



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

**Optimización del proceso de extrusión de una botana de tercera
generación a base de leguminosas**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:

Edith Guadalupe Lopez Gastelum

Dirigido por:

Dra. Marcela Gaytán Martínez

Querétaro, Qro. a 18 de diciembre de 2020



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Optimización del proceso de extrusión de una botana de tercera generación a base de leguminosas

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:

Edith Guadalupe Lopez Gastelum

Dirigido por:

Dra. Marcela Gaytán Martínez

Dra. Marcela Gaytán Martínez
Presidente

Dr. Eric Leonardo Huerta Manzanilla
Secretario

Mtro. Javier García Pérez
Vocal

Dr. Eduardo Morales Sánchez
Suplente

Dra. Magdalena Mendoza Sánchez
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Diciembre 2020
México

A mi familia, por siempre apoyarme incondicionalmente en todas mis decisiones, por ser mi fortaleza e inspiración para mejorar, pero sobre todo por impulsarme diariamente a ser mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, porque debido a ellos estoy donde estoy y soy quien soy, por amarme y confiar en mí incondicionalmente, por ser mi fuente de inspiración, les doy gracias por haberme apoyado durante toda mi vida, por siempre darme ánimos de seguir adelante y lograr todos mis propósitos. A mi pareja, por siempre estar ahí en los momentos más difíciles, por amarme y animarme siempre a lograr mis sueños.

A mis amigos, gracias por motivarme diariamente a mejorar, por alegrar mis días tristes, por soportar mis ocurrencias, por todos esos viajes, pero sobre todo por hacer esta etapa única.

También me gustaría agradecer a la Universidad Autónoma de Querétaro, porque me abrieron las puertas para estudiar un posgrado y apoyaron económicamente mis estudios. Además, cuenta con excelentes profesores, los cuales me ayudaron a crecer no solo profesional si no personalmente. También agradezco el apoyo del programa de seguimiento del fondo de proyectos especiales de rectoría FOPER-2019-0119, ya que de no ser por su amable ayuda esto no hubiera sido posible.

En especial quiero agradecer al Dr. Eric Leonardo Huerta Manzanilla por el apoyo brindado a lo largo de la maestría, por sus historias, su tiempo, amistad, por todos los conocimientos transmitidos y por la confianza depositada en mí. A la Dra. Marcela Gaytán Martínez por su orientación a lo largo de la maestría, por el seguimiento y la supervisión continua, por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de este proyecto.

Al Centro de Investigación en Ciencias Aplicadas y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional (CICATA) por confiar en nuestro proyecto y brindarnos el equipo necesario para llevarlo a cabo. Gracias al Dr. Eduardo Morales por su orientación y ayuda a lo largo de todo el proyecto.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para estudiar esta maestría, pues sin su ayuda no lo habría logrado.

