

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**Desarrollo y caracterización de una botana de 3^{era}
generación preparada con mezclas de harina de maíz azul y
soya**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIA DE LOS ALIMENTOS**

P R E S E N T A:

L. N. Isidro Reyes Hernández

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

CO-DIRECTOR

Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez

Inserta aquí el acta de revisión

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Miriam y mi hija Isis Noemi, por su paciencia, por su apoyo y sobre todo por sus sonrisas que me hacía sentir el esposo y papá más feliz del mundo.

A mi familia que estuvieron ahí apoyándome para seguir estudiando.

A la familia de mi esposa por ser parte de este proceso, apoyándome en su mayoría dándome palabras de aliento y de perseverancia.

Al Dr. Ricardo, Dr. Juan Pablo, Dra. Heidi y Dr. Apolonio. que fueron parte de este trabajo, por sus orientaciones y su apoyo, pero sobre todo su paciencia.

A mis compañeros y amigos que estuvieron conmigo en este proceso, Abigail, Izanami y Gerardo, con ellos aprendí a que a pesar de nuestras indiferencias ahí estábamos apoyándonos, para terminar este gran proyecto, conocerlos y tratarlos en esta etapa serán y son parte de esta vida.

DEDICATORIA

Dedicada a mi hija Isis Noemi Reyes Salitre con la intención que con el paso del tiempo ella pueda leer un trabajo hecho por su padre, que en ella nazca, el deseo de prepararse y ser parte de la investigación, que juntos aprendamos a que lo que dice la sociedad es de cuestionar e investigar.

A mi esposa Miriam Salitre Pérez, gracias a ella por su perseverancia, su fuerza que me compartía, por su paciencia, su amor, no cabe duda de que es la mejor compañera de vida. Y recordando que ella también está en el proceso de posgrado, le recomiendo que, este proceso es algo tedioso, en ocasiones el tema que estás trabajando no te apasiona, pero aprendes del mucho, y lo haces tuyo, y te gusta y al final te apasiona. Tanto que quieres seguir aprendiendo.

RESUMEN

La botana se define como un alimento pequeño y ligero, que es empaquetada en raciones individuales, comúnmente no es considerada como un alimento nutritivo. La industria alimentaria busca ingredientes innovadores para procesar botanas que aporten al comensal efectos benéficos a la salud. La tecnología de la extrusión es un proceso innovador con bajos costos en las preparaciones de botanas, además de proveer nuevas características fisicoquímicas a los alimentos. En el presente estudio de investigación, se desarrolló y caracterizó una botana de 3era generación expandida mediante microondas, utilizando mezclas de harina integrales de maíz azul y soya. Para el desarrollo de estos productos extruidos se utilizó un diseño de experimentos central compuestos rotatable con tres factores (temperatura de la matriz de salida, humedad de la mezcla y concentración de soya), la combinación de los niveles de los factores dio como resultado 20 tratamientos experimentales (8 puntos factoriales, 6 puntos axiales y 6 réplicas en el centro). Se prepararon mezclas de maíz azul y concentraciones de soya que oscilan entre 0 y 40%, con un contenido de humedad entre 22-32% y una temperatura de matriz de salida entre 90 y 140°C. Las variables de respuesta determinadas en los productos extruidos fueron, índice de expansión, dureza, densidad aparente, índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua, contenido fenoles totales, contenido de antocianinas, actividad antioxidante por DPPH y ABTS. Los resultados mostraron que los factores de estudio presentan efecto significativo sobre las respuestas evaluadas. El incremento en la concentración de soya disminuye el índice de expansión e incrementa la dureza y densidad aparente de los productos extruidos; mientras que el incremento en la temperatura de la matriz de salida disminuye la actividad antioxidante y contenido de antocianinas. La metodología de superficie de respuesta nos permite predecir las condiciones óptimas de un proceso, en el presente estudio las condiciones óptimas de procesamiento fueron, concentración de soya (20%), humedad de la mezcla (27%) y temperatura de la matriz de salida (140°C). Con esta concentración de soya se permite tener un alimento rico en proteína, rico en fibra y antioxidantes.

ABSTRACT

Snack is defined as a small and light food, which is packaged in individual rations, not commonly considered as a nutritious food. The food industry seeks innovative ingredients to process snacks that bring beneficial effects to the diner health. Extrusion technology is an innovative process with low costs in snack preparations, in addition to providing new physico-chemical characteristics to food. In the present research study, a 3rd generation snack expanded by microwave was developed and characterized, using blends of blue corn and soybean whole wheat flour. For the development of these extruded products, a design of central compound experiments was used, rotatable with three factors (output matrix temperature, mixture humidity and soybean concentration), the combination of factor levels resulted in 20 experimental treatments (8 factor points, 6 axial points and 6 replicates in the center). Mixtures of blue corn and soybean concentrations ranging from 0 to 40% were prepared, with a moisture content between 22-32% and an output matrix temperature between 90 and 140°C. The response variables determined in the extruded products were, expansion index, hardness, bulk density, water absorption index, water solubility index, total phenol content, anthocyanin content, antioxidant activity by DPPH and ABTS. The results showed that the study factors had a significant effect on the responses evaluated. The increased concentration of soy decreases the expansion rate and increases the hardness and apparent density of extruded products, while the increased temperature of the output matrix decreases the antioxidant activity and anthocyanin content. The response surface methodology allows us to predict the optimal conditions of a process, in the present study the optimal processing conditions were soybean concentration (20%), mixture humidity (27%) and output matrix temperature (140°C). With this concentration of soy is allowed to have a food rich in protein, rich in fiber and antioxidants.

ÍNDICE

Contenido

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	1
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
1 INTRODUCCIÓN	10
2 MARCO TEÓRICO	12
2.1 Botana.....	12
2.2 Clasificación de las botanas.....	13
2.3 Utilización de nuevas materias primas en la elaboración de botanas.	14
2.4 Tecnología de la extrusión.	15
2.5 Extrusor.....	16
2.6 Efectos que provoca el proceso de extrusión en los alimentos.....	17
2.7 Características de calidad para una botana: expansión y propiedades nutrimentales.....	17
2.8 Materias primas para elaboración de botanas.	19

2.8.1	<i>Maíz (Zea mays L.)</i>	19
2.8.2	<i>Estructura del grano.</i>	19
2.9	Maíz Azul.	21
2.9.1	<i>Composición química del grano de maíz.</i>	21
2.10	Soya (Glycine Max).....	24
2.10.1	Estructura del grano se soya.....	25
2.10.2	Lípidos de la soya.	25
2.10.3	Hidratos de Carbono en la soya.	26
2.10.4	Utilización de soya en extrusión.....	26
2.11	Optimización aplicada al desarrollo de botanas de tercera generación.	27
3	Justificación.....	28
4	Objetivos e hipótesis	29
4.1	Objetivo general	29
4.2	Objetivos específicos	29
5	Hipótesis	29
6	MATERIALES Y MÉTODOS	30
6.1	Materia Prima.....	30
6.2	Caracterización física de los granos de maíz y soya.	30
6.2.1	<i>Dimensión</i>	30
6.2.2	<i>Peso de 1000 y 100 granos.</i>	30

6.2.3	<i>Peso hectolítrico.</i>	30
6.2.4	Relación de componentes estructurales.....	31
6.3	Análisis químico proximal de harinas.	31
6.3.1	Obtención de harinas de maíz azul y soya.	31
6.3.2	Determinación de humedad.....	31
6.3.3	Determinación de lípidos.	32
6.3.4	Determinación de ceniza.	32
6.3.5	Determinación de fibra.....	32
6.4	Caracterización Físicoquímica de materias primas.	33
6.4.1	Índice de absorción de agua (IAA) e Índice de solubilidad (ISA).	33
6.4.2	Determinación de color.....	33
6.4.3	Análisis rápido de viscosidad.....	34
6.5	Caracterización funcional de materias primas.....	34
6.5.1	Obtención de extractos.....	34
6.5.2	Determinación del contenido de fenoles totales.	35
6.5.3	Determinación de Antocianinas mediante diferencial de pH.....	35
6.5.4	Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH).....	36
6.5.5	Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2'-azinobis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS•+)	36

6.5.6	Determinación de Flavonoides	37
6.6	Análisis de pellets (extrudidos).....	37
6.6.1	Obtención de pellets proceso de extrusión.....	37
6.7	Obtención de harina a partir de los pellets y su caracterización	39
6.7.1	Determinación de humedad.....	39
6.7.2	Índice de absorción de agua (IAA) e Índice de solubilidad (ISA).	39
6.7.3	Determinación de color.....	39
6.7.4	Análisis rápido de viscosidad.....	39
6.7.5	Obtención de extractos.....	39
6.7.6	Determinación del contenido de Fenoles totales.	39
6.7.7	Determinación de Antocianinas mediante diferencial de pH.....	40
6.7.8	Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH).....	40
6.7.9	Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2'-azinobis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS•+).	40
6.7.10	Determinación de Flavonoides.....	40
6.8	Análisis de Expandidos.....	40
6.8.1	Obtención de botanas de Expandidas.....	40
6.8.2	Índice de expansión.....	41
6.8.3	Densidad aparente.....	41

6.8.4	Dureza.....	42
6.8.5	Determinación de humedad.....	42
6.8.6	Índice de absorción de agua (IAA) e Índice de solubilidad (ISA).	42
6.8.7	Determinación de color.....	42
6.8.8	Obtención de extractos.....	42
6.8.9	Determinación del contenido de Fenoles totales.	42
6.8.10	Determinación de Antocianinas.....	43
6.8.11	Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH).....	43
6.8.12	Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2'-azinobis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS•+).	43
6.8.13	Determinación de Flavonoides.....	43
6.8.14	Análisis estadístico.....	43
6.9	Optimización.	43
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
7.1	Análisis fisicoquímico de los granos de maíz y soya.....	44
7.2	Análisis fisicoquímico de las mezclas de harinas antes de ser sometidas al proceso de extrusión.	52
7.3	Análisis fisicoquímico de pellets expandidos.....	53
7.4	Análisis Funcional de los Productos Extruidos Expandidos	67

7.4.1	Coeficientes de regresión del modelo ajustado	67
7.4.2	Cuantificación del contenido de fenoles totales en los productos extruidos expandidos.....	69
7.4.3	Cuantificación del contenido de antocianinas en los productos extruidos expandidos.....	70
7.5	Optimización del proceso de extrusión.....	78
8	CONCLUSIONES	80
9	Bibliografía	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Botanas fortificadas para mejorar el impacto a la salud.	18
Tabla 2 Diseño experimental, central compuesto rotatable para la obtención de una botana de 3era generación a partir de harina de maíz azul y soya.	38
Tabla 3 Análisis físico de los granos de maíz y soya.	45
Tabla 4. Relación de componentes estructurales de granos de maíz y soya.....	46
Tabla 5 Determinación de humedad, índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) de harina de maíz y harina de soya.	48
Tabla 6 Análisis químico proximal de la harina de maíz y de la harina de soya.....	48
Tabla 7 Determinación de los parámetros de color L*, a*, b* en harina de maíz azul, harina de soya y almidón de maíz.	49
Tabla 8 Análisis de combinaciones de harinas de maíz, azul y soya (índice de solubilidad, Índice de absorción de agua y color) en diferentes concentraciones sin tratamiento.....	52
Tabla 9 Análisis de Varianza y coeficientes de determinación (R ²) del modelo ajustado para las respuestas contenido de Índice de solubilidad de agua (ISA), Índice de absorción de agua (IAA), Diferencia de color (ΔE), Índice de expansión (Inexp), Densidad Aparente (δ_{apa}) y Dureza (D)en harina de pellet de maíz y soya expandida.	55
Tabla 10 Análisis de Varianza y coeficientes de determinación (R ²) del modelo ajustado para las respuestas índice de solubilidad en Fenoles Totales, Antocianinas (ANT), ABTS, DPPH y Flavonoides en harina de pellet de maíz y soya expandida.....	68
Tabla 11 Parámetros de la botana con optimizado con software y pellet final.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Análisis Rápido de Viscosidad, en el eje Y se muestra la viscosidad de la muestra en parámetros centipoints (cP), en el eje X el tiempo (min) y el eje Y la temperatura utilizada en el barrido de la rampa (°C).	51
Figura 2 Gráfico de superficie de respuesta de índice de expansión, en pellet expandido de harina de maíz y soya.	57
Figura 3 Gráfico de superficie de respuesta de dureza (N), en pellet expandido de harina de maíz y soya.....	60
Figura 4 Gráfico de superficie de respuesta de índice de absorción de agua, pellet expandido de harina de maíz y soya.	61
Figura 5 Gráfico de superficie de respuesta de índice de solubilidad de agua, en pellet expandido de harina de maíz y soya.	64
Figura 6 Gráfico de superficie de respuesta de densidad aparente, en pellet expandido de harina de maíz y soya.....	65
Figura 7 Gráfico de superficie de respuesta de índice de absorción de aceite, en pellet expandido de harina de maíz y soya.	66
Figura 8 Gráfico de superficie de respuesta de Índice de absorción de aceite, en pellet expandido de harina de maíz y soya	66
Figura 9 Gráfico de superficie de respuesta de contenido de Fenoles totales (mg/EAG/g) en pellet expandido de harina de maíz y soya.....	73
Figura 10. Gráfico de superficie de respuesta de contenido de Antocianinas (mg/g) en pellet expandido de harina de maíz y soya.....	74

Figura 11. Gráfico de superficie de respuesta para la determinación de actividad antioxidante por DPPH (mg/ET/g) en productos expandidos por microondas elaborados a partir de harina de maíz y soya.	76
Figura 12 Gráfico de superficie de respuesta de determinación de actividad antioxidante por ABTS (mg/ET/g) en pellet expandido de harina de maíz y soya.	77
Figura 13. Gráfico de optimización del proceso de extrusión para la elaboración de botana de tercera generación a partir de maíz azul y soya.	79

1 INTRODUCCIÓN

Los consumidores son cada vez más conscientes de las propiedades que contienen los alimentos, en respuesta a ello, buscan alimentos que les ayuden a reducir los riesgos de padecer algunas enfermedades, motivo por el cual la industria procesadora de alimentos busca el desarrollo de alimentos denominados funcionales, siendo un área de gran interés (Delcour & Poutanen, 2013).

Las materias primas vegetales destinadas a la alimentación como; cereales y leguminosas se encuentran entre las más importantes, debido a que si se realiza una combinación de cereales (ricos en fibra, contenido de proteína y lípidos bajos y con una digestibilidad alta de hidratos de carbono) y leguminosas (con alto contenido de proteínas, fibra e hidratos de carbono de digestión y asimilación lenta con un contenido de lípidos bajo) en comparación con los alimentos de origen animal que al ser consumido este contiene colesterol afectando en la salud del comensal.

Es preferible consumir alimentos de origen vegetal debido a que al hacer esta combinación se proporciona las proteínas con alto contenido de perfil de aminoácidos y alto valor biológico (Badui Dergal, 2016).

Una tecnología para el desarrollo de nuevos alimentos es la extrusión, es un proceso que combina operaciones unitarias como transporte, mezclado, cocimiento y formado, se utiliza en la industria alimentaria para la preparación de botanas con diferentes propiedades nutricionales; además, un proceso de bajo costo y fácil manipulación (Reis, Bertolino, & Canevarolo, 2009).

A nivel mundial el mercado de las botanas elabora una diversidad de productos, para satisfacer la demanda de la vida acelerada de la mayoría de los consumidores, inclinándose al consumo de alimentos de preparación rápida y accesible; sin embargo, estos alimentos, muchas de las veces son de bajo aporte nutricional, causando problemas de salud en la población actual, debido al consumo de alimentos considerados como “chatarra”.

Las botanas son consideradas un alimento, que pueden ser consumidas a cualquier hora del día, debido a sus características que estas presentan, en cuanto a cantidad,

sabor y precio, generalmente son consumidas entre comidas, con el objetivo de saciar el apetito (Agume, Njintang, & Mbofung, 2017).

La incorporación de nuevos ingredientes en la preparación de botanas es uno de los principales objetivos de la industria alimentaria, donde se busca ingredientes que además de aportar nutrientes básicos como proteínas, lípidos y carbohidratos, cumplan una función en la prevención de enfermedades. Las botanas extruidas permiten homogenizar mezclas de diferentes ingredientes sin importar su naturaleza.

Algunos estudios realizados donde se utilizaron mezclas de harina de maíz y leguminosas son los de, Sinaki, Masatcioglu, Paliwal, & Koksel (2021), quienes desarrollaron una botana de 2da y 3era generación ricas en proteína, utilizando mezclas de chicharos amarillos y lentejas rojas. Los porcentajes de humedad de las mezclas fueron 20 y 24% con temperatura de extrusión de 100 y 125 °C. Se evaluó el índice de expansión, densidad aparente y textura, los autores reportan que los extruidos de lenteja roja presentan una mayor expansión y mayor crujencia al incrementar la temperatura de extrusión. Esparza et al. (2019), desarrollaron una botana de 3era generación a partir de harina de trigo y diferentes concentraciones de harina de garbanzo (25, 30 y 35% p/p) variando la temperatura del extrusor de la zona A (80, 90 y 100 °C) y de la zona B (110, 115 y 120 °C), humedad de las mezclas (50, 55 y 60%).

Los resultados obtenidos muestran que al incrementar la concentración de garbanzo incrementa la densidad aparente y la dureza, y disminuye el índice de expansión; también reportan que la temperatura de la zona A y B que mostraron un mayor índice de expansión a 100 y 110°C, respectivamente; con una humedad de la mezcla de 60%.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Botana.

Se define como comida pequeña y ligera, de fácil manipulación, listas para su consumo, empaquetada en raciones individuales, pueden ser solidas o líquidas, su principal objetivo es satisfacer el apetito por un periodo de tiempo corto (Méndez-Montevalvo, García-Suárez, Paredes-López, & Bello-Pérez, 2008). Las botanas no son consideradas como alimentos verdaderos, debido a que tienen un bajo valor nutritivo.

La industria de las botanas es muy variable, debido a la preferencia de los consumidores, por lo que se tiene que estar innovando en el desarrollo y producción de nuevas botanas. Los ingredientes deben proporcionar características fisicoquímicas, nutricionales y organolépticas adecuadas para satisfacer las necesidades de los consumidores (Pszczola, 2002).

De acuerdo con el documento oficial PROY-NOM-216-SSA1-2002, se define como botana a aquellos productos fritos, horneados, explotados, extruidos o tostados obtenidos a partir de harinas de cereales o cutículas, productos nixtamalizados y piel de cerdo, que pueden estar adicionados o no con sal y otros ingredientes opcionales y aditivos alimentarios.

Las botanas pueden ser nutritivas cuando su elaboración es a base de frutas, tubérculos, leguminosas o cereales, entre otros. También son fuente de proteína y energía, particularmente para los sectores con bajos niveles de ingresos de la sociedad, cuya dieta es deficiente en estos nutrientes (Martínez Muñoz, 2013).

Las botanas con mayor consumo en México son elaboradas a base de maíz, papa y cacahuate; sin embargo, se cuenta con una gran diversidad y disponibilidad de tubérculos, cereales y leguminosas de los que se pueden obtener botanas con igual sabor y textura, aunque con mejores características nutricionales, debido a que son bajas en grasa y están constituidos por almidón resistente, no tienen aporte calórico y ejercen funciones similares en el organismo especialmente a las de fibra (Camire, Camire, Krumhar, & Nutrition, 1990).

La venta de botanas es una actividad redituable, debido a que existen compañías líderes que día con día innovan con sus productos, con el objetivo de satisfacer los paladares de los comensales (Taddei Bringas, 2006). En su mayoría estas empresas se localizan en gran parte de la república mexicana, algunas tienen marcas comerciales, algunas maquilan para empresas más grandes y existen fabricantes caseros, parte del éxito en el sector de las botanas consiste en las complejas redes de distribución de las compañías líderes, que abarcan las localidades más remotas del país (Arroyo & Herrera, 2003).

De acuerdo con la ENSANUT 2020, el gasto per cápita en la compra de botanas es de un 7.5%, esto se puede traducir que en la mayoría de los hogares gastan en alimentos de alta densidad energética, en cuya composición hay azúcares, aceites y/o grasas. Las botanas aportan aproximadamente el 30% de las calorías diarias en muchos países de América. Varias botanas que se consumen principalmente son aceptadas cada vez más como elementos de acompañamiento; por ejemplo, hojuelas de maíz o papas fritas servidas en lugar de puré de papas. Esto se puede observar en el crecimiento continuo en ventas (Riaz & engineering, 2006).

2.2 Clasificación de las botanas.

Desde la invención de las papas fritas, que data del año 1853, la forma de elaboración ha cambiado, por lo que, de acuerdo con su proceso de obtención las botanas se clasifican en 3 grupos.

- 1) **Botanas de primera generación:** se sitúan todos los productos naturales utilizados para botana, como nueces, papas fritas y palomitas. En ellas se destacan claramente dos inconvenientes, la materia prima es perecedera, con una vida de anaquel muy corta de 1 a 3 meses donde los empaques abiertos ocasionan un deterioro rápido del producto terminado (Riaz & engineering, 2006).
- 2) **Botanas de segunda generación o botanas expandidas:** la mayoría de las botanas en el mercado actual están incluidas en esta categoría. Las botanas de un solo ingrediente. Se llaman productos directamente expandidos porque no

requieren procesamiento adicional después del proceso de extrusión, y se dice que son los productos más fáciles de hacer con un extrusor (Sevatson & Huber, 2000).

- 3) **Botanas de tercera generación:** en esta categoría se incluye a los productos obtenidos por extrusión llamados productos indirectamente expandidos, semiterminados, o pellets debido a que el producto obtenido no se encuentra listo para ser consumido. La presentación final se obtiene después de una expansión por freído en aceite caliente, expansión con aire caliente o por microondas, una variante más reciente de este proceso es la expansión por radiación infrarroja (Sevatson & Huber, 2000). Debido a su alta estabilidad al almacenamiento y alta densidad aparente, las botanas de tercera generación no expandidas presentan un mercado interesante con elevado potencial (Riaz & engineering, 2006). La forma de los pellets se obtiene cuando se fuerza a fluir una masa a través de orificio de salida de dimensiones reducidas también conocido como “dado” que se encuentra a bajas temperaturas para prevenir la expansión (Moore, 1994). Este tipo de productos generalmente contienen al menos 60% de almidón para alcanzar la expansión máxima durante el proceso de post-extrusión (Sevatson & Huber, 2000).

2.3 Utilización de nuevas materias primas en la elaboración de botanas.

Actualmente existen nuevas materias primas que contienen propiedades nutraceuticas y funcionales para el desarrollo de alimentos botana, con el objetivo que al consumirlas provean al comensal un estilo de vida saludable.

