lactosa	Grasa	Minerales	Humedad
Suero de leche en polvo	11 – 14.5	63 – 75	1 – 1.5	8.2–8.8	3.5 – 5.0
Suero de leche en polvo reducido en lactosa	18 – 24	52 – 58	1 – 4	11 – 22	3 – 4

Suero de leche en polvo desmineralizado	en	11 – 15	70 – 80	0.5 – 1.8	1 – 7	3 – 4
Concentrado proteína -34	de	34 – 36	48 – 52	3 – 4.5	6.5 – 8.0	3 – 4.5
Concentrado proteína -50	de	50 – 52	33 – 37	5 – 6	7.5 – 8.5	3.5 – 4.5
Concentrado proteína -80	de	80 – 82	4 – 8	4 – 8	3 – 4	3.5 – 4.5
Aislamiento proteína de suero de leche	de	90 – 92	0.5 – 1.0	0.5 – 1.0	2 – 3	4.5

Fuente: Yada, (2018)

Tabla 7. Porcentaje de las proteínas típicas del suero de leche.

Proteínas	(%)
β -lactoglobulina	48
α -lactalbumina	19
Proteosa-peptona	20
Albúmina de suero	6
Inmunoglobulina	8

Fuente: Yada, (2018)

2.6.4 Composición química y valor nutricional del suero deshidratado.

Con respecto a su valor nutricional contiene el 50% de sólidos de la leche, de manera que se encuentra en mayor proporción la lactosa 63-65%, proteínas solubles 11 - 14.5%, grasas 1 - 1.5%, humedad 3.5 - 5% y minerales 8.2 - 8.8% tales como calcio, fosfato, potasio, cloruros, ácido láctico (Hernández et al., 2012; Yada, 2018). El lactosuero contiene el 20% de las proteínas solubles de la leche

tales como β -lactoglobulina 48%, α -lactoalbumina 19%, propeasa-peptona 20%, albúmina de suero 6% inmonoglobulinas 8% las que se encuentran en mayor proporción en el suero, las cuales al ser sometidas a temperaturas elevadas (50 - 80 °C) se produce una gelificación térmica lo cual es debido a la desnaturalización de las proteínas formando una red entre proteínas debido a las interacciones hidrofóbicas, los enlaces de hidrógeno y la formación de puentes de disulfuro así como también se ve afectado por el pH debido a esta reacción se favorece las propiedades sensoriales y de textura en diversos productos como helados, dulces y postres; sin embargo un pH de 5.3 no es benéfico para la formación del gel entre las proteínas del lactosuero debido a que la unión entre proteínas es débil pero cabe mencionar que la adición de polisacáridos al lactosuero fortalece la red de proteínas haciéndolas un gel resistente y de rápida gelificación (Li y Zhao, 2018; Yada, 2018; Espinosa-Dzib et al., 2012).

2.6.5 Beneficios del suero deshidratado.

El suero puede prevenir o utilizarse como terapia para diversas dificultades de la salud como son para el sistema inmunológico, sistema cardiovascular, sistema nervioso, sistema gastrointestinal, cáncer, antiviral, infecciones bacterianas debido al contenido de aminoácidos esenciales que le da un alto valor biológico proteico, así como facilita digestibilidad de β - lactoglobulina debido al tratamiento industrial (eterización, calentamiento o presión hidrostática alta y la hidrólisis). Debido a sus bioactivos es actualmente utilizado para el enriquecimiento y fortificación de diversos productos (helados, alimentos infantiles entre otros) (Yada, 2018; Parra, 2009; Madureira et al., 2010; Hernández-Rojas y Vélez-Ruiz, 2014)

2.6.6 Usos en la industria alimentaria.

Por su composición fisicoquímica presenta las siguientes propiedades funcionales como espumante, emulsificante, agente gelificante y viscosidad (Li y Zhao, 2018; Yada, 2018), por lo cual, puede tener diversas utilidades en la industria alimentaria o como producto nutracéutico como fuente de péptidos bioactivos (Madureira et al., 2010) por lo cual, el suero de leche en polvo en sus distintos tipos

y presentaciones tienen diversas utilidades como es la elaboración de carnes procesadas, productos de panificación, helados, dulces, alimentos infantiles, pastas, salsas, fortificación de bebidas para deportistas, alimento para animales, texturizados proteicos utilizados en bebidas acidificadas, quesos, separación de la lactosa para fines endulzantes en alimentos, medio de soporte para encapsular sustancias, películas comestibles (Onwulata et al., 2003; Reis de Souza et al., 2007; Hernández-Rojas y Veles-Ruiz, 2014).

2.7 Propiedades funcionales.

La funcionalidad de una sustancia se define como toda propiedad, nutricional o no, que interviene en su utilización (Mills et al., 2003) Las condiciones típicas de extrusión varían dependiendo del tipo y la cantidad de almidones utilizados. En general, la temperatura en la cocción, las zonas de extrusor, el contenido de humedad de la extrusión, tiempo de residencia. Estas condiciones cambiarán la física y química, propiedades además de nutricional y atributos sensoriales, que se afectan durante el procesamiento, almacenamiento, preparación y consumo del alimento resulta en el cambio de la calidad del producto. Las propiedades físicas incluyen el índice de expansión, a densidad aparente, dureza, color, índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) (Navale et al., 2015).

Las propiedades funcionales más importantes que se estudian en algunos sistemas de alimentos son:

2.7.1 Capacidad de absorción de agua.

La absorción de agua de un producto amiláceo depende de la disponibilidad de grupos hidrofílicos, principalmente grupos hidroxilos (Figura 12), capaces de unir moléculas de agua y de la capacidad de formar gel de las macromoléculas (Gómez y Aguilera, 1983). Sin embargo, muchos carbohidratos absorben poca agua en su estado nativo, por ser cristalino y exponer poca superficie, pero pasan a absorber

una gran cantidad cuando se desnaturalizan por la acción del calor y sus cadenas se despliegan. Este proceso, conocido como gelificación de los almidones, es de gran importancia en el procesamiento de los alimentos ya que supone un intenso cambio en las propiedades reológicas y una fijación de la estructura del alimento (Primo, 1997).

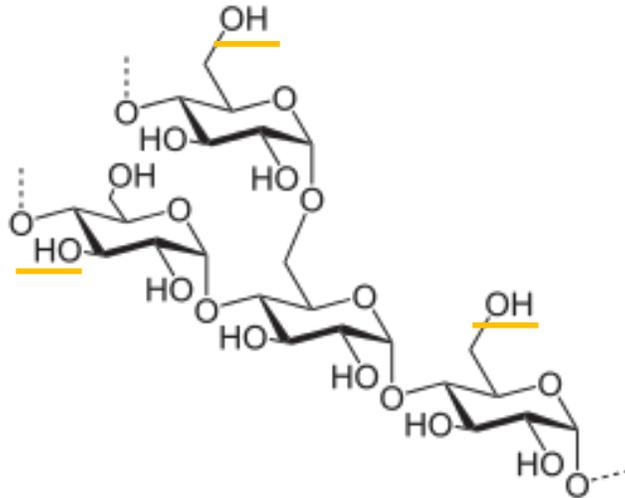


Figura 12. Estructura molecular de la amilopectina y de amarillo los grupos hidroxilos (Primo, 1997).

2.7.2 Índice de solubilidad en agua.

El ISA aumenta con el aumento de la velocidad del tornillo y la temperatura y disminuye con el aumento de humedad. Aumento de la temperatura en el cilindro resultó en un ISA más bajo. Pero aumenta ISA de extrudidos con aumento de velocidad del tornillo en que puede estar relacionada con el aumento de la mecánica específica energía con velocidad de tornillo el incremento de la temperatura aumenta el grado de gelatinización de almidón que podría aumentar la cantidad de almidón soluble que resulta en un aumento en ISA (Navale et al., 2015).

2.7.3 Densidad aparente.

El efecto de la variable independiente (temperatura, velocidad del tornillo y contenido de humedad) en la densidad de los extrudidos afecta a la relación de expansión. Un aumento en la temperatura del cilindro resulta en una menor

densidad aparente de productos extrudidos, aumentando la velocidad del tornillo resulta en una menor densidad aparente y el aumento del nivel de humedad da como resultado un volumen mínimo densidad. El comportamiento opuesto de densidad aparente y expansión lateral con el cambio en las variables de proceso. La baja velocidad del tornillo (20.1 - 32.6 rpm) conduce al aumento del valor de la densidad aparente del arroz texturizado, probablemente debido a la disminución de la gelatinización del almidón usando un alimento de maíz/soya. La densidad aparente es más dependiente de la velocidad del tornillo y temperatura (Navale et al., 2015).

2.7.4 Cambio de color

La comparación del cambio de color antes y después de la cocción por extrusión ayuda a determinar el impacto de la cocción por extrusión en los ingredientes del producto (Alam et al., 2015).

2.8 Prueba de aceptabilidad.

La evaluación sensorial es una disciplina científica utilizada para medir, analizar e interpretar las reacciones a esas características de los alimentos y materiales como son percibidos por los sentidos de la vista, olfato, gusto, tacto y el oído (Stone et al., 2012). Las pruebas de aceptación también se conocen como nivel de agrado (hedónica) son un componente valioso y necesario de todos los programas sensoriales. Se emplean para determinar el grado de aceptación de un producto por parte de los consumidores y según su tipo permite medir cuanto agrada o desagrade de dicho producto. La aceptabilidad de un producto generalmente indica el uso real del producto (compra y consumo) para determinar la aceptabilidad de un producto se pueden usar pruebas de ordenamiento, escalas, categorías y pruebas de comparación pareada (Hernández et al., 2005; Stone et al., 2012).

Las pruebas de aceptabilidad más usadas son: por ordenamiento y prueba hedónica (escala de nueve puntos). La escala más utilizada de 9 puntos, aunque existen

variantes de esta como son la de 7, 5 y 3 puntos o la escala grafica de cara sonriente que se utiliza generalmente en niños. La escala de 9 puntos es una escala bipolar. Se ha utilizado extensamente en una amplia variedad de productos y con un éxito considerable. Es la prueba recomendada para la mayoría de estudios o en proyectos de investigación estándar, donde el objetivo es simplemente determinar si existen diferencias entre los productos en la aceptación del consumidor (Thomas et al., 2017).

A los panelistas se les pide evaluar muestras codificadas de varios productos, indicando cuanto les agrada cada muestra, marcando una de las categorías en la escala que va desde “me disgusta extremadamente” hasta “me gusta extremadamente”. Cabe resaltar que la escala puede ser representada gráfica, numérica, horizontal o vertical y se utiliza para indicar las diferencias en gustos del consumidor de los productos (Ramirez-Navas, 2012; Thomas et al., 2017).

2.9 Optimización numérica

La optimización tiene el objetivo de encontrar las condiciones de proceso y de proporción de suero de leche dulce deshidratada y residuo de piña, con el máximo contenido de proteína y fibra respectivamente, también el mayor índice de expansión, menor dureza y menor gasto energético en la elaboración una botana en rica en proteína y fibra. La optimización se llevará a cabo mediante la superposición de las diferentes superficies de respuestas basadas en los máximos y mínimos, es decir en los valores observados de máximo (IE) y menor densidad aparente (DA), textura (H) energía mecánica específica (EME) (Pensamiento-Niño et a., 2018).

3 ANTECEDENTES

Da Silva et al. (2014) prepararon productos extrudidos a partir de harina de maíz y frijol carioca descascarillado (*Phaseolus vulgaris*, L.) mezcla de harina usando un extrusor de tornillo simple. Se utilizó un diseño central compuesto rotacional para evaluar el efecto de las variables del proceso de extrusión: velocidad del tornillo (318.9 - 392.9 rpm), humedad de alimentación (10.9 - 21.0 g/100 g) y nivel de harina de frijol (4.8 - 55.2 g/100 g) sobre la energía mecánica específica (EME), índice expansión longitudinal (IEL), índice de expansión (IE), índice de expansión volumétrico (IEV) y densidad (D) de los extrudidos. La textura instrumental también fue analizada. Las variables independientes tuvieron efectos significativos ($p < 0.05$) en las propiedades físicas (IE, IEV y densidad) de extrudidos, con la excepción de EME y IEL. IE aumentó con el aumento de la velocidad del tornillo, pero un mayor contenido de humedad y harina de frijol resultó en la disminución del IE e IEV. El aumento de la humedad y la harina de frijol aumentaron la densidad de los productos extrudidos. De acuerdo con el análisis de textura, algunos tratamientos con 30 y 45 g/100 g de harina de frijol no mostraron diferencia en comparación con las botanas comerciales de marca. La optimización del proceso de maíz remplazado por el frijol carioca 4.8 g/100 g, húmeda de 15 g/100 g y velocidad del tornillo 373 rpm.

Selani et al. (2014) Realizaron la caracterización la cáscara de piña y evaluaron su aplicación en la extrusión para mejorar contenido de fibra del producto final. La cáscara de piña con bajos contenido de lípidos (0.61%) y fibra dietética (45.22%), mostrando su potencial para el enriquecimiento de fibra de productos nutricionalmente pobres, como algunas botanas extrudidas. Los resultados mostraron bajos recuentos microbiológicos, actividad de agua y pH indicando buena calidad microbiológica y bajo riesgo de deterioro fisicoquímico. Durante la extrusión se evaluaron las siguientes variables, cáscara (0, 10.5 y 21%), humedad (14, 15 y 16%) y la temperatura (140 y 160 °C). La adición de cáscara de piña disminuyó la

expansión y luminosidad; al tiempo que aumenta el enrojecimiento de los extrudidos en comparación con el control (cáscara 0%, humedad 14%, temperatura 140 °C). Cuando la dureza, el amarilleo, la absorción de agua y la densidad aparente se compararon con control, no hubo ningún efecto ($p > 0.05$) de 10.5% de adición de cáscara de piña en los extrudidos, lo que indica que, en este nivel, cáscara de piña podría agregarse sin afectar las propiedades del producto final extrudido.

Teba et al. (2017) La influencia del concentrado de proteína de suero de leche (CPSL), la humedad de alimentación y la temperatura en las propiedades fisicoquímicas de los productos extrudidos a base de arroz fueron investigado con la sustitución de CPSL (0.64 a 7.36 g/100 g) se realizó la extrusión bajo 5 niveles de humedad (16.64, 18, 20, 22 y 23.36 g/100 g) y 5 niveles de temperatura (106.36, 120, 140, 160 y 173.64 °C) establecidos por un diseño central compuesto rotacional. Sobre las propiedades fisicoquímicas (color, solubilidad en agua y absorción, composición proximal, aminoácidos, minerales y electroforesis). La humedad y la temperatura de la alimentación aumentaron densidad y volumen total del poro CPSL y humedad aumentaron la cristalinidad, pero solo CPSL aumentó la solubilidad y disminuyó la tendencia a la retrogradación. Aumento de la temperatura aumentó la viscosidad de los extrudidos. La adición de CPSL mejoró la composición nutrición de los extrudidos, especialmente de las proteínas por el aumento del concentrado de proteína de suero de leche hasta 7.36 g/100 g. Lo cual se obtuvo con una humedad de alimentación de 23 g/100 g y una temperatura de 173 °C. Se sugiere que la extrusión proceso afectó positivamente a la retención de la mayoría de las cadenas de polipéptidos.

4 JUSTIFICACIÓN

Debido a su practicidad y fácil consumo, las botas son altamente consumidas mundialmente, sin embargo, la mayoría de las botanas están elaboradas principalmente por almidón por ello son densos en energía y pobres en nutrientes que pueden causar obesidad, enfermedades cardiovasculares y diabetes tipos 2, por ello el interés de nuevas fuentes ricas en proteínas, fibra, vitaminas y minerales. Como pueden ser los subproductos de residuo de piña y el suero de leche dulce deshidratado los cuales tiene un gran impacto negativo hacia el medio ambiente y de los cuales se tiene una alta producción en el Distrito de Tuxtepec, Oaxaca.

Sin embargo, estos subproductos como el residuo de piña (*Ananas comosus* L.) es rico en fibra la cual se le atribuyen diversas propiedades como pueden ser regulador intestinal al actuar como laxante presenta un factor preventivo del cáncer de colon, favorece a la disminución del colesterol y de glucosa, así como el suero de leche dulce deshidratado el cual el cual contiene el 20% de las proteínas solubles de la leche, unas de las proteínas es la β - lactoglobulina la cual presenta facilita digestibilidad y debido a sus bioactivos es actualmente es utilizado para el enriquecimiento y fortificación de diversos productos.

Por ello el interés en la utilización de subproductos o residuos, como puede ser el residuo de piña y el suero de leche dulce deshidratado ricos en fibra y proteínas respectivamente, que pueden mejorar el contenido de estos componentes en las botanas, dándole un valor agregado, así como también la utilización materias primas económicas lo que conlleva a la disminución del impacto ambiental por estos subproductos.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Optimizar el proceso de extrusión en el desarrollo y caracterización de una botana extrudida con mezclas de suero de leche deshidratado y residuos de piña a base de almidón de maíz.

5.1 Objetivos Específicos

1. Evaluar las propiedades fisicoquímicas de las materias primas (suero de leche dulce deshidratado, residuos de piña y almidón de maíz).
2. Realizar un diseño de experimentos para encontrar la temperatura de extrusión, contenido de humedad en la alimentación, proporción de suero de leche dulce deshidratado en almidón de maíz y proporción residuos de piña para obtener una botana extrudida lista para comer.
3. Estudiar el efecto de la temperatura de extrusión, contenido de humedad y la proporción de suero de leche dulce deshidratado en almidón de maíz y proporción residuos de piña sobre los parámetros de proceso (Tiempo de residencia, torque, presión y energía mecánica específica).
4. Estudiar el efecto de la temperatura de extrusión, contenido de humedad y la proporción de suero de leche dulce deshidratado en almidón de maíz y proporción de residuos de piña sobre índice de expansión, propiedades funcionales (índice de absorción de agua é índice de solubilidad en agua), densidad aparente, textura, color (L^* , a^* , b^* , C^* , h° y ΔE) y su macroestructura.
5. Evaluar la aceptación de las botanas obtenidas y realizar la optimización numérica del proceso de extrusión.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materias primas.

El residuo de piña (*Ananas comosus* L.) fue proporcionado por la procesadora Santa Mónica S. A. De C.V. ubicada en Loma Bonita Oaxaca. El suero de leche dulce fue de la marca Eagle pass (Grado "A" Eagle pass LLC 136 Anthony Dr. Suite B Anthony. Num 8802, Nuevo México, USA) y el almidón utilizados fue de la marca IMSA (Industrializadora de maíz. S. A. DE C.V. Tlalnepantla de Baz, Estado de México).

6.2 Acondicionamiento del residuo agroindustrial de piña.

Al residuo de piña se le realizó un pretratamiento para la eliminación de azúcares libres solubles totales presentes en la muestra fueron extraídos con etanol 80% con una relación 1:1 (p/v) posteriormente se lavó dos veces con agua destilada a 30 °C (Shiau et al., 2015; Martínez et al., 2012) y secada en un secador de charolas a 65 °C/8 h. y molido un molino para café (Marca KRUPS, modelo GX410011, México) y pasado en una malla del # 30 (0.59 mm) y almacenadas en bolsas al vacío.

6.3 Preparación de las mezclas.

Las tres materias primas se mezclaron en proporciones establecidas por el diseño experimental. Donde se utilizaron diferentes proporciones de las materias primas el suero de leche dulce deshidratado (0 a 59.5 g/100 g), el residuo de piña (0 a 30 g/100 g) y almidón de maíz (25.5 a 85 g/100 g) esta mezcla se acondicionó a diferentes contenido de humedad (18 a 25 g/100 g), el agua añadida se mezcló y distribuyó uniformemente, las mezclas resultantes fueron envasadas en bolsos de plástico selladas y refrigeradas por 12 h para garantizar homogeneidad y dispersión

del agua en toda la masa antes de la extrusión (Leyva-Corral et al., 2016, Da Silva et al., 2014).

6.4 Caracterización fisicoquímica de las harinas y productos extrudidos.

6.4.1 pH

El pH fue determinado usando un potenciómetro (Thermo Scientific Inc., Modelo Orion Star A211 pH/mV RmV[®], USA), un gramo de harina se mezcló con 10 mL de agua destinada a 25 °C. El electrodo del pH se sumergió en la mezcla, se observó la lectura una vez equilibrado (Pensamiento-Niño et al., 2018).

6.4.2 Color

El color se determinó mediante un Hunter Laboratorio tristimulus colorímetro (UltraScan-VIS, Hunter laboratorio, Model USVIS1347, Hunter Asociación de laboratorios, Inc., Reston, Virginia, USA). Se obtuvieron los valores L^* (Luminosidad), a^* (cromaticidad rojo-verde) y b^* (cromaticidad amarilla/azul), a partir de los cuales se calcularon los valores de Cromaticidad (C^*) El valor para C^* representa la intensidad del color (Ec. 1), ángulo Hue (h°) (Ec. 2), la diferencia total de color (ΔE) (Ec. 3) (Navarro-cortez et al., 2016).

$$C^* = ((a^* + (b^*)) 0.5 \quad (\text{Ec.1})$$

$$h^\circ = \arctan (b^*/a^*) \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\Delta E = [(L_s - L)^2 + (a_s - a)^2 + (b_s + b)^2]^{1/2} \quad (\text{Ec. 3})$$

6.4.3 Análisis químico proximal (AQP).

Se utilizaron métodos de la AOAC (2005) analizando: humedad (925.10), cenizas (923.03), proteínas (920.87), grasas (920.39) y fibra (962.09). El contenido de carbohidratos totales fue calculado por diferencia, todas las determinaciones se realizaron por triplicado para las materias primas y productos extrudidos.

6.5 Caracterización del proceso de extrusión.

El proceso de extrusión se realizó utilizando un extrusor de laboratorio (Extruder 19/25DN, Model 832005.007, Brabender - GmbH y Co. KG, Germany) de un sólo tornillo con una longitud de 428 mm y 19 mm de diámetro de la zona de barrido del extrusor, y una relación de compresión de 3:1. Se utilizó una boquilla circular de 4 mm de diámetro interno. El extrusor cuenta con cuatro zonas de calentamiento (zona 1) a 50 °C, (zona 2) a 80 °C y (zona 3) a 100 °C y la (zona 4) varió la temperatura según el diseño experimental 120 – 180 °C, La velocidad del tornillo 200 rpm mantuvieron constantes y la alimentación a 30 g/s.



Figura 13. Fotografía del extrusor de tornillo simple.

6.5.1 Variables del proceso de extrusión.

6.5.1.1 Torque (T_0).

Se determinó leyendo directamente desde el panel de operación del extrusor durante las corridas de extrusión de acuerdo con Iwe et al. (2001). Fueron registradas tres lecturas para cada ejecución, excepto cuando el torque era difícil de monitorear desde el panel. Los valores medios del torque fueron expresados en Nm/s.

6.5.1.2 Tiempo de residencia (TR).

El tiempo de residencia se determinó durante la extrusión según lo informado por Iwe et al. (2001). Se introduce un color rojo en el puerto de alimentación y el tiempo necesario para que el color apareciera por primera vez en la apertura del dado se registró como TR. Fueron registradas tres determinaciones para cada corrida.