TABLA DE CONTENIDOS

I. INTRODUCCIÓN	3
II. ANTECEDENTES	5
2.1 BOTANAS.....	5
2.2 PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	11
2.3 CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD PARA UNA BOTANA: EXPANSIÓN Y PROPIEDADES NUTRIMENTALES.....	8
2.4 ÍNDICE DE EXPANSIÓN.....	10
2.5 OPTIMIZACIÓN APLICADA AL DESARROLLO DE BOTANAS.....	13
2.6 TRABAJOS DE OPTIMIZACIÓN EN BOTANAS FORTALECIDAS NUTRICIONALMENTE.	14
2.7 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.	17
2.8 ANÁLISIS R Y R	19
III. HIPÓTESIS	20
IV. OBJETIVOS	20
4.1 OBJETIVO GENERAL	20
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
V. MATERIALES Y MÉTODOS	21
5.1 MATERIALES.....	21
5.2 PROCEDIMIENTO	21
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
6.1 ESTUDIO R Y R	27
6.2 ESTANDARIZAR CONDICIONES DE PROCESAMIENTO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN.	30
6.3 EXPERIMENTACIÓN DE LAS VARIABLES HUMEDAD, TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN.	32
6.4 OPTIMIZACIÓN DEL MODELO.....	36
6.5 DOCUMENTAR EL PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LA BOTANA.	38
VII. CONCLUSIONES	39
REFERENCIAS	39
ANEXOS	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pronóstico de crecimiento de la industria alimenticia en América Latina y el mundo por categoría.	6
Tabla 2. Proyección del mercado de subsectores de la industria de alimentos procesado en México.	7
Tabla 3. Botanas fortificadas para mejorar su impacto en la salud.	9
Tabla 4. Resumen de trabajos sobre botanas expandidas	16
Tabla 5. Tabla experimental para estandarizar la formulación de la masa.	24
Tabla 6. Tabla experimental para definir variables significativas.	25
Tabla 7. Análisis de la varianza del estudio R y R del método de desplazamiento de semilla con mijo rojo.	27
Tabla 8. Componentes de la varianza del estudio R y R del método de medición.	28
Tabla 9. Análisis de la varianza de la estandarización de las condiciones de procesamiento.	31
Tabla 10. Resultados de la experimentación de las variables de humedad, temperatura y velocidad.	34
Tabla 11. Análisis de varianza del diseño de experimentos.	32
Tabla 12. Análisis de varianza reducido del diseño de experimentos	33
Tabla 13. Resultados reales contra modelados.	37
Tabla 14. Extrapolación de modelo.	37
Tabla 15. Resultados de la experimentación de la extrapolación del modelo	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ventajas y desventajas de las botanas.....	8
Figura 2. Proceso de extrusión.	13
Figura 3. Clasificación de los diseños experimentales.....	18
Figura 4. Procedimiento de metodología propuesta.....	22
Figura 5. Método de medición del índice de expansión.....	23
Figura 6. Componentes de variación del análisis R y R del método de medición de expansión.	29
Figura 7. Interacción entre operador y muestra.....	29
Figura 8. Promedio por operador en el análisis R y R del sistema de medición.....	30
Figura 9. Gráfica de efectos principales de los ciclos, el aditivo de maíz y aditivo contra el índice de expansión.....	31
Figura 10. Gráfica de efectos principales de las variables de velocidad, temperatura y humedad contra el índice de expansión.....	35
Figura 11. Gráficas de interacción de las variables de humedad, temperatura y velocidad.	35

RESUMEN

Las botanas en México son un producto muy consumido por cualquier clase social y por todas las edades. Éstas son consideradas como comida chatarra, debido a su alto aporte de grasas y carbohidratos, por lo que se buscan alternativas para lograr producir botanas más nutritivas. Una alternativa es la elaboración de botanas por el proceso de extrusión y expandidas con aire caliente. En la UAQ-IPN desde el 2016, desarrollaron un proyecto para incorporar leguminosas en la formulación, para obtener una botana con alto contenido de proteínas y bajas en grasa. Sin embargo, al expandir con aire caliente se obtuvo una expansión de 1.21 ± 0.20 . Por lo anterior, es indispensable implementar un plan de optimización enfocado en este proceso, en el cual se controlen las variables de humedad, temperatura y velocidad del tornillo, para obtener botanas de tercera generación, enriquecidas con leguminosas, con un alto índice de expansión. Esto se puede hacer mediante el uso de diseño de experimentos. El objetivo del presente trabajo fue optimizar el proceso de extrusión. Para cumplir fue necesario realizar distintos pasos, primeramente, determinar las condiciones de extrusión, para posteriormente definir las condiciones del experimento, realizar un diseño de experimentos, y con ello resaltar las variables significativas y su nivel a trabajar para lograr la optimización del proceso. Las variables evaluadas, fueron la humedad, la velocidad y la temperatura, las cuales fueron significativas, lo que nos permitió tener un modelo con un alto ajuste, con el cual se pudo predecir las condiciones de procesamiento para tener un alto índice de expansión, por lo que como resultados se obtuvieron botanas de tercera generación enriquecida con leguminosas con un alto índice de expansión al expandirlas por aire caliente. Las condiciones de procesamiento para tener un índice de expansión alto (4 o más) se encontraron en 120 °C, 80% de humedad y 10 rpm. Por lo que se puede concluir que es posible lograr un alto índice de expansión al adicionar leguminosas a una botana (más fibra que la que comúnmente se utiliza) y expandirlas por aire caliente.