Las industrias de las botanas están diseñando productos horneados, sin gluten, sin azúcar, con granos integrales, con la finalidad de obtener una botana más nutritiva, con mayor cantidad de vitaminas, antioxidantes, sin perder la calidad, sabor y que sean atractivas a los consumidores, introduciendo nuevos ingredientes y mezclas de estos con polvos de frutas, verduras o algunos extractos que aporten un incremento en el valor nutrimental (Rodríguez Ostorga & Ventura Cáceres, 2017).

El Instituto politécnico nacional desarrolló una botana donde incorporó leguminosas, con el objetivo de incrementar el contenido de proteínas y disminuir el contenido de grasas, con una modificación en la cantidad de almidón presente.

En la elaboración de las botanas, existen 2 etapas, una de ellas se considera la formación de una pasta con materia prima basada en almidón y un secado para formar el producto intermedio y la segunda se basa en un calentamiento rápido al producto intermedio para lograr su expansión (Navarro-Cortez et al., 2016)

2.4 Tecnología de la extrusión.

Es una tecnología emergente en el procesamiento de alimentos, permitiendo procesar y producir una cantidad considerable de productos con diferentes tamaños, formas, texturas y sabores, impartiendo propiedades nutricionales mejoradas. La extrusión es un proceso termo-mecánico utilizado para elaboración de alimentos a alta presión y temperatura en un tiempo corto. Por lo tanto, es una forma rápida de cocción, continúa y homogénea que permite mejorar la digestibilidad de los alimentos y aspectos nutricionales.

Durante el proceso de extrusión, las materias primas sufren cambios nutricionales, fisicoquímicos y estructurales, haciendo pasar la materia prima por diferentes condiciones de humedad, temperatura, velocidad de tornillo y velocidad de alimentación. Se caracteriza por que tiene un control automatizado, con alta productividad y versatilidad, elevada eficiencia energética y bajo costo. Considerándose como un proceso de fabricación eficiente.

Durante el proceso de extrusión las harinas provenientes de cereales y leguminosas, sufren cambios estructurales y distintas reacciones que modifican sus propiedades, como la gelatinización del almidón, formación de complejos entre amilosa y lípidos, degradación de pigmentos, reacción de Maillard, modificaciones en el contenido de polifenoles, inactivación de compuestos anti nutricionales (ácido fítico, lectina, tripsina, inhibidores de la quimiotripsina y desnaturalización de proteínas), texturización y mejoramiento de las características sensoriales.

Todas estas reacciones son fundamentales en pro del desarrollo de estructura y funcionalidad del producto final procesado, la extrusión es un método eficaz para obtener productos como las botanas expandidas, cereales para desayuno, galletas almidones modificados, proteína vegetal texturizada, pastas, algunos sustitutos de carne y alimentos para mascotas (Arribas et al., 2019)

El proceso de extrusión se puede realizar de dos modos:

Extrusión en seco: el material que es utilizado sufre alteraciones provocadas por la presión y el calor.

Extrusión en húmedo: en este proceso, se añade humedad a la mezcla o material a extruir, este proceso es el más utilizado, no obstante, una condicionante es que el material a extruir debe de contener menos del 7.5% lípidos en su composición.

2.5 Extrusor.

Un extrusor está constituido por distintas partes, está provisto de un sistema de alimentación de las materias primas, un sistema de calentamiento donde se lleva a cabo la fusión y plastificación de las materias primas está provisto de un sistema de bombeo y presurización constituido por un tornillo sin fin, donde se mezclan los productos; también cuenta con un dado o matriz de salida la cual da la forma final al material fundido.

El sistema de alimentación más común en este tipo de maquina es una tolva. La materia prima que se va a procesar se introduce en forma de polvo, el cual cae al barril del extrusor en el cual en su interior está provisto un tornillo, que gira dentro de un cilindro que se calienta mediante resistencia eléctricas, al final del cilindro se coloca un cabezal o boquilla de salida con la forma que se desee el producto final, el sistema más importante es el cilindro-tornillo, debido a que al momento de girar compacta el alimento sólido, fundiendo el material y transportándolo hacia el cabezal de salida provisto de un orificio de salida de dimensiones reducidas (boquilla), produciendo al mismo tiempo presurización y mezclado del material (Navarro-Cortez et al., 2016).

2.6 Efectos que provoca el proceso de extrusión en los alimentos.

El proceso de extrusión provoca distintos efectos en los alimentos crudos, debido al sometimiento a temperaturas de hasta 250 °C y una presión de más de 100 bars, lo cual provoca cambios en las propiedades nutricionales de los alimentos, a continuación, se mencionan algunos cambios nutricionales en productos extruidos.

La extrusión afecta la biodisponibilidad de las proteínas y la solubilización de la fibra, el tratamiento térmico-mecánico provoca la desnaturalización de las proteínas, provoca cambios en el contenido de fibra dietética soluble a insoluble o viceversa después del proceso, teniendo implicaciones nutricionales y funcionales (Rolandelli et al., 2022). Se reporta la inactivación de enzimas responsables de la oxidación lipídica, así como, una disminución de compuestos anti nutricionales y en la carga microbiana.

El proceso de extrusión afecta de forma importante a los hidratos de carbono especialmente al almidón, gelatinizándolo, provocando la retrogradación y por consiguiente, la formación de almidón resistente. El almidón resistente resiste la digestión en el intestino delgado, en el intestino grueso es fermentado por la microflora del colon. La fermentación del almidón resistente en colon podría disminuir la incidencia de cáncer de colon (Xu et al., 2020).

2.7 Características de calidad para una botana: expansión y propiedades nutrimentales.

Debido a que los consumidores se preocupan cada vez más por su salud, la industria alimentaria se ha preocupado por desarrollar botanas con elevado contenido en proteínas y fibra, con la particularidad que sean bajos en hidratos de carbono y sodio, buscando productos más prácticos, que satisfagan el apetito, pero, además, que aporten compuestos para reducir la probabilidad de padecer sobrepeso y obesidad. Por lo que las investigaciones se centran en adicionar productos como frutas, verduras, cereales, leguminosas y otras proteínas de origen animal a las botanas. (Menis-Henrique, Janzantti, & Conti-Silva, 2017);(Nawaz et al., 2019).

En la Tabla 1 se mencionan algunos trabajos de investigación en los cuales se han desarrollado alimentos botana por extrusión utilizando diferentes materias primas con implicaciones en la salud.

Tabla 1 Botanas fortificadas para mejorar el impacto a la salud.

Fortificado	Beneficios a la salud	Referencias
Frutas y Verduras	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fibras ▪ Antioxidantes naturales 	<p>(Ruiz-Armenta et al., 2018)</p> <p>(Aguilar-Palazuelos, Martínez-Bustos, Limón-Valenzuela, & Zazueta-Morales, 2017)</p> <p>(Bhat, Wani, Hamdani, & Gani, 2019)</p> <p>(Poliszko et al., 2019)</p>
Cereales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fibras ▪ Proteínas ▪ Antioxidantes naturales 	<p>(Kharat et al., 2019)</p> <p>(Ruiz-Armenta et al., 2018)</p> <p>(Menis-Henrique et al., 2017)</p> <p>(Silva et al., 2019)</p>
Leguminosas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fibras ▪ Proteínas ▪ Antioxidantes naturales ▪ Vitaminas y minerales 	<p>(Natabirwa, Nakimbugwe, Lung'aho, & Muyonga, 2018)</p> <p>(Anton, Fulcher, & Arntfield, 2009)</p> <p>(Oladapo, Adeoye, & Ismail, 2018)</p>
Otras proteínas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proteínas ▪ Ácidos grasos Omega-3 ▪ Calcio ▪ Hierro ▪ Vitaminas A, D y E 	<p>(Aguilar-Palazuelos et al., 2017)</p> <p>(Yadav, Srivastava, Kumar, Abbassi, & Mishra, 2018)</p> <p>(Nawaz et al., 2019)</p>

2.8 Materias primas para elaboración de botanas.

2.8.1 Maíz (*Zea mays L.*).

Tiene su origen en el continente americano, su existencia data de hace aproximadamente 5,000 años de antigüedad, esto de acuerdo con representaciones prehispánicas de plantas de maíz o sus partes en códices, cerámicas, así como, en estudios de fósiles encontrados; se considera que el maíz tiene su origen en la República Mexicana, en el valle de Tehuacán, Puebla y al norte del estado de Oaxaca. Existen documentos de que en México ocurrió la domesticación y posterior dispersión a otras regiones del Continente Americano, abarcando desde Canadá hasta la zona sur de Argentina, tras el descubrimiento del Continente Americano, el grano de maíz se distribuyó a Europa a través de España (Reyes, 1990; Vergara, Pandey, Kumar, McLean, & Rodríguez, 1998).

En la actualidad el origen botánico del maíz gira en torno a la teoría que menciona que es la combinación del teocintle y una gramínea que ya se extinguió contenía características que produce el grano en forma de espiga (Méndez-Montealvo et al., 2005; Reyes, 1990)

El maíz pertenece a la familia de las Gramineae, subfamilia panicoideae y tribu Andropogoneae, la cual incluye siete distintos géneros: *Zea* (teocintle), *Tripsacum* (arrocillo o maicillo), *Coix*, *Chionachne*, *Sclerchne*, *Polytoxa* y *Trilobachne* (Paliwal, 2001; Vergara et al., 1998).

2.8.2 Estructura del grano.

El grano de maíz está dividido en 4 partes principales:

2.8.2.1 Pedicelo.

Es la estructura celular mediante la cual el grano se encuentra unido al olote, se compone de haces vasculares que termina en la porción basal del pericarpio, consta de una capa exterior de abscisión con la función de sellar la punta del grano maduro.

También, está compuesta de una serie de células parenquimatosas en forma de estrella, unida entre sí por medio de sus puntas formando una estructura frágil y

porosa, el pedicelo constituye un 0.8% del peso total del grano (Watson, 1987; Wolf, 1952).

2.8.2.2 Pericarpio.

Es la capa exterior dura y fibrosa que encierra el grano, comprende el pericarpio, la testa y la cofia, en un pequeño casquete que cubre la punta del grano y protege al embrión. Representa el 5.7% del peso total del grano. Es la cubierta botánica de la semilla y está compuesta por varias capas ricas en celulosa y hemicelulosa, la epidermis es la capa más externa, cubierta con cutina (sustancia cerosa que restringe la entrada de agua y otros líquidos o gases). El mesocarpio es la capa inferior a la epidermis, está compuesto de 12-25 capas de células conectadas entre sí, por los conductos a través los cuales pueden circular líquidos y gases), las siguientes cuatro capas las constituyen células cruzadas y tubulares; el agua entra por el pedicelo que puede ser transportada rápidamente dentro del grano a través de estas células (Eckhoff et al., 2003).

2.8.2.3 Endospermo.

Constituye la mayor proporción del grano con un porcentaje aproximado de un 80-84% del peso total. Su función principal es de reserva energética para la planta, durante su desarrollo. Comprende 2 regiones, la harinosa y la córnea con una relación de 2:1, su principal característica es que posee gránulos de almidón entre 10-30 μm de diámetro, con forma esférica y una capa delgada de matriz proteínica; en la región periférica o cornea se encuentran células con gránulos de almidón más pequeños (1-10 μm), químicamente el endospermo está compuesto por 90% de almidón y 67% de proteínas acompañadas de aceites, minerales y otros compuestos (Watson, 1987; Wolf, 1952).

2.8.2.4 Germen.

Es la parte del grano de maíz necesaria para el proceso de reproducción; contiene todas las enzimas, nutrimentos y componentes esenciales para producir una nueva planta de maíz (Inglett, 1970). Constituye de un 9.5-12% del peso total del grano y se localiza en la parte inferior del mismo, se divide en 2 partes, eje embrionario o escutelo, constituyendo cerca de 90% del germen y es donde se almacenan los nutrientes que

utiliza el grano durante la germinación. El germen está compuesto por aproximadamente un 35-40% del contenido total de lípidos encontrados en el grano (Hernández, Contreras, Castañeda, & Ramos, 2005; Watson, 1987).

2.9 Maíz Azul.

El color de este maíz se debe la presencia de antocianinas, las cuales se localizan en una capa delgada que recubre al endospermo, la mayoría de los maíces azules son de grano harinoso, el endospermo es de textura suave. El color azul se encuentra en la capa de células llamada aleurona, donde existe mayor concentración de pigmentos de antocianinas, lo cual hace que los granos parezcan negros. El endospermo a su vez está formado por proteínas y gránulos de almidón cuya forma y tamaño tiene influencia en sus propiedades fisicoquímicas (Taddei Bringas, 2006; Yadav et al., 2018).

México es considerado como uno de los principales centros de origen del maíz. La diversidad que existe en el país sobre esta gramínea es muy amplia y se demuestra que existen más de 59 razas de maíz descritas (Sánchez, Mascorro, & Amaya, 2000). En muchas de estas razas se presentan variantes de granos pigmentado, con coloraciones que van desde el negro hasta el rosa pálido, con los colores rojo y azul/morado como los más comunes (Salinas-Moreno & Aguilar-Modesto, 2010). Los maíces pigmentados son producidos por agricultores de subsistencia, en suelos marginales y en pequeñas superficies, y la mayor parte de su producción es para autoconsumo. Sin embargo, en estados como Puebla y México la relación costo/beneficio de la producción de maíz azul es de 2.24, superior a la razón 1.57 del maíz comercial de grano blanco (Arellano-Vázquez, Tut-Couoh, María-Ramírez, Salinas-Moreno, & Taboada-Gaytán, 2003; Hellin, Keleman, López, Donnet, & Flores, 2013). De esta manera, el maíz azul posee un papel muy importante como maíz especial.

2.9.1 Composición química del grano de maíz.

La composición química del maíz varía de acuerdo con las condiciones climatológicas, variedad, condiciones de crecimiento; a su vez dentro las distintas zonas del mismo

grano, su composición varía de un lugar a otro, en México existe una gran diversidad de maíz, en diferentes regiones se cultivan variedades criollas, en su composición destaca los hidratos de carbono y las proteínas.

2.9.1.1 Hidratos de Carbono.

El maíz azul, así como otras variedades de maíces son fuente importante de hidratos de carbono. Constituyendo cerca del 80% del peso del grano. Donde el 65% se encuentra en el germen, siendo un 69% de los hidratos de carbono son glucosa.

Contiene también monosacáridos libres como D-fructosa y D-galactosa, disacáridos como la sacarosa y maltosa, trisacáridos y oligosacáridos; conforme madura el grano, disminuye el contenido de azúcares y aumenta el contenido de almidón. Los hidratos de carbono complejos representan alrededor de 80% del peso total del grano y se dividen en estructurales y de reserva. Los estructurales se encuentran en las paredes del grano y son pectina, hemicelulosa, celulosa y lignina; el polisacárido de reserva es el almidón y se encuentra en el endospermo (Boyer & Shannon, 2001).

2.9.1.2 Proteínas de maíz.

Son las macromoléculas más importantes desde el punto de vista nutricional, representan aproximadamente el 10% del grano. El maíz azul contiene albuminas, globulinas, glutelinas y prolaminas (Dergal, Rodríguez, & Morales, 2006).

Contiene en su estructura aminoácidos como: fenilalanina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, treonina, triptófano y valina. Este cereal tiene un bajo contenido de triptófano. Aún, en la ausencia de este componente, las albuminas contienen un adecuado balance de aminoácidos esenciales, la relación de eficiencia proteica es de 1.37% y la utilización proteica neta es de 72.78% (Dergal et al., 2006).

2.9.1.3 Lípidos del maíz.

Representan el 5% del maíz azul. Se encuentran en mayor proporción con el germen, conteniendo el 84% de los lípidos del grano y el 16% restante se encuentra en el endospermo. Los ácidos grasos presentes en el maíz son los ácidos linoleicos (50%), Oleico (35%), palmítico (13%), esteárico (4%) y linoleico (3%). Además, que los lípidos

del maíz azul son muy estables, porque contienen altos niveles de antioxidantes naturales, por lo tanto, el maíz azul es una excelente fuente de ácidos grasos y genera aceites de buena calidad (Boyer & Shannon, 2001).

2.9.1.4 Propiedades antioxidantes.

El consumo de maíz azul está asociado indirectamente con beneficios a la salud, debido a la presencia de compuestos antioxidantes, los cuales retrasan el daño causado por los radicales libres, con actividad anticancerígena, anti neurodegenerativa y antiinflamatoria (Jahren & Kraft, 2008).

Estudios médicos han demostrado que pacientes con arterosclerosis presentan contenidos bajos de antioxidantes al compararlos con individuos sanos (Durak et al., 2004). (Ching, Ingram, Hahnel, & Rossi, 2002). encontraron que, al incrementar los niveles de antioxidantes en la sangre, los riesgos de presentar cáncer de mama se ven disminuido; (Stattin et al., 2004), evaluaron el efecto de antocianinas, como la cianidina-3-glucosido, en la proliferación de células de cáncer de colon y de mama, reportando actividad anticancerígena. (Joseph et al., 2004), reportaron que el consumo de suplementos antioxidantes revierte los efectos degenerativos del envejecimiento. Una gran variedad de fitoquímicos son los responsables de estos beneficios del maíz azul, entre ellos los compuestos fenólicos.

2.9.1.5 Compuestos Fenólicos.

El maíz azul es un cereal rico en compuestos fenólicos, los fenoles son compuestos que poseen anillos aromáticos, con sustituyentes hidroxilo, éster, glucósido. Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios que contribuyen al aroma y al sabor de los alimentos. Son esenciales para el crecimiento y la reproducción del maíz, otorgan resistencia al estrés ocasionado por condiciones ambientales, así como a los daños por plagas (Suárez Cerquera, 2010).

Los flavonoides están formados por dos grupos bencénicos unidos por un puente tricarbonato, por lo que su esqueleto básico es de 15 átomos de carbono. Además, poseen varios grupos hidroxilos unidos a su estructura de anillo y se encuentran

normalmente como glucósidos, un subgrupo de los compuestos flavonoides que ha sido objeto de estudio son las antocianinas (Lila & Biotechnology, 2004).

2.9.1.6 Antocianinas.

El maíz azul es una fuente importante de antocianinas. Las antocianinas se caracterizan por poseer un esqueleto básico de 25 átomos de carbono de tipo fenil benzopirona. Una sal de flavilio unida a glucosidos mediante un enlace glucosídico (Agama-Acevedo, Salinas-Moreno, Pacheco-Vargas, & Bello-Pérez, 2011). Estas moléculas tienen un sustituyente hidroxilo glicosilado, dependiendo de este sustituyente se obtienen diferentes colores, la variedad de antocianinas depende de grupos hidroxilo, azúcares, grupos alifáticos y ácidos aromáticos unidos a una estructura básica de las antocianinas. Los hidratos de carbono unidos a las antocianinas son la glucosa, galactosa, xilosa, arabinosa y ramnosa (Chirinos et al., 2006).

Los diferentes colores de maíz se deben a la cantidad de antocianinas, los colores del maíz van desde rojo, morado y llegando casi al color negro (Méndez-Montealvo et al., 2008).

2.10 Soya (Glycine Max).

Tiene su origen en el norte y centro de china, ha sido considerada como un alimento milenario de los pueblos de Oriente. En el año 3000 A.C, los chinos ya la consideraban una de las 5 semillas sagradas junto con el arroz, trigo, cebada y mijo. En la India se promociono su consumo a partir del año 1735; en Francia en el año 1740 se plantaron las primeras semillas provenientes de china; 25 años más tarde se introdujo al Continente Americano desde China vía Londres (Ridner, 2006).

La soya es la leguminosa que tiene mayor cantidad y mejor calidad de proteínas, y se utiliza para fortificar productos a base de cereales como el maíz y trigo. Las grasas son una fuente concentrada de energía para el organismo.

2.10.1 Estructura del grano de soya.

El grano de soya este compuesto por un embrión protegido por una cobertura seminal o tegumento, el embrión está compuesto por 2 cotiledones y un eje embrionario (Casini, Huerta, & Myers, 2011). Debido a la morfología del grano, la soya posee el eje hipocótilo-radícula muy expuesto debajo del tegumento, por lo que el daño mecánico puede determinar la imposibilidad futura de germinar y la merma de peso por su desprendimiento. Este problema es de menor relevancia en aquellos granos que son morfológicamente frutos (Maíz, Girasol y sorgo).

De manera general, la soya esta anatómicamente constituida por 3 fracciones principales, 1) la cascarilla, que representa el 8% del peso total de la semilla, 2) el hipocótilo (2%) y 3) el cotiledón (90%), en este último se localizan los lípidos en pequeños compartimientos llamados esferosomas que tienen un tamaño de 0.2 a 0.3 μ , que a su vez están dispersos entre los cuerpos proteínicos (aleuronas) de mayor tamaño (2-20 μ), formados por aproximadamente un 98% de proteínas, la función de las proteínas es de reserva para la germinación y el crecimiento de la planta.

La soya es un producto de elevado valor biológico que ha ganado reconocimiento por parte del consumidor y por el posible efecto benéfico a la salud del consumidor (Russell et al., 2006), es una fuente rica de proteínas y aceite en comparación con otros cereales y la mayoría de las legumbres (Alfonso, 2006). Debido a las propiedades funcionales de la soya, esta es utilizada en los alimentos como agente emulsificante, gelificante, espumante y por su capacidad de retención de agua.

2.10.2 Lípidos de la soya.

En cuanto a la composición de lípidos, posee un mayor contenido de ácidos grasos saturados y monoinsaturados en comparación con los ácidos grasos poliinsaturados. Además, es un alimento rico en lecitina, siendo aprovechado en la industria alimentaria (Dávila, 2003).

En comparación con el resto de las legumbres la soja contiene un mayor contenido de calcio, hierro, yodo, magnesio, potasio y fósforo, además de ácido fólico y otras vitaminas como B1, B2, B3 y B6.

2.10.3 Hidratos de Carbono en la soya.

El contenido de hidratos de carbono en la soya tiene un aproximado de 34%, dentro de los cuales encontramos hidratos de carbono insolubles (celulosa, hemicelulosa, pectina y trazas de almidón), y solubles (sacarosa y oligosacarosa) (Dávila, 2003).

El aceite crudo de soya contiene 1-3% de fosfolípidos (lecitina, fosfatidil, etanol amina, fosfatidil inositol y ácido fosfatídico), las cuales tiene propiedades de hidratación a altas temperaturas y son buenos agentes emulsificantes (Dávila, 2003).

La proteína de soya contiene todos los aminoácidos esenciales necesarios para el hombre y animales, con deficiencia en los aminoácidos cistina y metionina, es una proteína completa y se puede comparar con la proteína de la carne, con la característica de ser muy generosa, a pesar, de ser un alimento de origen vegetal (Anand, Matson, & Sharma, 1995).

La aplicación de soya es asombrosa, desde el desayuno hasta el postre, todo se puede hacer a partir de la soya; leche, pan, ensaladas, tortas, budines, cremas, masitas, granos tostados empleados como sustituto de café, en la industria panadera puede sustituir el gluten en todas clases de panes y comidas (Contreras-Jiménez, Morales-Sanchez, Reyes-Vega, & Gaytán-Martínez, 2014).