6.5.1.3 Energía mecánica específica (EME).

La energía mecánica específica (EME) (J/g) es definida, como la energía total requerida. Se calculó según la siguiente ecuación 4 (Rodríguez-Miranda et al., 2012; Pensamiento-Niño et al., 2018).

$$EME = \frac{\Omega \times \omega \times 60}{m_{feed}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

EME: Consumo de energía mecánica específica (J/g).

Ω = Torque neto ejercido sobre el extrusor (N-m).

ω = Velocidad angular del tornillo (radianes/s).

M_{feed} = Flujo total (g/min).

6.6 Caracterización de los productos extrudidos.

6.6.1 Índice de expansión (IE).

El índice de expansión (IE) se calculó con la medida del diámetro de 10 mediciones al aleatorias con un Vernier (Science Purchase, 0604CAL6, USA) de los productos extrudidos sobre el diámetro interno del dado de salida (Rodríguez-Miranda et al., 2014; Alam et al., 2016)

6.6.2 Densidad aparente (DA).

La densidad aparente se determinó de acuerdo con la técnica Rodríguez-Miranda et al. (2014) se midió el diámetro y la longitud de muestras aleatoriamente posteriormente se pesó cada extrudido para finalmente determinar la densidad usando la ecuación 5 y los resultados fueron expresados en g/cm³.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{Pe}{\pi(d/2)^2l} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

Diámetro d (cm)

Longitud L (cm)

Peso de extrudidos Pe (g)

6.6.3 Macroestructura.

Se tomaron fotografías a los extrudidos para relacionar el índice de expansión y los parámetros del proceso de extrusión que se tiene en la cantidad y el tamaño de burbujas de aire formada en los extrudido las cuales fueron observadas con una Cámara marca Samsung de 12 mega pixeles a una distancia de 5 cm sin flash.

6.6.4 Análisis de textura (Dureza).

La dureza (N) se determinó midiendo la fuerza máxima para romper las muestras extrudidas (70 mm de largo) con un texturómetro universal (Texture Analyser TA-XT plus, Stable Micro Systems). Utilizando una cuchilla Warner-Bratzler, se realizaron diecisiete repeticiones por cada tratamiento (Pensamiento–Niño et al., 2018).

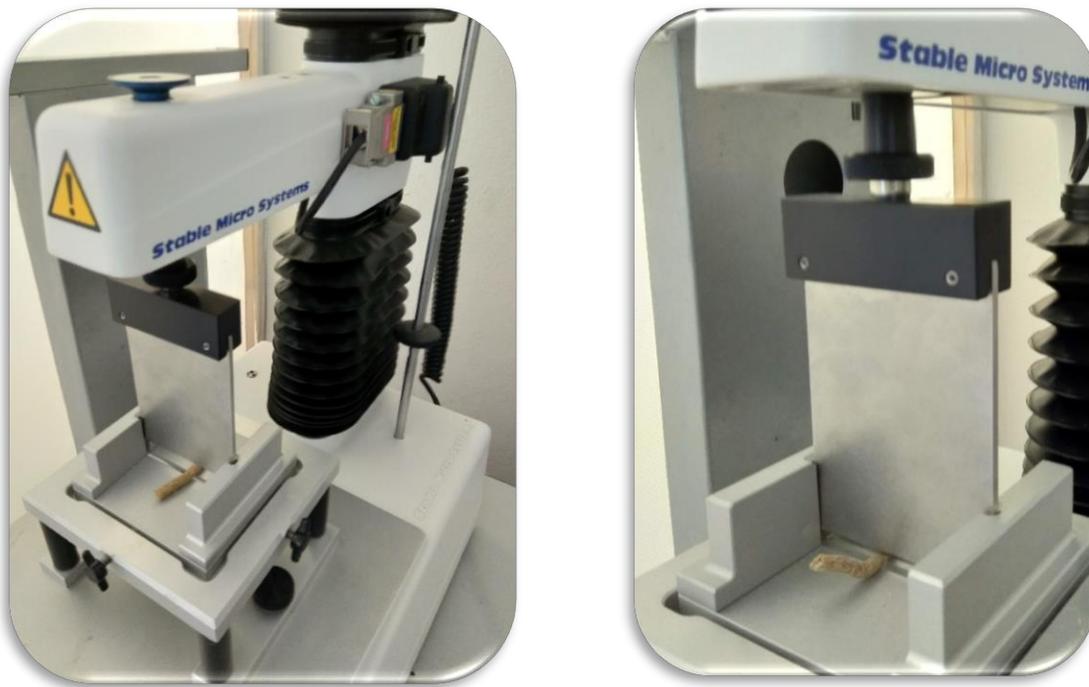


Figura 14. Fotografía del texturómetro y la cuchilla Warner-Bratzler.

6.6.5 Índice de absorción de agua e índice de solubilidad de agua

Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA), se realizaron en los productos extrudidos de acuerdo con Anderson *et al.* (1969). Se añadió agua destilada (10 mL) a 1 g de muestra, agitado en un vortex (Vortex-2 Genie, Model G-560, Scientific Industries, INC, U.S.A) durante 30 s posteriormente se centrifugó a $3500 \times g/15$ min (Centrifuge Hettich D-78532 1706-01, Model Rotina 380R, Germany). El sobrenadante se decantó en una cápsula de porcelana previamente a peso constante. IAA se calculó como el aumento de peso del sedimento obtenido después de decantar el sobrenadante con la siguiente ecuación 6. El sobrenadante se evaporó a 105°C hasta sequedad hasta peso constante (ISA) fue determinado mediante la siguiente ecuación 7. Los resultados fueron expresados como gramos de agua retenida por gramo de muestra para el IAA y para el ISA en porcentaje (Navarro Cortez *et al.*, 2016; Alam *et al.*, 2014).

$$\text{IAA} = \frac{\text{Peso del sedimento húmedo (g)}}{\text{Peso del sedimento seco (g)}} \quad \text{Ec. 6}$$

$$\% \text{ISA} = \frac{\text{Peso del sobrenadante seco (g)}}{\text{Peso de la muestra seca (g)}} \times 100 \quad \text{Ec. 7}$$

6.7 Prueba de aceptación.

Se utilizó una escala de calificación hedónica de nueve puntos para determinar aceptabilidad de botanas. Con 30 panelistas no entrenados. Se les asignó una categoría que van de (1 = "me disgusta extremadamente" a 9 = "me gusta extremadamente") a cada atributo de los 30 extrudidos obtenidos, las muestras se codificaron con tres dígitos (Peressini *et al.*, 2015; Ramirez-Navas, 2012).

6.8 Diseño experimental y análisis estadístico.

En la Tabla 8 se observa el diseño experimental central compuesto con cuatro variables independientes usando un paquete estadístico comercial (Design-Expert 7.0.0 Statease Inc., USA). Las variables independientes consideradas fueron la temperatura de extrusión (120 - 180 °C), contenido de humedad (18 - 25 g/100 g), la proporción de suero de leche dulce deshidratado en almidón de maíz (0 – 59.5 g/100 g) y la concentración del polvo del residuo de piña (0 - 30 g/100 g), manteniendo constante la velocidad de alimentación de 30 g/s y la velocidad de tornillo (200 rpm). Las variables de respuestas fueron: índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), Textura (Dureza) color (L^* , a^* , b^* C^* , h° y ΔE), pH, índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) contenido de proteína (CP), contenido de fibra (CF) y aceptación general (AG). Los resultados se analizaron mediante la metodología de superficie de respuesta utilizando el programa estadístico Statistica Versión 10.0 (StatSoft, Inc. 1984-2008, USA. Las significancias estadísticas de los coeficientes de regresión fueron analizadas por análisis de varianza (ANDEVA).

Se seleccionó el modelo polinomial de segundo orden para predecir el punto óptimo de las respuestas y expresada de la siguiente manera ecuación.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3$$

Ec. 8

Donde y representa la variable de respuesta, β_0 fue la intersección mientras que β_1 , β_2 y β_3 son términos lineales, β_{11} , β_{22} y β_{33} como condiciones cuadráticas y β_{12} , β_{13} y β_{23} como términos de interacción. X_1 , X_2 y X_3 son las variables independientes codificadas (Korkerd et al., 2016).

Tabla 8. Niveles codificados de las variables del proceso de extrusión.

Variables	Códigos	Niveles				
		- α	-1	0	+1	+ α
Temperatura (°C)	X_1	120	135	150	165	180
Humedad (g/100 g)	X_2	18	19.8	21.50	23.3	25
SLDD/AM (g/100 g)	X_3	0/100	24.5/68	29.8/55.2	35.0/42.5	59.5/10.5
RP (g/100 g)	X_4	0	7.5	15.00	22.5	30

6.9 Optimización numérica de los extrudidos obtenidos.

La optimización numérica se realizó a través de la superposición de las diferentes superficies de respuestas se utilizó para determinar el nivel óptimo de las cuatro variables independientes basada en el concepto de convivencia y deseabilidad (Pensamiento-Niño et al., 2018) de acuerdo a los máximos y mínimos encontrados, los cuales fueron: energía mecánica específica (EME) máximo índice de expansión (IE), mínima densidad aparente (DA), mínima Textura (Dureza), máximo contenido de fibra, proteína y aceptabilidad general, mismas que fueron establecidas en el programa Design Expert 7.0 (State-Ease Inc., Minneapolis, MN, USA) como valores óptimos, que deben contener los productos extrudidos.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Caracterización de las materias primas.

7.1.1 Rendimiento de la cáscara de piña.

Después del pretratamiento empleado en la cáscara de piña, se realizó el proceso de secado, se obtuvo un rendimiento del 10% este resultado menor a lo obtenido por Hernández et al. (2015), quienes reportaron un contenido de humedad del 81 - 86%, y de rendimiento 14 - 19% de sólidos totales de piña, sin embargo, es similar al valor obtenido por Sepúlveda et al. (2018) que reportaron un valor de 10%, en residuo de piña con aproximadamente el 96% de materia orgánica y el 4% de materia inorgánica. Estas diferencias pueden deberse al contenido de humedad inicial en las muestras.

7.1.2. Composición química de las materias primas.

En la Tabla 9 se observa la composición química del residuo de piña (RP), almidón de maíz (AM), suero de leche dulce deshidratado (SLDD). Se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en todos los parámetros evaluados. El mayor contenido de humedad se encontró en AM (9.26 g/100 g), seguido por el RP (5.63 g/100 g) presentando el de menor contenido de humedad el SLDD (5.45 g/100 g) estas diferencias pueden deberse al método de secado utilizado para la obtención de las materias primas. El contenido de humedad para RP fue superior a lo reportado por Selani et al. (2014) 3.77 g/100 g, esto es debido al método de secado.

Tabla 9. Composición química (base seca) del residuo de piña (RP), almidón de maíz (AM) y el suero de leche dulce deshidratado (SLDD).

Componentes (g/100 g)	RP	AM	SLDD
Proteínas (N x 6.25)	9.35 ± 0.09 ^a	N.D	10.42 ± 0.12 ^b
Lípidos	1.35 ± 0.02 ^a	0.62 ± 0.01 ^b	0.76 ± 0.01 ^c
Fibra cruda	22.66 ± 0.45 ^a	N.D	N.D

Carbohidratos totales*	63.09 ± 0.38 ^a	98.93 ± 0.06 ^b	79.44 ± 0.15 ^c
Ceniza	3.55 ± 0.01 ^a	0.49 ± 0.02 ^b	9.38 ± 0.01 ^c
Energía total (kJ/100 g)	1,263.9105 ± 1.544 ^a	1,674.8485 ± 0.171 ^b	1,529.341 ± 0.120 ^c

Los valores representan el promedio de tres determinaciones ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa ($p < 0.05$). N.D= No detectado *Calculados por diferencia.

Mientras que el contenido de humedad en AM fue menor a lo reportado por Sivoli et al. (2009) con 11.47 g/100 g sin embargo, fue mayor a lo obtenido por Ali et al. (2016) en dos variedades de AM con 6.06 y 8.45 g/100 g respectivamente, cabe señalar que el contenido de humedad del AM de este trabajo se encuentra dentro del intervalo permitido por la norma mexicana NMX-F-382-1986 >13 g/100 g. Y las diferencias dadas son por el proceso de secado y las técnicas de secado empleadas, así como a las variedades de maíz.

El contenido de humedad del SLDD fue superior a lo reportado por Yada, (2018) quién reportó 3.5 – 5 g/100 g, sin embargo, fue menor a lo obtenido por Espinosa-Dzib et al. (2012) que fue de 5.5 g/100 g estas diferencias en el contenido de humedad en SLDD puede darse al método de secado utilizado.

El mayor contenido de proteínas se encontró en SLDD (10.42 g/100 g) seguido de RP (9.35 g/100 g) y en AM no fue detectado, las diferencias dadas son debido al origen de cada materia prima.

Los valores de proteína en SLDD fue menor a lo reportado por Yada, (2018) 11 - 14.5 g/100 g esto puede deberse a las técnicas para recuperación de proteínas como pueden ser por aspersión, osmosis inversa, intercambio iónico, microfiltración y ultrafiltración (Caetano-Silva et al., 2015). Qi y Onwulatal (2011) reportaron que el método por aspersión al igual que el calentamiento puede reducir algunas propiedades de la proteína de suero de leche tales como la solubilidad de proteína, composición de proteína, calidad de proteína y la desnaturalización de la estructura globular, así como también de acuerdo con Abd El-Salam et al. (2009) menciona que existen variaciones ambientales (disponibilidad de alimentos, las horas de sol, tipo de suelo y la temperatura) inherentes en la composición de la proteína de la leche por lo que se obtiene variaciones similares en el suero obtenido de la

fabricación de queso, así como variaciones significativas en la composición de las proteínas (β -lactoglobulina, α -lactoalbumina y glicomacropéptido).

El contenido de proteínas encontrado en RP es mayor a lo reportado por Romelle et al. (2016) 5.1 g/100 g, Selani et al. (2014) 5.3 g/100 g y por Upadhyay et al. (2010) 3.3 g/100 g, esto puede ser debido a la variedad de piña, al método de secado y al contenido de bromelina, ya que, corresponde 80% de los compuestos nitrogenados (Sánchez-Hernández et al., 2015) y se encuentra en el residuo de piña en el núcleo, cáscara, corona y tallo (Upadhyay et al., 2010). El contenido de proteína de AM estudiado no fue detectado, sin embargo, Ali et al. (2016) reportaron 0.40 g/100 g para almidón de *Zea mays* L. (hibrido 1), Jiménez-Hernández et al. (2007) reportaron 0.5 g/100 g y Bello-Pérez et al. (2001) informaron 0.35 g/100 g ambos para el almidón de *Zea mays* L. Por otra parte, cabe señalar que la norma mexicana NMX-F-382-1986 permite un máximo de contenido 0.8% de proteína en AM. Dichas diferencias pueden estar relacionadas con factores agronómicos, climas y época de cosecha (Antonio-Estrada et al., 2014).

En el contenido de lípidos el mayor valor se encontró en el RP (1.35 g/100 g) seguido del SLDD (0.76 g/100 g) y con menor valor en AM (0.62 g/100 g) las diferencias pudieran deberse al origen de las materias primas y los métodos de obtención. El contenido de lípidos para RP (Tabla 9) fueron menores a lo reportado por Romelle et al. (2016) de 5.3 g/100 g, sin embargo, fue mayor a lo reportado por Selani et al. (2014) 0.61 g/100 g. El SLDD tiene un menor valor que lo obtenido por Yada, (2018) 1 - 1.5 g/100 g y Capitani et al. (2005) con 0.89 g/100 g estas diferencias pudieran deberse a un descremado del suero antes de ser obtenidas las proteínas.

El AM presentó el menor contenido de lípidos a lo reportado por Jiménez-Hernández et al. (2007) 0.68 g/100 g para almidón de *Zea mays* L., Ali et al. (2016) 0.67 g/100 g para almidón de *Zea mays* L (hibrido 1)., Dhital et al. (2011) 0.79 g/100 g, sin embargo, fue superior a lo presentado por Bello-Pérez et al. (2001) 0.19 g/100 g en almidón de *Zea mays* L, estas diferencias pueden deberse a que algunos lípidos como monoacil (grasos libres y lisofosfolípidos) se encuentran dentro de los

gránulos de almidón (Dhital et al., 2011) y debido a lo riguroso de técnica para la extracción de almidón pudiera afectar a la cantidad de lípido en el almidón.

Como se esperaba el mayor valor de fibra se encontró en el RP con 22.66 g/100 g, mientras que en el AM y SLDD no fue detectado este componente debido al método de extracción y el origen de las materias primas. El contenido de fibra en RP (Tabla 9) fue inferior a lo reportado por Ban-Koffi y Han (1990) 35.7 g/100 g en cáscara de piña y en residuo presenta Upadhyay et al. (2010) 36.6 g/100 g; Bardiya et al. (1996) 61.5 g/100 g; Larrauri et al. (1997) 70.6 g/100 g, sin embargo, fue superior a lo mencionado por Romelle et al. (2016) 14.80 g/100 g para cáscara seca de piña. Las diferencias encontradas al método empleado para determinación de fibra, así como también a la variedad y a la composición de la muestra tomada del residuo de piña.

En lo que se refiere al contenido de cenizas este componente se observó en mayor proporción en el SLDD (9.38 g/100 g) seguido del RP (3.55 g/100 g) y finalmente el menor contenido fue en el AM (0.49 g/100 g). El contenido de ceniza en el SLDD fue superior a lo reportado por Yada, (2018) con 8.2 – 8.8 g/100 g. Mientras que, Hernández et al. (2012) mencionan que el contenido ceniza en el suero de leche es elevado debido a que contiene más del 80% de los minerales de la leche, tales como, el calcio, fósforo potasio y cloruros, de los cuales se puede ver afectado su concentración como es el caso del contenido de calcio se ve influido por la época del año (Gómez *et al.*, 2005; Hernández-Rojas y Vélez-Ruiz, 2014).

El RP presentó un valor inferior de ceniza a lo obtenido por Romelle et al. (2016) 4.39 g/100 g para cáscara de piña y por Upadhyay et al. (2010) 4.1 g/100 g para residuo de piña, sin embargo, fue superior a lo reportado por Selani et al. (2014) 2.24 g/100 g en cáscara de piña, por lo que, el contenido de ceniza se encuentra dentro de lo reportado por ambos autores y las variaciones pueden darse a la composición del suelo donde fueron cultivadas. El contenido de cenizas de AM fue inferior a lo reportado por Agama-Acevedo et al. (2005) 1.2 g/100 g debido al grado de pureza (98.93%) presenta el almidón en este trabajo, sin embargo, fue superior a lo obtenido por Jiménez-Hernández et al. (2007) 0.38 g/100 g; Bello-Pérez et al. (2001) 0.12 g/100 g y Dhital et al. (2011) 0.09 g/100 g y por Ali et al. (2016) 0.20

g/100 g, las diferencias encontradas son debido al lugar de origen, ya que provienen de India, Austria y México.

El mayor contenido energético total lo obtuvo el AM 1,675 kJ/100 g posteriormente el SLDD con 1,529 kJ/100 g y finalmente el RP con 1,261 kJ/100 g las diferencia entre las materias primas puede deberse al origen de su naturaleza, así como a su composición químicas (lípidos, carbohidratos totales y proteínas). El contenido calórico AM fue mayor a lo presentado por Menezes et al. (2011) con 597 kJ/100 g para el almidón de plátano verde (*Musa acuminata*, var. Nanicão) esto puede ser debido al estado de madurez (verde o inmaduro) ya que, tiene un alto contenido de almidón resistente. En RP fue inferior a lo reportado por Menezes et al. (2011) 1,443 kJ/100 para salvado de trigo el cual es rico en fibra, pero posiblemente restos de carbohidratos eleva el contenido calórico.

7.1.3. pH y color de harina de residuo de piña (RP), suero de leche dulce deshidratado (SLDD) y almidón de maíz (AM).

Los parámetros de color y pH del RP, AM y el SLDD se muestran en la Tabla 10. presentando diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las materias primas. El SLDD presentó un pH (6.16) alcalino posteriormente el AM (5.75) y el más ácido fue el RP (4.23), estas diferencias pueden deberse al origen de cada materia prima, y al contenido de ácido láctico y otros ácidos orgánicos como el ácido cítrico, así como también por el tipo de suelo donde fueron cultivadas. El valor de pH del SLDD fue menor que lo obtenido por Dattatreya y Rankin (2006) con un pH 6.3 en suero dulce en deshidratado, pero fue mayor a lo obtenido por Hernández et al. (2012) con un pH de 6 para suero dulce, el valor obtenido del SLDD se encuentra dentro del intervalo reportado en el suero dulce (pH 6 - 6.6) debido al bajo contenido ácido láctico es debido a que se produce a partir de acción enzimática y contiene más lactosa (Hernández et al., 2012; Ramírez-Navas et al., 2013).

El pH encontrado en el AM fue superior a lo reportado por Takizawa et al. (2004) (4.9 a 5), y Jiménez-Hernández et al. (2007) (4.9), estas diferencias pueden deberse a la técnica de extracción en las cuales pueden utilizarse ácidos (Tris - ácido clorhídrico, ácido tricloroacético, metabisulfito) (Agama–Acevedo et al., 2013; Takizawa et al., 2004; Ultrilla-Coello et al., 2009), sin, embargo el intervalo aceptable de pH para almidones de maíz de acuerdo a la norma mexicana NMX-F-382-1986 se de 4.5 a 6.5 máximo.

El pH en el RP fue superior a lo reportado por Selani et al. (2014) fue de 3.86 para cáscara de piña en cambio Upadhyay et al. (2010) reporta 4.7 en residuo de piña, sin embargo, las diferencias entre los valores de acidez pueden haber sido causadas por variaciones en la madurez de la fruta, ya que mientras más verde tiende a ser más ácida, así como también influye directamente la acidez del suelo. Hernández-Sánchez et al. (2015) reporta un suelo ácido (pH 4.78) para la zona de cultivo de piña de Loma Bonita Oaxaca, por lo tanto, es conveniente subrayar que el RP utilizado en este trabajo es proveniente de esta zona de cultivo.

Tabla 10. Parámetros de Color y pH del residuo de piña (RP), almidón de maíz (AM) y el suero de leche dulce deshidratado (SLDD).

Parámetros	RP	AM	SLDD
pH	4.23 ± 0.00 ^a	5.75 ± 0.09 ^b	6.16 ± 0.03 ^c
Color	<i>L</i> [*]	64.45 ± 0.26 ^a	86.54 ± 2.08 ^b
	<i>a</i> [*]	1.77 ± 0.31 ^c	- 0.21 ± 0.00 ^b
	<i>b</i> [*]	20.35 ± 0.21 ^c	1.62 ± 0.07 ^a
	<i>C</i> [*]	20.43 ± 0.23 ^c	1.64 ± 0.07 ^a
	<i>h</i> [°]	85.05 ± 0.80 ^c	82.71 ± 0.25 ^b
	ΔE	38.80 ± 0.28 ^c	11.03 ± 2.05 ^a

Los valores representan el promedio de tres determinaciones ± desviación estándar. ^{a-c-b} Letras diferentes en la misma fila indican diferencia significativa ($p < 0.05$).

Los parámetros de color evaluados para las tres materias primas fueron significativamente ($p < 0.05$) (Tabla 10). El SLDD obtuvo el valor más alto de *L*^{*} (88.89), seguido por el AM (86.54) y finalmente el RP (64.45).