Palabras clave: Diseño de experimentos, optimización, extrusión, botanas de tercera generación.

ABSTRACT

Snacks in Mexico are a product very consumed by any social class and by all ages. These are considered junk food due to their high intake of fats and carbohydrates, so alternatives are sought to produce more nutritious snacks. An option is the development of snacks by the extrusion process and expanded with hot air. At UAQ-IPN since 2016, they developed a project to incorporate legumes into the formulation, to obtain a snack high in protein and low in fat. However, expanding with hot air resulted in an expansion of 1.21 ± 0.20 . Therefore, it is essential to implement an optimization plan focused on this process. The variables of humidity, temperature, and screw speed are controlled to obtain third-generation snacks enriched with legumes, with a high expansion rate. These can be done by using an experimental design. The objective of this work was to optimize the extrusion process. It was necessary to perform different steps to determine the extrusion conditions, subsequently, define the experiment's conditions, perform an experiment design, and highlight the significant variables and their level to work to optimize the process. The variables evaluated were moisture, speed, and temperature. They were significant, which allowed us to have a high fit model, with which processing conditions could be predicted to have a high rate of expansion n, so as results third-generation snacks enriched with legumes with a high quality of expansion were obtained when expanded by hot air. Processing conditions for a high expansion rate (4 or more) were found at 120oC, 80% humidity, and 10 rpm. So, it can be concluded that it is possible to achieve a high rate of expansion by adding legumes to a snack (more fiber than is commonly used) and expanding them by hot air.

Keywords: Design experiments, optimization, extrusion, third-generation snacks

I. Introducción

Las botanas son productos altamente vendidos debido a su accesibilidad, precio, buen sabor y una amplia variedad. Sin embargo, no son consideradas como alimento básico, debido a su bajo aporte nutricional, lo que les ha originado una imagen de “comida chatarra”, es decir, con un balance nutrimental inadecuado (Aguilera, Rodríguez, Sansores, y Gutiérrez, 2017); esto ha incrementado las investigaciones en el área, y con ello la búsqueda de alternativas más saludables.

Éstas se distinguen por ser un alimento que puede ser consumido a cualquier hora del día. Por sus características, como: cantidad, sabor y precio, generalmente se consumen entre comidas, para saciar un poco el hambre. De acuerdo con el Reglamento de Control Sanitario de Productos y Servicios, se definen como botanas, aquellos productos que, en su elaboración, incluyen materia prima inocua (harina, granos, cereales, semillas, tubérculos y frutas); pueden estar fritos, horneados o deshidratados; y adicionados con sal u otros ingredientes que mejoren el sabor. Entre las botanas de más consumo, se encuentran las papas totopos, chicharrones de harina de trigo, chicharrón de cerdo, cacahuates, habas, entre otros (Ley General de Salud, 1983).

Desde la invención de las papas fritas, en 1853, la forma de elaboración de botanas ha cambiado drásticamente entre generaciones; por lo que, la literatura divide el tipo de botana por el proceso productivo, mediante las cuales se fabrican (Tu interfaz, 2013). Las mismas se pueden clasificar en tres grandes grupos. Las botanas de primera generación son productos convencionales, elaborados a partir del grano entero, usando combinaciones de humedad y temperatura. En las botanas de segunda generación, se tiene un proceso productivo y la cocción de la botana, es inmediatamente después de este. Las botanas semiterminadas y productos intermediarios son conocidos como botanas de tercera generación. Al igual que la botana de segunda generación, tienen un proceso productivo, pero después de este, el producto se deshidrata y se obtiene el producto intermedio, el cual después tiene un calentamiento rápido. Estas botanas presentan una ventaja hacia las otras, pues tienen una alta vida en anaquel al estar en pellets. Para ser expandidas se usan métodos como el