2.10.4 Utilización de soya en extrusión.

El grano de soya integral se procesa mediante extrusión, debido a que este proceso elimina o destruye factores anti nutricionales; así como, incrementar la digestibilidad de los lípidos, conserva la calidad nutricional de su proteína (Araba & Dale, 1990). El principal factor anti nutricional de la soya integral es el inhibidor de tripsina, siendo una proteasa tóxica para la mayoría de los animales, esta puede ser inactivada con tratamiento térmico. Schumacher reportó que se considera necesaria una reducción de por lo menos el 85% del inhibidor de tripsina, evitando problemas anti nutricionales, sin afectar la calidad de proteína y especialmente de aminoácidos sensibles al calor, como la lisina.

2.11 Optimización aplicada al desarrollo de botanas de tercera generación.

(Aguilar-Palazuelos et al., 2017) menciona que la optimización es una técnica matemática, que sirve para conocer la información sobre el punto óptimo de un modelo; (Natabirwa et al., 2018) establece que la optimización consiste en la selección de la mejor alternativa, mientras que (Benson, Shanno, & Vanderbei, 2004), mencionan que un problema de optimización es el cálculo de los puntos extremos de una función objetivo sobre un conjunto de restricciones y variable reales desconocidas.

El uso de la optimización en el desarrollo de botanas no es fácil, debido a que se tiene que controlar distintas variables para obtener el producto óptimo deseado, lo cual conlleva a la utilización de métodos como redes neuronales artificiales, aplicaciones de pruebas estadísticas y de diseños de experimentos, las redes neuronales artificiales es un modelo computacional que simula el cerebro humano para poder tomar decisiones (Cubeddu et al., 2014), las pruebas estadísticas son más fáciles de aplicar y dan la respuesta óptima del problema (Bhat et al., 2019); mientras que, el diseño de experimentos ayuda a conocer las variables significativas de un proceso, con el fin de optimizarlo y hacerlo más robusto (Kowalski, Li, & Ganjyal, 2018).

El proceso de optimización consiste en seleccionar la mejor alternativa, de las demás posibles. Resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben de tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones (Ramos-Paja, Spagnuolo, Petrone, Giral, & Romero, 2010).

3 Justificación

La obesidad es una enfermedad crónica multifactorial caracterizada por una acumulación excesiva de grasa, existe un número ascendente de nuevos casos, por lo cual, se podría catalogar como una epidemia, afectando directamente la economía de los países; las principales causas desencadenantes se dividen en factores modificables y no modificables, entre los factores modificables se encuentran el cambio de hábitos dietéticos, como es la disminución de alimentos con elevado contenido calórico; además de realizar actividad física.

Sin embargo, con la incorporación de la mujer al ámbito profesional se tiene menos tiempo para preparar alimentos, por lo que los productos de fácil consumo son los que más se venden, dentro de estos se encuentran las botanas, también conocidas como alimentos chatarra, debido a que contienen un elevado contenido de Lípidos, Kcal y sodio, por esta razón, se busca desarrollar un producto botana a partir de harina de maíz azul y harina de soya utilizando la tecnología de extrusión que además de proveer los nutrientes necesarios, aporte fibra dietética y compuestos antioxidantes.

4 Objetivos e hipótesis

4.1 Objetivo general

Caracterizar fisicoquímica y funcionalmente una botana extruida de 3era generación elaborada a partir de maíz azul, almidón y soya.

4.2 Objetivos específicos

- 1.- Evaluar las características fisicoquímicas y relación de componentes estructurales de los granos de maíz azul y soya.
2. Evaluar las propiedades fisicoquímicas, contenido fitoquímico y capacidad antioxidante de los productos extruidos
3. Realizar una optimización del proceso de extrusión utilizando como variables de respuesta el índice de expansión, índice de solubilidad de agua, dureza, contenido de fenoles totales y antocianinas.

5 Hipótesis

Los extruidos obtenidos a partir de las mezclas de maíz azul y soya presentarán un contenido nutricional balanceado, con elevado índice de expansión, baja dureza y conservarán su contenido fitoquímico y capacidad antioxidante, por lo cual, podrían emplearse en la prevención de algunas enfermedades crónico-degenerativas.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materia Prima

El maíz azul se compró con un vendedor local en la ciudad de Tulancingo de Bravo, Hidalgo; mientras que la soya se compró en la central de abastos de Pachuca de Soto, Hidalgo. Los granos se limpiaron y se retirando impurezas, como granos quebrados, granos de otro color, tierra y piedras.

6.2 Caracterización física de los granos de maíz y soya.

6.2.1 Dimensión.

El tamaño del grano de maíz azul y soya se determinó midiendo su largo, ancho y grosor con un micrómetro digital Mitutoyo (Modelo H-2780, Japón), para lo cual se tomaron muestras aleatorias de 10 granos de maíz y soya.

6.2.2 Peso de 1000 y 100 granos.

El peso de mil y cien granos se determinó pesando 1000 y 100 granos de maíz azul y soya en una balanza analítica de precisión (Marca OHAUS, modelo PA-4101C, China), respectivamente. El análisis se realizó por triplicado.

6.2.3 Peso hectolítrico.

El peso hectolítrico se define como la masa de granos en kg que ocupa un volumen de 100 litros. Para la determinación del peso hectolítrico, se determinó la masa de granos de maíz y soya que ocupa un volumen de un litro, respectivamente, posteriormente se realizó la conversión a kg/m^3 . La determinación se realizó por triplicado.

6.2.4 Relación de componentes estructurales.

Se tomaron 10 granos al azar de maíz azul y 10 granos de soya, estos fueron pesados, posteriormente los granos se remojaron por 15 min en agua a temperatura ambiente (28 ± 2 °C), trascurrido el tiempo de remojo, se separaron los granos de maíz en pericarpio, germen, pedicelo y endospermo con ayuda de un bisturí; mientras que, los granos de soya se separaron en cascarilla, hipocótilo y cotiledón. Cada una de las partes estructurales de los granos se colocaron en charolas de aluminio, las cuales se colocaron en una estufa a 43 °C, por 24 h. Para calcular el porcentaje que representa cada una de las partes estructurales del grano, los residuos de las charolas se pesaron y se dividieron entre el peso inicial del grano y se multiplico por 100.

6.3 Análisis químico proximal de harinas.

6.3.1 Obtención de harinas de maíz azul y soya.

Se obtuvieron las harinas mediante la molienda de los granos, en un molino de martillo, hasta obtener un tamaño de partícula, sin antes mencionar que los granos fueron enteros, solo de retiraron los granos dañados, rotos para obtener homogeneidad en las harinas, se almacenaron en bolsas herméticas, en un lugar fresco y seco para evitar contaminantes externos.

6.3.2 Determinación de humedad.

La determinación de humedad se realizó de acuerdo con el método 44-16 de la AACC (2000). En charolas de aluminio previamente llevadas a peso constante, se colocó 1 g de muestra, posteriormente las charolas con la muestra se introdujeron en una estufa (Luzeren Modelo DHG9140A, México) a una temperatura de 130 ± 1 °C por 1 h. El porcentaje de humedad se obtuvo por diferencia de peso y se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad} = \left(\frac{\text{peso de la cápsula con muestra} - \text{peso de la cápsula con muestra seca}}{\text{peso de la muestra}} \right) * 100$$

6.3.3 Determinación de lípidos.

Para la determinación de lípidos se utilizó el extractor de grasa Marca Büchi (B-811, Extraction system, Suiza). En los vasos previamente llevados a peso constante, se pesaron 3 g de muestra seca, a la muestra se le adicionaron 75 mL de éter de petróleo y se colocaron sobre la parrilla de calentamiento. El proceso de extracción constó de 4 etapas, 1) extracción a 135 °C por 25 min, 2) tiempo de enjuague 20 min, 3) tiempo de recuperación 10 min y 4) tiempo de secado 5 min. La cuantificación de lípidos se determinó utilizando la siguiente ecuación, el análisis se realizó por triplicado.

$$\% \text{ extracto etéreo} = \frac{\text{Peso del crisol con grasa} - \text{Peso del crisol}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

6.3.4 Determinación de ceniza.

Se pesa 2 g de muestra desgrasada en un crisol puesto previamente a peso constante, se carboniza la muestra lentamente bajo la flama del mechero, evitando perdidas por arrastre de humo y proyección de la muestra fuera del crisol, hasta que no exista desprendimiento de humo. Posterior al incinerado se calcina en la mufla a 550°C hasta que las cenizas estén grises o blancas. Algunas cenizas pueden presentar coloración diferente si la muestra contiene algunos metales coloridos, pero nunca deberá permanecer el color negro del carbono se dejan enfriar los crisoles en un desecador y pesar. el análisis se realizó por triplicado. El % de ceniza se calcula con la siguiente formula:

$$\% \text{ de cenizas} = \frac{\text{Peso del crisol con cenizas} - \text{Peso del crisol}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

6.3.5 Determinación de fibra.

Para la determinación de fibra en las harinas, en vasos Berzelius se pesaron 2 g de muestra desgrasada, posteriormente se añadieron 200 mL de una solución de HCl 0.255 N. y se llevaron a calentamiento durante 30 min, cuidando que los sólidos no se peguen en la pared de vaso Berzelius, transcurrido el tiempo, el

residuo se filtró y se transfirió a otro vaso, se añade 200 mL de solución de hidróxido de sodio a 0.313 N, se dejó en ebullición durante 30 min, transcurrido el tiempo, se filtró y se lavó con 25 mL de solución de ácido y agua destilada caliente, posteriormente se añadieron 25 mL de etanol, se recuperó el residuo y se colocó en un crisol, el cual se colocó dentro de una estufa a 130°C por un periodo de 3 horas. Una vez secó el residuo se pesó y se reportó el contenido de fibra cruda.

6.4 Caracterización Fisicoquímica de materias primas.

6.4.1 Índice de absorción de agua (IAA) e Índice de solubilidad (ISA).

La determinación del IAA se realizó de acuerdo con la metodología reportada por Anderson et al., (1969). En tubos de 15 mL se colocó 1 g de muestra y se le adicionaron 10 mL de agua destilada, la suspensión se mantuvo en agitación a temperatura ambiente durante 30 minutos. Una vez transcurrido el tiempo de agitación, los tubos fueron centrifugados a 7640xg por 20 minutos (Centrifuga Biobase Modelo: BKC- TH2IRKL, China). El sobrenadante fue decantado en charolas de aluminio previamente llevadas a peso constante. Los tubos que contenían el residuo sólido fueron pesados. La ganancia en peso se utilizó para calcular índice de absorción de agua utilizando la siguiente ecuación:

$$IAA = \frac{\text{peso del gel (g)}}{\text{peso de la muestra (g)}}$$

Para la determinación del ISA el sobrenadante decantado se colocó en una estufa a 120°C por 24h hasta sequedad, una vez transcurrido este tiempo las charolas se sacaron de la estufa, se colocaron en un desecador hasta llegar a temperatura ambiente y se pesaron. El cálculo para el ISA se realizó de acuerdo con la siguiente fórmula, los valores obtenidos se reportaron en %:

$$ISA = \frac{\text{peso de solubles (g)}}{\text{peso de la muestra (g)}} * 100$$

6.4.2 Determinación de color.

Los parámetros de color L*, a*, b* de las materias primas, se determinó utilizando un colorímetro 3NH (Modelo NR110, China). El parámetro de color L*, es una

coordenada que recibe el nombre de luminosidad y puede tomar valores entre 0 y 100. a^* y b^* , son coordenadas colorimétricas, las cuales forman un plano perpendicular a la claridad. a^* : define la desviación del punto acromático correspondiente a la claridad, hacia el rojo si a^* es mayor que 0, y hacia verde si a^* es menor a 0. Análogamente la coordenada b^* define la desviación hacia el amarillo si b^* es mayor que 0, y hacia el azul si b^* es menor a 0.

6.4.3 Análisis rápido de viscosidad.

Para determinar el perfil de viscosidad de las harinas y los almidones, se empleó la técnica propuesta por la AACC (2000) con modificación en la rampa de calentamiento adaptado para una muestra de harina de leguminosas (Nath, Chattopadhyay, & Technology, 2008). Se preparó una dispersión de harina de maíz azul, almidón de maíz y soya con un % de agua que oscilaban del 13%-15%; la dispersión fue transferida al tazón del analizador rápido de viscosidad (RVA 4500, Perten instruments). La dispersión se sometió a una rampa de calentamiento y enfriamiento con una duración de 17 min, el calentamiento inicio a una temperatura de 50 °C por un minuto para posterior incrementar la temperatura a 95 °C con una velocidad de calentamiento de 6.4 °C/min, la temperatura a 95 °C se mantuvo por 3 minutos y posteriormente disminuyó a la temperatura inicial (50 °C) a una velocidad de enfriamiento de 6.4 °C/min, para mantenerse a 50 °C por 3 min.

6.5 Caracterización funcional de materias primas.

6.5.1 Obtención de extractos.

Para la obtención de los extractos provenientes de las materias primas, se pesaron 0.5 g de harina y se colocaron en tubos de centrífuga de 10 mL, posteriormente se adicionaron 10 mL de metanol al 80% y se agitaron durante un periodo de 24 h protegiendo las muestras de la luz. Posteriormente, las suspensiones se centrifugaron a 7640xg durante 10 minutos para recuperar el sobrenadante. Los extractos se utilizaron inmediatamente para cuantificar fenoles totales, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante por DPPH y ABTS.

6.5.2 Determinación del contenido de fenoles totales.

Los fenoles totales se cuantificaron siguiendo la metodología descrita por (López & Suárez, 2010), con algunas modificaciones. Se realizó una curva estándar con ácido gálico a concentraciones de 0 a 100 ppm a una longitud de onda de 760 nm, las absorbancias obtenidas se graficaron en el eje y, y las concentraciones de las diferentes soluciones se colocaron en el eje x, mediante regresión lineal se obtuvo la ecuación de la recta del tipo $y = mx + b$, donde y es la absorbancia, m la pendiente y b la ordenada al origen. Para cuantificar la concentración de fenoles totales en los extractos provenientes de las materias primas, en tubos 15 mL, se colocaron 120 μ L de muestra, 9.48 mL de agua destilada y 600 μ L de reactivo de Folin-Ciocalteu (diluido en agua 1:2), la mezcla se agitó y dejó reposar por 3 minutos, por último, se adicionaron 1.80 mL de Na_2CO_3 al 10%. Los tubos se dejaron reposar por 2 h, transcurrido este tiempo se determinó la absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro Genesys 10S UV-Vis (Thermo Fisher Scientific, EUA). El contenido de fenoles totales se expresó como mg equivalentes de ácido gálico por 100 g muestra base seca (mg Eq AG/100 g muestra b.s.).

6.5.3 Determinación de Antocianinas mediante diferencial de pH.

El método fue propuesto por Giusti & Wrolstad (2001), se utiliza un buffer de cloruro de potasio a pH 1 y un buffer de acetato de sodio a pH 4.5, se determina la absorbancia a 510 y 700 nm, se colocan 500 μ L de extracto de maíz azul y 3500 μ L de solución de buffer, dejando reposar durante 15 min, para determinar la cantidad de antocianinas en base seca se utiliza la siguiente fórmula.

$$\text{Contenido de antocianinas} = \frac{\text{Abs Dif} * \text{Peso molecular} * \text{factor de dilucion}}{(\epsilon * 1)}$$

Diferencias de absorbancia:

$$\text{Abs dif} = (\text{Abs}_{510} - \text{Abs}_{700})_{\text{pH } 1.0} - (\text{Abs}_{510} - \text{Abs}_{700})_{\text{pH } 4.5}$$

ϵ = Coeficiente de Extinción de la molécula

6.5.4 Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH).

Este método fue desarrollado por (Brand-Williams, Cuvelier, Berset, & Technology, 1995) ,se basa en la reducción de la absorbancia del radical DPPH• a 520 nm por sustancias antioxidantes, el cual fue empleado con algunas modificaciones. Se preparó una solución de DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) disolviendo 2.5 mg del radical con 40 mL de metanol, posteriormente se aforó a 50 mL con metanol, se ajustó la absorbancia a 0.50 ± 0.03 unidades a una longitud de onda de 520 nm. Se utilizó una curva patrón de Trolox, de 0 a 200 ppm. En tubos Eppendorf se colocaron 200 μ L de los extractos a analizar y 2 mL del DPPH, se dejaron reposar por media hora y se midió la absorbancia a 520 nm en el espectrofotómetro Genesys 10S UV-Vis (Thermo Fisher Scientific, EUA). Mediante regresión lineal se determinó la capacidad de los extractos para neutralizar al radical DPPH, reportando los resultados en μ Mol de Trolox/g de muestra (μ Mol Trolox/g mtra).

6.5.5 Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2'-azinobis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS•+)

La determinación de la actividad antioxidante mediante ABTS se realizó de acuerdo con la metodología descrita por (Ortega Amaya et al., 2017; Pastrana-Bonilla, Akoh, Sellappan, Krewer, & chemistry, 2003), el radical ABTS•+ se generó tras la reacción del ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulphonico) (ABTS) (7 mM) con persulfato potásico (2.4 mM, concentración final) en 10 mL con agua destilada. La solución fue almacenada en refrigeración ($\pm 4^{\circ}\text{C}$), en oscuridad, durante 12 h. Una vez formado el radical ABTS•+, se diluyó con acetato de sodio. Para el análisis de las muestras, en microtubos se colocaron 990 μ L del radical ABTS, previamente formado y se midió la absorbancia a 734 nm en el espectrofotómetro (tiempo cero). Posteriormente se añadieron 10 μ L de la muestra, se dejaron reposar por 5 minutos y se midió la absorbancia. Mediante regresión lineal, se utilizó una curva patrón de Trolox para determinación de capacidad de los extractos para inhibir al radical

ABTS, los resultados se reportaron en mg equivalentes de trolox/g de muestra (μMol Trolox/g mta).

6.5.6 Determinación de Flavonoides

Se determinó el contenido de flavonoides de acuerdo a (Ortega Amaya et al., 2017), mediante extracción acuosa, se prepara Nitrato de sodio a al 20%, Cloruro de aluminio al 10% e hidróxido de sodio al 11.25 M, para determinar los flavonoides se toma 500 μL de extracto , se añade 750 μL de cloruro de aluminio y se deja incubar a 5 min en completa oscuridad, se añade 50 μL de NaOH y se incuba de nuevo en oscuridad por 30 min a temperatura ambiente se mide a una absorbancia de 415 nm, utilizando como blanco alcohol etílico acidificado y nitrato de sodio , esta determinación utiliza curva de calibración estándar de quercetina, la cuantificación se realizó por triplicado.

6.6 Análisis de pellets (extrudidos).

6.6.1 Obtención de pellets proceso de extrusión

Para el proceso de extrusión se utilizó un extrusor de un solo tornillo (modelo 19/25D, Brabender GmbH & Co. KG); el barril del extrusor era estriado con 3 zonas de calentamiento independientes, la temperatura de la zona 1 y matriz de salida se mantuvieron constantes en 67 °C, la temperatura de la zona 2 y 3 se varió de acuerdo con el diseño experimental (Tabla 2), la velocidad del tornillo utilizada fue de 80 rpm y la velocidad de alimentación fue de 1.8 kg/h. La matriz de salida fue rectangular con las siguientes dimensiones (20 mm*2.0 mm). La cinta obtenida se cortó en fragmentos de 3 cm de largo, se deshidrataron para la obtención de los pellets, los pellets posteriormente se expandieron utilizando un horno de microondas con una potencia de 600 watts (Modelo-Kor 665, marca Daewoo, China)

Se utilizó un diseño de experimentos central compuesto rotatable con tres factores (temperatura de barril de la zona 2 y 3, humedad de alimentación y adición de soya). La combinación de los niveles de los factores dio como resultado 20 tratamientos experimentales (Tabla 2).

Tabla 2 Diseño experimental, central compuesto rotatable para la obtención de una botana de 3era generación a partir de harina de maíz azul y soya.

Tx	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Soya (%)
1	100.1	22.0	8.1
2	129.9	22.0	8.1
3	100.1	28.0	8.1
4	129.9	28.0	8.1
5	100.1	22.0	31.9
6	129.9	22.0	31.9
7	100.1	28.0	31.9
8	129.9	28.0	31.9
9	90.0	25.0	20.0
10	140.0	25.0	20.0
11	115.0	20.0	20.0
12	115.0	30.0	20.0
13	115.0	25.0	0.0
14	115.0	25.0	40.0
15	115.0	25.0	20.0
16	115.0	25.0	20.0
17	115.0	25.0	20.0
18	115.0	25.0	20.0
19	115.0	25.0	20.0
20	115.0	25.0	20.0

6.7 Obtención de harina a partir de los pellets y su caracterización

Los pellets se molieron en una licuadora de cocina (Oster, modelo, México) evitando el calentamiento, posteriormente para reducir su tamaño se realizó una segunda molienda en un molino ciclónico (UDY Corporation, USA). El polvo obtenido se tamizó utilizando una malla #100 (149 μm), posteriormente se almacenó en bolsas de polietileno con cierre hermético de color ámbar, para su caracterización.

6.7.1 Determinación de humedad.

Se determina humedad con metodología en el apartado 6.3.2

6.7.2 Índice de absorción de agua (IAA) e Índice de solubilidad (ISA).

Se determina índice de absorción de agua y solubilidad de agua con la metodología que se describe en el apartado 6.4.1

6.7.3 Determinación de color.

Se determina color en pellet con la metodología que se describe en el apartado 6.4.2

6.7.4 Análisis rápido de viscosidad.

Se determina análisis rápido de viscosidad con la metodología que se describe en el apartado 6.4.3

6.7.5 Obtención de extractos

Se obtiene extractos de harina de pellets con la metodología que se describe en el apartado 6.5.1

6.7.6 Determinación del contenido de Fenoles totales.

Se obtiene cantidad de fenoles totales en harina de pellets con la metodología que se describe en el apartado 6.5.2

6.7.7 Determinación de Antocianinas mediante diferencial de pH.

Se obtiene cantidad de antocianinas de harina de pellets con la metodología que se describe en el apartado 6.5.3

6.7.8 Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH).

La actividad antioxidante por DPPH de extracto de harina de pellets se realizó por la metodología descrita en el apartado 6.5.4

6.7.9 Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2'-azinobis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS•+).

La actividad antioxidante por ABTS de extracto de harina de pellets se realizó por la metodología descrita en el apartado 6.5.5

6.7.10 Determinación de Flavonoides.

Se obtiene cantidad de flavonoides de harina de pellets con la metodología que se describe en el apartado 6.5.6

6.8 Análisis de Expandidos.

6.8.1 Obtención de botanas de Expandidas.

Los pellets fueron expandidos en un horno de microondas Daewoo con una potencia de 600W (Modelo-Kor 665, China) por un periodo de tiempo de 23 segundos a máxima potencia. El expandido se dejó por 5 min, este método se repitió en 20 pellets por tratamiento.