El parámetro de L^* del SLDD fue superior (88.89) a lo reportado Dattatreya y Rankin (2006) (74.837), esto podría deberse al método de secado, por ejemplo: mediante evaporador de efecto simple y posteriormente un tratamiento térmico, cabe señalar que el aumento de temperatura se pierde luminosidad. El AM (86.54) fue superior a lo obtenido por Ali et al. (2016) con 80.72 y el RP (64.45) el valor obtenido de L^* fue inferior a lo obtenido por Selani et al. (2014) con un valor de 75.63, esta diferencia es dada por el método de secado, ya que, fue liofizada por cual no recibió tratamiento térmico. El aumento de temperatura produce reacciones de pardeamiento y degradación de pigmentos (Oliveira *et al.*, 2018) por lo cual el RP es más oscuro, sin embargo, tiene atributos deseables para la aplicación alimentaria.

Por otro lado, los parámetros a^* el más rojizo fue el RP con 1.77 y en tonalidades verdes el AM (-0.21) y SLDD (-1.60). El RP tiende a tonalidades rojizas mientras, Selani et al. (2014) reportó -0.10 con tendencia hacia verde, el AM en tonalidades verdes este valor fue similar a lo obtenido por Ali et al. (2016) -0.25 y el SLDD con tonalidad verde. El valor b^* el RP (20.35) y SLDD (16.62) presentó la más alta tonalidad amarilla mientras que AM (1.62) fue las más baja hacia tonalidad azul.

Como se puede observar el valor b^* en el RP tuvo tendencias amarillas las cuales son inferiores a lo obtenido por Selani et al. (2014) con 26.91 estas diferencias obtenidas podrían deberse al estado de madurez, el SLDD ($b^* = 6.62$) la tendencia hacia tonalidades ligeramente amarillas puede ser debido al método de secado (aspersión) de la materia prima, ya que el procesamiento a altas temperaturas así como la presencia de azúcares y proteínas (aminoácidos), promueven reacciones no enzimáticas (reacción de Maillard) tal como lo menciona Teba et al. (2017) en suero de leche.

y el valor del AM es inferior a lo obtenido por Ali et al. (2016) con 3.47 con tonalidades amarillas. Para el parámetro de C^* que mide la saturación de color, el

mayor valor lo obtuvo el RP 20.43 seguido de SLDD 16.70 y finalmente AM con 1.62.

Para el h° , los valores para las materias primas colocándolos en el cuadrante de amarillamiento para las tres materias primas al AM (82.71), SLDD (84.51) y con una tendencia hacia el cuadrante verde el RP (85.05). Para la diferencia total de color ΔE en el RP (38.80) fue superior al SLDD (18.73) y AM (11.03). Es importante mencionar que actualmente no existen reportes sobre parámetros de color (C^* , h° y ΔE) para RP, AM y SLDD.

7.2 . Efecto de la temperatura, contenido de humedad, SLDD /AM y RP sobre el proceso de extrusión.

7.2.1. Tiempo de residencia (TR).

El TR es el tiempo de duración de los alimentos durante el proceso de extrusión, este parámetro vincula las variables del proceso, como velocidad del tornillo y contenido de humedad (Rodríguez-Miranda et al., 2012). En la Tabla 11 se muestra los valores de los parámetros de proceso evaluados. El TR encontrado oscilo de entre 12.50 a 45.70 g/min (Tabla 11). El menor TR (12.50 g/min) fue en el tratamiento (Tto) 3 obtenido a 7.5 g/100 g RP y 16.2 g/100 g de SLDD/AM, con contenido de humedad de 23.3% a una temperatura de extrusión de 135 °C. El modelo de regresión ajustada mostro un coeficiente de determinación $R^2 = 0.934$ (Tabla 12). El modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indicó la validez de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación (9) de regresión para predecir el TR a cualquier concentración de RP, SLDD/AM, contenido de humedad y temperatura dentro de los intervalos establecidos en el diseño está dada por:

$$\begin{aligned} \text{TR} = & \mathbf{20.211} + \mathbf{1.437 X_1} - 2.129 X_2 + \mathbf{12.159 X_3} + \mathbf{2.708 X_4} + 1.083 X_1^2 + \mathbf{4.939 X_2^2} \\ & + \mathbf{15.372 X_3^2} + 0.971 X_4^2 - 0.927 X_1X_2 - 0.014 X_1X_3 + \mathbf{2.429 X_1X_4} + \mathbf{12.559 X_2X_3} + \\ & 0.772 X_2X_4 + \mathbf{4.017 X_3X_4} \end{aligned}$$

(Ec. 9)

El coeficiente de regresión de TR (Tabla 12) se puede observar el efecto lineal para la temperatura de extrusión (X_1), SLDD/AM (X_3) y RP (X_4) presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) positivo, mientras que en su término cuadrático presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) positivo para SLDD (X_3^2) y RP (X_4^2). Se observó un efecto significativo ($p < 0.05$) positivo para la interacción temperatura de extrusión - RP (X_1X_4), contenido de humedad - SLDD/AM (X_2X_3), SLDD/AM - RP (X_3X_4) (Tabla 12). Esto indica que el aumento de temperatura entre 130 – 150 °C y contenido de SLDD/AM (0 – 50%) disminuye el TR, mientras que también el aumento del contenido de SLDD/AM (50 – 60%) aumenta el TR (Figura 15 a), sin embargo, el aumento RP (0 – 30%) y la temperatura de extrusión (120 - 180 °C) disminuye el TR, al mismo tiempo el elevado de contenido de RP (25 – 30%) y temperatura (170 – 180 °C) aumenta el TR (Figura 15 b).

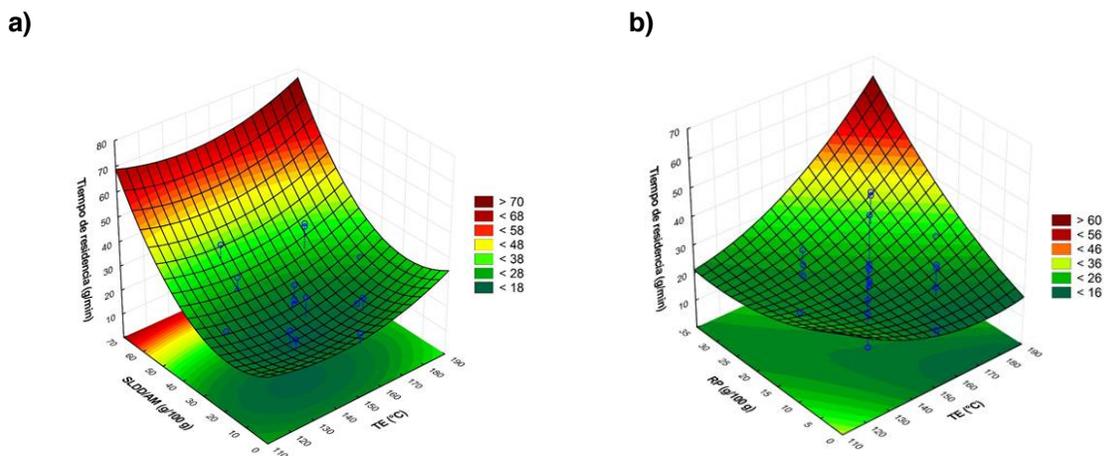


Figura 15. Tiempo de residencia (TR) durante el proceso de extrusión con el efecto del **a)** Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE), **b)** Residuo de piña (RP) y temperatura de extrusión (TE).

Onwulata et al. (2010) menciona que la presencia de proteína carece de agua debido a la competencia por el agua entre el almidón y las proteínas por lo que hay una limitada gelatinización del almidón y debido a esto hay un incremento en el TR

(Figura 15 a), también es importante mencionar que la limitada gelatinización tiene efecto en reducir el IAA (Figura 22) (Brnčić et al., 2011) debido a que la gelatinización del almidón aumenta la absorción de agua. Por otra parte, la fibra tiene la capacidad de absorción de agua reduciendo el uso para la hidratación del almidón de maíz que probablemente promueva la viscosidad de la mezcla (Selani et al., 2014). La viscosidad aumenta con una mayor concentración de fibra, pero puede disminuir con la temperatura (Elleuch et al., 2011) porque en elevadas concentraciones de RP a requerir una mayor entrada de energía mecánica en el proceso por lo que el TR será mayor como se puede observar en la (Figura 15 b).

Tabla 11. Parámetros del proceso de extrusión de los productos extrudido

Tto	Parámetros			
	TR (g/min)	Torque (N/m)	P (N/m ²)	EME (J/g)
1	24.47 ± 0.32	9.57 ± 0.29	42.06 ± 4.83	495.04 ± 14.94
2	22.44 ± 0.30	8.13 ± 0.15	57.92 ± 2.76	452.05 ± 8.49
3	12.50 ± 0.07	5.90 ± 1.10	31.95 ± 16.38	591.13 ± 110.21
4	17.33 ± 0.15	5.07 ± 0.15	18.85 ± 3.47	365.60 ± 11.02
5	29.37 ± 0.33	3.80 ± 0.44	13.10 ± 10.02	163.68 ± 18.77
6	29.37 ± 0.24	3.90 ± 0.36	30.11 ± 1.05	166.07 ± 15.35
7	40.59 ± 0.04	4.40 ± 0.72	30.11 ± 1.05	136.31 ± 22.34
8	30.43 ± 0.02	2.97 ± 0.31	26.43 ± 9.26	122.47 ± 12.61
9	22.38 ± 0.21	10.10 ± 0.53	201.56 ± 22.91	570.13 ± 29.87
10	26.37 ± 0.09	9.23 ± 0.68	25.97 ± 11.15	439.07 ± 32.37
11	15.48 ± 0.05	5.73 ± 0.25	8.27 ± 4.31	463.71 ± 20.35
12	19.50 ± 0.07	5.90 ± 0.20	19.08 ± 9.90	381.03 ± 12.92
13	26.31 ± 0.02	4.80 ± 0.36	33.78 ± 6.32	130.72 ± 2.31
14	40.25 ± 0.18	4.83 ± 0.95	20.22 ± 13.45	151.29 ± 29.59
15	31.58 ± 0.18	3.43 ± 0.25	23.21 ± 3.26	137.06 ± 10.05
16	41.53 ± 0.26	4.33 ± 0.15	11.95 ± 7.04	131.59 ± 4.64
17	22.60 ± 0.05	4.57 ± 0.21	30.11 ± 3.80	254.31 ± 11.59
18	27.66 ± 0.44	3.97 ± 0.50	27.81 ± 12.53	178.57 ± 22.66
19	28.60 ± 0.21	6.43 ± 0.38	42.06 ± 2.76	283.82 ± 16.70
20	22.71 ± 0.23	4.07 ± 0.21	9.42 ± 2.22	223.71 ± 11.45
21	26.66 ± 0.27	10.30 ± 0.98	87.79 ± 5.08	488.48 ± 46.71
22	45.70 ± 0.10	4.13 ± 0.25	4.37 ± 0.40	113.51 ± 6.91

23	20.77 ± 0.16	5.47 ± 0.15	32.64 ± 1.44	329.34 ± 9.20
24	26.67 ± 0.43	5.23 ± 0.35	30.57 ± 3.26	244.31 ± 16.39
25	20.26 ± 0.05	5.07 ± 0.23	23.21 ± 0.80	314.71 ± 14.34
26	20.67 ± 0.00	4.80 ± 0.20	11.26 ± 3.40	291.86 ± 12.16
27	19.68 ± 0.17	4.47 ± 0.15	12.41 ± 4.52	286.55 ± 9.80
28	19.85 ± 0.10	4.43 ± 0.35	14.71 ± 2.79	281.41 ± 22.29
29	20.42 ± 0.26	4.47 ± 0.15	12.41 ± 1.19	276.87 ± 9.47
30	20.58 ± 0.11	4.90 ± 0.20	17.70 ± 4.84	298.25 ± 12.17

Los valores representan el promedio de tres determinaciones ± desviación estándar. Tto = Tratamiento, TR = Tiempo de residencia, P = Presión, EME = Energía mecánica específica.

Tabla 12. Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple del proceso de extrusión de productos extrudidos.

Coeficientes	Respuestas			
	TR	Torque	P	EME
Intercepto	20.211*	4.716*	15.588	292.641*
Lineal	X_1	1.437*	-0.194	-7.654
	X_2	-2.129	-1.789*	-26.819*
	X_3	12.159*	-3.345*	-33.798*
	X_4	2.708*	-0.039	1.949
Cuadrático	X_1^2	1.083	-0.065	4.120
	X_2^2	4.939*	0.712	13.291
	X_3^2	15.372*	2.628*	32.769
	X_4^2	0.971	0.200	3.446
Interacciones	X_1X_2	-0.927	0.116	17.186
	X_1X_3	-0.014	0.315	17.361
	X_1X_4	2.429*	0.264	-11.398
	X_2X_3	12.559*	3.034*	57.936
	X_2X_4	0.772	-0.028	-17.448
	X_3X_4	4.017*	0.179	-12.076
R²	0.934	0.962	0.685	0.912

*Los numero en negrita indican coeficientes significativos ($p < 0.05$). X_1 = Temperatura de extrusión (TE); X_2 = Contenido de humedad (CH); X_3 = Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM); X_4 = Residuo de piña (RP); TR = Tiempo de residencia; P = Presión; EME = Energía mecánica específica.

7.2.2. Torque (N/m).

El torque es requerido para girar el tornillo de extrusión está relacionado con la velocidad del extrusor, llenado, y la viscosidad del material alimenticio en el canal del tornillo (Iwe et al., 2001). En la Tabla 11 se muestran los valores de torque (N/m) que oscilan 2.97 a 10 (N/m), el menor torque (2.97 N/m) correspondiente al Tto 8 obtenido a 22.5 g/100 g RP y 40.7 g/100 g SLDD/AM con una humedad de 19.8 g/100 g y una temperatura 135 °C. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales del torque mostró un valor del coeficiente de determinación $R^2 = 0.962$ (Tabla 12) del modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indicó la validez de la ecuación 10 para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para torque está dada por:

$$\text{Torque} = 4.716 - 0.194 X_1 - 1.789 X_2 - 3.345 X_3 - 0.039 X_4 - 0.06 X_1^2 + 0.712 X_2^2 + 2.628 X_3^2 + 0.200 X_4^2 + 0.116 X_1 X_2 + 0.315 X_1 X_3 + 0.264 X_1 X_4 + 3.034 X_2 X_3 - 0.028 X_2 X_4 + 0.179 X_3 X_4$$

(Ec. 10)

El coeficiente de regresión de torque muestra (Tabla 12) que el contenido de humedad (X_2) y SLDD/AM (X_3) presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) negativo en termino lineal, sin embargo, en término cuadrático presentó efecto significativo ($p < 0.05$) positivo el SLDD/AM (X_3^2) y en interacciones que presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) el contenido de humedad y SLDD/AM ($X_2 X_3$). Esto indica que el contenido de humedad entre 18 – 21 g/100 g aumentaron el torque (Figura 16), sin embargo, las elevadas temperaturas y el contenido de SLDD/AM entre 30 – 60 g/100 g favorece a disminuir el torque.

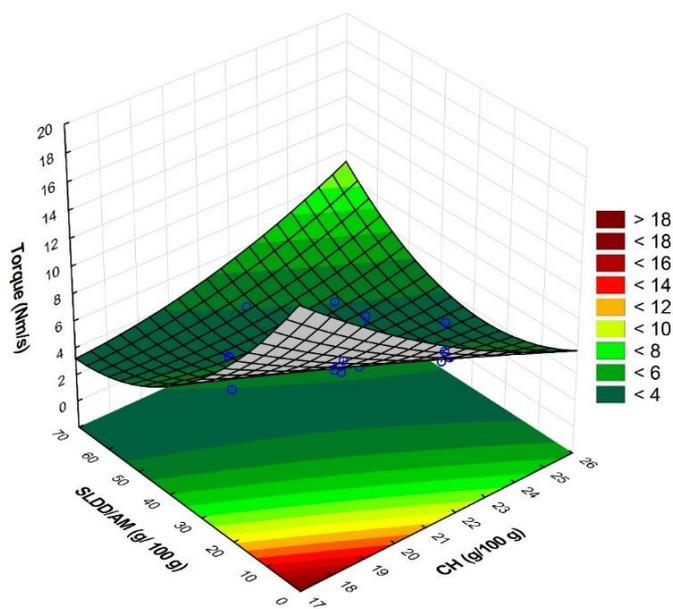


Figura 16. Efecto del contenido de humedad (CH) y el suero de leche dulce deshidratado/ almidón de maíz (SLDD/AM) sobre el torque en el proceso de extrusión.

El alto contenido de humedad, el SLDD/AM por el contenido de azúcares o carbohidratos de bajo peso molecular (lactosa, D-glucosa) así como las proteínas, fibra y la grasa, los cuales actúan como diluyentes y la temperatura elevada favorece a la disminución del torque, esto pudiera deberse a la viscosidad de la muestra ya que mientras más fría sea la mezcla será mayor su viscosidad, Por lo tanto, el aumento de temperatura y de SLDD/AM-contenido de humedad provoca una reducción de la viscosidad del producto debido a esto la disminución del torque, así como también puede disminuir la presión y la EME (Brnčić et al., 2011; Navale et al., 2015; Allen et al., 2007).

7.2.3. Presión (N/m²).

El modelo de regresión ajustada a los resultados experimentales de P (N/m²) mostró un valor del coeficiente de relación $R^2 = 0.685$ (Tabla 12) del modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación 11 para el modelo de regresión para presión a cualquier

concentración de RP, SLDD/AM, contenido de humedad y temperatura dentro de los intervalos establecidos en el diseño está dada por:

$$\text{Presión} = 15.588 - 7.654 X_1 - 26.819 X_2 - 33.798 X_3 + 1.949 X_4 + 4.120 X_1^2 + 13.291 X_2^2 + 32.769 X_3^2 + 3.44 X_4^2 + 17.186 X_1X_2 + 17.361 X_1X_3 - 11.398 X_1X_4 + 57.936 X_2X_3 - 17.448 X_2X_4 - 12.076 X_3X_4$$

(Ec. 11)

La presión (P) encontrado osciló entre 4.37 a 201.56 N/m² (Tabla 11). El de menor P (4.37 N/m²) en el Tto 22 obtenido con 22.5 g/100 g RP y 59.5 g/100 g de SLDD/AM, con una humedad de 21.5 g/100 g a una temperatura de 150 °C. Los coeficientes de regresión de la P (N/m²) (Tabla 12) que el contenido de humedad (X₂) y el SLDD/AM (X₃) presentaron efecto significativo (*p* < 0.05) negativo en el término lineal, Esto indica el bajo contenido de humedad entre 17 – 21 g/100 g y el bajo contenido de SLDD/AM 0 – 25 g/100 g aumenta la presión hasta 200 N/m², sin embargo, el alto contenido de humedad y SLDD/AM favorece a una baja presión (Figura 17).

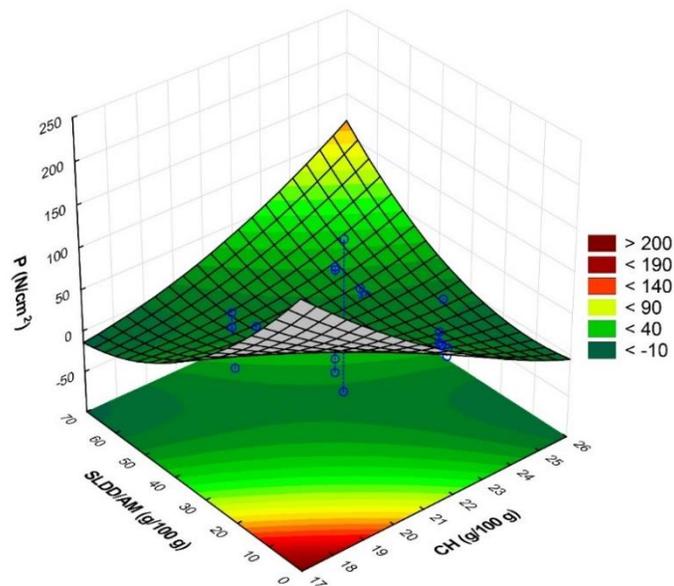


Figura 17. Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y contenido de humedad (CH) sobre la presión durante el proceso de extrusión.

Como puede observar la presión (Figura 17) y el torque (Figura 16) tienen comportamientos similares debido a que el contenido de humedad, los azúcares o carbohidratos de bajo peso molecular (lactosa, D-glucosa) así como las proteínas, fibras y grasa, actúan como diluyentes y la elevada temperatura favorece a disminuir la viscosidad la cual influye en todos los parámetros del proceso de extrusión como son el torque, presión y EME (Brnčić et al., 2011; Navale et al., 2015; Allen et al., 2007), por lo que, al disminuir el SLDD/AM y el contenido de humedad aumentó la presión debido a que los componentes que favorecen la viscosidad disminuyen, por lo cual aumenta la viscosidad y afecta los parámetros del proceso.

7.2.4. Energía mecánica específica (EME).

La EME (J/g), definida, como la energía mecánica total requerida para obtener 1 g de producto extrudido (Pensamiento-Niño et al., 2018; Navale et al., 2015). El modelo de regresión ajustada a los resultados experimentales de EME (J/g) mostró un valor del coeficiente de determinación $R^2 = 0.912$ (Tabla 12) del modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación 12 para el modelo de regresión para EME a cualquier concentración de RP, SLDD/AM, contenido de humedad y temperatura dentro de los intervalos establecidos en el diseño está dada por:

$$\begin{aligned} \text{EME} = & 292.641 - 26.111 X_1 - 28.447 X_2 - 281.713 X_3 - 34.104 X_4 - 11.799 X_1^2 - 9.420 \\ & X_2^2 + 34.764 X_3^2 + 4.250 X_4^2 - 22.051 X_1 X_2 + 61.443 X_1 X_3 + 10.505 X_1 X_4 + 10.122 \\ & X_2 X_3 - 12.139 X_2 X_4 - 13.149 X_3 X_4 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 12})$$

El intervalo de la EME encontrados en esta investigación fue de 13.51 - 591.13 J/g (Tabla 11). El de menor EME fue de 13.51 J/g que correspondió al Tto 22, SLDD/AM 59.5 y RP 15 g/100 g, con un contenido de humedad de 21.5 g/100 g y una temperatura de 150 °C. Los coeficientes de regresión de la EME (Tabla 12) que la temperatura (X_1), SLDD/AM (X_3) y RP (X_4) presentaron efecto significativo ($p < 0.05$)

negativo en el término lineal. Esto indica el aumento de temperatura (120 - 180 °C) y el contenido de SLDD/AM en bajas concentraciones (0 – 35 g/100 g) incrementa la EME, sin embargo, el aumento del porcentaje de SLDD/AM (35 – 60 g/100 g) disminuye la EME (Figura 18 a) y con temperaturas de 120 - 170 °C y concentraciones de RP (0 – 15 g/100 g) aumentó la EME, sin embargo, a elevadas temperaturas y concentraciones de RP disminuyeron la EME en el proceso de extrusión (Figura 18 b).