freído en aceite o aplicación de microondas, los cuales permiten que la botana cuente con una forma, un sabor o propiedades únicas específicas (Fan *et al.*, 2013; Riaz y Rokey, 2012). La expansión de las botanas es una característica de calidad muy importante para la aceptación por parte de los consumidores, pues está relacionada con la crujencia del producto. Además, deben tener baja humedad, pues cambios en los niveles de humedad pueden afectar su textura (Rodríguez, 2017).

Según lo reportado por la Procuraduría Federal del Consumidor, en el 2018, las botanas comerciales tienen alrededor de 30 g de grasas por 100 g de producto, las cuales provienen del aceite utilizado en la elaboración de estas. Respecto a las grasas saturadas, se encontraron porcentajes entre el 3 % y 15.8 %. Además de reportar altas cantidades de sodio (Profeco, 2018).

Adicionalmente el consumo de estos productos se ha relacionado con problemas de salud, como obesidad, enfermedades cardíacas, diabetes y otras enfermedades crónicas, por lo que, la industria de las botanas está rediseñando sus productos, generando productos horneados, sin gluten, sin azúcar, productos de granos integrales, entre otros; con el fin de lograr un resultado más nutritivo, con más vitaminas, antioxidantes o ingredientes, que sean atractivos para los consumidores. También se han integrado nuevos ingredientes, como mezclas de granos con frutas, verduras, o algunos extractos, que aporten valor nutrimental (Aguilera *et al.*, 2017; Rodríguez, 2017).

En el 2016, la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) en colaboración con el Instituto Politécnico Nacional (IPN), comenzaron con un proyecto, en donde se incorporaron leguminosas en la formulación de una botana, con el fin de obtener un producto con alto contenido de proteínas y bajo porcentaje de grasas, lo que requiere modificaciones en la cantidad de almidón presente, componente químico que contribuye con la expansión de la botana. Donde evaluaron las propiedades fisicoquímicas de la botana, el nivel de humedad (60 y 80 %) y la temperatura de la zona final de calentamiento (100, 110 o 120 °C), dejando fija la primera zona en 60 °C. Las botanas extruidas con las temperaturas de 110 y 120 °C con 80 % de humedad mostraron la mayor aceptabilidad en cuando a alto índice de expansión,

y baja densidad y dureza. El índice de expansión de la botana al ser expandida por aire caliente fue de 1.21 ± 0.20 , mientras que al expandirlas por el método tradicional (freído en aceite) fue de 3.93 ± 0.59 . Debido a que no se ha logrado obtener la expansión requerida para un producto de este tipo, es necesario optimizar las condiciones de procesamiento.

Así mismo, las condiciones no optimizadas en el proceso de extrusión ocasionan bajos índices de expansión, por lo que no son aceptados por el consumidor. Por lo anterior, se hace indispensable implementar un plan de optimización, enfocado en este proceso, en el que, se utilicen herramientas estadísticas, como diseño de experimentos, para lograr definir los puntos óptimos para la función objetivo, que sería el índice de expansión.

La información de este estudio será útil para contribuir con el rediseño de las botanas, que actualmente, demanda la industria alimenticia, así como ofrecer un producto con las características fisicoquímicas (mayor expansión) que requieren los consumidores y de mayor valor nutrimental.

II. Antecedentes

2.1 Botanas

Según la PROY-NOM-216-SSA1-2002 se pueden definir como botanas a los productos de pasta de harinas, cereales, leguminosas, tubérculos o féculas; así como de granos, frutas, frutos, semillas o leguminosas con o sin cáscara o cutícula, productos nixtamalizados y piel de cerdo, los cuales pueden estar fritos, horneados, explotados, cubiertos, extruidos o tostados; adicionados o no con sal y otros ingredientes opcionales como aditivos para alimentos.