6.8.2 Índice de expansión.

Para determinar el índice de expansión de los expandidos, primero se determinó el largo, ancho y espesor en mm de los pellets con un micrómetro digital Mitutoyo de 0-1ppl (Modelo H-2780, Japón), y posteriormente de los expandidos, con estos datos se calculó el volumen tanto del pellet y del expandido. El índice de expansión determinó 10 veces utilizando la siguiente formula:

$$IE = \frac{V_{Exp} - V_{Pell}}{V_{Pell}}$$

Ind exp= Índice de expansión

V exp =Volumen de pellet expandido

V pell = Volumen del pellet

6.8.3 Densidad aparente.

Se utilizo el método reportado por Gujska y Khan (1991), se obtuvo dividiendo el peso de la muestra del producto por su volumen aparente, antes los pellets y expandidos se midieron el largo, ancho y grosor posteriormente pesan los pellets y los expandidos, se utiliza la siguiente fórmula para calcular el volumen, así como la densidad de la botana:

$$V = L * A * E$$

V= volumen

L= largo

A=ancho

E=espesor

La densidad aparente de la botana se determinó mediante la siguiente ecuación.

$$D = \frac{m}{V}$$

D= Densidad

V= Volumen

m=masa

6.8.4 Dureza.

La dureza se determinó en las botanas expandidas utilizando un texturómetro (modelo TAXT plus, Stable Micro System, UK) en modo de comprensión utilizando la celda de corte Kramer. La dureza se tomó como la fuerza máxima de ruptura; se realizaron 20 determinaciones por tratamiento.

6.8.5 Determinación de humedad.

Se determinó humedad con la metodología descrita en el apartado 6.3.2

6.8.6 Índice de absorción de agua (IAA) e Índice de solubilidad (ISA).

Se determinó el índice de absorción de agua y solubilidad de agua con la metodología descrita en el apartado 6.4.1

6.8.7 Determinación de color.

La determinación de color en pellets y productos expandidos se determinó con la metodología descrita en el apartado 6.4.2

6.8.8 Obtención de extractos.

Los extractos se obtuvieron de los polvos de pellets y de productos expandidos de acuerdo con la metodología descrita en el apartado 6.5.1

6.8.9 Determinación del contenido de Fenoles totales.

La cuantificación fenoles totales se realizó en pellets y productos expandidos de acuerdo con la metodología descrita en el apartado 6.5.2

6.8.10 Determinación de Antocianinas.

La determinación se realizó de acuerdo con el método descrito en el apartado 6.5.3

6.8.11 Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH).

La determinación se realizó de acuerdo con el método descrito en el apartado 6.5.4

6.8.12 Determinación de la capacidad antioxidante por 2,2'-azinobis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS•+).

La determinación se realizó de acuerdo con el método descrito en el apartado 6.5.5

6.8.13 Determinación de Flavonoides.

La determinación se realizó de acuerdo con el método descrito en el apartado 6.5.6

6.8.14 Análisis estadístico.

El análisis de los datos obtenidos para la caracterización de las harinas se realizó mediante análisis de varianza, para encontrar diferencias estadísticas significativas se utilizó la prueba de comparación múltiple de Tukey a un intervalo de confianza del 95%. El análisis estadístico de los datos provenientes de los diferentes tratamientos del diseño de experimentos central compuesto rotatable se ajustaron a un modelo cuadrático utilizando el programa estadístico Design Expert 7.1 (Stat-ease, Inc., USA).

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{1,2} X_1 X_2 + \beta_{1,3} X_1 X_3 + \beta_{2,3} X_2 X_3 + \beta_{1,1} + \beta_{2,2} + \beta_{3,3}$$

6.9 Optimización.

Para encontrar las mejores condiciones de procesamiento se procedió a realizar una optimización numérica utilizando el software estadístico Design-Expert 7.1.5 (Stat-Ease Inc., USA). Las variables de respuesta utilizadas en la optimización fueron el índice de absorción de agua, el índice de solubilidad de agua, fenoles totales, índice de expansión y dureza. Las condiciones óptimas predichas por el programa se validaron experimentalmente por triplicado.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Análisis fisicoquímico de los granos de maíz y soya

En la Tabla 3 se presentan los resultados del análisis físico realizado a los granos de maíz y soya, este análisis es el primer paso para la selección y sugerencia de su uso industrial (Agama-Acevedo et al., 2011). Las características físicas de los granos proporcionan información de la calidad del grano, así como el proceso en el cual podrían ser utilizados. De acuerdo con (Salinas Moreno, García Salinas, Coutiño Estrada, & Vidal Martínez, 2013).

El maíz azul utilizado en este estudio se clasifica como grano pequeño, como lo indican los datos obtenidos del largo, ancho y espesor de los granos. (Figuroa Cárdenas et al., 2013; Mauricio Avalos, 2021) clasifican los granos de maíz en grupos raciales encontrándose como variedad moderna incipiente que se desarrollaron desde la época de la conquista, utilizado para elaborar tortillas y botanas. En el caso de la soya el tamaño del grano es medio. El peso hectolitro es una determinación exigida por la norma mexicana NMX-FF-119-SCFI-2015 (Normas, 2002) y se relaciona directamente con la dureza del grano en los cereales, de acuerdo con este parámetro el grano de maíz utilizado en este estudio se clasifica como suave, mientras que el grano de soya se encuentra en intermedio, siendo los granos más propensos a romperse fácilmente en la molienda y pueden ser atacado por insectos fácilmente.

En el análisis de relación de componentes estructurales del grano de maíz, los valores obtenidos concuerdan con lo reportado por (Bartolo Perez, Peña, Cruz Orea, & Calderón, 2013) en maíz azul criollo, donde el endospermo presenta el mayor porcentaje del grano.

Tabla 3 Análisis físico de los granos de maíz y soya.

Parámetros	Maíz	Soya
Peso de 100 granos (g)	29.95 ± 0.76	20.95 ± 0.45
Peso de 1000 granos (g)	290.33 ± 1.33	209.00 ± 0.78
Largo (mm)	13.62 ± 0.41	7.33 ± 0.42
Ancho (mm)	7.43 ± 0.08	5.69 ± 0.40
Espesor (mm)	5.25 ± 0.14	6.63 ± 0.41
Peso Hectolítrico (kg/hL)	65.78 ± 0.08	73.4 ± 0.65

Los resultados se expresan como promedio (n = 3) ± desviación estándar

En la Tabla 4 se presentan los resultados que se obtuvieron en el estudio de componentes estructurales de los granos de maíz, se encuentran dentro de los parámetros que reportan Wolf y Watson 1987. A la vez concuerdan con los valores obtenidos por (Bartolo Perez et al., 2013), que reportan que es un maíz criollo de las razas conocida como Vandefño y Zapalote Grande, como característica podemos mencionar que el endospermo presenta el mayor porcentaje del peso del grano. Evaluándolo como un grano de calidad de comercial buena.

En cuanto al grano de la soya, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los valores reportados por (Jiménez, Fabra, Talens, & Chiralt, 2012) quienes reportaron la composición estructural de la soya. La estructura que tiene mayor porcentaje en peso en el grano de la soya es el cotiledón, siendo así para la mayoría de las leguminosas. El cotiledón contiene la mayor cantidad de proteína en la soya.

Tabla 4. Relación de componentes estructurales de granos de maíz y soya.

Parámetros	Maíz	Parámetros	Soya
Pericarpio (g)	4.57 ± 0.22	Pericarpio (g)	5.73 ± 0.26
Germen (g)	3.77 ± 0.68	Germen (g)	0.62 ± 0.16
Pedicelo (g)	1.05 ± 0.10	Hilum (g)	0.64± 0.06
Endospermo (g)	81.11 ± 0.46	Cotiledón (g)	90.11± 0.61

Los resultados se expresan como promedio (n = 10) ± desviación estándar

En la Tabla 5, se muestran los análisis que se realizaron en las harinas previamente preparadas a partir de los granos, en ella se observan los resultados obtenidos en parámetros como humedad, capacidad de retención de agua y aceite. Índice de absorción de agua, solubilidad en agua, poder de hinchamiento y análisis proximales.

Estos análisis podrían darnos un panorama general de la calidad nutricional y fisicoquímica de las harinas, y su posible uso en procesos de producción de alimentos. El porcentaje de humedad se encuentran dentro de los parámetros tanto en la harina de maíz y soya referenciando la NOM-247-SSA1-2008 (Mexicana), que la humedad que debe de ser menor a 15% para la utilización en la producción de alimentos. Además, el contenido de humedad estar relacionado con la vida de

anaquel, los valores obtenidos en las harinas se encuentran altos en comparación con el estudio realizado por Agama-Acevedo et al (2011), donde se obtuvo un contenido de humedad de 9.8% en harina de maíz azul; mientras el estudio realizado por (Mendoza Espinoza & Rojas Loor, 2017) en harina de soya reporta una humedad de 12.78%. La humedad de la harina de soya en el presente estudio fue de 8.46%. Con respecto a la capacidad de retención de agua, el cual es un parámetro con el cual se puede evaluar la calidad de grano y el método de molienda.

Los valores que se obtuvieron en este estudio concuerdan con lo reportado por (Contreras-Jiménez et al., 2014). Este parámetro se utiliza en la industria harinera, para evaluar la pérdida de agua durante la cocción.

En relación con el índice de absorción de agua es un parámetro que nos ayuda a conocer la capacidad de la harina para absorber agua, este depende de la disponibilidad de grupos hidrofílicos y de la capacidad que tienen las macromoléculas para formar un gel. Los valores obtenidos en las harinas oscilan entre 0.84% a 2.08 %, siendo la harina de soya la que obtuvo mayor índice de absorción de agua. El mayor índice de absorción de agua en la soya se debe principalmente a su composición de macromoléculas, tales como, proteínas, lípidos y carbohidratos dentro de los que destaca el contenido de almidón. En el caso de harina de maíz, el almidón ayuda a retener agua (Contreras-Jiménez et al., 2014).

Tabla 5 Determinación de humedad, índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA) de harina de maíz y harina de soya.

Parámetros	Maíz	Soya
Humedad (%)	11.60 ± 0.06	8.46 ± 0.42
Capacidad de retención de aceite (%)	0.60 ± 0.03	0.52 ± 0.20
IAA (%)	7.37 ± 0.70	8.57 ± 0.61
ISA (%)	1.30 ± 0.50	7.79 ± 0.46

Los resultados se expresan como promedio (n = 3) ± desviación estándar

En la Tabla 6 se muestran los resultados del análisis químico proximal para la harina de maíz azul y la harina de soya. Los resultados muestran que la harina de soya posee el mayor contenido de lípidos, cenizas, proteínas y fibra en comparación con la harina de maíz azul (Iznaga et al., 2009). Los valores de lípidos, fibra, cenizas para la harina de soya fueron los siguientes 18.75, 14.19 y 6.31 g, respectivamente.

Tabla 6 Análisis químico proximal de la harina de maíz y de la harina de soya.

Parámetro	Maíz	Soya
(g/100g)		
Lípidos	4.59 ± 2.92	18.75 ± 3.92
Cenizas	1.13 ± 0.06	6.31 ± 0.36
Proteínas	9.33 ± 0.21	20.65 ± 1.15
Fibra	6.07 ± 0.68	14.19 ± 2.44
Hidratos de carbono	78.89 ± 0.10	40.10 ± 0.10

Los resultados se expresan como promedio (n = 3) ± desviación estándar

En la Tabla 7 se presentan los valores de los parámetros de color L, a, b. Las harinas y el almidón presentan una luminosidad elevada, tomando en consideración que 0

es oscuro y 100 es luminoso. En lo que respecta en el parámetro a^* donde si los valores negativos se acercan al color verde y si es positivo a color rojo, estos al ser valores cercanos al eje X se encuentran entre las tonalidades de grises. Excepto en la soya acercándose a rojo, en la relación de b^* que evalúa la tonalidad de azul y amarillo, el más cercano al color amarillo es la soya, mientras el maíz y el almidón no salen de la tonalidad hacia el color azul. En el parámetro h_u es la medida de matiz del color representa si es un color brillante u opaco. Teniendo harinas sin brillo.

Tabla 7 Determinación de los parámetros de color L^* , a^* , b^* en harina de maíz azul, harina de soya y almidón de maíz.

Parámetro	Maíz	Soya	Almidón
L^*	73.04 ± 0.32	80.54 ± 0.21	88.94 ± 1.27
a^*	0.61 ± 0.07	2.39 ± 0.10	-0.38 ± 0.05
b^*	1.76 ± 0.25	19.16 ± 0.26	7.22 ± 0.21
h	70.86 ± 2.82	82.89 ± 0.32	93.01 ± 0.49

Los resultados se expresan como promedio ($n = 3$) \pm desviación estándar

En la Figura 1 se muestran los resultados del análisis rápido de viscosidad del almidón, harina de miz azul y harina de soya utilizadas en el desarrollo de las botanas de 3ra. generación. El RVA proporciona información del almidón durante el proceso de gelatinización y resistencia al corte. Cuando los gránulos de almidón son sometidos a calentamiento en exceso de agua, este comienza a hincharse y posteriormente es solubilizado, dando lugar a gránulos de almidón hinchados y moléculas dispersas en una suspensión de almidón en una fase continua, con mayor viscosidad (Amador-Rodríguez et al., 2019).

El almidón de maíz presentó el mayor valor de viscosidad 2.43 Pa.s, mientras que la harina de soya presentó los menores valores de viscosidad 0.19 Pa.s, de acuerdo a Montoya (2012) la menor viscosidad desarrollada en las harinas de leguminosas y cereales se debe al contenido de proteínas, lípidos, hidratos de carbono y fibra que interfieren en la capacidad de gelatinización del almidón que estas contienen.

Con respecto a la caída de la viscosidad la cual experimentan los gránulos de almidón se asocia con después la gelación del almidón, la harina de soya fue la que presenta el menor valor, seguida de la harina de maíz azul; mientras que el almidón de maíz fue el que desarrollo un valor más alto. El valor de este parámetro oscila entre 0.219 a 1.265 Pa.s. Con respecto a la viscosidad final, la cual mide la capacidad de la tendencia a la retrogradación, aquí las estructuras del almidón tienden a reestructurarse para dar paso a un incrementó en la viscosidad.

Los resultados reportados en este estudio se observan que tanto la harina de maíz azul y el almidón son propensos a retrogradarse, esto concuerda con lo reportado por (Rocha, Felizardo, Jane, & Franco, 2012), quiénes reportan variaciones en diferentes tipos de harinas, debido al contenido de amilosa, variedad del grano y su genotipo. En relación con la viscosidad final de la soya que fue menor, se debe al elevado contenido de proteína, la cual interfiere en el pegado de los almidones presente en la harina (Ayo-Omogie, Adeyemi, Otunola, & technology, 2010).

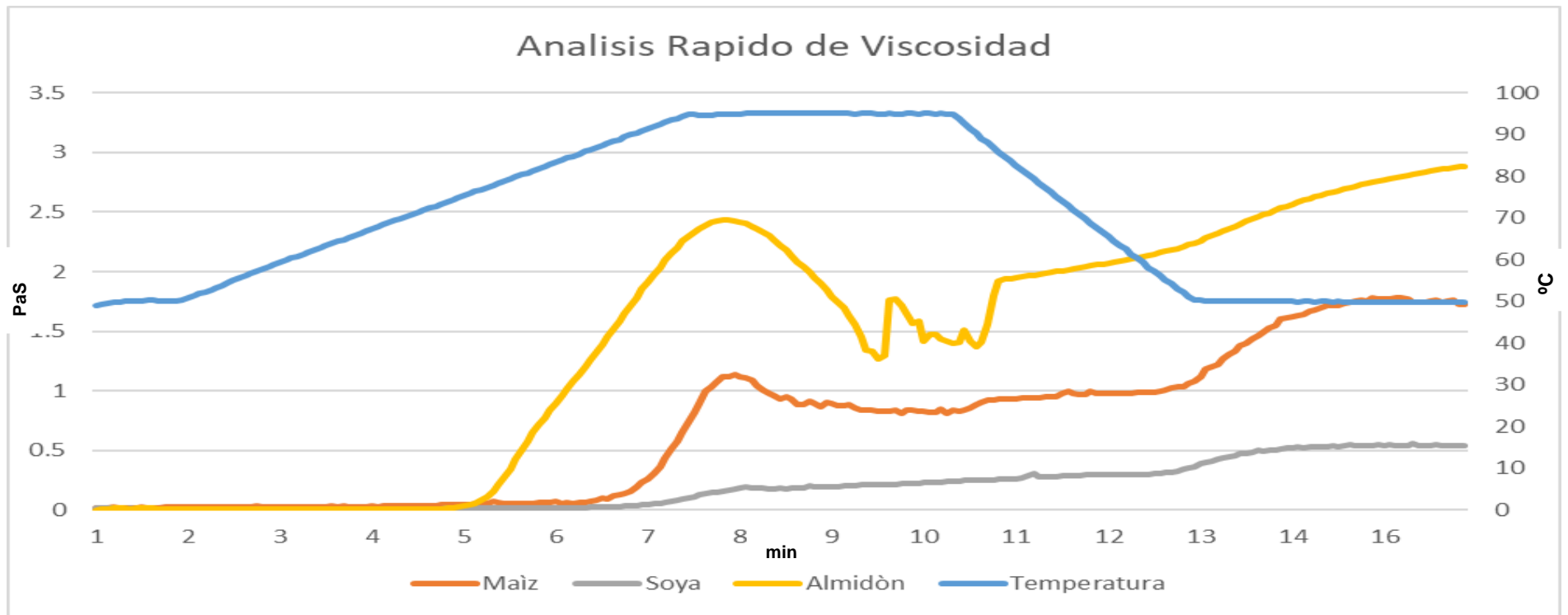


Figura 1 Análisis Rápido de Viscosidad, en el eje Y se muestra la viscosidad de la muestra en parámetros centipoints (cP), en el eje X el tiempo (min) y el eje Y la temperatura utilizada en el barrido de la rampa (°C).

7.2 Análisis fisicoquímico de las mezclas de harinas antes de ser sometidas al proceso de extrusión.

El análisis de la combinación de la materia prima se realiza con el objetivo de obtener la mejor muestra para ser utilizado en el extrusor. Con las características necesarias para que exista un buen funcionamiento. Se tiene que considerar que la harina de soya tiene en su contenido una cantidad considerable de proteína. En la tabla 7. Se puede observar el análisis de las combinaciones de harinas de maíz azul y soya, evaluando su índice de solubilidad, índice de absorción de agua, y color, en diferentes contenidos de harina de soya, (0%-40%). Obteniendo resultados que oscilan ISA 0.73-3.05, IAA 6.85-7.79. se toma en consideración que entre mayor adición de harina de soya el índice de solubilidad de agua aumenta, esto se debe a que, al adicionar soya, la mezcla aumenta de contenido de fibra y proteínas, haciendo un cambio en moléculas solubles en agua (Chiang, Zhang, & Hande, 2005).

Tabla 8 Análisis de combinaciones de harinas de maíz, azul y soya (índice de solubilidad, Índice de absorción de agua y color) en diferentes concentraciones sin tratamiento.

Harina % soya	ISA (%)	IAA (%)	Color		
			L	a*	b*
0%	3.05 ± 0.02	7.79 ± 0.03	84.77 ± 0.23	0.72 ± 0.01	0.67 ± 0.02
3.1%	6.27 ± 0.04	8.08 ± 0.06	84.12 ± 0.59	0.62 ± 0.08	0.65 ± 0.12
20 %	13.86 ± 0.46	8.43 ± 0.11	83.18 ± 0.27	0.18 ± 0.05	3.83 ± 0.50
31.8%	7.59 ± 0.12	7.67 ± 0.04	84.56 ± 1.02	0.18 ± 0.01	5.83 ± 0.02
40 %	0.73 ± 0.02	6.85 ± 0.03	83.43 ± 0.05	0.32 ± 0.02	6.04 ± 0.03

Promedio de 3 repeticiones ± desviación estándar.

7.3 Análisis fisicoquímico de pellets expandidos

En la Tabla 9 se presentan los coeficientes de regresión del modelo ajustado para las respuestas índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA), diferencia de color (ΔE), densidad aparente (δ_{apa}), índice de expansión (Inexp) y dureza (D). Los coeficientes de regresión del modelo resaltados en negritas indican si el coeficiente fue significativo.

Los datos experimentales de cada una de las respuestas mencionadas con anterioridad se ajustaron a un modelo cuadrático del tipo,

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{1,2} X_1 X_2 + \beta_{1,3} X_1 X_3 + \beta_{2,3} X_2 X_3 + \beta_{1,1} X_1^2 + \beta_{2,2} X_2^2 + \beta_{3,3} X_3^2$$

en el cual se observan coeficientes positivos y negativos, los coeficientes positivos indican un incremento en la respuesta evaluada al incrementar los niveles de los factores, mientras que los coeficientes negativos indican una disminución en la respuesta evaluada conforme incrementan los niveles de los factores. Para todas las respuestas evaluadas el modelo ajustado es significativo y presenta falta de ajuste. El coeficiente de determinación R^2 para las respuestas antes mencionadas es igual o mayor a 0.72. El coeficiente de determinación R^2 es una medida de la proporción de varianza explicada dentro de una variable (Miles, 2005).

En la Tabla 10 se presentan los coeficientes de regresión del modelo ajustado para las respuestas contenido de fenoles, antocianinas (Ant), actividad antioxidante (ABTS y DPPH) y contenido de flavonoides. Los coeficientes de regresión del modelo resaltados en negritas indican si el coeficiente fue significativo sobre cada una de las respuestas evaluadas.

Los datos experimentales de cada una de las respuestas mencionadas con anterioridad se ajustaron a un modelo cuadrático.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{1,2} X_1 X_2 + \beta_{1,3} X_1 X_3 + \beta_{2,3} X_2 X_3 + \beta_{1,1} X_1^2 + \beta_{2,2} X_2^2 + \beta_{3,3} X_3^2$$

Los coeficientes de regresión presentan signos positivos y negativos, lo cual es un indicativo del efecto de cada uno de los factores en sus términos lineales, interacciones y términos cuadráticos sobre la respuesta de interés. Los términos negativos indican una disminución en la respuesta de interés conforme incrementa el nivel del factor; mientras que, los términos positivos indican un incremento en la respuesta de interés al incrementar el nivel de cada uno de los factores

Tabla 9 Análisis de Varianza y coeficientes de determinación (R^2) del modelo ajustado para las respuestas contenido de Índice de solubilidad de agua (**ISA**), Índice de absorción de agua (**IAA**), Diferencia de color (**ΔE**), Índice de expansión (**Inexp**), Densidad Aparente (**δ_{apa}**) y Dureza (**D**) en harina de pellet de maíz y soya expandida.