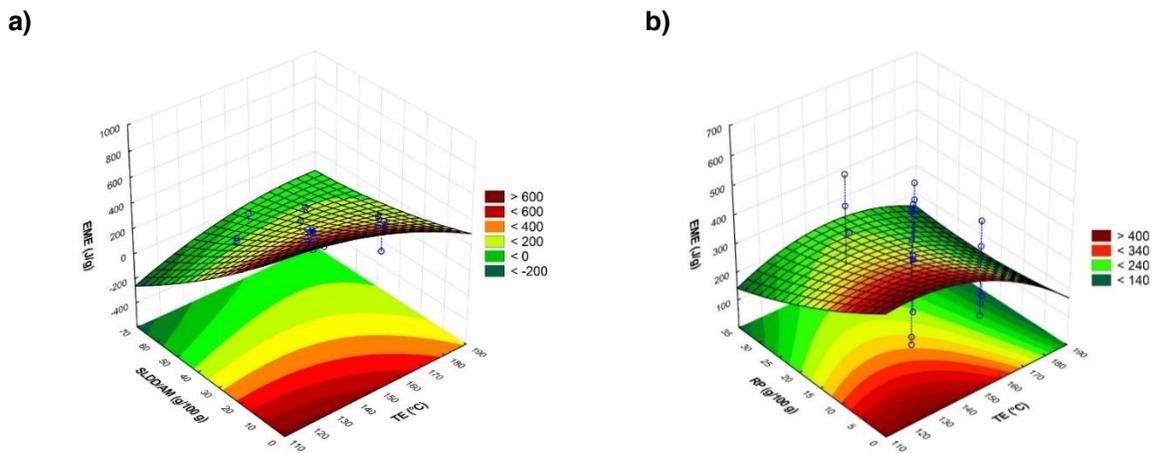


Figura 18. Energía mecánica específica (EME) utilizada durante el proceso de extrusión con el efecto del **a)** Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE), **b)** Residuo de piña (RP) y temperatura de extrusión (TE).

Navale et al. (2015) mencionan que la alta humedad y la temperatura tienen efecto lubricante debido a que disminuyen la viscosidad, por lo que, resulta en un menor uso de la EME. También cabe mencionar que la mayoría de la grasa del SLDD/AM por incremento de la temperatura pasa de sólida a líquida, la cual, actúa como diluyente (Brnčić et al., 2011), como se puede observar en la Figura 13 a el incremento de SLDD/AM disminuye la EME debido a sus componentes (lípidos, proteínas, lactosa, carbohidratos) Onwulata et al. (2011) reportaron que el aumento de proteína de suero disminuye la EME lo que da lugar a productos más suaves y crujientes, en este estudio el incremento de SLDD/AM afectó positivamente la

reducción de EME, pero sin embargo, el incremento de SLDD/AM y temperatura afectan la dureza de los extrudidos (Figura 18 a) así como también el IE se ve afectado por el incremento de SLDD/AM y bajas temperaturas (Figuras 16). Cuando se añade RP al producto disminuyó todos los parámetros de proceso esto puede ser a la presencia de diluyentes que pueden disminuir la viscosidad (Selani et al., 2014; Allen et al., 2007) como se puede observar en la (Figura 18 b).

7.3 . Caracterización fisicoquímica de los productos extrudidos de residuo de piña y suero de leche dulce deshidratado a base de almidón de maíz.

7.3.1. Macroestructuras.

En las Figuras 19 y 20, se muestran fotografías de los productos extrudidos que se obtuvieron a partir de los diferentes tratamientos y las variables del proceso de extrusión como fueron SLDDD/AM (0 – 59.5 g/100 g), RP (0 – 30 g/100 g), contenido de humedad (18 – 25 g/100 g) y temperatura de extrusión (120 – 180 °C). Por lo que, se observó una amplia variación en todas las muestras para las diferentes combinaciones experimentales como se muestra en la Tabla 13 y 17 es decir el IE osciló entre 0.73 – 1.66, DA = 1.60 – 15.05 kg/m³, textura = 25.22 – 115.97 N, IAA = 2.18 – 5.37, ISA = 14.92 – 40.68, pH = 5.29 – 6.24, L* = 58.11 – 82.92, C* = 5.91 – 8.62, ΔE = 19.88 – 49.02, contenido de proteína 1.87- 6.00 g/100 g y contenido de fibra = 1.28 – 5.15 g/100 g.



Figura 19. Total de tratamientos obtenidos en el proceso de extrusión.

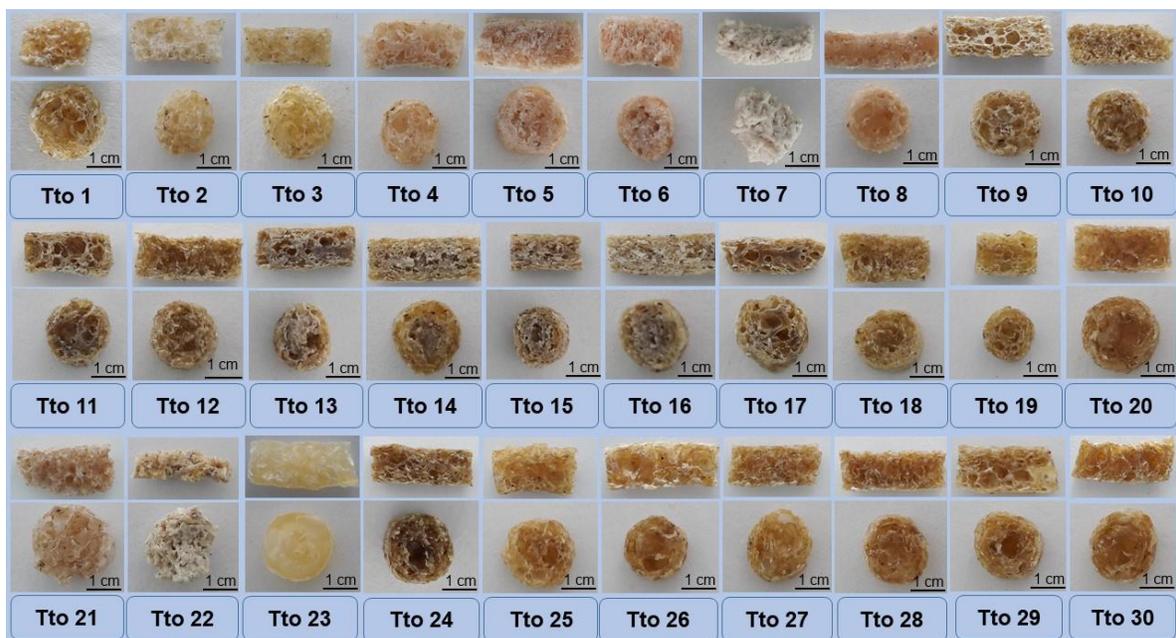


Figura 20. Macroestructura de extrudidos en cortes trasversal y tangencial.

Mientras que, en la Figura 20 se muestran los cortes transversales y tangenciales de los extrudidos obtenidos de RP y SLDD/AM, donde se pueden observar algunas afectaciones debido a la concentración de los componentes, así como de la temperatura y humedad. En el corte trasversal se aprecia el diámetro de las burbujas de aire producidas durante el proceso de extrusión, sin embargo, en el corte tangencial se aprecian la cantidad de burbujas formadas en el extrudidos, cabe señalar que la cantidad y diámetro de las burbujas se relaciona con la composición de cada extrudido, dado que, los que presentan un mayor porcentaje de almidón tuvieron una mayor cantidad de burbujas cabe señalar que los extrudidos con mayor porcentaje de RP y SLDD tendieron a tener burbujas más pequeñas esto es debido a la presencia de fibras y lactosa. Las fibras tienden a romper las paredes celulares ante las burbujas de gas. Puede expandirse a su potencial máximo disminuyendo en la relación de expansión por la adición de productos ricos en fibra (Selani et al., 2014; Robin et al., 2012; Onwulata et al., 2001; Korkerd et al., 2016).

7.3.2. Índice de expansión (IE).

El IE en botanas extrudidas es un parámetro importante de calidad, funcionalidad y aceptabilidad del producto final. En el proceso de extrusión se forman burbujas de aire que dan una estructura expandida porosa a los materiales extrudidos. La porosidad creada durante la extrusión puede ser usada para describir las propiedades de expansión de producto (Navarro-Cortez et al., 2016; Rodríguez-Miranda et al., 2014). El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales del IE mostró un valor del coeficiente de determinación $R^2 = 0.962$ (Tabla 14). El modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación 13 para el modelo de regresión para IE a cualquier concentración de RP, SLDD/AM, contenido de humedad y temperatura dentro de los intervalos establecidos en el diseño está dada por:

$$\text{IE} = 1.133 + 0.094 X_1 + 0.035 X_2 - 0.214 X_3 + 0.019 X_4 + 0.032 X_1^2 + 0.172 X_2^2 + 0.451 X_3^2 + 0.029 X_4^2 - 0.204 X_1X_2 + 0.028 X_1X_3 + 0.024 X_1X_4 + 0.063 X_2X_3 + 0.040 X_2X_4 + 0.168 X_3X_4$$

(Ec. 13)

El intervalo de IE fue de 0.73 - 166 (Tabla 13) el mayor IE obtuvo con 1.66 que corresponde al Tto 2 obtenido con SLDD/AM, 7.5 g/100 g RP, 76.3 g/100 g AM, humedad de alimentación 19.8 g/100 g y temperatura de extrusión 165 °C. El coeficiente de regresión de la IE muestra efecto significativo ($p < 0.05$) en el término lineal para la temperatura (X_1) con efecto positivo y SLDD/AM (X_3) efecto negativo (Tabla 14). En términos cuadrático presentan efecto significativo ($p < 0.05$) positivo el SLDD/AM (X_3^2) y para la interacción temperatura de extrusión-contenido de humedad (X_1X_2) presentan efecto significativo negativo ($p < 0.05$). Esto indica que el contenido de SLDD/AM en concentraciones (30 – 50 g/100 g) y la temperatura (120 – 150 °C) disminuye el IE, sin embargo, las temperaturas 120 – 180 °C y el contenido de SLDD/AM 0 – 10 g/100 g y de 50 – 60 g/100 g favorecen al aumento de IE (Figura 21).

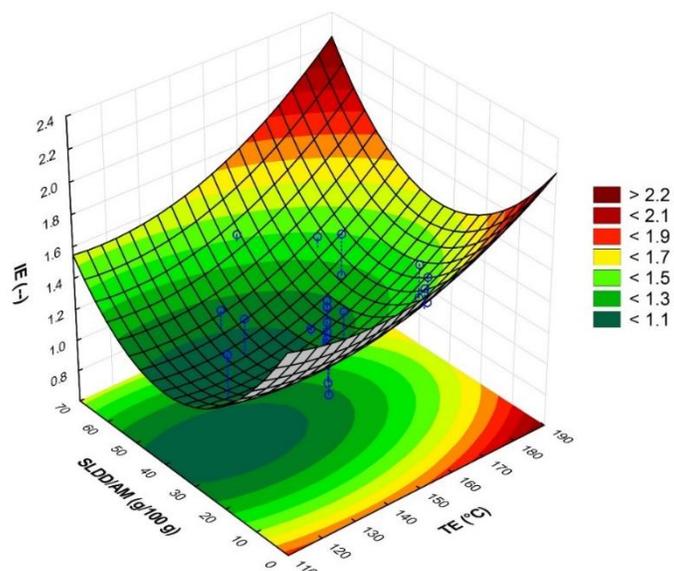


Figura 21. Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE) sobre el índice de expansión (IE).

El suero reduce el torque, presión y la temperatura, al reducir la temperatura y son más densos, el alto contenido de SLDD/AM y la baja temperatura favorecieron a una baja gelatinización debido a la competencia de agua entre el almidón y las proteínas, porque el IE es menor como se observa en la (Figura 19), así como el contenido de lactosa de las proteínas de suero puede haber contribuido a la reducción de la expansión (Onwulata et al., 2001 y 2010), es importante mencionar que en la proporción SLDD/AM cuando es menor el contenido de SLDD será mayor el contenido de AM se observa un mayor IE.

Tabla 13. Parámetros de caracterización fisicoquímica de los productos extrudidos.

Tto	IE	DA (kg/m ³)	Tex (N)	IAA (g/g)	ISA (%)	pH
1	1.34 ± 0.04	7.47 ± 0.45	43.02 ± 9.62	4.59 ± 0.10	20.07 ± 2.53	5.90 ± 0.04
2	1.66 ± 0.10	3.79 ± 0.87	25.22 ± 10.07	3.16 ± 2.74	16.23 ± 3.34	5.90 ± 0.01
3	1.40 ± 0.07	7.83 ± 0.83	44.85 ± 18.29	4.78 ± 0.14	20.17 ± 1.94	6.24 ± 0.03
4	1.45 ± 0.20	4.65 ± 1.36	27.25 ± 6.62	5.37 ± 0.24	19.02 ± 1.19	5.86 ± 0.02
5	0.73 ± 0.33	6.86 ± 0.49	92.17 ± 23.34	2.48 ± 0.15	35.62 ± 1.77	6.12 ± 0.03
6	1.43 ± 0.04	8.73 ± 2.30	70.54 ± 31.02	2.78 ± 0.28	14.92 ± 1.34	5.88 ± 0.03

7	1.24 ± 0.07	2.46 ± 0.85	27.60 ± 11.56	2.18 ± 0.06	36.73 ± 0.31	6.14 ± 0.01
8	1.13 ± 0.12	10.03 ± 2.14	67.67 ± 19.25	2.60 ± 0.07	34.15 ± 0.42	5.90 ± 0.02
9	1.17 ± 0.02	8.16 ± 0.81	42.60 ± 6.48	4.41 ± 0.13	19.20 ± 1.14	5.52 ± 0.02
10	1.46 ± 0.03	4.24 ± 0.22	43.19 ± 8.30	4.75 ± 0.04	19.67 ± 0.48	5.29 ± 0.02
11	1.23 ± 0.08	7.71 ± 1.12	46.85 ± 16.64	4.61 ± 0.04	22.19 ± 1.67	5.52 ± 0.02
12	1.61 ± 0.22	3.58 ± 1.04	44.21 ± 16.15	4.62 ± 0.29	19.02 ± 1.19	5.32 ± 0.05
13	0.90 ± 0.20	8.12 ± 1.16	101.15 ± 15.76	3.97 ± 0.38	26.34 ± 1.69	5.70 ± 0.11
14	1.55 ± 0.09	4.40 ± 0.48	76.99 ± 13.17	3.46 ± 0.16	32.10 ± 0.89	5.61 ± 0.01
15	1.28 ± 0.19	7.40 ± 1.60	87.60 ± 14.42	3.59 ± 0.10	29.06 ± 0.64	5.77 ± 0.01
16	1.28 ± 0.13	5.26 ± 1.22	67.15 ± 14.59	4.58 ± 0.40	28.09 ± 0.55	5.58 ± 0.04
17	1.35 ± 0.10	7.18 ± 1.92	93.12 ± 14.22	4.14 ± 0.45	21.23 ± 1.97	5.69 ± 0.09
18	1.32 ± 0.11	6.95 ± 1.24	69.03 ± 16.93	4.81 ± 0.46	18.62 ± 0.18	6.03 ± 0.55
19	1.36 ± 0.08	7.85 ± 0.83	70.03 ± 16.79	4.03 ± 0.05	24.63 ± 0.37	5.99 ± 0.01
20	1.40 ± 0.08	6.89 ± 0.56	115.97 ± 27.32	5.26 ± 0.21	16.42 ± 1.68	5.92 ± 0.01
21	1.36 ± 0.08	4.86 ± 0.63	34.41 ± 9.75	4.21 ± 0.41	32.21 ± 2.47	5.40 ± 0.04
22	1.45 ± 0.11	3.62 ± 0.70	25.85 ± 10.59	2.64 ± 0.18	40.68 ± 2.37	6.01 ± 0.01
23	1.15 ± 0.09	1.60 ± 0.40	116.22 ± 33.76	4.23 ± 0.69	19.93 ± 0.62	6.48 ± 0.00
24	1.40 ± 0.37	4.67 ± 2.38	58.11 ± 20.19	4.74 ± 0.23	19.10 ± 1.38	5.48 ± 0.01
25	1.13 ± 0.12	11.12 ± 3.89	92.87 ± 21.92	4.89 ± 0.19	20.28 ± 0.86	5.72 ± 0.02
26	1.26 ± 0.06	8.87 ± 1.21	101.31 ± 25.75	4.71 ± 0.61	20.21 ± 0.35	5.70 ± 0.03
27	1.15 ± 0.07	9.72 ± 1.17	108.35 ± 19.64	5.22 ± 0.12	19.84 ± 0.72	5.71 ± 0.02
28	1.07 ± 0.06	10.70 ± 1.74	110.66 ± 18.41	4.98 ± 0.53	18.49 ± 0.44	5.62 ± 0.12
29	0.99 ± 0.05	15.05 ± 1.11	107.66 ± 22.06	5.31 ± 0.07	19.05 ± 1.41	5.70 ± 0.02
30	1.20 ± 0.06	9.80 ± 1.69	90.95 ± 20.81	4.53 ± 0.06	20.74 ± 0.58	5.69 ± 0.03

Los valores representan el promedio de tres determinaciones ± desviación estándar. IE= índice de expansión, DA= densidad aparente, Tex= Textura, IAA= índice de absorción de agua, ISA=índice de solubilidad de agua, pH= potencial de hidrógeno.

Tabla 14. Coeficiente estimado por regresión lineal múltiple en la caracterización fisicoquímicas de los extrudidos obtenidos.

Coeficientes	Respuestas						
	IE	DA	Tex	IAA	ISA	pH	
Intercepto	1.133*	10.831*	102.246*	4.951*	19.749*	5.692*	
Lineal	X_1	0.094*	-0.496	-4.637	4.951	-1.325	-0.0368
	X_2	0.035	-0.326	1.002	0.439*	0.629	0.0162
	X_3	-0.214*	0.283	22.140*	-1.107*	8.083*	0.2062*
	X_4	0.019	-0.013	4.929	0.144	1.116	-0.2178*
Cuadrático	X_1^2	0.032	-0.803*	-9.369	-0.182	0.104	0.0238
	X_2^2	0.172	-2.920	-26.526	-0.562	1.159	0.1879
	X_3^2	0.451*	-5.883*	-88.354*	-1.805*	16.826*	-0.0644
	X_4^2	0.029	-1.864*	0.734	-0.146	0.070	0.654*
Interacciones	X_1X_2	-0.204*	0.950	7.967	0.417	1.271	-0.0626
	X_1X_3	0.028	2.467*	2.585	0.227	-1.650	0.0041
	X_1X_4	0.024	-0.801	-1.480	0.081	1.742	0.0088
	X_2X_3	0.063	-0.832	-24.847	-0.628	3.993	-0.0690
	X_2X_4	0.040	0.027	3.387	-0.188	-2.409	-0.0415
	X_3X_4	0.179	-12.076	4.017*	-13.149	0.168	-1.394
R²	0.962	0.685	0.934	0.912	0.749	0.769	

*Los números en negrita indican estimaciones de parámetros significativos ($p < 0.05$). X_1 = Temperatura de extrusión (TE); X_2 = Contenido de humedad (CH); X_3 = Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM); X_4 = Residuo de piña (RP); IE = índice de expansión, DA = densidad aparente, Tex = Textura, IAA = índice de absorción de agua, ISA = índice de solubilidad de agua, pH = potencial de hidrógeno.

7.3.3. Densidad aparente (DA).

La DA es una determinación comúnmente utilizada para definir características físicas y la calidad de las muestras extrudidas. La DA está directamente relacionada con el grado de expansión que se produce durante la extrusión (Navarro-Cortez et

al., 2016; Rodríguez-Miranda et al., 2014) El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de DA mostró un valor del coeficiente de correlación (R^2) = 0.685 (Tabla 14) del modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación (14) para el modelo de regresión para DA está dada por:

$$\text{DA} = 10.831 - 0.496 X_1 - 0.326 X_2 + 0.283 X_3 - 0.013 X_4 - 0.803 X_1^2 - 2.920 X_2^2 - 5.883 X_3^2 - 1.864 X_4^2 + 0.950 X_1X_2 + 2.467 X_1X_3 - 0.801 X_1X_4 - 0.832 X_2X_3 + 0.027 X_2X_4 - 1.394 X_3X_4$$

(Ec. 14)

En la Tabla 13 se muestra el intervalo de la DA entre 1.60 – 15.05 kg/m³. El de menor DA fue de 1.60 kg/m³ que corresponde al Tto 23, SLDD/AM = 35 g/100 g y RP sin, con un contenido de humedad 21.5 g/100 g y extrudido a una temperatura 150 °C. Los coeficientes de regresión de la DA (Tabla 14) las variables que presentaron efecto significativo negativo ($p < 0.05$) en termino cuadrático son temperatura (X_1^2), SLDD (X_3^2) y RP (X_4^2) y las interacciones temperatura-SLDD/AM (X_1X_3) presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) positivo. Esto indica que el incremento de temperatura de 130 – 60 °C y la concentración de 10 – 30 g/100 g de SLDD/AM aumenta la densidad de los extrudidos sin embargo las concentraciones de SLDD/AM de 0 – 10 g/100 g y altas temperaturas 170 – 180 °C y altas concentraciones de SLDD/AM 50 – 60 g/100 g y temperaturas 120 – 140 °C tiende a obtener densidades bajas en los extrudidos (Figura 22).

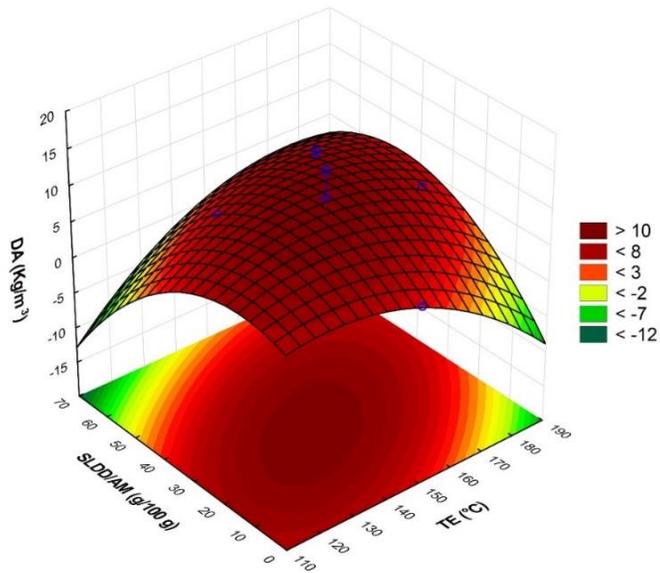


Figura 22. Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE) sobre la densidad aparente (DA).

El comportamiento encontrado en este estudio puede deberse a que la presencia de alta cantidades de proteína inhibe el crecimiento de las burbujas de aire en productos extruidos, disminuyendo así el número de burbuja de aire y aumento de la densidad del producto (Paraman et al., 2013) así como también la presencia de fibras, que tienden a romper las paredes celulares ante las burbujas de gas. Puede expandirse a su potencial máximo disminuyendo en la relación de expansión por la adición de productos ricos en fibra (Selani et al., 2014). Existen diversos trabajos que sugieren que a medida que se va incrementado el alto contenido de fibra y de proteína de suero en botanas extrudidas a base de almidón se espera que aumente la densidad del producto (Onwulata et al., 2001; Korkerd et al., 2016).