A lo largo del tiempo las botanas han sido catalogadas como alimentos chatarra debido a que para su producción la materia prima se ve involucrada en distintas etapas de preparación, de la cual se obtiene una masa, la que posteriormente es sometida a cocción por freído para obtener un producto final, el cual tiene modificaciones en su composición, entre

ellas baja su valor nutricional e incrementa su nivel calórico (Morales, Martínez y Rodríguez, 2016).

La industria de las botanas está rediseñando sus productos para lograr un resultado más nutritivo, con más vitaminas, antioxidantes o ingredientes que sean atractivos para los consumidores. También se han integrado nuevos ingredientes como mezclas de granos con frutas, verduras, o algunos extractos que aporten valor nutrimental (Aguilera *et al.* , 2017; Excelsior, 2015; Rodríguez, 2017).

Algunos expertos en nutrición afirman que los alimentos no tienen por qué ser completos, ni suficientes, ni equilibrados, pues esas son propiedades que resultan de combinarlos en una dieta. Por lo que, dicen que no existen alimentos buenos o malos, ya que cada uno proporciona diferentes nutrientes (Valdés, 2009).

Según Euromonitor (2015) el consumo de botanas dulces y saladas ha ido aumentando con el paso de los años y se espera que siga así. En América Latina se estima que entre los años 2015-2020 crezca un 7.9 %, siendo la segunda categoría de alimentos más consumida, mientras que en el mundo se espera que incremente un 6 %, siendo el segundo lugar junto con la categoría de arroz y pasta, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Pronóstico de crecimiento de la industria alimenticia en América Latina y el mundo por categoría.

Categoría	América Latina (TMCA 2015-2020)	Mundo (TMCA 2015-2020)
Comida para bebé	7.30 %	10.90 %
Arroz y pastas	5.90 %	6.00 %
Botanas dulces y saladas	7.90 %	6.00 %
Helados	6.50 %	5.50 %
Galletas y barras	6.30 %	5.40 %
Sopas	8.00 %	3.80 %

Fuente: Euromonitor (2015).

En México la proyección del mercado de la industria de alimentos es liderada por la panadería, seguida por los lácteos y la confitería, mientras que el consumo de las botanas dulces y saladas se encuentra en séptimo lugar, en cuanto a su valor en el mercado, con una proyección de crecimiento del 4.9 %, en el periodo del 2015 al 2020, como se muestra en la Tabla 2 (Euromonitor, 2015).

Tabla 2. Proyección del mercado de subsectores de la industria de alimentos procesado en México.

Categoría	Valor mercado, 2015 (mdd)	TMCA 2015-2020
Panadería	15,718	4.5 %
Lácteos	11,550	4.6 %
Confitería	4,072	3.6 %
Productos del mar y cárnicos	3,313	5.7 %
Salsas y aderezos	3,209	5.5 %
Galletas y barras	3,176	4.7 %
Botanas dulces y saladas	3,003	4.9 %
Aceites y grasas	1,993	4.0 %
Arroz y pastas	1,874	4.9 %

Fuente: Euromonitor (2015).

Dentro de la clasificación de las botanas se encuentran las de tercera generación, éstas se caracterizan por tener una apariencia translúcida, ya que el almidón se gelatiniza. También son conocidas como “Productos intermediarios”, las cuales presentan una ventaja pues pueden ser almacenadas como cualquier pasta debido a su densidad y estabilidad (Morales, Martínez y Rodríguez, 2016).

Para la elaboración de estas botanas se pueden dividir en dos etapas, la primera es la formación de una pasta con materia prima basada en almidón y un secado para formar el producto intermedio, la segunda etapa se basa en un calentamiento rápido al producto intermedio para lograr su expansión (Morales, Martínez y Rodríguez, 2016).