Respuestas	β_0	β_1	β_2	β_3	$\beta_{1,2}$	$\beta_{1,3}$	$\beta_{2,3}$	$\beta_{1,1}$	$\beta_{2,2}$	$\beta_{3,3}$	R^2	P de F (modelo)	Falta de ajuste
ISA (%)	-154.57	+0.99	+7.39	+1.10	-3.10E-003	-4.58E-003	-0.08	-4.10E-003	-0.11	+0.01690	0.72	<0.0001	<0.0001
IAA (%)	+0.50	+0.67	+1.84	+0.84	-8.73E-003	-2.96E-003	-0.02	-1.59E-003	-7.080E-003	-3.22E-004	0.79	<0.0001	<0.0001
ΔE	+18.04	+0.33	-0.93	+0.32	-3.40E-003	-1.97E-003	0.01	-8.59E-004	+0.03234	+6.32E-003	0.75	<0.0001	<0.0001
$\Delta_{apa}(\text{Kg/m}^3)$	-7.33	+0.019	-0.14	+0.04	+1.22E-004	+2.04E-006	-0.90E-004	-1.08E-004	+2.696E-003	+1.99E-004	0.86	<0.0001	<0.0001
Inexp	-10.60	+0.085	+0.64	-0.15	-2.77E-003	-8.43E-004	+5.40E-003	+8.10E-005	-8.766E-003	+8.16E-004	0.84	<0.0001	<0.0001
D(Kg/m ³)	+185.23	-1.47	-7.13	+1.01	+0.03	-6.97E-003	-0.01	+3.37E-003	+0.064502	+1.73E-003	0.75	<0.0001	<0.0001

b_1 : Temperatura, b_2 : Humedad, b_3 : Soya. Los coeficientes de regresión resaltados en negritas indican efecto significativo sobre la respuesta de interés ($\alpha=0.05$) en el modelo ajustado.

En la Figura 2 se muestra el efecto de las variables temperatura, humedad y porcentaje de soya sobre el índice de expansión (IE). El IE es un parámetro importante en la producción de botana extruidas a base de cereales, ya que, es un parámetro de aceptabilidad en el producto final (Ozer, Sarpel, Gulek, Alparslan, & Erken, 2005).

En la Figura 2a se muestra el efecto de la temperatura de extrusión y la humedad de las mezclas sobre el IE; a una concentración de soya del 20% la figura muestra que el mayor IE, se obtuvo en aquellos productos procesados a una temperatura de 140°C y una humedad del 22%. El IE disminuye al incrementar la humedad en todas las temperaturas probadas. En la Figura 2b se muestra el efecto de la temperatura de extrusión y el % de soya a una humedad del 27%, en la figura se observa que al incrementar el % de soya el IE disminuye en todas las temperaturas probadas. En la Figura 2c se muestra el efecto de la humedad de las mezclas y el % de soya a una temperatura de 115 °C, el gráfico muestra una disminución del IE al incrementar el % de soya en todas las humedades probadas.

Las proteínas afectan la expansión debido a que tiene la capacidad de influir en la distribución del agua en la matriz, este efecto es causado a su conformación y estructura macromolecular, afectando las propiedades de fusión de los extruidos (Amaya-Llano, Hernández, Tostado, & Martínez-Bustos, 2007). Este efecto depende del tipo de proteína y concentración, afectando la interacción con el almidón presente en las harinas e inhibiendo la liberación del contenido de agua, este efecto disminuye la expansión e incrementa la densidad de los pellets (Seker & Agriculture, 2005).

El aumento del IE se vio afectado al aumentar la temperatura de la extrusión, esto se debe a que existe un aumento en la presión de vapor combinado con la humedad de la mezcla. Obteniéndose un mayor grado de gelatinización de almidón que tiene la mezcla (Korkerd et al., 2016). De acuerdo con Morales-Villagrán el IE disminuye al incrementar el % de soya debido a un efecto de dilución, es decir conforme incrementa el % de soya disminuye la mezcla de harina de maíz y almidón.

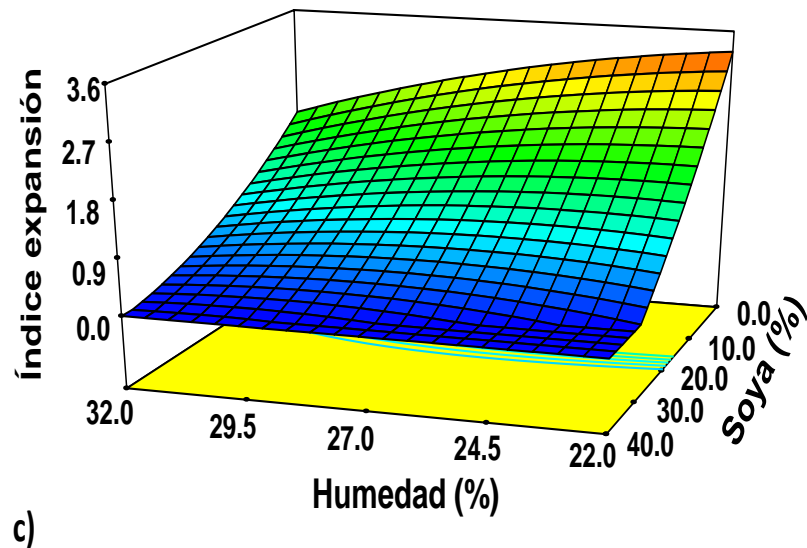
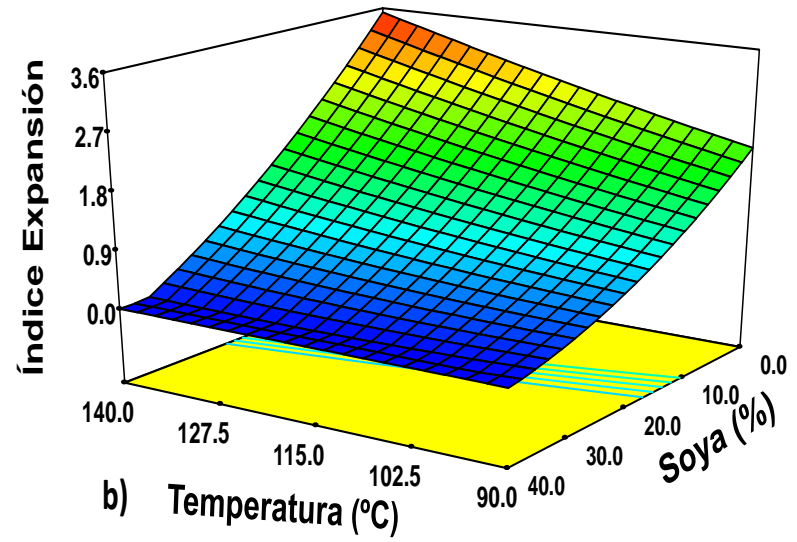
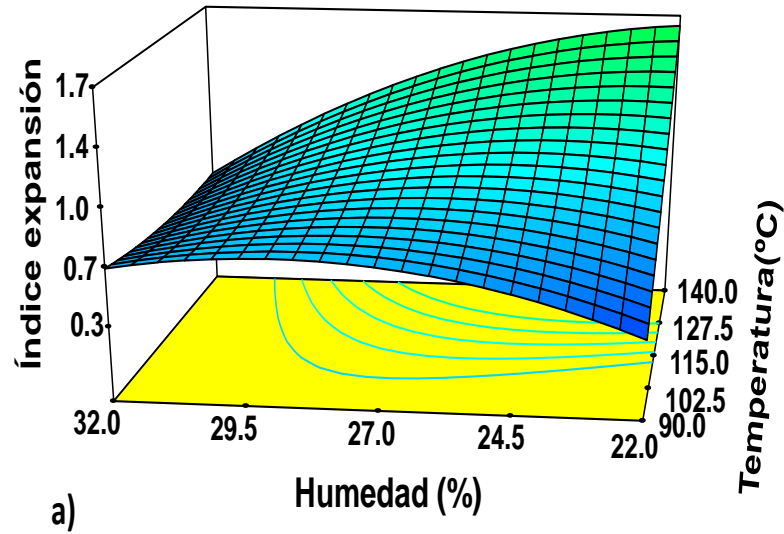


Figura 2 Gráfico de superficie de respuesta de índice de expansión, en pellet expandido de harina de maíz y soya.

En la Figura 3 se muestran los gráficos de superficie de respuesta para la dureza (**D**) de los pellets expandidos por microondas. En la Figura 3a se muestra el efecto de la temperatura y humedad a un % de soya de 20%, en este gráfico se observa una disminución en la **D** al incrementar la temperatura de extrusión en las humedades probadas. En la Figura 3b se muestra el efecto de la temperatura de extrusión y el % de soya a una humedad del 27%, en la figura se aprecia una disminución en la dureza de los productos extruidos a 140°C y al incrementar el % de soya, así como una disminución en la dureza en la mezcla sin soya y disminuir la temperatura de 140 °C a 90 °C. En la Figura 2c se muestra el efecto de la humedad y el % de soya sobre la dureza a una temperatura de extrusión de 115 °C, en el gráfico se aprecia una disminución de la dureza de los productos extruidos expandidos por microondas al incrementar el % de soya en todas las humedades probadas.

La dureza es un parámetro importante en la aceptabilidad del producto por parte de los consumidores. Las botanas deben de tener una textura crujiente y no tan dura. De acuerdo a (Jin, Hsieh, & Huff, 1995) reportaron que la **D** de una botana incrementa conforme incrementa el contenido de soya. Delgado-Nieblas et al. (2018) reportan que al calentar la mezcla a temperaturas superiores a la de gelatinización el IE incrementa y por ende se obtienen productos menos duros.

En la Figura 4 se presenta el gráfico para la respuesta índice de absorción de agua (IAA) en pellet expandido. La Figura 4a muestra el efecto de la temperatura y humedad a un % de soya del 20% sobre el IAA, el gráfico muestra que a una temperatura de 115°C en todas las humedades probadas presentan el mayor IAA y por debajo y por encima de esta temperatura hay una disminución en el IAA. La Figura 4b muestra el efecto de la humedad y el % de soya sobre el IAA a una temperatura de 115 °C, el gráfico muestra que el mayor IAA se obtuvo a un % de soya de 40% y una humedad del 22%. El IAA disminuye conforme disminuye el % de soya en la mezcla (Figura 4b). De acuerdo a Campillo et al (2013) el incremento en el IAA al incrementar el % de soya se debe a que las harinas ricas en fibra y proteínas (leguminosas) favorecen el incremento de absorción de agua debido a

que existen mayor cantidad de moléculas que compiten por agua; por otro lado, partículas con tamaño más pequeños absorben proporcionalmente más agua y con mayor velocidad, este fenómeno se puede explicar debido a que tiene un área de superficie mayor interactuando con las moléculas de agua de acuerdo con (RICE & PAYKARY, 2014). Zheng (2002) reportó que el IAA se modifica por el efecto mecánico de fricción entre el tornillo y el barril del extrusor. Hoover (2001), reportó que fenómenos como la desnaturalización de proteínas, la gelatinización del almidón, así como el hinchamiento de la fibra cruda favorecen el incremento en el IAA.

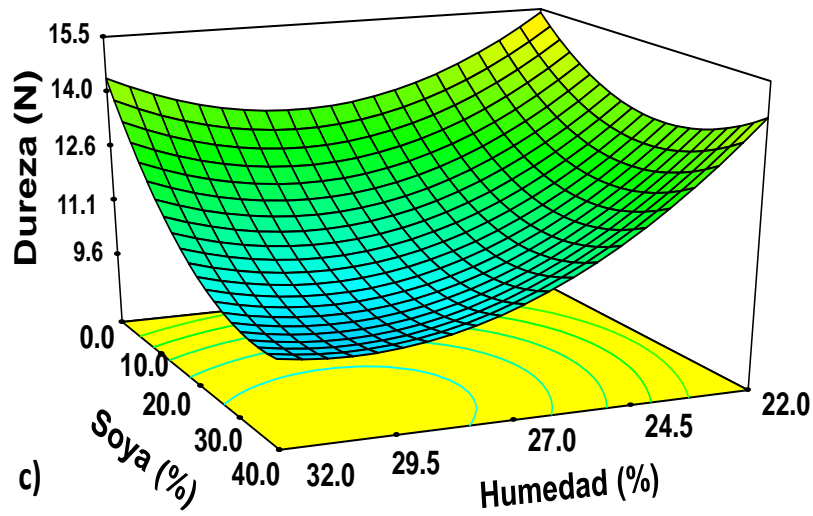
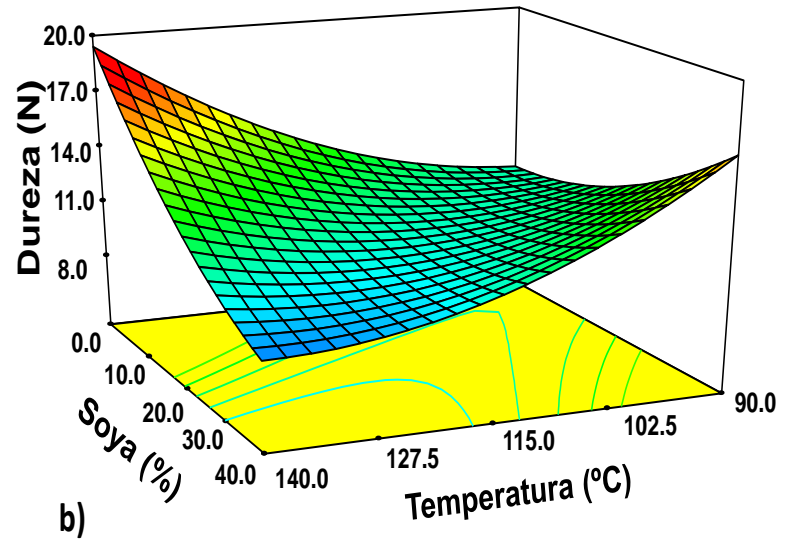
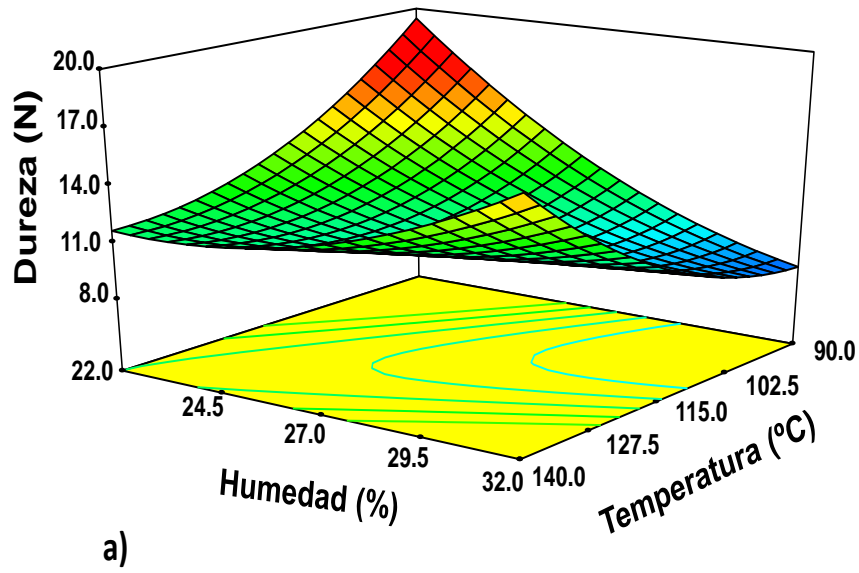
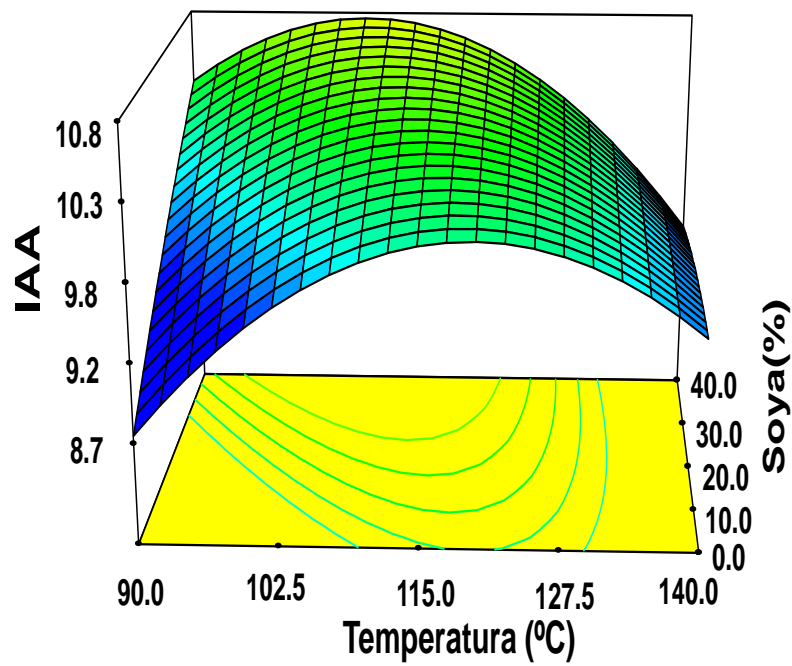
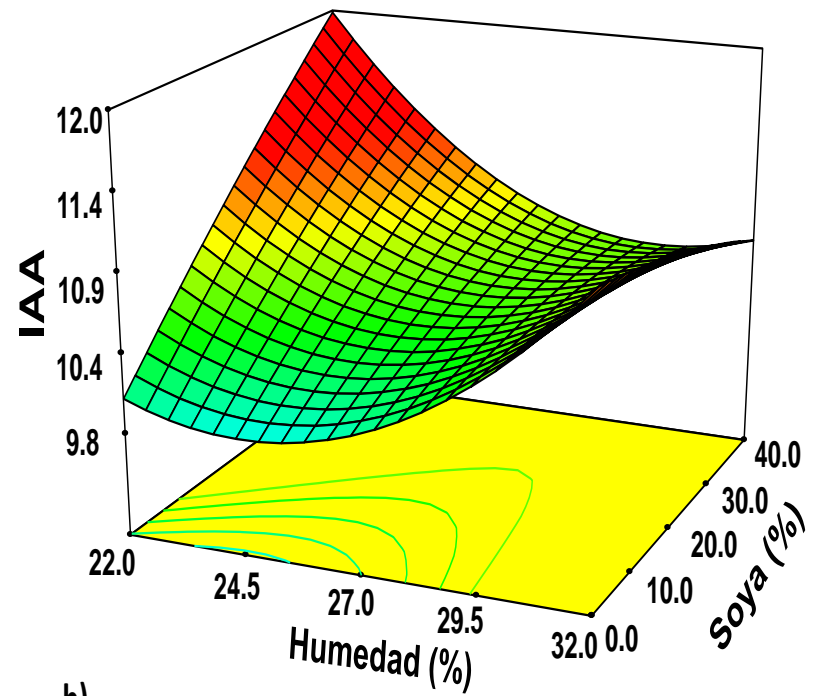


Figura 3 Gráfico de superficie de respuesta de dureza (N), en pellet expandido de harina de maíz y soya.



a)



b)

Figura 4 Gráfico de superficie de respuesta de índice de absorción de agua, pellet expandido de harina de maíz y soya.

En el gráfico de superficie de respuesta Figura 5 se muestra el efecto de la humedad y % de soya sobre el índice de solubilidad en agua (ISA) a una temperatura de 115 °C, en la figura se aprecia que los valores más altos de ISA se obtienen a 40% de soya en todas las humedades probadas, una disminución en el ISA se observa al disminuir el % de soya de 40 a 10% en todas las humedades probadas, y por debajo de 10% de soya el ISA tiende a incrementar. (Chiang, Zhang, & Hande, 2005) , reportaron que, al incrementar la humedad de la mezcla, el ISA incrementa, debido a un incremento en la viscosidad de la mezcla, lo cual mantiene a la mezcla por un periodo de tiempo más prolongado en el barril del extrusor, como consecuencia de esto, el grado de gelatinización y fricción del almidón es mayor. El ISA depende de la cantidad de moléculas solubles, que está relacionado con la degradación. La solubilidad en agua incrementa cuando las cadenas de almidón se degradan en fragmentos más pequeños a una velocidad de tornillo más alta, por lo tanto, el ISA aumenta (Maskan, 2012)

En la Figura 6 de superficie de respuesta se presenta el efecto de la humedad de la mezcla y el % de soya a una temperatura de 115 °C sobre la densidad aparente (DA). La figura muestra una disminución en la DA al disminuir el % de soya, obteniéndose la menor densidad aparente en la mezcla que no tiene soya en todas las humedades probadas. La DA presentada en los pellets expandidos de harina de maíz azul y soya, se encuentra en un rango de los 200 kg/m³ a los 1000 kg/m³. La DA se encuentra inversamente relacionada con el índice de expansión y directamente con la dureza de los productos extruidos expandidos por microondas. La DA de un material es la relación existente entre el volumen que ocupa el material y el peso del material, incluye la presencia de orificios y poros aparentes que contenga, la densidad, mide la expansión de los extruidos en todas las direcciones (Robin, Théoduloz, Srichuwong, & technology, 2015). Esta propiedad es importante debido a que se puede relacionar con el costo del producto y el llenado del empaque final (Espinoza, Acero, & Martínez, 2021).(Hernández-Nava, Bello-Pérez, Martín-Martínez, Hernández-Sánchez, & Mora-Escobedo, 2011) elaboraron un extrudido con harina de lenteja y harina de plátano inmaduro, donde obtuvieron densidades que oscilaban entre los 170 a 540 kg/m³, los autores reportaron que la adición de la

harina de leguminosa incrementa la densidad del producto debido a la cantidad de fibra y proteína que esta contiene. Se reporta que al incorporar fibra y proteína en los extrudidos se obtienen productos de mayor densidad aparente (Bastos-Cardoso, 2007).

Sharma (2016) reporta que, si el calor suministrado durante el proceso de extrusión no es suficiente o la humedad del material de alimentación es elevada, el producto obtenido es más denso y tiene una menor expansión. El aumento de la densidad se debe al aumento de la gelatinización del almidón en consecuencia del aumento de la temperatura.

(Pastor-Cavada et al., 2011) reportaron que la adición de harinas de leguminosas produce un incremento en la densidad aparente de los extrudidos. (Puma Campues, 2019), reporta que la densidad aparente de una botana depende de la configuración del tornillo y la composición de la materia prima, afectando la distribución de la materia tratada y el tiempo de residencia en el barril del extrusor, promoviendo la gelatinización y fusión del almidón.