7.3.4. Textura (N).

La fuerza de rotura (dureza) de productos expandidos, particularmente en botanas expandidas, es un factor importante tanto para la industria como para el consumidor. Si el producto tiene una fuerza de rotura bajo, se romperá fácilmente durante el envasado y la distribución (Brncic et al., 2009). Por otro lado, si el producto tiene

una alta fuerza de rotura, el consumidor encontrará el producto difícil de morder y masticar. La dureza de materiales extrudidos es una percepción del ser humano y está asociada con la expansión y la estructura celular del producto. Por lo tanto, la dureza del producto extrudido es la fuerza máxima requerida para una sonda o cuchillas paralelas para penetrar en material extrudido (Navarro-Cortez et al., 2016; Dehghan-Shoar et al., 2010). El modelo de regresión mostró un valor de coeficiente de determinación de $R^2 = 0.934$ (Tabla 14) el modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación 15 para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para Tex (N) está dada por:

$$\text{Tex} = 102.246 - 4.637 X_1 + 1.002 X_2 + 22.140 X_3 + 4.929 X_4 - 9.369 X_1^2 - 26.526 X_2^2 - 88.354 X_3^2 + 0.734 X_4^2 + 7.967 X_1X_2 + 2.585 X_1X_3 - 1.480 X_1X_4 - 24.847 X_2X_3 + 3.387 X_2X_4 + 4.017 X_3X_4$$

(Ec. 15)

El intervalo de Tex (N) osciló entre 25.22 – 115.97 (N) (Tabla 13). El de menor Tex (N) fue de 25.22 que corresponde al Tto 2, SLDD/AM 16.2 g/100 g, RP 7.5 g/100 g, contenido de humedad 19.8 g/100 g y temperatura 135 °C. Los coeficientes de regresión de la Tex (N) muestran (Tabla 14) que el SLDD/AM (X_3) presenta un efecto positivo ($p < 0.05$) lineal, también el SLDD/AM (X_3^2) presenta efecto negativo ($p < 0.05$) en termino cuadrático, sin embargo, la interacción SLDD/AM - RP (X_3X_4) presenta efecto positivo ($p < 0.05$). Esto indica que el incremento de SLDD/AM del 10 a 55 g/100 g y una temperatura de 120 – 180 °C afecta la dureza de los extrudidos sin embargo el bajo contenido de SLDD/AM 0 – 10 y de 55 – 60 g/100 g y con temperatura de 120 – 130 °C y de 160 – 180 °C disminuye la dureza de los extrudidos como se puede observar en la figura 23.

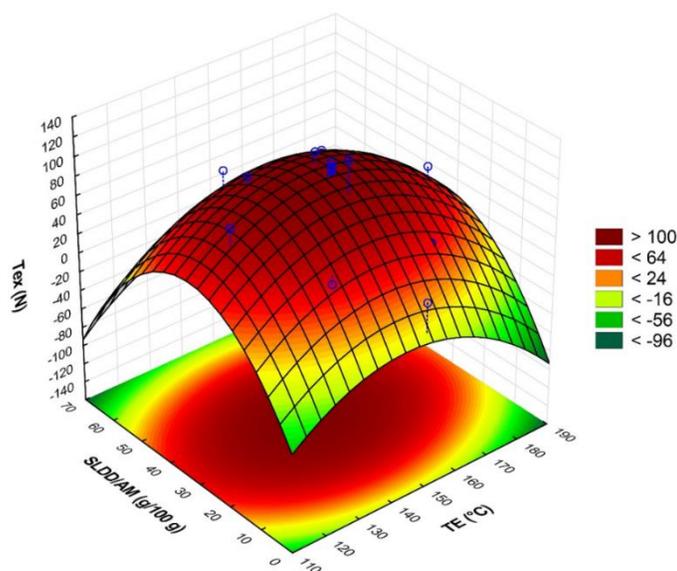


Figura 23. Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE) sobre la textura (Tex).

El aumento de SLDD/AM disminuye el IE (Figura 21) así como también aumenta la densidad aparente (Figura 22) y la textura como se observa en la (Figura 23), se puede atribuir este aumento de dureza a la lactosa del SLDD, debido a que, reduce la extensibilidad del polímero de almidón durante su expansión en el dado de salida (Korkerd et al., 2016; Onwulata et al., 2001) donde se obtiene productos menos expandidos, densos y duros. Sin embargo, en la proporción SLDD/AM en elevadas concentraciones de SLDD y bajas concentraciones de AM favorece a una disminución de la dureza esto puede deberse a no hubo una adecuada gelatinización quedando productos quebradizos. Así como, en la proporción de SLDD/AM el aumento de AM y disminución del SLDD la dureza disminuye, esto puede deberse al incremento de formación de burbujas de aire en los productos debido a la disminución de la viscosidad por la disminución del SLDD y el incremento del AM (Paraman et al., 2013; Yang et al., 2019).

7.3.5. índice de absorción de agua (IAA).

La capacidad de absorción de agua se ha atribuido generalmente a la dispersión de almidón en exceso de agua, y la dispersión se incrementa por el grado de daño en el almidón debido a la gelatinización y la fragmentación inducida por el proceso de extrusión, es decir, reducción de peso molecular de las moléculas de amilosa y amilopectina (Navarro-Cortez et al., 2016). El modelo de regresión mostró un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 0.912$ (Tabla 14) el modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación 16 para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para IAA está dada por:

$$\text{IAA} = 4.951 + 4.951 X_1 + 0.439 X_2 - 1.107 X_3 + 0.144 X_4 - 0.182 X_1^2 - 0.562 X_2^2 - 1.805 X_3^2 - 0.146 X_4^2 + 0.417 X_1X_2 + 0.227 X_1X_3 + 0.081 X_1X_4 - 0.628 X_2X_3 - 0.188 X_2X_4 + 0.230 X_3X_4$$

(Ec.16)

En la Tabla 13 se observa los intervalos de IAA que estos oscilan entre 2.18 a 5.37 g/g, el menor valor de IAA corresponde al Tto 7 obtenido con SLDD/AM = 48.6 g/100 g y RP = 7.5 g/100 g con una temperatura 135 °C y un contenido de humedad de 23.3 g/100 g. Los coeficientes de regresión de la IAA (Tabla 14) en que el contenido de humedad (X_2) presenta efecto positivo lineal ($p < 0.05$) así como el SLDD/AM (X_3) presenta efecto negativo ($p < 0.05$) lineal y cuadrático. Esto indica que el contenido de SLDD/AM de 0 a 50 g/100 g y el contenido de humedad de 18 al 25 g/100 g aumenta el IAA sin embargo el contenido de SLDD/AM del 50 – 60 g/100 g y el contenido de humedad del 18 – 25 g/100 g disminuye el IAA (Figura 24).

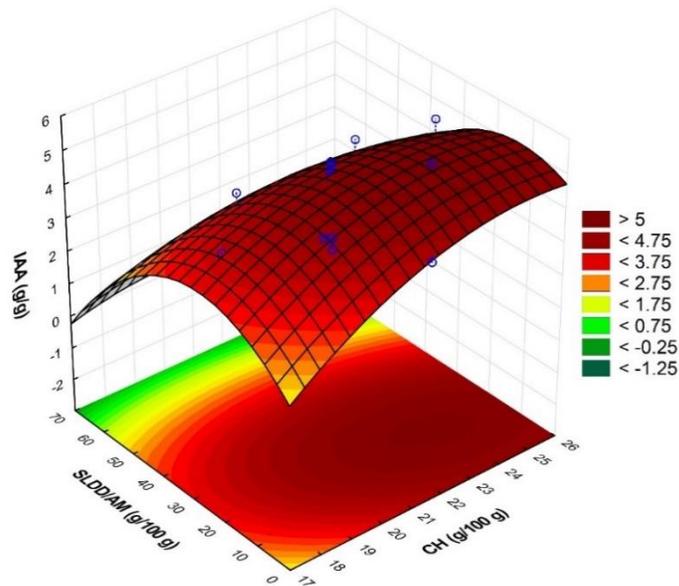


Figura 24. Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y el contenido de humedad sobre índice absorción de agua (IAA).

Como se puede observar en la Figura 24 el alto contenido de CH y en la proporción SLDD/AM en la baja concentración de SLDD favorece el aumento del IAA ya que el principal efecto de las proteínas de suero es reducir el IAA (Brcin et al., 2011) debido a la competencia por el agua entre el almidón y las proteínas (Onwulata et al., 2010) porque afecta la gelatinización durante la extrusión de la mezcla. Por otra parte, Yada et al. (2018) menciona que las altas concentraciones de contenido de humedad favorecen a la disminución de corte debido a ello disminuye el corte de las moléculas de almidón por lo que Cuj-Laines et al. (2018) mencionan que los altos valores de IAA están relacionados con la presencia de grandes fragmentos de moléculas de almidón gelatinizado. Así como también el IAA está asociado al equilibrio hidrofílico de las proteínas que puede cambiar debido al grado de desnaturalización por el proceso de extrusión, por la modifica el índice de solubilidad de las proteínas (Pensamiento-Niño et al., 2018).

7.3.6. Índice de solubilidad de agua (ISA).

El ISA es a menudo se utiliza como un indicador de la degradación de los componentes moleculares, mide el grado de conversión del almidón durante la extrusión, que es la cantidad de polisacárido soluble liberado del componente de almidón después de la extrusión (Navarro-Cortez et al., 2016). En la Tabla 13 se muestran los valores de ISA que oscilan de 14.92 a 40.68 %, de menor ISA (14.92) correspondiente al Tto 6 obtenido con SLDD/AM (48.6 g/100 g), RP (7.5 g/100 g) con un contenido de humedad 19.8 g/100 g y con una temperatura 165 °C. El modelo de regresión para mostro un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 0.749$ (Tabla 14) el modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación 17 para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para ISA está dada por:

$$\text{ISA} = 19.749 - 1.325 X_1 + 0.629 X_2 + \mathbf{8.083 X_3} + 1.116 X_4 + 0.104 X_1^2 + 1.159 X_2^2 + \mathbf{16.826 X_3^2} + 0.070 X_4^2 + 1.271 X_1X_2 - 1.650 X_1X_3 + 1.742 X_1X_4 + 3.993 X_2X_3 - 2.409 X_2X_4 + 2.218 X_3X_4$$

(Ec. 17)

Los coeficientes de regresión de la ISA (Tabla 14) en que el contenido SLDD/AM (X_3) de presenta efecto positivo ($p < 0.05$) lineal y cuadrático. Esto indica el elevado contenido de SLDD/AM 50 – 60 g/100 g y el RP 0 – 30 g/100 g favorece al incremento de ISA como se puede observar en la Figura 25.

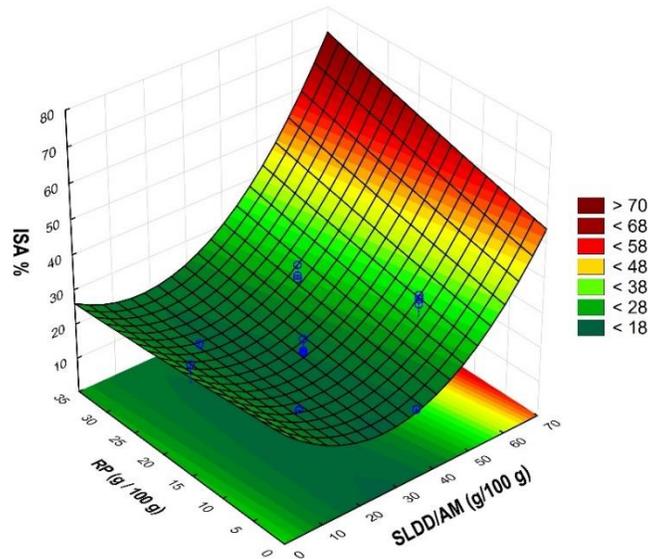


Figura 25. Efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) sobre índice solubilidad de agua (ISA).

La extrusión reduce el peso molecular de la pectina y hemicelulosa favoreciendo una mayor solubilidad en agua (Navale et al., 2015). El contenido de SLDD/AM disminuye la solubilidad después de la extrusión y esto se puede atribuir a la desnaturalización de las proteínas, ya que se ha demostrado que causa pérdida de solubilidad (Onwulata et al., 2010; Qi, y Onwulata, 2011) sin embargo, esta propiedad se usa a menudo como un indicador de la desnaturalización de la proteína del suero (Yada, 2018) y como se puede observar en la (Figura 23) y como se ha mencionado el SLDD/AM tiene efecto lineal y cuadrático positivo sobre la solubilidad esto indica que el nivel de desnaturalización del SLDD/AM no llega a afectar a los aminoácidos laterales de las proteínas las cuales interactúan con el agua (Yada, 2018) por otro lado, Kowalski et al. (2018) menciona que la degradación (dextrinización) del almidón durante la extrusión favorece a la solubilidad en agua. Sin embargo, al hablar de las interacciones proteína – almidón de acuerdo con Allen et al. (2007) y Brncic et al. (2011) explican que el intervalo de temperatura de (158 – 170 °C) favorece a la interacción de amilosa (cadenas lineales) y las proteínas de suero produciendo polímeros insolubles, al incremento del torque promueve la

desnaturalización de las proteínas de suero, exponiendo sitios de unión adicionales para las moléculas de almidón, azúcar o dextrinas u otras proteínas.

7.3.7. Potencial de hidrógeno (pH).

En la Tabla 13 se muestra los resultados obtenidos de pH los cuales oscilan de 5.29 a 6.24, el de menor pH fue el Tto 10 obtenido con 13.6 g/100 g SLDD/AM, 22.5 g/100 g RP, contenido de humedad 19.8 g/100 g y con una temperatura de 165 °C. El modelo de regresión para estas botanas mostró un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 0.769$ (Tabla 14) el modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para pH está dada por:

$$\text{pH} = 5.692 - 0.036 X_1 + 0.016 X_2 + \mathbf{0.206 X_3} - \mathbf{0.217 X_4} + 0.023 X_1^2 + 0.1879 X_2^2 - 0.064 X_3^2 + \mathbf{0.654 X_4^2} - 0.062 X_1X_2 + 0.004 X_1X_3 + 0.008 X_1X_4 - 0.069 X_2X_3 - 0.041 X_2X_4 + 0.119 X_3X_4$$

(Ec. 18)

Los coeficientes de regresión del pH muestran (Tabla 14) que el contenido de SLDD/AM (X_3) presenta efecto positivo, así como el RP (X_4) presenta efecto negativo ($p < 0.05$) en termino lineal. En término cuadrático el RP (X_4^2) presenta efecto positivo ($p < 0.05$). En la (Figura 26) se muestra la superficie de respuesta de los efectos de la concentración de SLDD/AM y RP sobre el pH, se puede observar que el incremento de RP de 15 a 30 g/100 g disminuye el pH, sin embargo, el incremento del SLDD/AM favorece al incremento de pH esto es debido al pH de cada materia prima (SLDD y RP) ya que le RP presenta un pH con una mayor acidez (4.23) debido a la presencia de ácidos orgánicos como es caso del ácido cítrico, sin embargo, el SLDD presenta un pH (6.16) es más alcalino debido al bajo contenido de ácido láctico (Hernández et al., 2012; Ramírez-Navas et al., 2013) que presenta el SLDD debido a su proceso de obtención por renina (enzimas quimosina y

pepsina). También cabe mencionar, que de acuerdo con Pensamiento-Niño et al. (2018) durante el proceso de extrusión ayudan a liberar ácidos orgánicos (ácidos grasos) lo que lleva a valores de pH más bajo en las botanas extrudidas y además que la presencia de ácidos grasos libres puede causar hidrólisis del almidón.

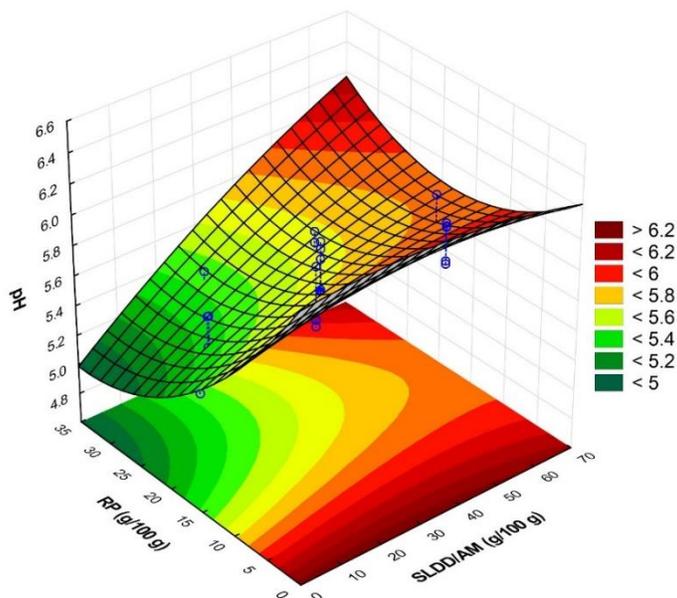


Figura 26. Efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/ almidón maíz (SLDD/AM) sobre pH.

7.4. Efecto de la temperatura de extrusión, contenido de humedad, SLDD/AM y RP sobre el de color de los productos extrudidos.

Tabla 15. Parámetros de color de los productos extrudidos.

Tto	Parámetro de color					
	L^*	a^*	b^*	C^*	h°	ΔE
1	62.75 ± 1.49	7.00 ± 0.23	23.41 ± 0.69	7.80 ± 0.14	73.38 ± 0.60	42.42 ± 1.62
2	69.79 ± 2.71	7.63 ± 0.46	22.23 ± 2.11	7.72 ± 0.39	71.10 ± 0.46	36.28 ± 3.55
3	65.43 ± 0.14	6.71 ± 0.14	22.76 ± 0.43	7.68 ± 0.09	73.57 ± 0.47	39.83 ± 0.29
4	69.97 ± 1.88	8.72 ± 0.21	20.92 ± 0.64	7.70 ± 0.14	67.38 ± 0.44	35.61 ± 1.87

5	76.72 ± 1.80	7.53 ± 0.33	17.13 ± 1.30	7.02 ± 0.27	66.27 ± 0.50	27.92 ± 2.27
6	71.57 ± 0.32	8.11 ± 0.10	19.46 ± 0.10	7.43 ± 0.03	67.38 ± 0.52	33.36 ± 0.27
7	82.92 ± 2.10	4.83 ± 0.35	12.69 ± 1.27	5.91 ± 0.33	69.21 ± 0.87	19.88 ± 2.49
8	80.13 ± 0.48	5.05 ± 0.37	14.46 ± 1.90	6.24 ± 0.42	70.78 ± 0.30	23.13 ± 1.71
9	61.38 ± 3.43	6.55 ± 0.22	21.91 ± 0.96	7.54 ± 0.18	73.37 ± 0.45	42.69 ± 3.45
10	65.99 ± 1.09	5.48 ± 0.15	20.29 ± 0.56	7.18 ± 0.12	74.91 ± 0.42	37.83 ± 0.65
11	59.00 ± 2.31	6.05 ± 0.12	20.63 ± 0.72	7.30 ± 0.13	73.65 ± 0.14	44.05 ± 1.65
12	61.46 ± 3.81	7.12 ± 0.47	23.34 ± 2.31	7.80 ± 0.41	73.08 ± 0.58	43.47 ± 4.43
13	61.10 ± 0.64	7.15 ± 0.22	23.15 ± 1.15	7.78 ± 0.18	72.84 ± 0.90	43.68 ± 0.83
14	61.79 ± 4.05	7.32 ± 0.45	24.35 ± 1.00	7.96 ± 0.24	73.32 ± 1.31	43.79 ± 3.95
15	63.36 ± 3.72	6.04 ± 0.35	19.89 ± 1.30	7.20 ± 0.28	73.16 ± 0.83	39.91 ± 3.93
16	69.49 ± 4.28	5.70 ± 0.29	20.33 ± 1.58	7.21 ± 0.30	74.36 ± 0.41	35.04 ± 4.40
17	60.12 ± 9.69	6.60 ± 0.56	22.47 ± 1.07	7.62 ± 0.29	73.71 ± 1.92	44.19 ± 8.90
18	64.30 ± 0.68	6.83 ± 0.09	24.79 ± 0.45	7.95 ± 0.08	74.61 ± 0.13	41.93 ± 0.26
19	62.49 ± 3.11	6.84 ± 0.45	24.09 ± 2.27	7.86 ± 0.40	74.18 ± 0.67	42.98 ± 3.94
20	58.11 ± 1.34	7.58 ± 0.11	23.91 ± 0.59	7.94 ± 0.10	72.41 ± 0.31	46.65 ± 0.85
21	60.54 ± 0.05	7.52 ± 0.04	19.42 ± 0.56	7.34 ± 0.09	68.84 ± 0.39	42.36 ± 0.31
22	75.87 ± 1.20	4.89 ± 0.28	16.74 ± 0.66	6.57 ± 0.18	73.77 ± 1.20	27.72 ± 1.42
23	73.46 ± 0.24	7.65 ± 0.07	24.56 ± 1.15	8.02 ± 0.16	72.68 ± 0.54	35.16 ± 0.98
24	54.91 ± 1.42	7.11 ± 0.28	23.32 ± 0.39	7.80 ± 0.12	73.07 ± 1.01	49.02 ± 1.08
25	59.47 ± 1.00	9.10 ± 0.09	27.74 ± 0.82	8.58 ± 0.11	71.82 ± 0.49	46.49 ± 1.26
26	60.72 ± 1.61	7.83 ± 0.06	26.32 ± 0.57	8.26 ± 0.08	72.44 ± 0.09	45.85 ± 1.39
27	59.44 ± 0.47	8.76 ± 0.29	28.39 ± 0.78	8.62 ± 0.11	72.85 ± 1.17	46.23 ± 0.55
28	59.95 ± 2.42	8.74 ± 0.42	25.29 ± 1.65	8.25 ± 0.30	71.96 ± 0.55	46.12 ± 0.90
29	60.55 ± 3.32	8.20 ± 0.86	25.55 ± 3.48	8.20 ± 0.63	72.34 ± 1.30	45.62 ± 4.92
30	60.01 ± 0.46	7.80 ± 0.44	25.58 ± 1.43	8.17 ± 0.19	72.00 ± 2.10	46.60 ± 1.01

Los valores representan el promedio de tres determinaciones ± desviación estándar. L^* = Luminosidad, a^* = verde-rojo; b^* = azul-amarillo; C^* = Cromaticidad; h° = Ángulo hue; ΔE = Diferencia total de color.

Tabla 16. Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple de los parámetros de color de los productos extrudidos.