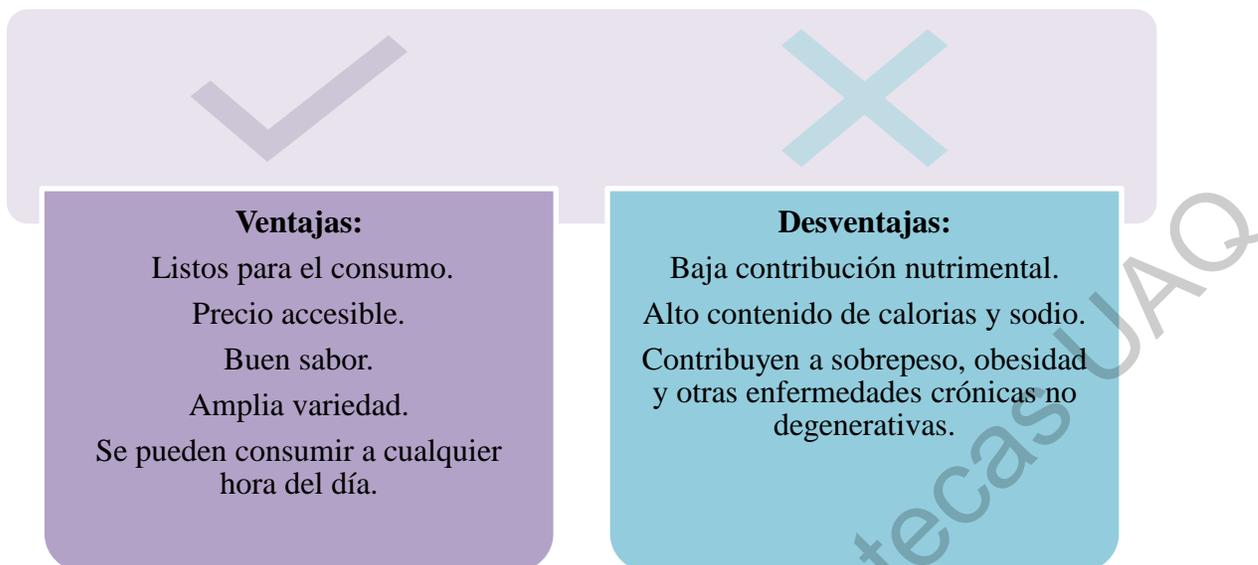


Figura 1. Ventajas y desventajas de las botanas.

La Figura 1 muestra las ventajas y desventajas de las botanas. Algunas de las ventajas que señalan diversos autores son que están listas para el consumo, así como se pueden consumir a cualquier hora del día, también satisfacen el apetito, cuentan con un buen precio, buen sabor y existe una amplia variedad (García *et al.*, 2019; Nawaz *et al.*, 2019; Cortez *et al.*, 2014). Por otro lado, otros autores afirman que estos productos tienen una baja contribución nutricional, por su alto contenido de calorías y sodio, lo cual puede contribuir al sobrepeso, obesidad y otras enfermedades crónicas no degenerativas de los consumidores (García *et al.*, 2019; Nawaz *et al.*, 2019; Gaona-Pineda *et al.*, 2018 Cortez *et al.*, 2014; Ramírez, Uresti y Aldana, 2013). Consecuentemente, la industria alimentaria está rediseñando sus botanas, reduciéndolas en grasa saturada y se añadiéndolas con materiales ricos en proteínas y fibra.

2.2 Características de calidad para una botana: Expansión y propiedades nutrimentales.

La importancia de generar productos que sean ricos en proteínas y fibra, que a su vez son bajos en carbohidratos y sodio, está en que los consumidores se preocupan cada vez

más por su salud y buscan productos que sean prácticos, satisfagan el hambre, pero que a su vez tengan un aporte nutricional, para reducir la probabilidad de sobrepeso y obesidad. Por lo que, diferentes autores se han centrado en agregar productos como frutas y verduras, cereales, legumbres y otras proteínas de origen animal a las botanas (Ruiz-Armenta *et al.* , 2018; Honi *et al.* , 2017; Menis-Henrique *et al.* , 2018; Kumar *et al.* , 2018; Natabirwa *et al.* , 2018; Anton *et al.* , 2009; Yadav *et al.* , 2018; Nawaz *et al.* , 2017).