En la Figura 7 se presenta el gráfico de superficie de respuesta para el IAAceite, en la Figura 7a se muestra el efecto de la temperatura y el % de soya a una humedad del 27% sobre el IAAceite, la máxima absorción de aceite se obtiene en aquellos productos obtenidos con un 30% de harina de soya y una temperatura de 150 °C, y los menores valores de IAAceite se obtienen en productos que contienen menos del 30% de soya en todas las temperaturas probadas. En la Figura 7b se muestra el efecto de la humedad de alimentación y el % de harina de soya donde el máximo IAAceite se obtiene a un porcentaje de harina de soya del 20 al 30% y humedades entre 24.5 a 29.5%. El índice de absorción de aceite es una propiedad funcional del atrapamiento físico de lípidos por las proteínas que componen el sistema, en su estructura llamada micela (Yu, Li, Ding, Hang, & Fan, 2016). Otro factor es la cantidad de almidón que contiene la mezcla que absorbe los lípidos (Altan, McCarthy, & Maskan, 2008). El contenido de harina de soya afecta la absorción de aceite debido a la cantidad de proteína que esta tiene, además de otros componentes como la fibra, ya que se utilizó en la presente investigación harina integral de soya.

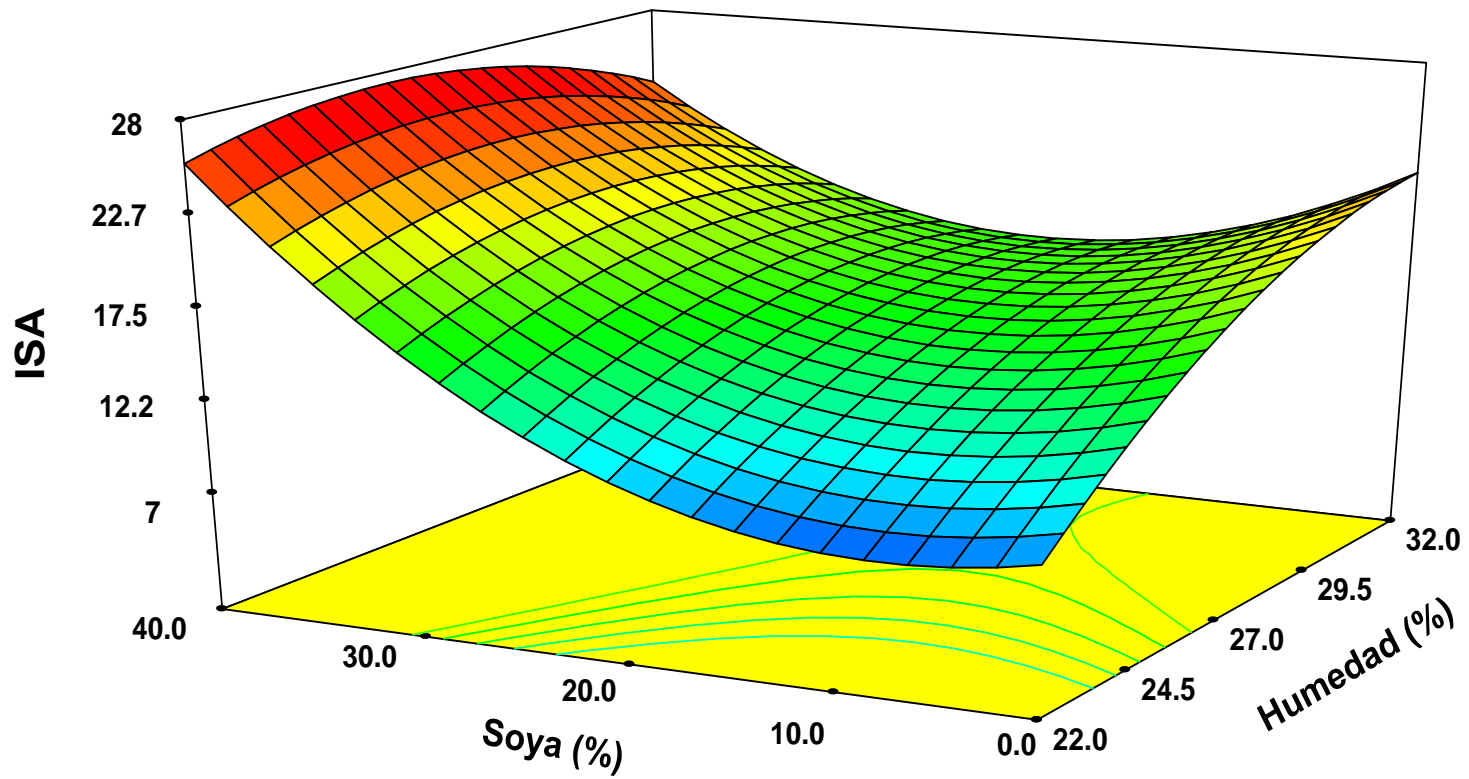


Figura 5 Gráfico de superficie de respuesta de índice de solubilidad de agua, en pellet expandido de harina de maíz y soya.

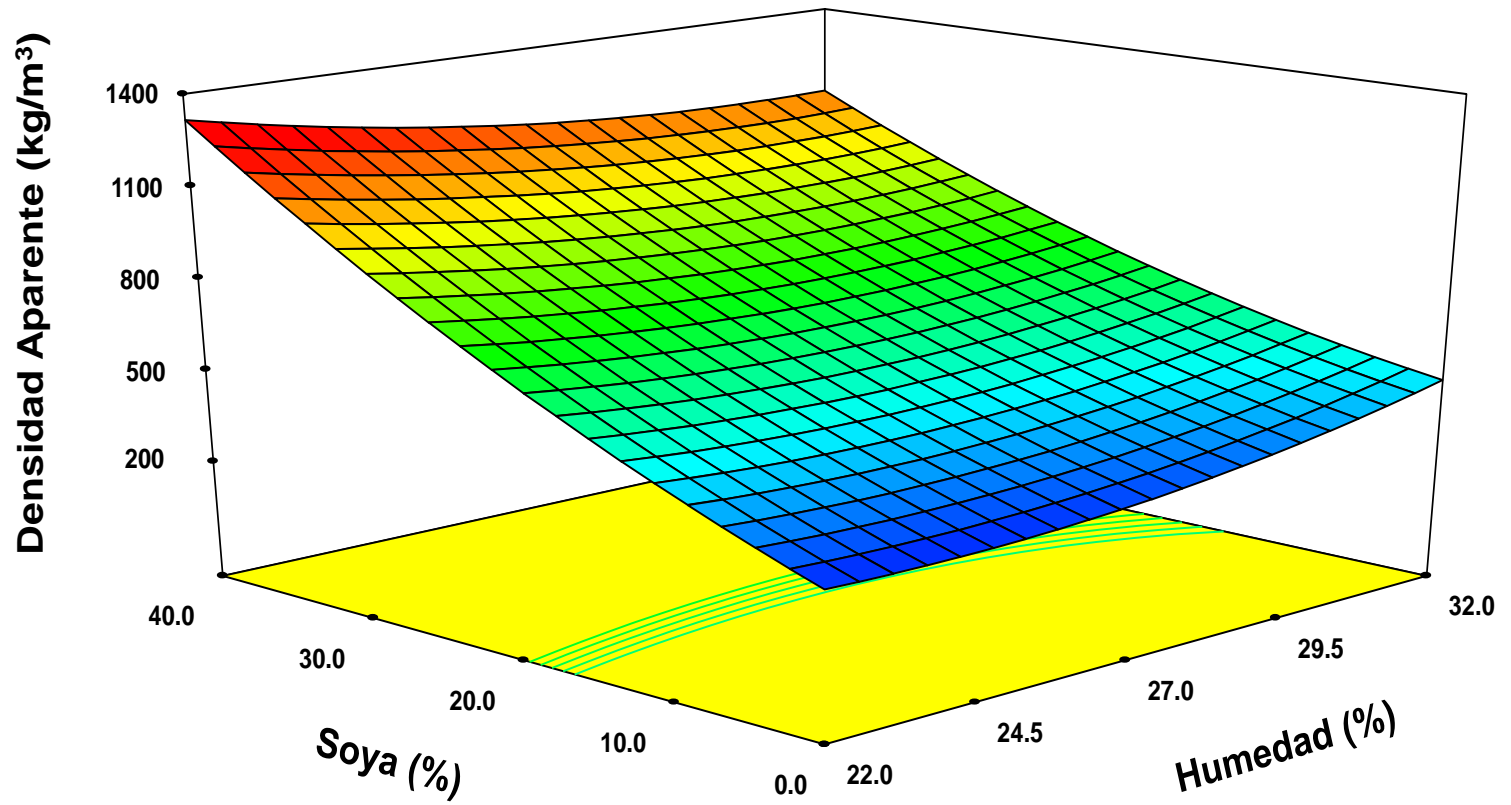


Figura 6 Gráfico de superficie de respuesta de densidad aparente, en pellet expandido de harina de maíz y soya.

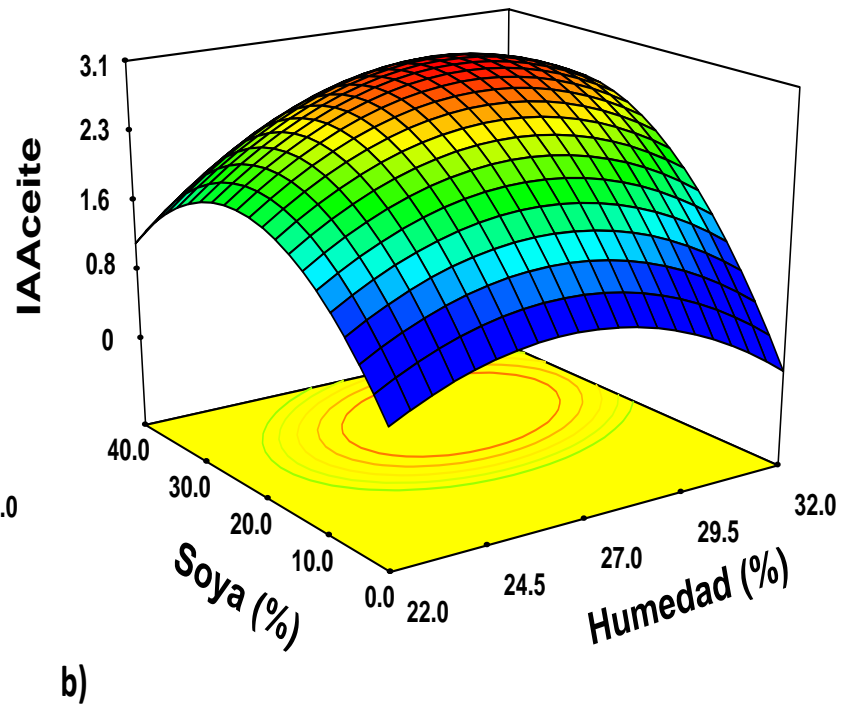
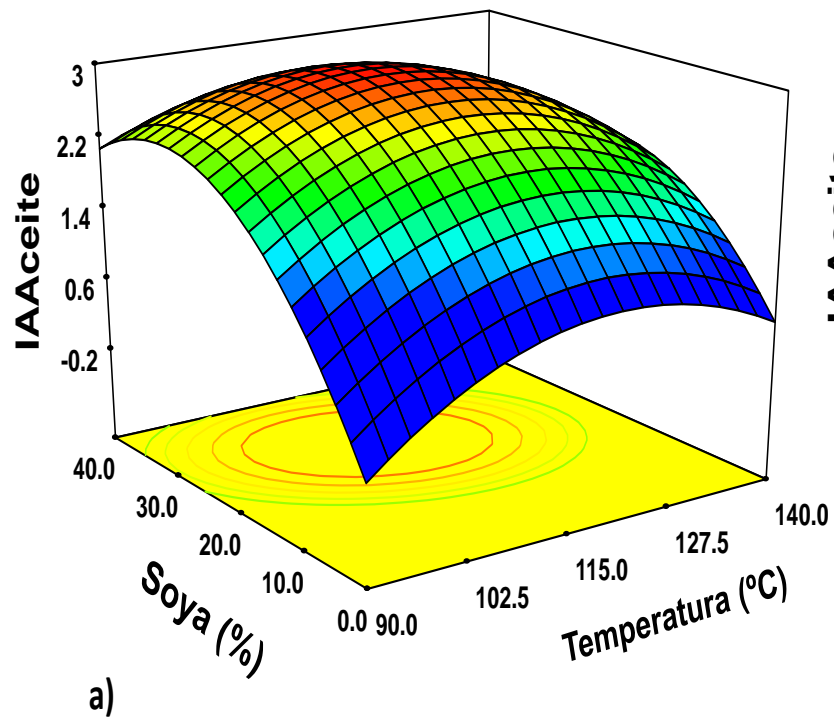


Figura 7 Gráfico de superficie de respuesta de índice de absorción de aceite, en pellet expandido de harina de maíz y soya.

7.4 Análisis Funcional de los Productos Extruidos Expandidos

7.4.1 Coeficientes de regresión del modelo ajustado

En la Tabla 10 se aprecia que el contenido de fenoles es afectado positivamente por la humedad en su término lineal y cuadrático, así como, por la temperatura en su término cuadrático; mientras que las interacciones temperatura-humedad y temperatura-% de soya presentaron efecto negativo. Con respecto al contenido de antocianinas se muestra un impacto negativo de la temperatura en su término lineal, así como de la interacción temperatura-% de soya y un efecto positivo de la interacción temperatura-humedad, así como del término cuadrático temperatura, humedad y % de soya.

La actividad antioxidante por ABTS se ve afecta positivamente por la temperatura y humedad en su término cuadrático y negativamente por la temperatura en su término lineal; así como por la interacción temperatura-% de soya, y por la humedad en su término cuadrático. La actividad antioxidante por DPPH se ve afectada negativamente por la interacción temperatura-humedad, así como la temperatura y humedad en su término cuadrático, y positivamente por la interacción humedad-% de soya y por el % de soya en su término cuadrático.

El contenido de flavonoides se va afectado positivamente por la temperatura y % de soya en su término lineal, por la interacción temperatura-% de humedad y por el % de soya en su término cuadrático; y negativamente por la interacción humedad-% de soya y por la temperatura en su término cuadrático.

Tabla 10 Análisis de Varianza y coeficientes de determinación (R^2) del modelo ajustado para las respuestas índice de solubilidad en Fenoles Totales, Antocianinas (**ANT**), ABTS, DPPH y Flavonoides en harina de pellet de maíz y soya expandida.

Respuestas	β_0	β_1	β_2	β_3	$\beta_{1,2}$	$\beta_{1,3}$	$\beta_{2,3}$	$\beta_{1,1}$	$\beta_{2,2}$	$\beta_{3,3}$	R^2	P de F (modelo)	Falta de ajuste
Fenoles (mg/EAG/g)	+100.57	-1.29	-3.17	+1.40	-0.07	-6.14E-003	-0.07	+0.01	+0.23	+0.02	0.84	<0.0001	<0.0001
Ant (mg/g)	+124.57	-1.31	-3.97	+0.55	+0.02	-4.07E-003	-4.26E-003	+4.28E-003	+0.05	+2.67E-003	0.92	<0.0001	<0.0001
ABTS(mg/ET/g)	+205.02	-2.41	-4.88	+0.15	-3.80E-003	-3.03E-003	-8.74E-004	+0.01	+101	-5.94E-003	0.85	<0.0001	<0.0001
DPPH(mg/ET/g)	-68.00	+2.11	+12.49	-0.40	-0.01	-6.22E-004	+0.02	-7.73E-003	-0.21	+5.81E-003	0.85	<0.0001	<0.0001
Flavo	+10.55	+0.25	-1.43	+0.19	+0.02	-3.31E-004	-0.01	-3.67E-003	-0.01	+1.79E-003	0.74	<0.0001	<0.0001

b_1 : Temperatura, b_2 : Humedad, b_3 : Soya. Los coeficientes de regresión resaltados en negritas indican efecto significativo sobre la respuesta de interés ($\alpha=0.05$) en el modelo ajustado.

7.4.2 Cuantificación del contenido de fenoles totales en los productos extruidos expandidos

En la Figura 8 se muestra el efecto de los factores temperatura, humedad y % de harina de soya sobre el contenido de fenoles totales (mg/EAG/g) en los pellets expandidos elaborados con harina de maíz azul. La Figura 8a, muestra el efecto que tiene la temperatura y humedad, en donde se puede observar que los valores elevados de fenoles se encuentran en un % de humedad elevado y una temperatura de extrusión baja; mientras que en la Figura 8b se observa la relación que existe entre la temperatura y la humedad de la mezcla, obteniendo los valores altos de contenido de fenoles bajo las siguientes condiciones de tratamiento a 90 °C de temperatura con 0% contenido de soya. Por otra parte, en la Figura 8c se observa que entre mayor contenido de humedad y menor concentración de harina soya (0%) el contenido de fenoles tiende a aumentar. Por lo tanto se tiene que los procesos térmicos, como la cocción por extrusión en combinación con la humedad influyen sobre el contenido de polifenoles en los productos alimenticios (Nayak, Berrios, Powers, & Tang, 2011). En el caso de las temperaturas elevadas modifican el contenido de fenoles, ya que existe una descomposición de compuestos fenólicos termolábiles y conducen a la polimerización de fenoles (Zhao, Wang, Zuo, Geng, & Design, 2014); otros factores que intervienen de acuerdo a (Ruttarattamongkol, Chittrakorn, Weerawatanakorn, Dangpium, & Technology, 2016) son temperaturas superiores a 110 °C.

En el año 2010 Pokorny y Schmidt, reportaron que el proceso de extrusión suele realizarse a temperaturas por encima de los 100 °C, pero el tiempo de contacto de la masa con las paredes del extrusor es corto, por lo cual, la descomposición de los antioxidantes es relativamente baja.

En relación con el contenido de humedad en la mezcla, al incrementar el contenido de humedad, el paso de la mezcla por el tornillo del extrusor tiende a ser más lento, causando que la mezcla este en mayor contacto con la temperatura. Considerando la naturaleza de la mezcla que se utiliza en este estudio, los reportes que realizaron (Neder-Suárez et al., 2021), mencionan un aumento significativo en la cantidad de

contenido fenólicos en un porcentaje de humedad bajo en productos extruidos elaborados de mezclas de harina de maíz azul, frijol negro y acelgas.

Sharma et al. (2022) reportaron que la disminución de compuestos bioactivos va a depender del proceso y del contenido de humedad del alimento, así como de su composición, lo cual estos factores protegerían a los compuestos fenólicos presentes. Debido a esto se buscó la posible respuesta del por qué en el estudio el contenido de fenoles aumento en condiciones de alta humedad, la bibliografía menciona que el adicionar harina de integral de soya (se utiliza el termino de integral debido a que la semilla fue molida sin llevar tratamiento previo al molido). esto en consecuencia aumenta la humedad de la mezcla, protegiendo los compuestos fenólicos al momento del procesamiento de extrusión.

Además, al utilizar materias primas que contienen antioxidantes altamente reactivos, pudiesen interaccionar con radicales libres presentes en las muestras (Xu, 2009). El efecto de la extrusión sobre los compuestos bioactivos depende de la leguminosa. Esto se debe a la desnaturalización de las proteínas durante la extrusión, promoviendo la interacción tanino-proteína provocando la formación de complejos, en consecuencia, retiene la actividad antioxidante. Con la posibilidad que estos complejos pueden descomponerse en el tracto gastrointestinal para liberar los compuestos antioxidantes (Riedl, 2001).

7.4.3 Cuantificación del contenido de antocianinas en los productos extruidos expandidos

En la Figura 9 se presenta el gráfico de respuesta del contenido de antocianinas en mg por cada g de muestra de la botana expandida, en el grafico 9a se observa que al incrementar la humedad en las mezclas las antocianinas presentan valores mayores a una temperatura de 140 °C, mientras que en la Figura 9b los valores más altos es a mayor cantidad de soya adicionada (40%) y a una menor temperatura. Tomando en cuenta que las antocianinas son termolábiles y se pierden en procesos que utilizan temperatura. (Escalante-Aburto et al., 2013), reportan que existe una

termo-resistencia en el proceso de extrusión debido a que las harinas utilizadas contiene pericarpio haciendo un factor de protección.

El proceso de extrusión es un proceso muy agresivo debido a que utiliza temperaturas mayores a 100 °C, no obstante, en este estudio la cantidad de antocianinas fueron mayores a pesar de utilizar temperaturas de 140 °C, esto fue también reportado por (Escalante-Aburto et al., 2013). Otros de los factores que intervienen es la cantidad de fibra que contiene la soya, aumentando las moléculas de protección de antocianinas en la mezcla. Escalante 2013 y (Sharma et al., 2022), mencionan que al disminuir la temperatura en la extrusión la antocianinas se preservan debido a que la temperatura no degrada las estructuras moleculares.

En la Figura 10 se muestra el gráfico de superficie de respuesta para la actividad antioxidante de los pellets expandidos por DPPH. En la Figura 10a se muestra el efecto de la temperatura y humedad de las mezclas a una concentración de soya del 20% sobre la actividad antioxidante por DPPH, mientras que en la Figura 10b se muestra el efecto de la humedad y el % de soya a una temperatura de 115 °C sobre la actividad antioxidantes por DPPH.

En la Figura 10a se observa que la mayor actividad antioxidante se obtiene a humedades entre el 24.5 al 28%. En la Figura 10b, se observa que la mayor actividad antioxidante se obtiene a humedades del 27% y concentraciones de soya entre el 30 al 40%.

Ruiz-Armenta et al. (2018) reportaron que debido a la temperatura de procesamiento y cizallamiento la materia prima sufre cambios físicos y estructurales, además de cambios en los compuestos antioxidantes. Otro de los factores que afectan la actividad antioxidante es la humedad de las mezclas; ya que, posiblemente puede promover la transformación del ácido fenólico a sus formas conjugadas. (White, Howard, Prior, & Chemistry, 2010), reportaron que los cambios en los compuestos antioxidantes se deben al rompimiento de enlaces covalentes. Por otro lado, la cantidad de fibra que hay en la mezcla tiene un efecto protector para los antioxidantes. Se señala que la capacidad antioxidante de los cereales se

debe principalmente a los ácidos fenólicos unidos a la pared celular, los compuestos más comunes son flavonoides, carotenoides y tocoferoles (Esposito, 2005).