Coeficientes		Respuestas					
		L^*	a^*	b^*	C^*	h°	ΔE
	Intercepto	59.950*	8.404*	26.557*	8.357*	72.310*	46.257*
Lineal	X_1	1.063	0.157	0.365	0.071	-0.052	-0.663
	X_2	0.987	-0.387	-1.375	-0.257*	-0.113	-1.607
	X_3	6.506*	-0.659*	-2.168*	-0.409*	-0.207	-6.637*
	X_4	-3.803*	-0.345*	0.285	0.001	1.190*	3.148*
	X_1^2	1.204	-0.451*	-1.042*	-0.189*	0.276	-1.511*
Cuadrático	X_2^2	3.130	-1.332*	-3.881*	-0.661*	0.234	-4.529
	X_3^2	10.775*	-2.288*	-9.863*	-1.603*	-1.965	-14.129*
	X_4^2	1.447*	-0.249	-0.752	-0.122*	0.065	-1.431*
	X_1X_2	0.412	0.350	0.320	0.095	-0.630	-0.124
Interacciones	X_1X_3	-2.711	-0.252	1.061	0.120	1.577	2.713
	X_1X_4	0.379	-0.240	0.224	-0.007	0.668	-0.261
	X_2X_3	7.040*	-2.605*	-4.036*	-0.959*	3.220	-8.462*
	X_2X_4	-1.172	0.200	0.418	0.108	-0.080	1.254
	X_3X_4	-1.928	0.211	1.540	0.267	1.070	2.456
	R²	0.897	0.827	0.871	0.893	0.590	0.892

Los números en negrita indican estimaciones de parámetros significativos ($p < 0.05$). X_1 = Temperatura de extrusión (TE); X_2 = Contenido de humedad (CH); X_3 = Suero de leche dulce deshidratado /almidón de maíz (SLDD/AM); X_4 = Residuo de piña (RP); L^ = Luminosidad, a^* = verde-rojo; b^* = azul-amarillo; C^* = Cromaticidad; h° = Ángulo hue; ΔE = Diferencia total de color

7.4.1. Luminosidad (L^*)

En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos de luminosidad (L^*) los cuales oscilaron entre 54.91 a 82.92, el de menor L^* fue el Tto 6 obtenido con 48.6 g/100 g SLDD/AM, 7.5 g/100 g RP, contenido de humedad 19.8 g/100 g y con una

temperatura de 165 °C. El modelo de regresión mostro un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 0.897$ (Tabla 16) el modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para L^* está dada por:

$$L^* = 59.950 + 1.063 X_1 + 0.987 X_2 + 6.506 X_3 - 3.803 X_4 + 1.204 X_1^2 + 3.130 X_2^2 + 10.775 X_3^2 + 1.447 X_4^2 + 0.412 X_1X_2 - 2.711 X_1X_3 + 0.379 X_1X_4 + 7.040 X_2X_3 - 1.172 X_2X_4 - 1.928 X_3X_4$$

(Ec.19)

Los coeficientes de regresión para L^* muestran (Tabla 16) que el contenido de SLDD/AM (X_3) presenta efecto positivo, así como el RP (X_4) presentó un efecto negativo ($p < 0.05$) en término lineal. En término cuadrático el SLDD/AM (X_3^2) y RP (X_4^2) presentan efecto negativo ($p < 0.05$) e interacción del contenido de humedad - SLDD/AM (X_2X_3) presentan efecto negativo ($p < 0.05$). En la Figura 27 se muestra la superficie de respuesta de los efectos del RP y SLDD/AM sobre la L^* . El incremento de RP disminuye la luminosidad en productos con contenido de 20 – 30 g/100 g de RP sin embargo las elevadas 40 – 60 g/100 g concentraciones de SLDD/AM favorecen al incremento de luminosidad en los productos obtenidos.

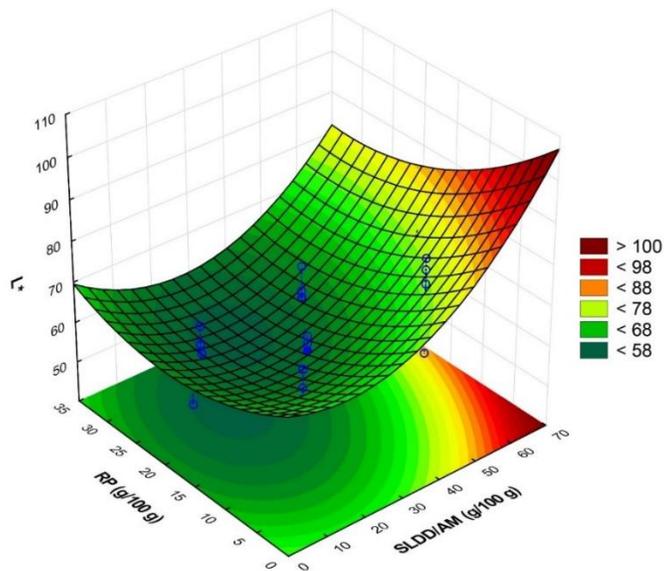


Figura 27. Efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado /almidón de maíz (SLDD/AM) sobre luminosidad (L^*).

La elevada concentración de RP y la baja concentración de SLDD/AM afecto la L^* esto puede ser debido al enrojecimiento que presenta reacciones de pardeamiento, tales como Maillard y la caramelización, promovidos por la presencia de azúcar, aminos, temperaturas elevadas y una baja humedad (Selani et al., 2014) de acuerdo con Teba et al. (2017) como anteriormente se mencionó el principal cambio de color se puede deber a las reacciones de Maillard que se divide en tres etapas: en la etapa inicial, hay una reacción entre reducir un azúcar y aminos que dan como resultados productos incoloros; intermedio lo que resulta productos incoloros o ligeramente amarillos y en la última etapa son productos de colores intensos. Por la presencia de factores como elevadas temperaturas y bajos contenidos de humedad ubicaran al producto en una de estas etapas de la reacción de Maillard.

7.4.2 Parámetro a^* .

En la Tabla 15 se muestra los resultados obtenidos para a^* los cuales oscilaron entre 4.83 a 9.10, el de menor a^* fue el Tto 7 obtenido con 48.6 g/100 g SLDD/AM, 7.5 g/100 g RP, contenido de humedad 19.8 g/100 g y con una temperatura de 135 °C. El modelo de regresión mostró un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 0.827$ (Tabla 16) el modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para a^* está dada por:

$$a^* = 8.404 + 0.157 X_1 - 0.387 X_2 - 0.659 X_3 - 0.345 X_4 - 0.451 X_1^2 - 1.332 X_2^2 - 2.288 X_3^2 - 0.249 X_4^2 + 0.350 X_1X_2 - 0.252 X_1X_3 - 0.240 X_1X_4 - 2.605 X_2X_3 + 0.200 X_2X_4 + 0.211 X_3X_4.$$

(Ec.20)

Los coeficientes de regresión para a^* muestran (Tabla 16) que el contenido de SLDD/AM y para RP presenta efecto negativo ($p < 0.05$) en termino lineal. En términos cuadráticos el contenido de humedad y SLDD/AM presentaron efecto negativo ($p < 0.05$) e interacciones el contenido de humedad - SLDD/AM mostraron efecto negativo ($p < 0.05$). En la Figura 28 se muestra la superficie de respuesta de los efectos del RP y SLDD/AM sobre a^* . El incremento de RP y SLDD/AM aumentaron el enrojecimiento (a^*), en productos con contenido de 0 – 25 g/100 g de RP, sin embargo, elevadas concentraciones (0 – 50 g/100 g) de SLDD/AM favorecieron al incremento de enrojecimiento en los productos obtenidos como se puede observar en la Figura 28.

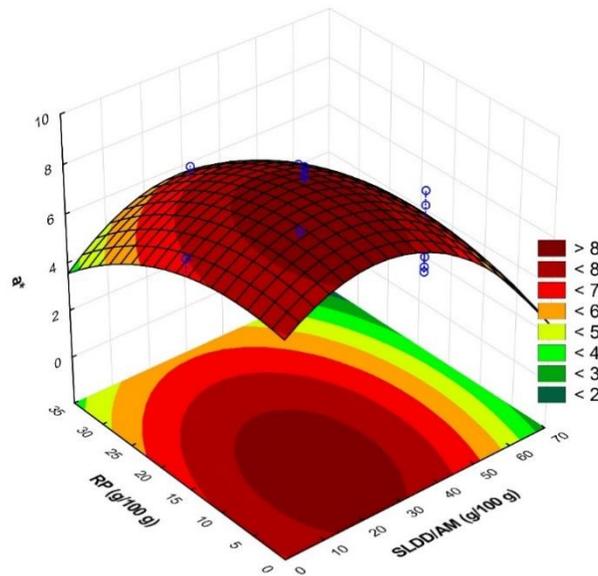


Figura 28. Efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) sobre enrojecimiento (a^*).

De acuerdo con los autores Selani et al. (2014), Paraman et al. (2013) reportaron que el bajo contenido de humedad y el elevado contenido de piña aumenta el enrojecimiento ya que las temperaturas elevadas, la baja humedad, el contenido de azúcares o lactosa en SLDD y el tiempo durante el proceso de extrusión generan la presencia de reacciones de pardeamiento, tales como Maillard y la caramelización. También cabe mencionar que de acuerdo con Delgado-Nieblas et al. (2014) el almidón durante el proceso de extrusión tiene fricción lo cual ocasiona despolimerización del almidón formando azúcares que podrían sufrir caramelización o reacción de Maillard, afectado el color del producto obtenido.

7.4.3. Parámetro b^* .

El parámetro b^* encontrado oscilo de entre 12.69 a 28.39 (Tabla 15). El menor valor para el parámetro b^* (12.69) fue en el Tto 7 obtenido a 7.5 g/100 g RP y 48.6 g/100 g de SLDD, con una humedad de 23.3 g/100 g a una temperatura de 135 °C. El modelo de regresión ajustada mostro un coeficiente de determinación $R^2 = 0.871$ (Tabla 16). El modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indicó la validez

de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación 21 de regresión para b^* a cualquier concentración de RP, SLDD/AM, contenido de humedad y temperatura dentro de los intervalos establecidos en el diseño está dada por:

$$b^* = 26.557 + 0.365 X_1 - 1.375 X_2 - 2.168 X_3 + 0.285 X_4 - 1.042 X_1^2 - 3.881 X_2^2 - 9.863 X_3^2 - 0.752 X_4^2 + 0.320 X_1X_2 + 1.061 X_1X_3 + 0.224 X_1X_4 - 4.036 X_2X_3 + 0.418 X_2X_4 + 1.540 X_3X_4$$

(Ec.21)

El coeficiente de regresión de b^* (Tabla 16) se puede observar que presentaron efecto lineal significativo ($p < 0.05$) el SLDD/AM (X_3) negativo y RP (X_4) positivo en este término, mientras que en su término cuadrático presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) negativo para temperatura de extrusión (X_1^2), contenido de humedad (X_2^2) y SLDD/AM (X_3^2). Se observó efecto significativo ($p < 0.05$) positivo para las interacciones (X_2X_3) contenido de humedad y SLDD/AM. En la Figura 29 se puede observar que las concentraciones de SLDD/AM 0 – 50 g/100 g y las concentraciones de RP 0 – 30 g/100 g incrementan el amarillamiento de los productos. De acuerdo con lo reportado por Teba et al. (2017) en la reacción de Maillard los productos extrudidos en la presencia de azúcares (fructosa, sacarosa y lactosa) y aminos (Navale et al., 2015) tienden a cambiar de color, como puede ser el amarillamiento; así como también Delgado-Nieblas et al. (2014) reporta que la presencia del almidón sufre degradación la cual puede causar caramelizarían afectando al producto final.

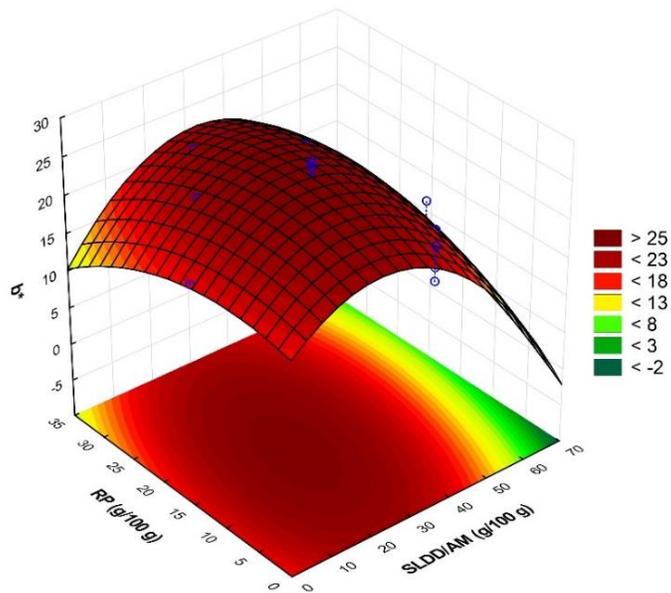


Figura 29. El efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) sobre el parámetro b^* .

7.4.4. Chromaticidad (C^*)

En la Tabla 15 se muestra los resultados obtenidos de C^* los cuales oscilaron entre 5.91 a 8.62, el de menor C^* fue el Tto 7 obtenido con 48.6 g/100 g SLDD/AM, 7.5 g/100 g RP, contenido de humedad 23.3 g/100 g y con una temperatura de 135 °C. El modelo de regresión mostró un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 0.893$ (Tabla 16) el modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación 22 para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para C^* está dada por:

$$C^* = 8.357 - 0.071 X_1 - 0.257 X_2 - 0.409 X_3 + 0.001 X_4 - 0.189 X_1^2 - 0.661 X_2^2 - 1.603 X_3^2 - 0.122 X_4^2 + 0.095 X_1 X_2 + 0.120 X_1 X_3 - 0.007 X_1 X_4 - 0.959 X_2 X_3 - 0.108 X_2 X_4 + 0.267 X_3 X_4$$

(Ec. 22)

Los coeficientes de regresión para C^* (Chromaticidad) muestran (Tabla 16) que el contenido de humedad (X_2) y SLDD/AM (X_3) presentaron un efecto negativo ($p < 0.05$) en término lineal. En términos cuadráticos la temperatura de extrusión (X_1^2), contenido de humedad (X_2^2), SLDD/AM (X_3^2) y RP (X_4^2) presentaron efecto negativo ($p < 0.05$) y las interacciones el contenido de humedad y el SLDD/AM (X_2X_3) mostraron efecto negativo ($p < 0.05$). En la Figura 30 se muestra la superficie de respuesta de los efectos del SLDD/AM y CH sobre C^* . El incremento de SLDD/AM y CH favorece al aumento del brillo en productos con extrudidos, sin embargo, a elevadas concentraciones de SLDD/AM y CH favorece a la obtención de productos más opacos.

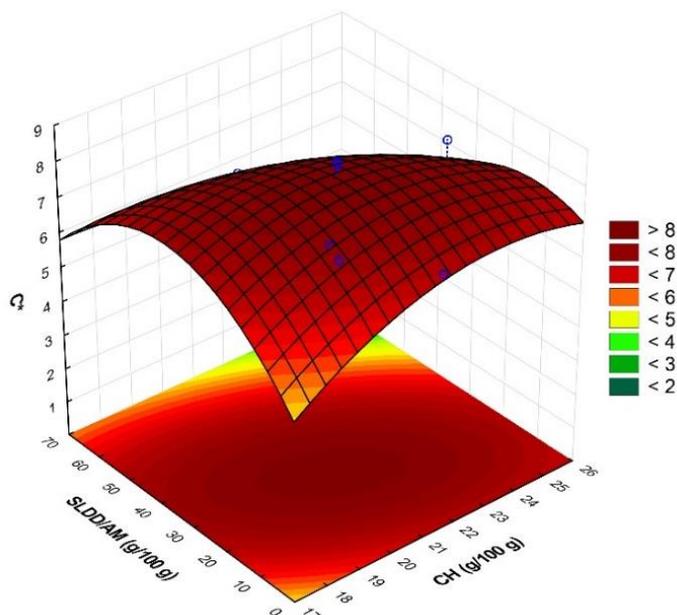


Figura 30. El efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y contenido de humedad (CH) sobre C^* .

7.4.5. Ángulo hue (h°).

El modelo de regresión ajustada a los resultados experimentales de h° mostró un valor del coeficiente de determinación $R^2 = 0.590$ (Tabla 16) del modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación 23 para el modelo de regresión para h° a cualquier

concentración de RP, SLDD/AM, contenido de humedad y temperatura dentro de los intervalos establecidos en el diseño está dada por:

$$h^{\circ} = 72.310 - 0.052 X_1 - 0.113 X_2 - 0.207 X_3 + 1.190 X_4 + 0.276 X_1^2 + 0.234 X_2^2 - 1.965 X_3^2 + 0.065 X_4^2 - 0.630 X_1X_2 + 1.577 X_1X_3 + 0.668 X_1X_4 + 3.220 X_2X_3 - 0.080 X_2X_4 + 1.070 X_3X_4$$

(Ec. 23)

El h° encontrado oscilo de entre 67.38 a 74.91 (Tabla 15). El de menor h° (67.38) en el Tto 6 obtenido con 22.5 g/100 g RP y 13.6 g/100 g de SLDD/AM, con una humedad de 19.8% a una temperatura de 135 °C. Los coeficientes de regresión de la h° (Tabla 16) que el RP (X_4) presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) positivo en el término lineal, esto indica que la temperatura de extrusión (110 – 150 °C) y el contenido de humedad favorecieron a la disminución del amarillamiento de los productos obtenidos, sin embargo, las elevadas temperaturas (150 – 180 °C) favorecieron al incremento del amarillamiento pudiera estar relacionado con la reacción de Maillard ya que las elevadas temperaturas son un factor dentro de esta reacción, como se puede observar en la Figura 31.

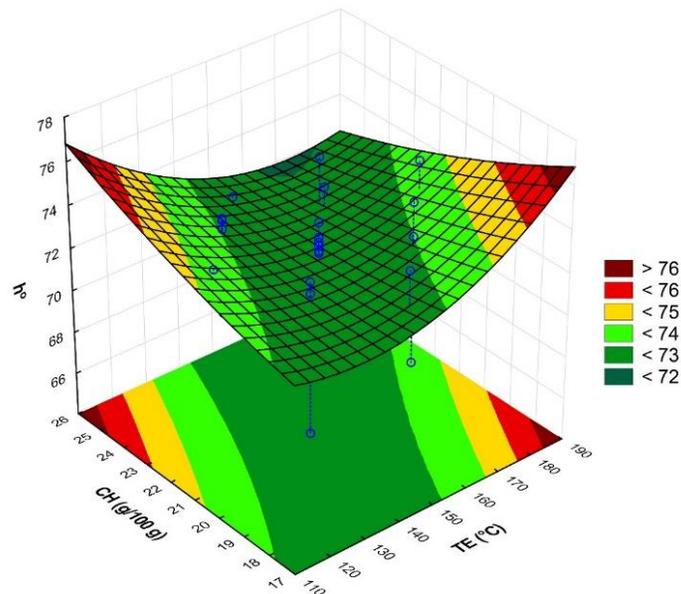


Figura 31. El efecto del contenido de humedad (CH) y la temperatura de extrusión (TE) sobre el h° .

7.4.6. Diferencia total del color (ΔE).

En la Tabla 15 se muestra los resultados obtenidos de C^* los cuales oscilan de 19.88 a 49.02, el de menor ΔE fue el Tto 7 obtenido con 48.6 g/100 g SLDD/AM, 7.5 g/100 g RP, contenido de humedad 23.3 g/100 g y con una temperatura de 135 °C. El modelo de regresión para estas botanas mostró un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 0.892$ (Tabla 16) el modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación 24 para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para ΔE está dada por:

$$\Delta E = 46.257 - 0.663 X_1 - 1.607 X_2 - 6.637 X_3 + 3.148 X_4 - 1.511 X_1^2 - 4.529 X_2^2 - 14.129 X_3^2 - 1.431 X_4^2 - 0.124 X_1X_2 + 2.713 X_1X_3 - 0.261 X_1X_4 - 8.462 X_2X_3 + 1.254 X_2X_4 + 2.456 X_3X_4$$

(Ec.24)

Los coeficientes de regresión para ΔE se muestran (Tabla 16) que presentaron un efecto negativo SLDD/AM (X_3) y RP (X_4) un efecto positivo ($p < 0.05$) en término lineal. En términos cuadráticos la temperatura de extrusión (X_1^2), SLDD/AM (X_3^2) y RP (X_4^2) presentan efecto negativo ($p < 0.05$) y las interacciones el contenido de humedad - SLDD/AM (X_2X_3) presentaron un efecto negativo ($p < 0.05$). En la Figura 32 se muestra la superficie de respuesta de los efectos del RP y SLDD/AM sobre ΔE . El incremento de RP y en la presencia del SLDD/AM favorecieron al aumento del cambio total de color en productos extrudidos los cuales fueron más oscuros, sin embargo, es importante recalcar que el RP obtuvo el mayor valor de ΔE dentro de las materias primas por que en mayor es concentración mayor será la ΔE en productos terminados. Cabe mencionar que de acuerdo con Teba et al. (2017) y Delgado-Nieblas et al. (2014) reportaron que durante el proceso de extrusión con bajos contenidos de agua y elevadas temperaturas favorecen a la reacción de Maillard y a la caramelización produciendo productos oscuros.

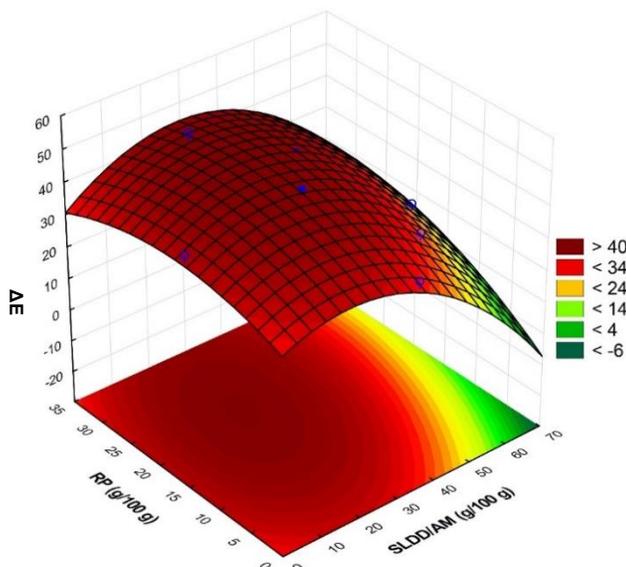


Figura 32. El efecto del residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratada/almidón de maíz (SLDD/AM) sobre ΔE .

7.5 Efecto de las variables de proceso (temperatura de extrusión, concentración de harina de residuo de piña y suero de leche dulce deshidratado) sobre la aceptación general y composición de proteína y fibra.

Tabla 17. Contenido de proteína y fibra, así como la aceptación general de productos extrudidos.