Tabla 3. Botanas fortificadas para mejorar su impacto en la salud.

Fortificado con	Beneficios a la salud	Referencias
Frutas y verduras	-Fibras -Antioxidantes naturales	Ruiz-Armenta <i>et al.</i> 2018 Honi <i>et al.</i> 2017 Bhat <i>et al.</i> 2019 Poliszko <i>et al.</i> 2019 Kakaei <i>et al.</i> 2019 Promsakha <i>et al.</i> 2018 Kasprzak <i>et al.</i> 2018
Cereales	-Fibras -Proteínas -Antioxidantes naturales	Kharat <i>et al.</i> 2019 Camacho <i>et al.</i> 2014 Menis-Henrique <i>et al.</i> 2018 Kumar <i>et al.</i> 2018 Philipp <i>et al.</i> 2018 Kantrong <i>et al.</i> 2018 Levien <i>et al.</i> 2018 Saldanha <i>et al.</i> 2019 Wani & Kumar 2016 Mahati <i>et al.</i> 2018
Leguminosas	-Fibras -Proteínas -Antioxidantes naturales -Vitaminas y minerales	Natabirwa <i>et al.</i> 2018 Anton <i>et al.</i> 2009 Adeoye <i>et al.</i> 2018
Otras proteínas	-Proteínas -Ácidos grasos Omega-3 -Calcio -Hierro -Vitaminas A, D y E	Limón-Valenzuela <i>et al.</i> 2017 Yadav <i>et al.</i> 2018 Nawaz <i>et al.</i> 2017 Zdanowska-Sasiadek <i>et al.</i> 2018 Kumar <i>et al.</i> 2017

La Tabla 3 muestra algunos estudios en los que se fortificó una botana con diferentes materias primas, como cereales, leguminosas, frutas y verduras, así como otras proteínas de origen animal. Lo que resultó en botanas aceptadas por el consumidor y con un aporte nutricional. Los cereales, como el mijo, el maíz azul, la cebada y el arroz proporcionan las principales contribuciones de fibra, proteínas, antioxidantes y bajo contenido de lípidos. Al agregar legumbres, como frijoles y maní, aumenta el nivel de antioxidantes, las fibras, las proteínas, las vitaminas y los minerales de los bocadillos. Cuando se fortifican con frutas y verduras como naranja, granada, tomate, col rizada y calabaza a una merienda aumenta el contenido de fibra y la actividad antioxidante. Y, por último, agregar otras proteínas como leche, pescado, avestruz, pollo y camarones produce beneficios para mejorar el contenido de proteínas, ácidos grasos omega-3, calcio, hierro y vitaminas A, D y E. Generalmente se obtuvo una alta expansión cuando el procesamiento fue a altas temperaturas y humedad.

En cuanto a la aceptabilidad de las botanas por los consumidores, la expansión es una característica de calidad muy importante, pues se espera que los productos sean esponjosos. Además, deben tener baja humedad, pues un cambio en el contenido de humedad puede afectar su textura, las botanas menos crujientes no son aceptables. De igual manera, el adicionamiento de nuevos ingredientes puede afectar la textura. Agregar fibra puede impactar en el inflado de estos productos, debió al impacto en las propiedades mecánicas, las cuales son impulsadas por sus dimensiones aparentes, porosidad y forma (Rodríguez, 2017).