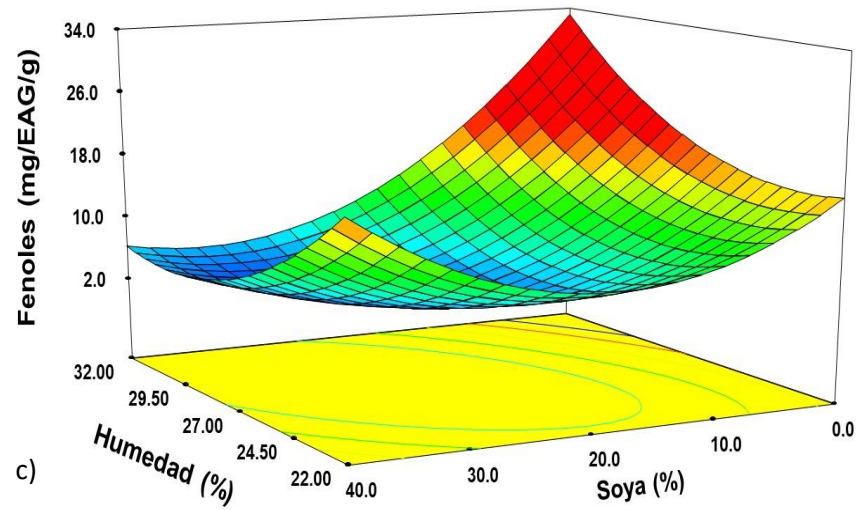
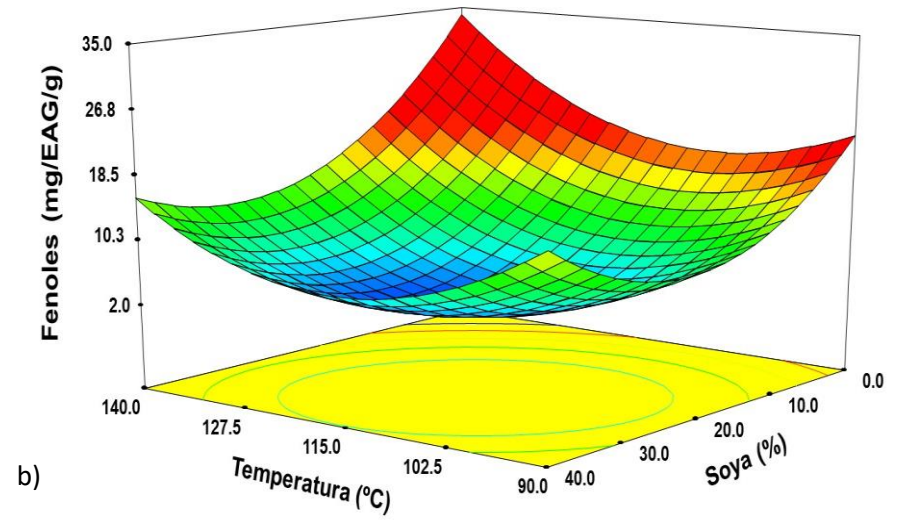
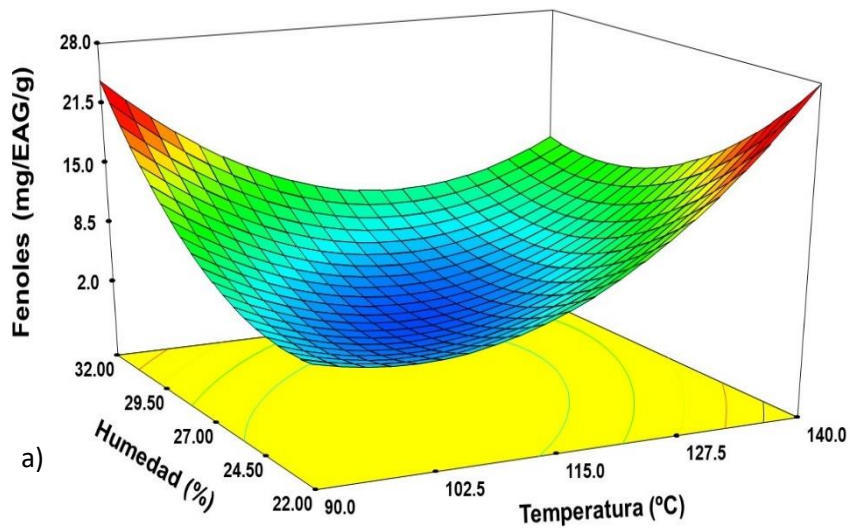


Figura 9 Gráfico de superficie de respuesta de contenido de Fenoles totales (mg/EAG/g) en pellet expandido de harina de maíz y soya.

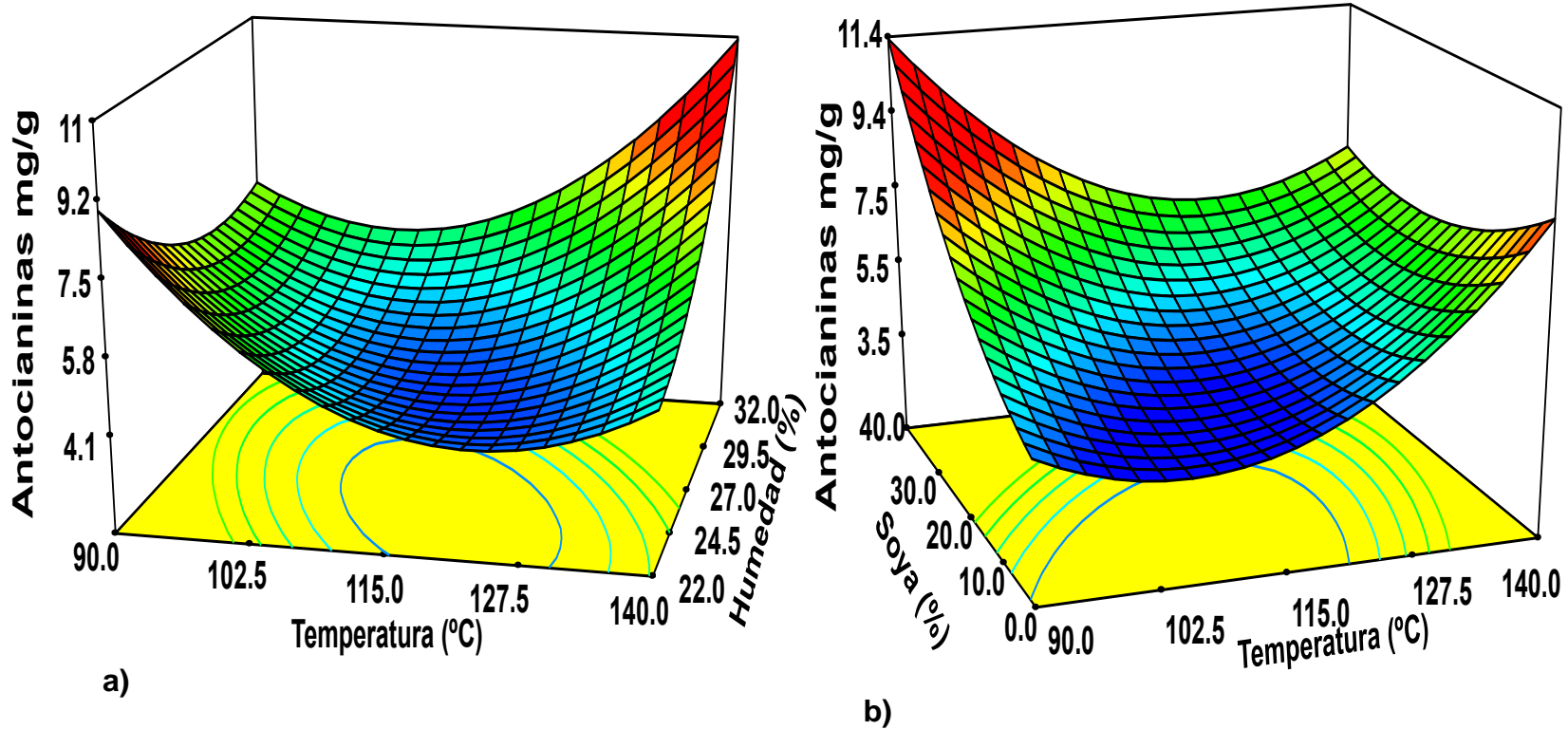
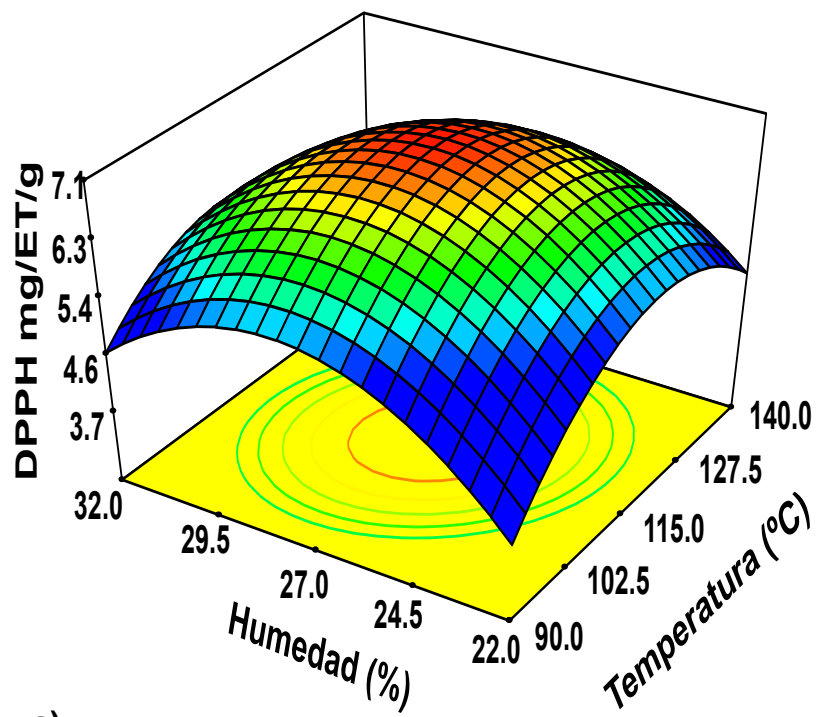


Figura 10. Gráfico de superficie de respuesta de contenido de Antocianinas (mg/g) en pellet expandido de harina de maíz y soya.

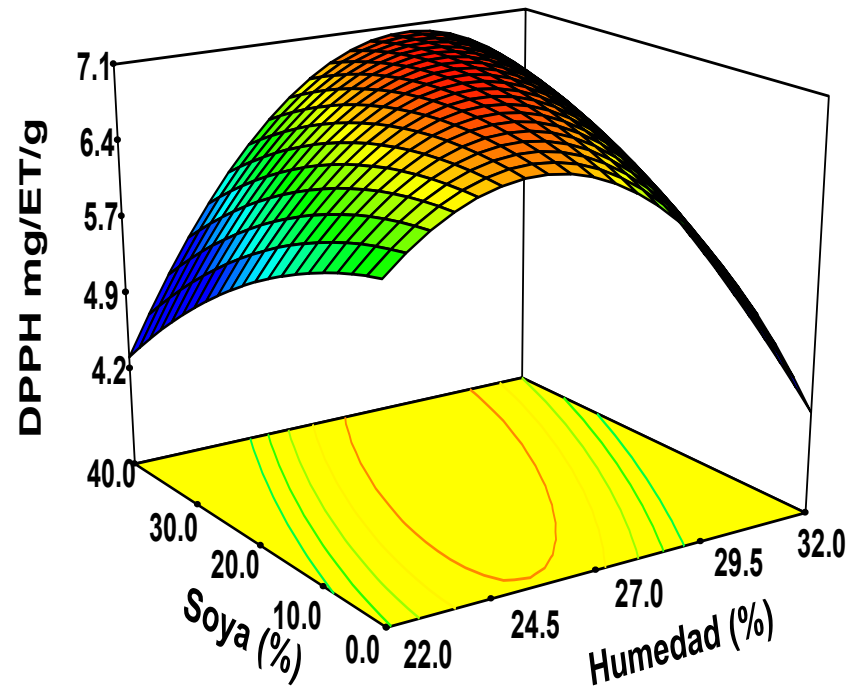
El proceso de extrusión puede causar rompimiento de algunos compuestos antioxidantes, ya que, la humedad afecta el producto final debido a que al incrementar el contenido de humedad este provoca que el cizallamiento sea más destructivo de estos compuestos. Otros de los factores que intervienen en el contenido de antioxidantes, es la velocidad de tornillo, debido a que si es alta la velocidad deteriora mayor área de contacto en la materia prima por el cizallamiento (Wani, 2019).

En la Figura 11 se muestra el efecto de la temperatura de extrusión y % de inclusión de soya a una temperatura de 115 °C sobre la actividad antioxidante por ABTS, el gráfico muestra que la menor actividad antioxidante se obtiene a 115 °C a todos los porcentajes de soya probados; la mayor actividad antioxidante se obtiene a bajas temperaturas (90 °C) y elevadas temperaturas (140 °C) sin importar el % de harina de soya adicionado. Recordando que los antioxidantes desempeñan un papel importante en la protección contra los daños causados por los oxidantes y los radicales libres, ciertos alimentos poseen actividad antioxidante proporcionando protección contra radicales libres (Nayak, 2011). Una posible causa del incremento de Antioxidantes podría deberse al desarrollo de pigmentos de pardeamiento de Maillard (Rufián-Henares, 2009).

Algunos autores mencionan que la actividad antioxidante varía de acuerdo con las condiciones de la extrusión, así como la humedad de la materia viva, principalmente la temperatura y la velocidad de rotación del tornillo que influye en la energía mecánica (Antón, 2009)



a)



b)

Figura 11. Gráfico de superficie de respuesta para la determinación de actividad antioxidante por DPPH (mg/ET/g) en productos expandidos por microondas elaborados a partir de harina de maíz y soya.

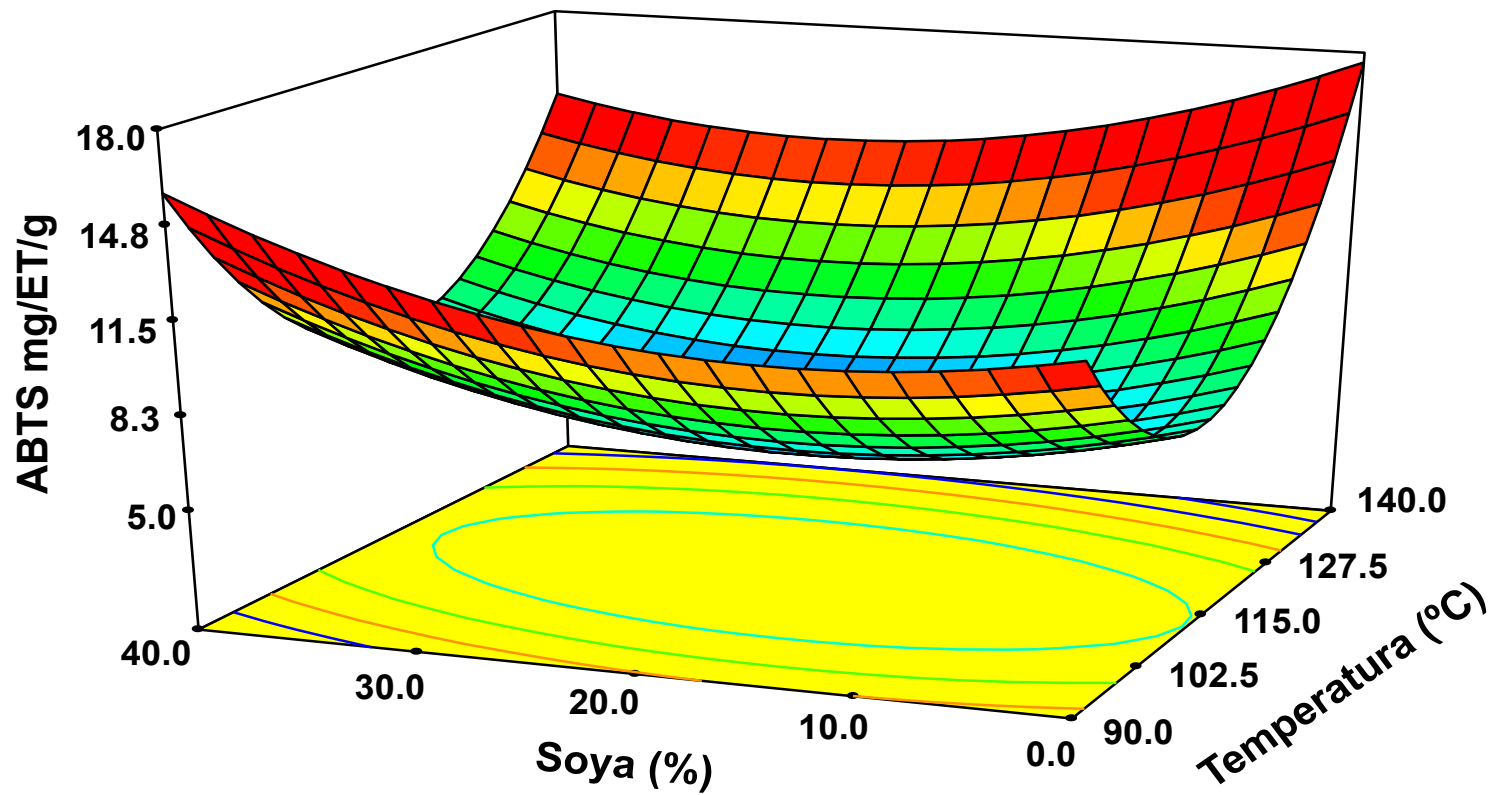


Figura 12 Gráfico de superficie de respuesta de determinación de actividad antioxidante por ABTS (mg/ET/g) en pellet expandido de harina de maíz y soya.

7.5 Optimización del proceso de extrusión

En la Figura 12 se muestra el área óptima para producir productos expandidos con un IE = 2.8, dureza = 14.3N, ISA = 5.6 y contenido de fenoles totales de 6.1 mg EAG/100g de muestra. La optimización se realizó mediante la sobreposición de superficie de respuesta, utilizando el método de máxima o mínima pendiente según fuera el caso.

En la Tabla 13 se muestra la comparación de los parámetros de la botana optimizada con el software y extruido. Las condiciones que se utilizaron fue 20% de contenido de soya, a una temperatura de 115 °C en el procesamiento en el extrusor y un porcentaje de humedad de 27%. Se observa que los valores obtenidos entre el modelo que se predijo a la realidad existen diferencias en el parámetro de fenoles se obtuvo un menor contenido, este resultado pudo haberse obtenido debido a que el tiempo que se utilizó para experimentar en las variables y el optimizado, las muestras fueron afectadas por condiciones como temperatura y cantidad de luz, otra posibilidad es en la preparación de los reactivos.

En lo que concierne en el parámetro ISA y Dureza, los resultados son parecidos a los que predijo el software.

Donde se obtuvo un resultado menor fue en dureza, se buscó una explicación, y esto se podría deber a que, en el momento de hacer la prueba de dureza, existe en los resultados desviaciones por cada muestra que se analizó, otro factor que pudo determinar es la temperatura y la humedad del ambiente donde se realizó la prueba. Además, de que los materiales generados son heterogéneos en cuanto a la distribución de celdas de aire dentro del producto.

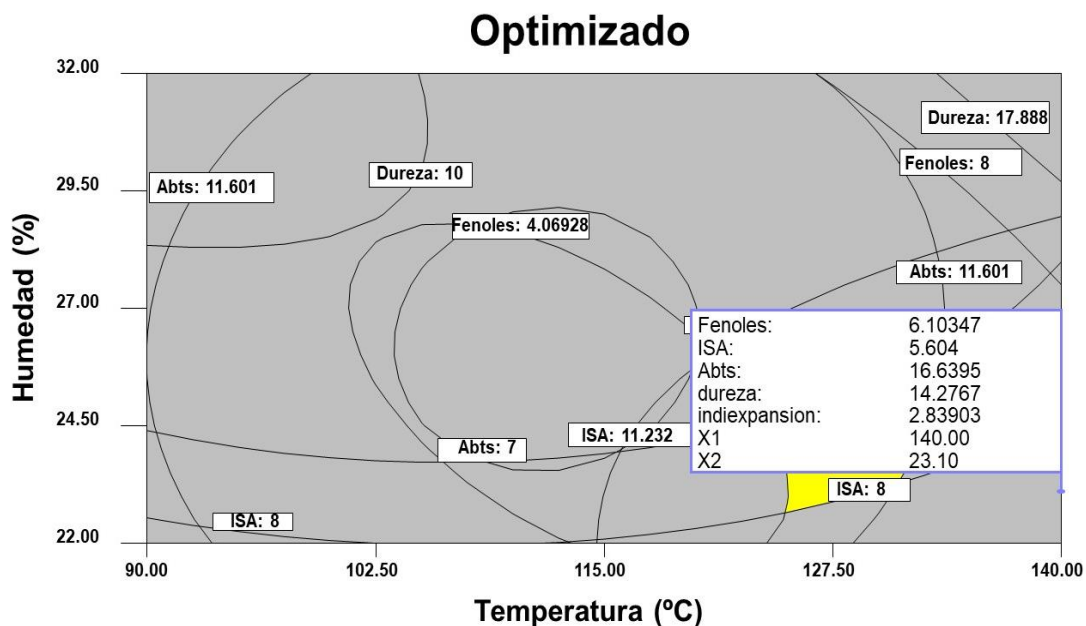


Figura 13. Gráfico de optimización del proceso de extrusión para la elaboración de botana de tercera generación a partir de maíz azul y soya.

Tabla 11 Parámetros de la botana con optimizado con software y pellet final.

Parámetro	Optimizado	Pellet Optimizado
Fenoles	6.10	5.84 ± 0.04
ISA (%)	5.60	5.52 ± 0.08
Dureza	14.28	14.84 ± 0.68
índice expansión	2.84	2.69 ± 0.74

Los resultados se expresan como promedio (n = 5) ± desviación estándar.

8 CONCLUSIONES

De acuerdo con las características fisicoquímicas que presentan las materias primas utilizadas en el presente estudio se consideran aptas para ser procesadas para la obtención de botanas extruidas de tercera generación con actividad antioxidante, debido a la presencia de compuestos fenólicos.

El proceso de extrusión incrementó el IAA e ISA en los productos extruidos debido principalmente a los esfuerzos de corte, altas temperaturas y elevada fricción mecánica. El uso de horno de microondas en la expansión de botanas de tercera generación disminuye el contenido calórico en botanas.

La metodología de superficie de respuesta es de utilidad en el desarrollo, caracterización y optimización de las condiciones de proceso para la obtención de alimentos tipo botana a partir de mezclas de harina de maíz azul integral y harina de soya integral. El uso de diseños de experimentos es de utilidad para no hacer gastos en materias primas y reactivos en las investigaciones que busquen una mezcla con mejores propiedades.

Las condiciones para tener una botana con características que contengan mayor cantidad de fenoles, índice de solubilidad de agua, dureza e índice de expansión fueron; concentración de soya de 20%, temperatura de extrusión de 115 °C y porcentaje de humedad en la mezcla de 27%.