Tto	Parámetros		
	Contenido de proteína (g/100 g)	Contenido de fibra (g/100 g)	Aceptación general %
1	2.24 ± 0.10	1.28 ± 0.02	5.09 ± 1.38
2	1.87 ± 0.07	1.54 ± 0.04	4.59 ± 1.10
3	1.90 ± 0.08	1.24 ± 0.02	4.55 ± 1.44

4	2.14 ± 0.07	1.56 ± 0.03	4.64 ± 1.29
5	4.63 ± 0.13	1.65 ± 0.02	3.41 ± 1.82
6	4.11 ± 0.07	1.56 ± 0.02	3.95 ± 1.86
7	4.36 ± 0.16	1.69 ± 0.02	3.77 ± 1.93
8	3.99 ± 0.14	1.60 ± 0.02	4.27 ± 1.64
9	3.05 ± 0.11	4.18 ± 0.02	5.45 ± 1.97
10	2.78 ± 0.04	4.48 ± 0.01	5.86 ± 1.88
11	2.96 ± 0.15	4.22 ± 0.04	4.77 ± 1.41
12	2.82 ± 0.14	4.65 ± 0.02	5.77 ± 1.74
13	5.19 ± 0.09	4.87 ± 0.15	3.36 ± 1.68
14	4.72 ± 0.17	4.27 ± 0.02	4.05 ± 1.84
15	4.98 ± 0.10	4.66 ± 0.05	4.14 ± 1.64
16	4.66 ± 0.10	5.15 ± 0.01	4.45 ± 2.13
17	6.00 ± 0.07	2.43 ± 0.02	4.09 ± 1.77
18	3.51 ± 0.10	2.48 ± 0.02	5.27 ± 1.78
19	2.27 ± 0.11	2.55 ± 0.01	3.59 ± 1.84
20	2.03 ± 0.08	2.52 ± 0.02	4.45 ± 1.34
21	2.41 ± 0.09	2.48 ± 0.02	5.36 ± 1.18
22	4.15 ± 0.20	1.76 ± 0.03	3.32 ± 1.78
23	3.88 ± 0.14	0.01 ± 0.00	5.50 ± 2.18
24	4.16 ± 0.16	4.22 ± 0.01	5.27 ± 2.03
25	5.20 ± 0.04	2.43 ± 0.04	4.55 ± 1.65
26	5.33 ± 0.12	2.55 ± 0.06	5.05 ± 1.46
27	5.03 ± 0.20	2.31 ± 0.05	4.55 ± 1.65
28	5.33 ± 0.11	2.43 ± 0.11	5.05 ± 1.46
29	5.37 ± 0.06	2.55 ± 0.04	4.55 ± 1.65
30	4.94 ± 0.08	2.45 ± 0.68	5.05 ± 1.46

Los valores representan la media ± desviación estándar por triplicado. Tto= tratamiento.

Tabla 18. Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple de la aceptación general y contenido de proteína y fibras en productos extrudidos.

Coeficientes	Respuestas		
	Contenido proteína	Contenido fibra	Aceptación general
Intercepto	5.197*	2.4862*	4.8120*
Lineal	X_1	- 0.343*	0.0414
	X_2	- 0.031	0.0746
	X_3	1.714*	0.0668
	X_4	0.367*	1.3617*
Cuadrático	X_1^2	- 0.049	0.1122
	X_2^2	- 3.093*	0.5550
	X_3^2	- 2.000*	0.0612
	X_4^2	- 0.322*	0.0450
Interacciones	X_1X_2	0.173	0.1641
	X_1X_3	- 0.128	-0.2056
	X_1X_4	- 0.007	-0.0075
	X_2X_3	- 0.050	0.1510
	X_2X_4	0.042	0.1276
	X_3X_4	- 0.338	0.0599
R^2	0.899	0.903	0.899

*Los números en negrita indican estimaciones de parámetros significativos ($p < 0.05$). X_1 = temperatura de extrusión (°C), X_2 = Contenido de humedad (g /100g), X_3 = Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (g/100 g) y X_4 = Residuo de piña (g/100 g).

6.5.1. Contenido de proteína (CP).

Para el contenido de proteína los valores oscilaron de entre 1.87 a 6.00 % (Tabla 17). El mayor valor para el CP (6.00 g/100 g) fue en el Tto 17 obtenido a 15 g/100 g RP y 29.8 g/100 g de SLDD/AM, con una humedad de 21.5 g/100 g a una temperatura de 120 °C. El modelo de regresión ajustada mostró un coeficiente de

determinación $R^2 = 0.899$ (Tabla 18). El modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indicó la validez de la ecuación para predecir la respuesta. La ecuación 17 de regresión para CP a cualquier concentración de RP, SLDD/AM, contenido de humedad y temperatura dentro de los intervalos establecidos en el diseño está dada por:

$$\text{CP} = 5.197 - 0.343 X_1 - 0.031 X_2 + 1.714 X_3 + 0.367 X_4 - 0.049 X_1^2 - 3.093 X_2^2 - 2.000 X_3^2 - 0.322 X_4^2 + 0.173 X_1 X_2 - 0.128 X_1 X_3 - 0.007 X_1 X_4 - 0.050 X_2 X_3 + 0.042 X_2 X_4 - 0.338 X_3 X_4.$$

(Ec. 25)

El coeficiente de regresión de CP (Tabla 18) se puede observar que presentaron termino lineal significativo ($p < 0.05$) la temperatura de extrusión (X_1) con efecto negativo y SLDD/AM (X_3) y RP (X_4) con efecto positivo, mientras que en su término cuadrático presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) negativo para contenido de humedad (X_2^2), SLDD/AM (X_3^2) y RP (X_4^2). En la Figura 33 se observa que el aumento del contenido de SLDD/AM se incrementó el contenido de proteína en los productos obtenidos esto es debido a que el SLDD contiene un 10.42 g/100 g por que el aumento del SLDD favorece al aumento de proteína sin embargo la temperatura afecta significativamente ($p < 0.05$) a las proteínas al desnaturalizarlas.

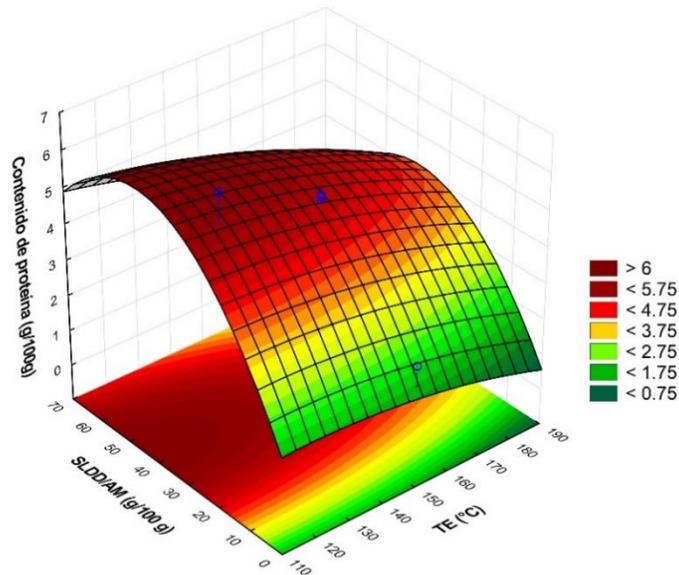


Figura 33. Efecto del suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión (TE).

7.5.2. Contenido de fibra (CF).

En la Tabla 17 se muestra los resultados obtenidos del contenido de fibra, los cuales oscilan de 1.28 a 5.15, el de mayor CF fue el Tto 16 obtenido con 40.7 g/100 g de SLDD/AM, 22.5 g/100 g RP, contenido de humedad 23.3 g/100 g y con una temperatura de 165 °C. El modelo de regresión mostro un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 0.903$ (Tabla 18) el modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación 26 para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para CF está dada por:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{CF} = & \mathbf{2.4862} + 0.0414 X_1 + 0.0746 X_2 + 0.0668 X_3 + \mathbf{1.3617 X_4} + 0.1122 X_1^2 + 0.5550 \\
 & X_2^2 + 0.0612 X_3^2 + 0.0450 X_4^2 + 0.1641 X_1X_2 - 0.2056 X_1X_3 - 0.0075 X_1X_4 + 0.1510 \\
 & X_2X_3 + 0.1276 X_2X_4 + 0.0599 X_3X_4
 \end{aligned}$$

(Ec. 26)

Los coeficientes de regresión para el contenido de fibra (CF) se muestran (Tabla 17) En término lineal que presenta efecto positivo RP (X_4) efecto positivo ($p < 0.05$) en termino lineal. En la Figura 34 se muestra la superficie de respuesta de los

efectos del residuo de piña (RP) y temperatura de extrusión (TE) sobre CF. El incremento de RP favoreció al aumento del CF debido a que el RP contiene 22.66 g/100 g de fibra, por lo que, el incremento de RP favoreció al incremento de fibra en los productos extrudidos.

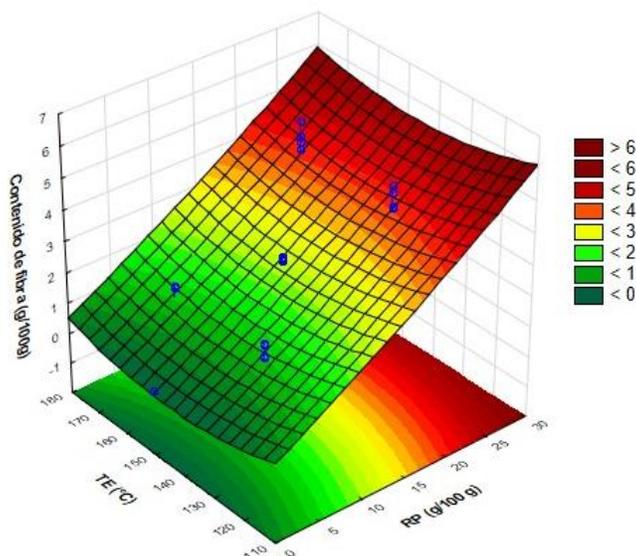


Figura 34. Efecto del residuo de piña (RP) y de la temperatura de extrusión (TE) sobre el contenido de fibra (CF).

7.5.3. Aceptación general (AG)

Los resultados obtenidos de la aceptación general se muestran en la Tabla 17, los cuales oscilan de 3.32 a 5.86, el de mayor AG fue el Tto 10 obtenido con 13.6 g/100 g SLDD/AM, 22.5 g/100 g RP, contenido de humedad 19.8 g/100 g y con una temperatura de 165 °C. El modelo de regresión mostró un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 0.899$ (Tabla 18) el modelo de regresión fue significativo ($p < 0.05$), lo que indica la validez de la ecuación 27 para predecir la respuesta. La ecuación para el modelo de regresión para AG está dada por:

$$\mathbf{AG} = 4.8120 + 0.224 X_1 + 0.207 X_2 - 1.147 X_3 + 0.013 X_4 - 0.046 X_1^2 - 0.860 X_2^2 - 0.560 X_3^2 + 0.089 X_4^2 + 0.091 X_1X_2 + 0.153 X_1X_3 + 0.124 X_1X_4 + 0.751 X_2X_3 + 0.099 X_2X_4 - 0.495 X_3X_4.$$

(Ec. 27)

El coeficiente de regresión de AG (Tabla 18) se puede observar que presentaron termino lineal significativo ($p < 0.05$) la TE (X_1) con efecto positivo y SLDD/AM (X_3) con efecto negativo, mientras que en su término cuadrático presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) negativo para CH (X_2^2), y SLDD/AM (X_3^2) y para las interacciones el CH y SLDD/AM (X_2X_3) así como también el SLDD/AM y RP (X_3X_4). En la figura 35 se muestra la superficie de respuesta de los efectos del RP y SLDD/AM sobre la AG como se observa en la Figura 35 a) tiene una mayor aceptación los que tienen un incremento del 15 – 30 g/100 g de RP y de SLDD/AM de 10 – 40 g/100 g. En la Figura 35 b) el contenido de humedad y las bajas concentraciones de SLDD/AM 0 – 30 g/100 g favorecen al incremento de la AG posiblemente porque tenga una mejor gelatinización el almidón, lo que, se tiene mayor expansión y menor dureza en los productos extrudidos. Para la Figura 35 c) las elevadas TE 140 - 180 °C y bajas concentraciones de SLDD/AM 0 – 40 g/100 g podrían favorecer ya que las elevadas temperaturas y las bajas concentraciones de SLDD/AM favorecen un mayor índice de expansión y menor textura en los productos extrudidos.

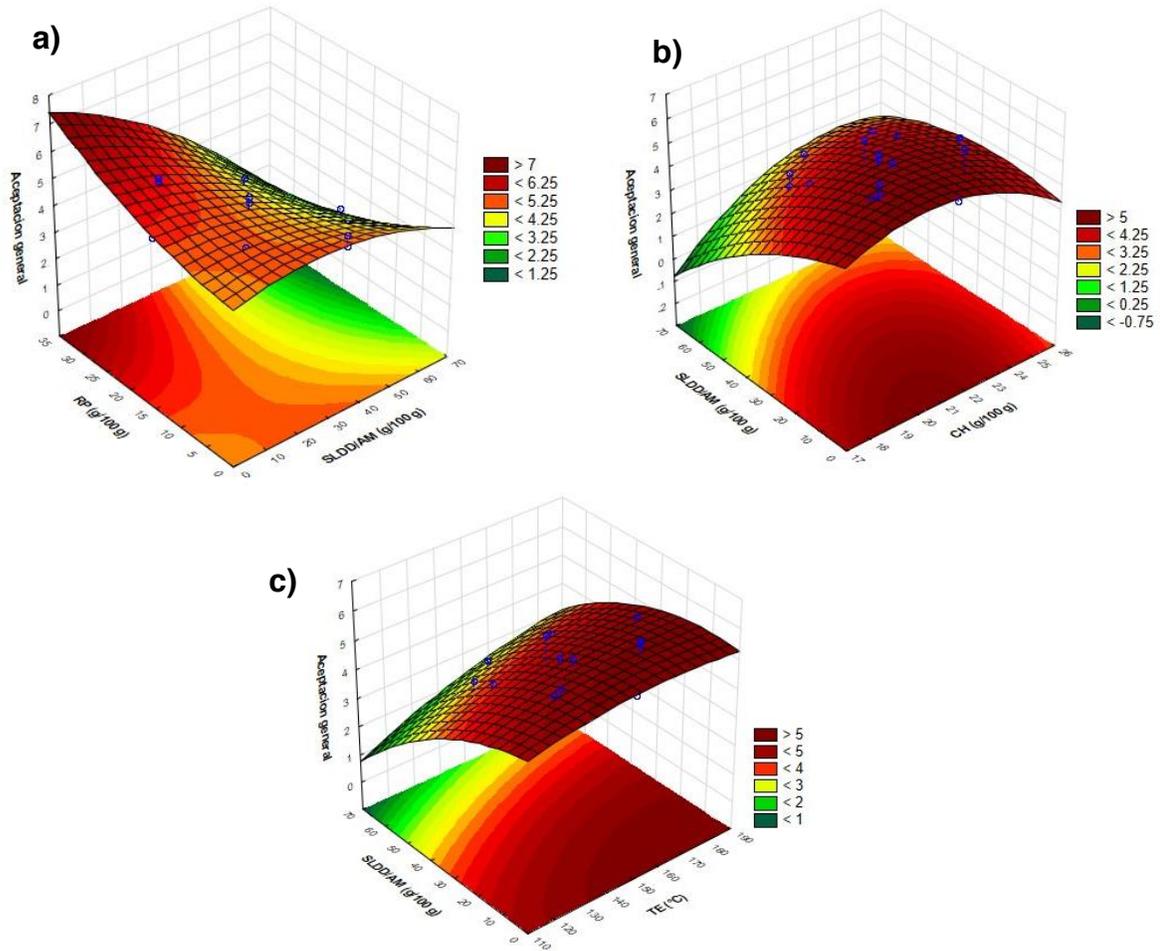


Figura 35. Gráficos de superficie de respuesta para la aceptación general de los productos extrudidos obtenidos con efectos de las variables independientes **a)** Residuo de piña (RP) y suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM), **b)** Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y contenido humedad (CH). **c)** Suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz (SLDD/AM) y temperatura de extrusión.

7.6. Optimización numérica.

La optimización numérica es la superposición de las diferentes superficies de respuesta, se utilizó para determinar el nivel óptimo de las cuatro variables independientes basadas en el concepto de conveniencia y deseabilidad

Pensamiento-Niño et al., 2018). Se realizó de acuerdo a los valores mínimos energía mecánica específica, densidad aparente y valores máximos índice de expansión, proteína, fibra y aceptación general.

Tabla 19. Optimización numérica de los productos extrudidos.

Parámetros de proceso	Importancia	Intervalo	Valor experimental		Parámetros óptimos	Deseabilidad
			Min	Max		
TE (°C)	3	Intervalo	135	165	165	
CH (g/100 g)	3	Intervalo	19.75	23.25	22.95	
SLDD/AM (g/100 g)	3	Intervalo	17.5	52.5	48.86	
RP (g/100 g)	3	Intervalo	7.5	22.5	22.5	
Respuesta					Valores predichos	
EME (J/g)	5	Mínimo	113.51	591.13	74.95	
IE	5	Máximo	0.73	1.66	1.48	0.709
DA (kg/m)	5	Mínimo	1.60	15.05	4.85	
Textura (N)	5	Mínimo	25.22	116.22	51.33	
ΔE	3	Intervalo	19.88	49.01	35.54	
IAA (g/g)	3	Intervalo	2.18	5.37	3.78	
ISA (%)	3	Intervalo	14.91	40.68	35.00	
Proteína (g/100 g)	5	Máximo	1.87	6.61	4.35	
Fibra (g/100 g)	5	Máximo	0.11	5.15	4.30	
Aceptación general	5	Máximo	3.31	5.86	4.25	

TE = temperatura de extrusión, CH = contenido de humedad, SLDD/AM = suero de leche dulce deshidratado/almidón de maíz, RP = residuo de piña, EME = energía mecánica específica, IE = índice de expansión, DA = densidad aparente, ΔE = diferencia de color total, IAA = índice absorción de agua, ISA = índice solubilidad de agua.

8 CONCLUSIONES.

- El RP tuvo un rendimiento del 10% y presentó un contenido de proteína 9.35 g/100 g, lípidos 1.35 g/100 g, ceniza 3.55 g/100 g y carbohidratos 63.09 g/100 g y fibra 22.66 g/100 g, por lo cual, resulta una fuente rica en fibra y el aprovechamiento de materia prima ayudando a disminuir el impacto ambiental, así como también se puede obtener a bajo costo.
- El suero de leche dulce deshidratada obtuvo el mayor contenido de proteínas y cenizas, sin embargo, el mayor contenido de lípidos y fibra lo obtuvo residuo de piña y el mayor contenido de carbohidratos fue para el almidón de maíz.
- Para los parámetros de color el suero de leche dulce deshidratado presentó la mayor L^* , el residuo de piña presentó la mayor tendencia hacia los cuadrantes de enrojecimiento (a^*), amarillamientos (b^*), y opacidad (C^*) y la mayor diferencia total de color.
- La extrusión con un solo tornillo tuvo grandes efectos sobre las características fisicoquímicas de los extrudidos listos para comer. El estudio demostró que la adición de RP aumento ($p < 0.05$) CF, AG, ΔE sin embargo disminuyo ($p < 0.05$) TR, EME y L^* .
- Para el contenido de SLDD/AM se tuvieron los coeficientes significativos ($p < 0.05$) sobre las variables dependientes en termino lineal textura, L^* , índice de solubilidad de agua y contenido de proteína con efecto positivo, sin embargo, con efecto negativo se presentaron índice de expansión, aceptación general, torque, tiempo de residencia, energía mecánica específica, índice absorción de agua, y diferencia total de color.
- El incremento de temperatura de extrusión benefició significativamente ($p < 0.05$) las variables respuesta como son el tiempo de residencia, índice de expansión y aceptación general pero afecto la energía mecánica y el contenido de proteína.
- El contenido humedad en su incremento beneficio significativamente ($p < 0.05$) a las variables de respuesta como es el índice de absorción de agua, sin embargo, en su disminución afecto el torque.

-
- Se obtuvo la optimización numérica del producto con parámetros óptimos con un contenido de humedad = 22.95 g/100 g, temperatura extrusión = 165 °C, SLDD/AM = 48.86 g/100 g y RP = 22.5 g/100 g para obtener una predicción de EME (74.95 J/g), IE (1.48), AG (4.25), CP (4.35 g/100 g) y CF (4.30 g/100) por lo tanto el SLDD y RP son fuentes disponibles y económicas de proteína y fibra para el enriquecimiento de botanas.
 - Se demostró que se puede tener una botana extrudida aceptable por el consumidor ricos en proteína y fibra con una incorporación de SLDD y RP de 48.86 g/100 g y 22.5 g/100 g respectivamente sin afectar las propiedades fisicoquímicas.

9 REFERENCIAS.

- Abd El-Salam, M. H., El-Shibiny, S., y Salem, A. (2009). Factors affecting the functional properties of whey protein products: a review. *Food Reviews International*, 25(3), 251-270.
- Ačkar, Đ., Jozinović, A., Babić, J., Miličević, B., Balentić, J. P., y Šubarić, D. (2018). Resolving the problem of poor expansion in corn extrudates enriched with food industry by-products. *Innovative food science y emerging technologies*, 47, 517-524.
- Agama-Acevedo, E., Juárez-García, E., Evangelista-Lozano, S., Rosales-Reynoso, O. L., y Bello-Pérez, L. A. (2013). Characteristics of maize starch and relationship with its biosynthesis enzymes. *Agrociencia (Montecillo)*, 47(1), 1-12.
- Agama-Acevedo, E., Ottenhof, M. A., Farhat, I. A., Paredes-López, O., Ortiz-Cereceres, J., y Bello-Pérez, L. A. (2005). Aislamiento y caracterización del almidón de maíces pigmentados. *Agrociencia*, 39(4) 419-429.
- Agama-Acevedo, E., Salinas-Moreno, Y., Pacheco-Vargas, G., y Bello-Pérez, L. A. (2011). Physical and chemical characteristics of blue corn from two races: starch morphology. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 317-329.
- Agudelo Gómez, D. A. y Bedoya Mejía, O. (2005). Composición nutricional de la leche de ganado vacuno. *Revista Lasallista de investigación*, 2(1) 38 – 42.
- Alam, M. S., Pathania, S., y Sharma, A. (2016). Optimization of the extrusion process for development of high fibre soybean-rice ready-to-eat snacks using carrot pomace and cauliflower trimmings. *LWT-Food Science and Technology*, 74, 135-144.
- Ali, A., Wani, T. A., Wani, I. A., y Masoodi, F. A. (2016). Comparative study of the physico-chemical properties of rice and corn starches grown in Indian temperate climate. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15(1), 75-82.

-
- Allen, K. E., Carpenter, C. E., y Walsh, M. K. (2007). Influence of protein level and starch type on an extrusion-expanded whey product. *International journal of food science y technology*, 42(8), 953-960.
 - Álvarez, A. (2006). Aplicaciones del maíz en la tecnología alimentaria y otras industrias. *Maíz y Nutrición*, 2, 9-13.
 - Antonio-Estrada, C., Bello-Perez, L. A., Martínez-Sánchez, C. E., Montañez-Soto, J. L., Jiménez-Hernández, J., y Vivar-Vera, M. A. (2009). Producción enzimática de maltodextrinas a partir de almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) Enzymatic production of maltodextrins from taro (*Colocasia esculenta*) starch. *CyTA-Journal of Food*, 7(3), 233-241.
 - Bach Knudsen, K. E (2001). The nutritional significance of “dietary fibre” analysis. *Animal Feed Science and Technology*, 90, 3-20
 - Bardiya, N., Somayaji, D., y Khanna, S. (1996). Biomethanation of banana peel and pineapple waste. *Bioresource technology*, 58(1), 73-76.
 - Bello-Pérez, L. A., Meza-León, K., Contreras-Ramos, S., y Paredes-López, O. (2001). Functional properties of corn, banana and potato starch blends. *Acta científica venezolana*, 52(1), 62-67.
 - Beninca, C., Demiate, I. M., Lacerda, L. G., Carvalho Filho, M. A. D. S., Ionashiro, M., y Schnitzler, E. (2008). Thermal behavior of corn starch granules modified by acid treatment at 30 and 50 C. *Eclética Química*, 33(3), 13-18.
 - Blanca, B. H., Azucena, T. D. Y., y Adriana, L. T. (2008). Utilización de residuos agroindustriales. *Revista Sistemas Ambientales*, 2(1), 44-50.
 - Botella, C., De Ory, I., Webb, C., Cantero, D., y Blandino, A. (2005). Hydrolytic enzyme production by *Aspergillus awamori* on grape pomace. *Biochemical Engineering Journal*, 26(2-3), 100-106.
 - Brnčić, M., Bosiljkov, T., Ukrainczyk, M., Tripalo, B., Brnčić, S. R., Karlović, S., y Topić, D. V. (2011). Influence of whey protein addition and feed moisture content on chosen physicochemical properties of directly expanded corn extrudates. *Food and bioprocess technology*, 4(7), 1296-1306.

-
- Brnčić, M., Ježek, D., Rimac Brnčić, S., Bosiljkov, T., y Tripalo, B. (2008). Influence of whey protein concentrate addition on textural properties of corn flour extrudates. *Mljekarstvo*, 58(2), 131–149.
 - Cadena Madonado, C. D., y Yánez Sotomayor, S. X. (2010). Elaboración de un snack extruido expandido: a base de chocho y gritz de maíz (Bachelor's thesis, Quito: USFQ, 2010).
 - Caetano-Silva, M. E., Capitani, C. D., Antunes, A. E. C., Vougt, E., da Silva, V. S. N., y Pacheco, M. T. B. (2015). Whey Protein-Carboxymethylcellulose Obtained by Complex Coacervation as an Ingredient in Probiotic Fermented Milk. *Food and Nutrition Sciences*, 6(06), 571.
 - Capitani, C. D., Pacheco, M. T. B., Gumerato, H. F., Vitali, A., y Schmidt, F. L. (2005). Milk whey protein recuperation by coacervation with polysaccharide. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 40(11), 1123-1128.
 - Caren E. Smith¹ y Katherine L. Tucker (2011), Health benefits of cereal fibre: a review of clinical trials *Nutrition, Research Reviews*, 24, 118–131.
 - Cuggino, M. I. (2008). Desarrollo de alimentos precocidos por extrusión a base de maíz-leguminosa (tesis Doctoral). Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.
 - Da Silva, E. M. M., Ascheri, J. L. R., de Carvalho, C. W. P., Takeiti, C. Y., y Berrios, J. D. J. (2014). Physical characteristics of extrudates from corn flour and dehulled carioca bean flour blend. *LWT-Food Science and Technology*, 58(2), 620-626.
 - Dattatreya, A., y Rankin, S. A. (2006). Moderately acidic pH potentiates browning of sweet whey powder. *International Dairy Journal*, 16(7), 822-828.
 - De Wit, J. N. (2001). *Lecturer's handbook on whey and whey products*. European whey products association, Brussels.
 - Dehghan-Shoar, Z., Hardacre, A. K., y Brennan, C. S. (2010). The physico-chemical characteristics of extruded snacks enriched with tomato lycopene. *Food Chemistry*, 123(4), 1117-1122.

-
- Dehghan-Shoar, Z., Hardacre, A. K., y Brennan, C. S. (2010). The physico-chemical characteristics of extruded snacks enriched with tomato lycopene. *Food Chemistry*, 123(4), 1117-1122.
 - Dhital, S., Shrestha, A. K., Hasjim, J., y Gidley, M. J. (2011). Physicochemical and structural properties of maize and potato starches as a function of granule size. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(18), 10151-10161.
 - Drago, S. R., González, R. J., Chel-Guerrero, L., y Valencia, M. E. (2007). Evaluación de la disponibilidad de minerales en harinas de frijol y en mezclas de maíz/frijol extrudidas. *Información tecnológica*, 18(1), 41-46.
 - Elleuch, M., Bedigian, D., Roiseux, O., Besbes, S., Blecker, C., y Attia, H. (2011). Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological, functionality and commercial applications: A review. *Food Chemistry*, 124, 411–421.
 - Espinosa-Dzib, A., Ramírez-Gilly, M., y Tecante, A. (2012). Viscoelastic behavior and microstructure of aqueous mixtures of cross-linked waxy maize starch, whey protein isolate and κ-carrageenan. *Food hydrocolloids*, 28(2), 248-257.
 - Espinosa-Dzib, A., Ramírez-Gilly, M., y Tecante, A. (2012). Viscoelastic behavior and microstructure of aqueous mixtures of cross-linked waxy maize starch, whey protein isolate and κ-carrageenan. *Food hydrocolloids*, 28(2), 248-257.
 - Estructura morfológica de la planta de la piña. <http://lapiniatropical.blogspot.com/2015/04/taxonomia-botanica-y-fisiologia-de-la.html>
 - FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). FAOSTAT Statistics Database – Agriculture, 2017. URL<<http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> /boletines/Paginas/JAC_0031-21.aspx#)
 - FDA (Food and Drug Administration). Code of Federal Regulations. Title 21 – Food and Drugs– Food Labeling, Part 101 – Food Labeling, Subpart D – Specific

-
- Florencia de piña https://es.wikipedia.org/wiki/Ananas_comosus
 - González RJ, Torres RL y De Greef. (2002). Extrusión–Cocción de Cereales. Boletín da Sociedade Brasileira de Ciencia e Tecnologia de Alimentos (sbCTA), Campinas. 36 (2), 83-136.
 - González-Cortés, N., Silos-Espino, H., Estrada Cabral, J. C., Chávez-Muñoz, J. A., y Tejero Jiménez, L. (2016). Características y propiedades del maíz (*Zea mays* L.) criollo cultivado en Aguascalientes, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(3), 669-680.
 - González-Sánchez, M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., y Yañez-Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista argentina de microbiología*, 47(3), 229-235.
 - Gupta, R. K., Kumar, P., Sharma, A., y Patil, R. T. (2011). Color kinetics of aonla shreds with amalgamated blanching during drying. *International Journal of Food Properties*, 14(6), 1232-1240.
 - Hernández, Elizabeth. (2005). Evaluación sensorial. Bogotá, DC. Centro Nacional de Medios para el Aprendizaje.
 - Hernández, J. C., García, F. P., Cruz, V. E. R., Santillán, Y. M., y Marzo, M. A. M. (2012). Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de recuperación de fósforo. *Acta Universitaria*, 22(1), 11-18.
 - Hernández, M. Á. S., Mendoza, S. A., y Gómez, R. A. (2015). Producción de Piña Cayena Lisa y MD2 (*Ananas comosus* L.) en condiciones de Loma Bonita, Oaxaca. In *Ciencias de la Biología y Agronomía: Handbook TI. ECORFAN*. 100-110.
 - Hernández-Rojas, M., y Vélez-Ruiz, J. F. (2014). Suero de leche y su aplicación en la elaboración de alimentos funcionales. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*, 8(2), 13-22.
 - Hess, J. M., y Slavin, J. L. (2018). The benefits of defining “snacks”. *Physiology and behavior*, 193, 284-287.
 - Holban A. Maria y Grumezescu A. Mihai, (2018), *In Alternative and Replacement Foods*, Londres, Europa, Academic Press.

-
- Huber, G. R. (2001). Developments and trends in extruded snacks. *Food Prod. Design*, 11, 123-143.
 - Ilankovan Paraman, Susmoko Supriyadi, Michael E. Wagner y Syed S. H. Rizvi (2013) Prebiotic fibre-incorporated whey protein crisps processed by supercritical fluid extrusion, *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 2193–2199.
 - Iwe, M. O., Zuilichem, D. V., y Ngoddy, P. O. (2001). Extrusion cooking of blends of soy flour and sweet potato flour on specific mechanical energy (SME), extrudate temperature and torque. *Journal of Food Processing and Preservation*, 25(4), 251-266.
 - Jha, S. K., Singh, H. R., y Prakash, P. (2017). Dietary Fiber and Human Health: An Introduction. In *Dietary Fiber for the Prevention of Cardiovascular Disease*. Academic Press, 1-22.
 - Jiménez-Hernández, J., Salazar-Montoya, J. A., y Ramos-Ramírez, E. G. (2007). Physical, chemical and microscopic characterization of a new starch from chayote (*Sechium edule*) tuber and its comparison with potato and maize starches. *Carbohydrate polymers*, 68(4), 679-686.
 - Jing, Y., y Chi, Y. J. (2013). Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue. *Food chemistry*, 138(2-3), 884-889.
 - Korkerd, S., Wanlapa, S., Puttanlek, C., Uttapap, D., y Rungsardthong, V. (2016). Expansion and functional properties of extruded snacks enriched with nutrition sources from food processing by-products. *Journal of food science and technology*, 53(1), 561-570.
 - Kowalski, R. J., Hause, J. P., Joyner, H., y Ganjyal, G. M. (2018). Waxy flour degradation—Impact of screw geometry and specific mechanical energy in a co-rotating twin screw extruder. *Food Chemistry*, 239, 688-696.
 - Kowalski, R. J., Hause, J. P., Joyner, H., y Ganjyal, G. M. (2018). Waxy flour degradation—Impact of screw geometry and specific mechanical energy in a co-rotating twin screw extruder. *Food chemistry*, 239, 688-696.

-
- Larrauri, J. A., Rupérez, P., y Calixto, F. S. (1997). Pineapple shell as a source of dietary fiber with associated polyphenols. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(10), 4028-4031.
 - Leyva-Corral, J., Quintero-Ramos, A., Camacho-Dávila, A., de Jesús Zazueta-Morales, J., Aguilar-Palazuelos, E., Ruiz-Gutiérrez, M. G., y de Jesús Ruiz-Anchondo, T. (2016). Polyphenolic compound stability and antioxidant capacity of apple pomace in an extruded cereal. *LWT-Food Science and Technology*, 65, 228-236.
 - Li, Q., y Zhao, Z. (2018). Interaction between lactoferrin and whey proteins and its influence on the heat-induced gelation of whey proteins. *Food Chemistry*, 252, 92-98.
 - Llopart, E. E., Drago, S. R., De Greef, D. M., Torres, R. L., y González, R. J. (2014). Effects of extrusion conditions on physical and nutritional properties of extruded whole grain red sorghum (*Sorghum spp*). *International journal of food sciences and nutrition*, 65(1), 34-41.
 - Loison-Cabot, C. (1992). Origin, phylogeny and evolution of pineapple species. *Fruits*, 47(1), 25-32.
 - Madureira, A. R., Tavares, T., Gomes, A. M. P., Pintado, M. E., y Malcata, F. X. (2010). Invited review: physiological properties of bioactive peptides obtained from whey proteins. *Journal of dairy science*, 93(2), 437-455
 - Makowska, A., Zielińska-Dawidziak, M., Niedzielski, P., y Michalak, M. (2018). Effect of extrusion conditions on iron stability and physical and textural properties of corn snacks enriched with soybean ferritin. *International journal of food science y technology*, 53(2), 296-303.
 - Martínez, R., Torres, P., Meneses, M. A., Figueroa, J. G., Pérez-Álvarez, J. A., y Viuda-Martos, M. (2012). Chemical, technological and in vitro antioxidant properties of mango, guava, pineapple and passion fruit dietary fibre concentrate. *Food Chemistry*, 135(3), 1520-1526
 - Martínez, R., Torres, P., Meneses, M. A., Figueroa, J. G., Pérez-Álvarez, J. A., y Viuda-Martos, M. (2012). Chemical, technological and in vitro antioxidant

properties of mango, guava, pineapple and passion fruit dietary fibre concentrate. *Food chemistry*. 135(3), 1520-1526.

- Mattes, R. D. (2018). Snacking: A cause for concern. *Physiology y behavior*, 193, 279-283.
- Menezes, E. W., Tadini, C. C., Tribess, T. B., Zuleta, A., Binaghi, J., Pak, N., y Lajolo, F. M. (2011). Chemical composition and nutritional value of unripe banana flour (*Musa acuminata*, var. Nanicão). *Plant foods for human nutrition*, 66(3), 231-237.
- Mills, E. C., Marigheto, N. A., Wellner, N., Fairhurst, S. A., Jenkins, J. A., Mann, R., and Belton, P. S. (2003). Thermally induced structural changes in glycinin, the 11S globulin of soya bean (*Glycine max*)—an in situ spectroscopic study. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics*, 1648(1), 105-114
- Miriam Mabel Selani, Solange Guidolin Canniatti Brazaca, Carlos Tadeu dos Santos Dias, Wajira S. Ratnayake, Rolando A. Flores, Andreia Bianchini (2012) Characterisation and potential application of pineapple pomace in an extruded product for fibre enhancement *Food Chemistry* 163 (2014) 23–30
- Mohammed Shafiq Alam, Shivani Pathania, Anjali Sharma (2016) Optimization of the extrusion process for development of high fibre soybean-rice ready-to-eat snacks using carrot pomace and cauliflower trimmings. *Food Science and Technology*, 74, 135 - 144
- Motato, K. E., Mejía, A. I., y León, á. (2006). Evaluación de los residuos agroindustriales de plátano (*Musa paradisíaca*) y aserrín de abarco (*Cariniana piriformes*) como sustratos para el cultivo del hongo *Pleurotus djamovitae*. *Revista de la facultad de química farmacéutica* 13(1) 24-29.
- Navale, S. A., Swami, S. B., y Thakor, N. J. (2015). Extrusion cooking technology for foods: a review. *Journal of Ready to Eat Food*, 2(3), 66-80.
- Navarro Cortez, R. O., Gómez-Aldapa, C. A., Aguilar-Palazuelos, E., Delgado-Licon, E., Castro Rosas, J., Hernández-Ávila, J., y Medrano-Roldán, H. (2016). Blue corn (*Zea mays* L.) with added orange (*Citrus sinensis*) fruit

bagasse: novel ingredients for extruded snacks. *CyTA-Journal of Food*, 14(2), 349-358.

- Navarro-Cortez, R.O, Hernández-Santos, B., Gómez-Aldapa, C.A., Castro-Rosas, J., Herman-Lara, E., Martínez Sánchez, C.E., Juárez-Barrientos, J.M., Antonio-Cisneros, C.M., Rodríguez-Miranda, J., (2016). Development of extruded ready-to-eat snacks using pumpkin seed (*Cucurbita pepo*) and nixtamalized maize (*Zea mays*) flour blends. *Revista Mexicana Ingeniera Química*. 15 (2) 409–422.
- Navas, J. S. R. (2015). Aprovechamiento Industrial de Lactosuero Mediante Procesos Fermentativos. *Publicaciones e Investigación*, 6, 69-83.
- Oliveira, L. C., Alencar, N. M., y Steel, C. J. (2018). Improvement of sensorial and technological characteristics of extruded breakfast cereals enriched with whole grain wheat flour and jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) peel. *LWT- Food Science and Technology*, 90, 207-214.
- Onwulata, C. I., Konstance, R. P., Cooke, P. H., y Farrell Jr, H. M. (2003). Functionality of extrusion—texturized whey proteins. *Journal of Dairy Science*, 86(11), 3775-3782.
- Onwulata, C. I., Phillips, J. G., Tunick, M. H., Qi, P. X., y Cooke, P. H. (2010). Texturized dairy proteins. *Journal of food science*, 75(2), 100-109.
- Onwulata, C. I., Smith, P. W., Konstance, R. P., y Holsinger, V. H. (2001). Incorporation of whey products in extruded corn, potato or rice snacks. *Food Research International*, 34(8), 679-687.
- Paraman, I., Supriyadi, S., Wagner, M. E., y Rizvi, S. S. (2013). Prebiotic fibre-incorporated whey protein crisps processed by supercritical fluid extrusion. *International Journal of Food Science y Technology*, 48(10), 2193-2199.
- Parra Huertas, R. A. (2009). Lactosuero: importancia en la industria de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 62(1).4967-4982

-
- Peressini, D., Foschia, M., Tubaro, F., y Sensidoni, A. (2015). Impact of soluble dietary fibre on the characteristics of extruded snacks. *Food Hydrocolloids*, 43, 73-81.
 - Primo Y.E. (1997). Química de los Alimentos. Madrid, España. Editorial SINTESIS
 - Qi, P. X., y Onwulata, C. I. (2011). Physical properties, molecular structures, and protein quality of texturized whey protein isolate: Effect of extrusion moisture content. *Journal of dairy science*, 94(5), 2231-2244.
 - Qi, P. X., y Onwulata, C. I. (2011). Physical properties, molecular structures, and protein quality of texturized whey protein isolate: Effect of extrusion temperature. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(9), 4668-4675.
 - Ramírez-Cortina, C. R., Alonso-Gutiérrez, M. S., y Rigal, L. (2012). Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de rumiantes. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(3), 449-457.
 - Ramírez-Navas, J. S. (2012). Análisis sensorial: pruebas orientadas al consumidor. *Revista ReCiTelA* 12 (1).90 - 93
 - Ramírez-Navas, J. S. (2013). Uso de la fermentación para el aprovechamiento del lactosuero. *Tecnología Láctea Latinoamericana*, 77, 52-61.
 - Reis de Souza, T. C., Mariscal Landín, G., Aguilera Barreyro, A., y Cervantes Huerta, J. G. (2007). Digestibilidad de la proteína y energía en dietas para lechones, complementadas con tres diferentes tipos de suero de leche deshidratado. *Veterinaria México*, 38(2) 141-151
 - Requirements for Nutrient Content Claims, 2013. URL:<<http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=101.54>>
 - Robin, F., Schuchmann, H. P., y Palzer, S. (2012). Dietary fiber in extruded cereals: limitations and opportunities. *Trends in Food Science y Technology*, 28(1), 23-32.

-
- Robutti, J., Borrás, F., González, R., Torres, R., y De Greef, D. (2002). Endosperm properties and extrusion cooking behavior of maize cultivars. *LWT-Food Science and Technology*, 35(8), 663-669.
 - Rodríguez-Miranda, J., Gómez-Aldapa, C. A., Castro-Rosas, J., Ramírez-Wong, B., Vivar-Vera, M. A., Morales-Rosas, I., y Delgado, E. (2014). Effect of extrusion temperature, moisture content and screw speed on the functional properties of aquaculture balanced feed. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 26 (8) 659-671.
 - Rodríguez-Miranda, J., Ruiz-López, I. I., Herman-Lara, E., Martínez-Sánchez, C. E., Delgado-Licon, E., y Vivar-Vera, M. A. (2011). Development of extruded snacks using taro (*Colocasia esculenta*) and nixtamalized maize (*Zea mays*) flour blends. *LWT-Food Science and Technology*, 44(3), 673-680.
 - Romelle, F., Ashwini, R., y Manohar, R. (2016). Chemical composition of some selected 732 fruit peels. *European Journal of Food Science and Technology*, 4, 12-21.
 - Rouf Shah, T., Prasad, K., y Kumar, P. (2016). Maize—A potential source of human nutrition and health: A review. *Cogent Food y Agriculture*, 2(1), 1166995.
 - SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación, 2017 URL < <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal>
 - SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación, 2017 URL < <https://www.mexicampo.com.mx/fortalece-mexico-produccion-de-maiz-blanco-sagarpa/>
 - Samaan, R. A. (2017). Dietary Fiber for the Prevention of Cardiovascular Disease: Fiber's Interaction between Gut Microflora, Sugar Metabolism, Weight Control and Cardiovascular Health. *Los Angeles, CA, United States, Academic Press*.
 - Sanewski, G. M., Bartholomew, D. P., y Paull, R. E. (2018). *The pineapple: botany, production, and uses*, Londres, Europa, CABI

-
- Saricoban, C., y Yilmaz, M. T. (2010). Modelling the effects of processing factors on the changes in colour parameters of cooked meatballs using response surface methodology. *World Applied Sciences Journal*, 9(1), 14-22.
 - Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *BioTecnología*, 16(2), 14-46.
 - Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2017) Planeación agrícola nacional 2017-20130.
 - Selani, M. M., Brazaca, S. G. C., dos Santos Dias, C. T., Ratnayake, W. S., Flores, R. A., y Bianchini, A. (2014). Characterisation and potential application of pineapple pomace in an extruded product for fibre enhancement. *Food chemistry*, 163, 23-30.
 - Shiau, S. Y., Wu, M. Y., y Liu, Y. L. (2015). The effect of pineapple core fiber on dough rheology and the quality of mantou. *journal of food and drug analysis*, 23(3), 493-500.
 - Shihani, N., Kumbhar, B. K., y Kulshreshtha, M. (2006). Modeling of extrusion process using response surface methodology and artificial neural networks. *Journal of engineering science and Technology*, 1(1), 31-40.
 - Silveira Rodríguez, M. B., Monereo Megías, S., y Molina Baena, B. (2003). Alimentos funcionales y nutrición óptima: ¿Cerca o lejos? *Revista española de salud pública*, 77, 317-331.
 - Singh R.P.,Heldman Dennis R. (2014) Chapter 14 - Extrusion Processes for Foods. *Food Science and Technology*, 743-766
 - Solís-Fuentes, J. A., Morales-Téllez, M., Ayala-Tirado, R. C., y Durán-de-Bazúa, M. D. C. (2012). Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. *Tecnología Ciencia Educación*, 27(1) 36 – 48
 - Soykeabkaew, N., Thanomsilp, C., y Suwantong, O. (2015). A review: Starch-based composite foams. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 78, 246-263.
 - Stone, H., Bleibaum R. N y Thomas. H. A (2012). *Sensory evaluation practices*. Londres, Europa. Academic press.

-
- Takizawa, F. F., Silva, G. D. O. D., Konkel, F. E., y Demiate, I. M. (2004). Characterization of tropical starches modified with potassium permanganate and lactic acid. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 47(6), 921-931.
 - Teba da Silva, C., da Silva, E. M. M., Chávez, D. W. H., de Carvalho, C. W. P., y Ascheri, J. L. R. (2017). Effects of whey protein concentrate, feed moisture and temperature on the physicochemical characteristics of a rice-based extruded flour. *Food chemistry*, 228, 287-296.
 - Thomas, E., Puget, S., Valentin, D., y Songer, P. (2017). Sensory Evaluation—Profiling and Preferences. In *The Craft and Science of Coffee*. Academic Press. 419-456.
 - Upadhyay, A., Lama, J. P., y Tawata, S. (2010). Utilization of pineapple waste: a review. *Journal of Food Science and Technology Nepal*, 6, 10-18
 - Utrilla-Coello, RG, Agama-Acevedo, E., de la Rosa, APB, Martínez-Salgado, JL, Rodríguez-Ambríz, SL, y Bello-Pérez, LA (2009). Maíz azul: caracterización de morfología y sintasa de almidón de gránulos de almidón. *Alimentos de origen vegetal para la nutrición humana* 64 (1), 18-24.
 - Valenzuela-Lagarda, J. L., Gutiérrez-Dorado, R., Pacheco-Aguilar, R., Lugo-Sánchez, M. E., Valdez-Torres, J. B., Reyes-Moreno, C., y Muy-Rangel, M. D. (2017). Botanas expandidas a base de mezclas de harinas de calamar, maíz y papa: efecto de las variables del proceso sobre propiedades fisicoquímicas. *CyTA-Journal of Food*, 15(1), 118-124.
 - Wijeratnam, S. W. (2016). Pineapple. In B. Caballero, P. M. Finglas, y F. Toldrá (Eds.). *Encyclopedia of Food and Health*. Elsevier Academic Press. 380–384.
 - Yada, R. Y. (2018) *Proteins in Food Processing*. Woodhead Publishing Cambridge, Estados Unidos, Elsevier
 - Yang, C., Zhong, F., Goff, H. D., y Li, Y. (2019). Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends. *Food chemistry*, 280, 51-58.