9 Bibliografía

- Agama-Acevedo, E., Salinas-Moreno, Y., Pacheco-Vargas, G., & Bello-Pérez, L. A. J. R. m. d. c. a. (2011). Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: morfología del almidón. *2*(3), 317-329.
- Aguilar-Palazuelos, E., Martínez-Bustos, F., Limón-Valenzuela, V., & Zazueta-Morales, J. d. J. J. R. M. d. I. Q. (2017). Propiedades microestructurales y de formación de pasta de pellets extrudidos elaborados a partir de almidón de maíz enriquecidos con MCP y concentrado proteínico de leche. *16*(1), 193-205.
- Agume, A. S. N., Njintang, N. Y., & Mbofung, C. M. F. J. F. (2017). Effect of soaking and roasting on the physicochemical and pasting properties of soybean flour. *6*(2), 12.
- Alfonso, E. (2006). *Curso de Medicina Natural en 40 lecciones*: Editorial Kier.
- Altan, A., McCarthy, K. L., & Maskan, M. J. J. o. F. E. (2008). Evaluation of snack foods from barley–tomato pomace blends by extrusion processing. *84*(2), 231-242.
- Amador-Rodríguez, K. Y., Pérez-Cabrera, L. E., Guevara-Lara, F., Chávez-Vela, N. A., Posadas-Del Río, F. A., Silos-Espino, H., & Martínez-Bustos, F. J. F. c. (2019). Physicochemical, thermal, and rheological properties of nixtamalized blue-corn flours and masas added with huitlacoche (*Ustilago maydis*) paste. *278*, 601-608.
- Amaya-Llano, S., Hernández, N. M., Tostado, E. C., & Martínez-Bustos, F. J. C. C. (2007). Functional characteristics of extruded blends of whey protein concentrate and corn starch. *84*(2), 195-201.
- Anand, S., Matson, K., & Sharma, S. J. J. o. N. (1995). Effect of soil temperature and pH on resistance of soybean to *Heterodera glycines*. *27*(4), 478.

- Anton, A. A., Fulcher, R. G., & Arntfield, S. D. J. F. c. (2009). Physical and nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. *113*(4), 989-996.
- Araba, M., & Dale, N. J. P. S. (1990). Evaluation of protein solubility as an indicator of overprocessing soybean meal. *69*(1), 76-83.
- Arellano-Vázquez, J. L., Tut-Couoh, C., María-Ramírez, A., Salinas-Moreno, Y., & Taboada-Gaytán, O. R. J. R. F. M. (2003). Maíz azul de los Valles Altos de México. I. Rendimiento de grano y caracteres agronómicos. *26*(2), 101-101.
- Arribas, C., Pereira, E., Barros, L., Alves, M. J., Calhelha, R. C., Guillamón, E., . . . Ferreira, I. C. J. F. c. (2019). Healthy novel gluten-free formulations based on beans, carob fruit and rice: Extrusion effect on organic acids, tocopherols, phenolic compounds and bioactivity. *292*, 304-313.
- Arroyo, P., & Herrera, P. J. N. C. (2003). Programa de fortalecimiento de la enseñanza de la nutrición en escuelas y facultades de medicina de México 1991-2002. *6*(2), 133-136.
- Ayo-Omogie, H. N., Adeyemi, I. A., Otunola, E. T. J. I. j. o. f. s., & technology. (2010). Effect of ripening on some physicochemical properties of cooking banana (*Musa* ABB Cardaba) pulp and flour. *45*(12), 2605-2611.
- Badui Dergal, S. (2016). *Química de los alimentos*: México, Pearson Educación.
- Bartolo Perez, P., Peña, J., Cruz Orea, A., & Calderón, A. (2013). Estudio de la composición química de pericarpio de maíz con las técnicas XPS y EDAX.
- Benson, H. Y., Shanno, D. F., & Vanderbei, R. J. J. M. p. (2004). Interior-point methods for nonconvex nonlinear programming: jamming and numerical testing. *99*(1), 35-48.

- Bhat, N. A., Wani, I. A., Hamdani, A. M., & Gani, A. J. F. c. (2019). Effect of extrusion on the physicochemical and antioxidant properties of value added snacks from whole wheat (*Triticum aestivum* L.) flour. *276*, 22-32.
- Boyer, C., & Shannon, J. J. J. o. C. S. (2001). Carbohydrates of the kernel, corn: chemistry and technology. *1*, 253-272.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.-E., Berset, C. J. L.-F. s., & Technology. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *28*(1), 25-30.
- Camire, M. E., Camire, A., Krumhar, K. J. C. R. i. F. S., & Nutrition. (1990). Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *29*(1), 35-57.
- Casini, H., Huerta, M., & Myers, R. C. J. J. o. H. E. P. (2011). Towards a derivation of holographic entanglement entropy. *2011*(5), 1-41.
- Chiang, M., Zhang, S., & Hande, P. (2005). *Distributed rate allocation for inelastic flows: optimization frameworks, optimality conditions, and optimal algorithms*. Paper presented at the Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.
- Ching, S., Ingram, D., Hahnel, R., & Rossi, E. J. D. d. n. (2002). Los niveles séricos de micronutrientes, antioxidantes y el estado antioxidante total predecir el riesgo de cáncer de mama en un estudio de casos y controles. 303-306.
- Chirinos, R., Campos, D., Betalleluz, I., Giusti, M., Schwartz, S., Quingguo, T. J. J. o. A., & Chemistry, F. (2006). Cromatografía líquida de alta resolución con detección de matrices de fotodiodos (HPLC-DAD)/HPLC-Espectrometría de Masas (MS) de antocianinas de tubérculos andinos Mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavón) y su contribución a la actividad antioxidante Global. *54*, 7089-7097.
- Contreras-Jiménez, B., Morales-Sanchez, E., Reyes-Vega, M., & Gaytán-Martínez, M. J. C.-J. o. F. (2014). Propiedades funcionales de harinas de maíz nixtamalizado obtenidas por extrusión a baja temperatura. *12*(3), 263-270.

- Cubeddu, R. J., Don, C. W., Horvath, S. A., Gupta, P. P., Cruz-Gonzalez, I., Witzke, C., . . . Interventions, C. (2014). Left ventricular end-diastolic pressure as an independent predictor of outcome during balloon aortic valvuloplasty. *83(5)*, 782-788.
- Dávila, J. (2003). *Tecnología de alimentos de soya*: Gráficas Guimar.
- Delcour, J. A., & Poutanen, K. (2013). *Fibre-rich and wholegrain foods: improving quality*. Elsevier.
- Dergal, S. B., Rodriguez, H. B., & Morales, A. A. (2006). *Química de los alimentos*: Pearson educación.
- Durak, İ., Aytaç, B., Atmaca, Y., Devrim, E., Avcı, A., Erol, Ç., & Oral, D. J. L. s. (2004). Effects of garlic extract consumption on plasma and erythrocyte antioxidant parameters in atherosclerotic patients. *75(16)*, 1959-1966.
- Eckhoff, D. E., Smyth, C. A., Eckstein, C., Bilbao, G., Young, C. J., Thompson, J. A., & Contreras, J. L. J. S. (2003). Suppression of the c-Jun N-terminal kinase pathway by 17 β -estradiol can preserve human islet functional mass from proinflammatory cytokine-induced destruction. *134(2)*, 169-179.
- Escalante-Aburto, A., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P., Figueroa-Cárdenas, J., López-Cervantes, J., Barrón-Hoyos, J., & Morales-Rosas, I. J. C.-J. o. F. (2013). Effect of extrusion processing parameters on anthocyanin content and physicochemical properties of nixtamalized blue corn expanded extrudates. *11(sup1)*, 29-37.
- Espinoza, K., Acero, D. J. R., & Martínez, N. (2021). *Elaboración de Snack extruido a partir de Cereales y Concentrado de proteína de pota (*Dosidicus gigas*) y determinación de su vida útil*. Paper presented at the Anales Científicos.
- Figueroa Cárdenas, J. d. D., Narváez González, D. E., Mauricio Sánchez, A., Taba, S., Gaytán Martínez, M., Véles Medina, J. J., . . . Aragón Cuevas, F. J. R. f.

- m. (2013). Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos (criollos) de México. *36*, 305-314.
- Hellin, J., Keleman, A., López, D., Donnet, L., & Flores, D. J. R. f. m. (2013). La importancia de los nichos de mercado: Un estudio de caso del maíz azul y del maíz para pozole en México. *36*, 315-328.
- Hernández-Nava, R., Bello-Pérez, L., Martín-Martínez, S., Hernández-Sánchez, H., & Mora-Escobedo, R. J. R. m. d. i. q. (2011). Effect of extrusion cooking on the functional properties and starch components of lentil/banana blends: Response surface analysis. *10*(3), 409-419.
- Hernández, G. N., Contreras, R. F., Castañeda, F. G., & Ramos, A. P. J. T. P. e. M. (2005). Madurez de híbridos de maíz a la cosecha para mejorar la producción y calidad del forraje. *43*(1), 69-78.
- Iznaga, A. C., Pérez, R. A., Valdés, A. B., Sánchez, A. C., Valdés, G. R., & Romero, S. C. J. C. A. (2009). Influencia de la época de siembra sobre el crecimiento y desarrollo de tres cultivares de soya [*Glycine max* (L.) Merr.]. *36*(1), 33-39.
- Jahren, A. H., & Kraft, R. A. J. P. o. t. N. A. o. S. (2008). Carbon and nitrogen stable isotopes in fast food: signatures of corn and confinement. *105*(46), 17855-17860.
- Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. J. F. H. (2012). Effect of re-crystallization on tensile, optical and water vapour barrier properties of corn starch films containing fatty acids. *26*(1), 302-310.
- Jin, Z., Hsieh, F., & Huff, H. J. J. o. C. S. (1995). Effects of soy fiber, salt, sugar and screw speed on physical properties and microstructure of corn meal extrudate. *22*(2), 185-194.
- Joseph, M. A., Moysich, K. B., Freudenheim, J. L., Shields, P. G., Bowman, E. D., Zhang, Y., . . . cancer. (2004). Cruciferous vegetables, genetic

polymorphisms in glutathione S-transferases M1 and T1, and prostate cancer risk. *50*(2), 206-213.

Kharat, S., Medina-Meza, I. G., Kowalski, R. J., Hosamani, A., Ramachandra, C., Hiregoudar, S., . . . processing, b. (2019). Extrusion processing characteristics of whole grain flours of select major millets (foxtail, finger, and pearl). *114*, 60-71.

Korkerd, S., Wanlapa, S., Puttanlek, C., Uttapap, D., Rungsardthong, V. J. J. o. f. s., & technology. (2016). Expansion and functional properties of extruded snacks enriched with nutrition sources from food processing by-products. *53*, 561-570.

Kowalski, R. J., Li, C., & Ganjyal, G. M. J. J. o. F. E. (2018). Optimizing twin-screw food extrusion processing through regression modeling and genetic algorithms. *234*, 50-56.

Lila, M. A. J. J. o. B., & Biotechnology. (2004). Anthocyanins and human health: an in vitro investigative approach. *2004*(5), 306.

López, L. B., & Suárez, M. M. (2010). Fundamentos de nutrición normal. In *Fundamentos de nutrición normal* (pp. 429-429).

Martínez Muñoz, A. G. (2013). Elaboración de una botana a base de malanga (*Colocasia esculenta*) utilizando microondas para su procesamiento.

Mauricio Avalos, A. F. (2021). Alimentación de cuyes a base de harina de papa (*Solanum tuberosum*) de descarte como sustituto del maíz amarillo (*Zea mays*) más alfalfa (*Medicago sativa*) en la localidad de Chavinillo.

Méndez-Montevalvo, G., García-Suárez, F. J., Paredes-López, O., & Bello-Pérez, L. A. J. J. o. C. S. (2008). Effect of nixtamalization on morphological and rheological characteristics of maize starch. *48*(2), 420-425.

- Méndez-Montevalvo, G., Solorza-Feria, J., del Valle, M. V., Gómez-Montiel, N., Paredes-López, O., & Bello-Pérez, L. A. J. A. (2005). Composición química y caracterización calorimétrica de híbridos y variedades de maíz cultivadas en México. *39*(3), 267-274.
- Mendoza Espinoza, A. A., & Rojas Loor, J. R. (2017). *Evaluación de tiempo y temperatura de fritura en la calidad nutricional y sensorial de un snack (hojuelas) con soja (Glycine max)*. Calceta: ESPAM,
- Menis-Henrique, M. E. C., Janzantti, N. S., & Conti-Silva, A. C. J. J. o. S. S. (2017). Identification of sensory and non-sensory factors involved in food consumption: A study with extruded corn-based snacks. *32*(6), e12299.
- Mexicana, N. O. J. P. y. S. C. y. s. p. C., Harinas de Ce. NOM-247-SSA1-2008.
- Natabirwa, H., Nakimbugwe, D., Lung'aho, M., & Muyonga, J. H. J. L. (2018). Optimization of Roba1 extrusion conditions and bean extrudate properties using response surface methodology and multi-response desirability function. *96*, 411-418.
- Nath, A., Chattopadhyay, P. J. L.-F. S., & Technology. (2008). Effect of process parameters and soy flour concentration on quality attributes and microstructural changes in ready-to-eat potato–soy snack using high-temperature short time air puffing. *41*(4), 707-715.
- Navarro-Cortez, R., Hernández-Santos, B., Gómez-Aldapa, C., Castro-Rosas, J., Herman-Lara, E., Martínez-Sánchez, C., . . . Rodríguez-Miranda, J. J. R. M. d. I. Q. (2016). Development of extruded ready-to-eat snacks using pumpkin seed (*Cucurbita pepo*) and nixtamalized maize (*Zea mays*) flour blends. *15*(2), 409-422.
- Nawaz, A., Xiong, Z., Xiong, H., Chen, L., Wang, P. k., Ahmad, I., . . . Technology. (2019). The effects of fish meat and fish bone addition on nutritional value, texture and microstructure of optimised fried snacks. *54*(4), 1045-1053.

- Nayak, B., Berrios, J. D. J., Powers, J. R., & Tang, J. J. J. o. f. s. (2011). Effect of extrusion on the antioxidant capacity and color attributes of expanded extrudates prepared from purple potato and yellow pea flour mixes. *76(6)*, C874-C883.
- Neder-Suárez, D., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C. O., de Jesús Zazueta-Morales, J., Paraguay-Delgado, F., & Ruiz-Gutiérrez, M. G. J. L. (2021). Evaluation of the physicochemical properties of third-generation snacks made from blue corn, black beans, and sweet chard produced by extrusion. *146*, 111414.
- Normas, S. d. E.-D. G. d. (2002). NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-Cereales-Parte I: Maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado-Especificaciones y métodos de prueba. In: Secretaría de Economía, Dirección General de Normas México^ eD. FDF.
- Oladapo, B. I., Adeoye, A. O., & Ismail, M. J. C. P. B. E. (2018). Analytical optimization of a nanoparticle of microstructural fused deposition of resins for additive manufacturing. *150*, 248-254.
- Ortega Amaya, R., Matsumoto, Y., Díaz-Torres, E., Gutiérrez Lazos, C., Perez Guzman, M. A., Ortega-López, M. J. G. M.-S., Properties, & Modifications. (2017). Green Routes for Graphene Oxide Reduction and Self-Assembled Graphene Oxide Micro-and Nanostructures Production. 129-151.
- Ozer, H. T., Sarpel, T., Gulek, B., Alparslan, Z. N., & Erken, E. J. C. r. (2005). The Turkish version of the bath ankylosing spondylitis functional index: Reliability and validity. *24(2)*, 123-128.
- Paliwal, R. L. (2001). *El maz en los trpicos: Mejoramiento y produccin*: Food & Agriculture Org.

- Pastor-Cavada, E., Drago, S. R., González, R. J., Juan, R., Pastor, J. E., Alaiz, M., & Vioque, J. J. F. C. (2011). Effects of the addition of wild legumes (*Lathyrus annuus* and *Lathyrus clymenum*) on the physical and nutritional properties of extruded products based on whole corn and brown rice. *128*(4), 961-967.
- Pastrana-Bonilla, E., Akoh, C. C., Sellappan, S., Krewer, G. J. J. o. a., & chemistry, f. (2003). Phenolic content and antioxidant capacity of muscadine grapes. *51*(18), 5497-5503.
- Poliszko, N., Kowalczewski, P. Ł., Rybicka, I., Kubiak, P., Poliszko, S. J. J. o. C. P., & Safety, F. (2019). The effect of pumpkin flour on quality and acoustic properties of extruded corn snacks. *14*(2), 121-129.
- Pszczola, D. E. J. F. T. (2002). *Products Technologies*. *56*(2), 56.
- Puma Campues, G. Y. (2019). *Evaluación del efecto de la mezcla gritz de maíz zea mays gritz de mashua tropaeolum tuberosum y el diámetro de la boquilla del extrusor en el proceso de extrusión*.
- Ramos-Paja, C. A., Spagnuolo, G., Petrone, G., Giral, R., & Romero, A. (2010). *Fuel cell MPPT for fuel consumption optimization*. Paper presented at the Proceedings of 2010 IEEE international symposium on circuits and systems.
- Reis, K. C. d., Bertolino, M. K., & Canevarolo, S. V. (2009). Color formation monitoring of extruded melt mixed PP/MMT nanocomposite.
- Reyes, C. (1990). *El maíz y su cultivo*.
- Riaz, M. N. J. H. o. f. s., technology,, & engineering. (2006). *Extruded snacks*. *4*, 168.
- RICE, P. F. B. S., & PAYKARY, M. (2014). *DEVELOPMENT OF EXTRUDED GLUTEN FREE HARD*.

- Ridner, E. (2006). Soja, propiedades nutricionales y su impacto en la salud. In: Sociedad Argentina de Nutrición.
- Robin, F., Théoduloz, C., Srichuwong, S. J. I. J. o. f. s., & technology. (2015). Properties of extruded whole grain cereals and pseudocereals flours. *50*(10), 2152-2159.
- Rocha, T. S., Felizardo, S. G., Jane, J.-I., & Franco, C. M. J. F. H. (2012). Effect of annealing on the semicrystalline structure of normal and waxy corn starches. *29*(1), 93-99.
- Rodríguez Ostorga, C. E., & Ventura Cáceres, J. T. (2017). Elaboración de un snack a base de harina de maíz (*Zea mays*) y yuca (*Manihot esculenta*), fortificada con Teberinto (*Moringa oleifera*) para reducir la subalimentación. Su análisis bromatológico y análisis sensorial.
- Rolandelli, G., García-Pinilla, S., Cueto, M. A., Farroni, A. E., Gutiérrez-López, G. F., & Buera, M. d. P. (2022). *Extrusión para el desarrollo de alimentos innovadores: caso de productos a base de maíz* (9876793292). Retrieved from
- Ruiz-Armenta, X. A., Zazueta-Morales, J. d. J., Aguilar-Palazuelos, E., Delgado-Nieblas, C. I., López-Díaz, A., Camacho-Hernández, I. L., . . . Martínez-Bustos, F. J. C.-J. o. F. (2018). Effect of extrusion on the carotenoid content, physical and sensory properties of snacks added with bagasse of naranjita fruit: optimization process. *16*(1), 172-180.
- Ruttarattanamongkol, K., Chittrakorn, S., Weerawatanakorn, M., Dangpium, N. J. J. o. F. S., & Technology. (2016). Effect of drying conditions on properties, pigments and antioxidant activity retentions of pretreated orange and purple-fleshed sweet potato flours. *53*(4), 1811-1822.

- Salinas-Moreno, Y., & Aguilar-Modesto, L. J. I. A. y. B. (2010). Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays* L.) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. *2*(1), 5-11.
- Salinas Moreno, Y., García Salinas, C., Coutiño Estrada, B., & Vidal Martínez, V. A. J. R. f. m. (2013). Variabilidad en contenido y tipos de antocianinas en granos de color azul/morado de poblaciones mexicanas de maíz. *36*, 285-294.
- Sánchez, D. G. R., Mascorro, A. G., & Amaya, J. S. C. J. R. F. M. (2000). Respuesta del maíz para ensilaje a métodos de siembra y densidades de población. *23*(1), 37-47.
- Seker, M. J. J. o. t. S. o. F., & Agriculture. (2005). Selected properties of native or modified maize starch/soy protein mixtures extruded at varying screw speed. *85*(7), 1161-1165.
- Sevatson, E., & Huber, G. R. (2000). Extruders in the food industry. In *Extruders in food applications* (pp. 167-204): CRC Press.
- Sharma, P., Goudar, G., Longvah, T., Gour, V. S., Kothari, S., & Wani, I. A. J. F. R. I. (2022). Fate of Polyphenols and Antioxidant Activity of Barley during Processing. *38*(2), 163-198.
- Silva, N. L., Saldanha, A. A., Silva, D. B., Carollo, C. A., Sartori, A. L. B., Soares, A. C., & Siqueira, J. M. d. J. B. j. (2019). Anti-inflammatory, antinociceptive and antioxidant activities of the hydromethanolic fraction from *Annona nutans* leaves. 1599-1613.
- Stattin, P., Lukanova, A., Biessy, C., Söderberg, S., Palmqvist, R., Kaaks, R., . . . Jellum, E. J. I. j. o. c. (2004). Obesity and colon cancer: does leptin provide a link? , *109*(1), 149-152.
- Suárez Cerquera, N. (2010). Estudio de la sustitución parcial del Fenol por Lignina en la obtención de las resinas fenol-formaldehído utilizadas para la

fabricación de tableros aglomerados OSB a partir de especies forestales colombianas.

- Taddei Bringas, C. J. E. s. (2006). Estrategias de mercado en firmas líderes de la industria alimentaria. *14*(28), 67-106.
- Vergara, N., Pandey, S., Kumar, S., McLean, S. D., & Rodríguez, S. J. A. M. (1998). Comportamiento de híbridos de maíz y aptitud combinatoria de líneas con caracteres contrastantes. 97-104.
- Watson, S. J. E. U. (1987). Composición química de las partes del grano de maíz.
- White, B. L., Howard, L. R., Prior, R. L. J. J. o. A., & Chemistry, F. (2010). Polyphenolic composition and antioxidant capacity of extruded cranberry pomace. *58*(7), 4037-4042.
- Wolf, F. T. J. P. o. t. N. A. o. S. (1952). The production of indole acetic acid by *Ustilago zaeae*, and its possible significance in tumor formation. *38*(2), 106-111.
- Xu, E., Campanella, O. H., Ye, X., Jin, Z., Liu, D., BeMiller, J. N. J. T. i. F. S., & Technology. (2020). Advances in conversion of natural biopolymers: a reactive extrusion (REX)–enzyme-combined strategy for starch/protein-based food processing. *99*, 167-180.
- Yadav, A. K., Srivastava, P., Kumar, N., Abbassi, R., & Mishra, B. K. J. C. w. f. i. w. t. (2018). Constructed wetland-microbial fuel cell: an emerging integrated technology for potential industrial wastewater treatment and Bio-electricity generation. 493-510.
- Yu, L., Li, J., Ding, S., Hang, F., & Fan, L. J. F. H. (2016). Effect of guar gum with glycerol coating on the properties and oil absorption of fried potato chips. *54*, 211-219.

Zhao, D., Wang, Z., Zuo, M., Geng, H. J. M., & Design. (2014). Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of extruded AZ80 magnesium alloy. *56*, 589-593.