2.3 Índice de expansión

Una de las características más importantes para una botana es su índice de expansión, ya que con éste se puede determinar su densidad, y con ello conocer la calidad del producto. Una forma efectiva y sencilla para calcular este índice es mediante el método de desplazamiento de volumen. Para calcular la densidad de un producto se divide su peso entre su volumen. Si cada producto de una serie se hace con el mismo peso de masa o pasta, los volúmenes pueden compararse directamente. Según Penfield y Campbell (1990) el grado

de expansión se determina restando el volumen inicial, al volumen final y dividiendo éste entre el volumen inicial, tal cual se muestra en la siguiente expresión.

$$IE = \frac{V_f - V_i}{V_i}$$

Dónde:

V_f = Volumen de las semillas de mijo que se desplazan al introducir los expandidos.

V_i = Volumen de las semillas de mijo que se desplazan al introducir los pellets.

2.4 Proceso de extrusión

El proceso de extrusión es importante en la industria alimenticia, pues se considera una de las formas más versátiles de producir alimentos y cuenta con una alta capacidad de producción, además de presentar ventajas técnicas de calidad, costos y diversidad sobre otros procesos utilizados en ésta industria (Cubeddu, Rauh, y Delgado, 2014; Ghumman, Kaur, Singh, y Singh, 2016; Siddiq, Sogi, y Dolan, 2013; Yan, Ye, y Chen, 2015). Las botanas de tercera generación, al inicio fueron expandidas por freído, pero estas pueden ser expandidas por calentamiento con infrarrojo o microondas y recientemente se ha empleado aire caliente (Avalos-Esparza, Gaytan-Martinez, Morales-Sanchez y Reyes-Vega, 2020).

Éste es una forma de producir alimentos de manera rápida, continua y homogénea. Este proceso es mecánico, por lo que se procesa a una alta presión y temperatura, durante un breve espacio de tiempo. Como resultado, se genera una serie de cambios en la forma, estructura y composición del producto.

La cocción por extrusión es un proceso físico que combina altas temperaturas con una gran cantidad de energía mecánica, el cual es comúnmente utilizado para promover cambios estructurales en el almidón, incluida la gelatinización, la fusión y la fragmentación (Roman, Gomez, Hamaker, y Martinez, 2018). En los últimos años ha sido importante en la industria alimenticia, pues es considerado un proceso versátil, además de contar con una alta

capacidad de producción, y algunas ventajas técnicas, de calidad, costos y diversidad sobre otros procesos utilizados en ésta industria (Cubeddu *et al.* , 2014).

Durante la cocción en este proceso, los materiales alimenticios se cocinan en un barril sellado a alta presión, temperaturas elevadas y a un gran cizallamiento mecánico en poco tiempo. Este proceso produce varias reacciones químicas, alteración de las estructuras de la pared celular y cambios reológicos (Zhong *et al.* , 2018).

Un gran número de variables están presentes en el proceso de extrusión, Algunos estudios sobre materiales a base de almidón incluyen variaciones en la velocidad de alimentación del proceso, el nivel de humedad en el barril, la temperatura del barril, y la velocidad del tornillo, las cuales son de gran impacto en las cualidades de los productos finales. Por lo que es necesario controlar esas variables obtener los productos más deseables (Kowalski, Li, y Ganjyal, 2018).

Los extrusores, comúnmente utilizados para la elaboración de alimentos, se pueden clasificar en dos: extrusor de tornillo simple y extrusor de doble tornillo. Los extrusores de tornillo simple, como el que se muestra en la Figura 2a, son los más usados en la industria de alimentos. En éstos según López y Hermann (2004), se pueden distinguir las tres zonas: de alimentación, compresión y descarga. En este tipo de extrusores según Avalos-Esparza *et al.* (2020) el material se transporta por el efecto que se produce cuando la fricción del material sobre la superficie interna del cilindro es mayor respecto a la fricción del material sobre la superficie del tornillo. Por otra parte, los extrusores de doble tornillo consisten en dos tornillos en paralelo rotando dentro de un barril, como se muestra en la Figura 2b, según Beltrán y Marcilla (2012) son utilizados para productos más específicos ya que por su forma presentan mejor capacidad de mezclado y mejor tiempo de residencia y de distribución, aunque, su costo es más elevado.

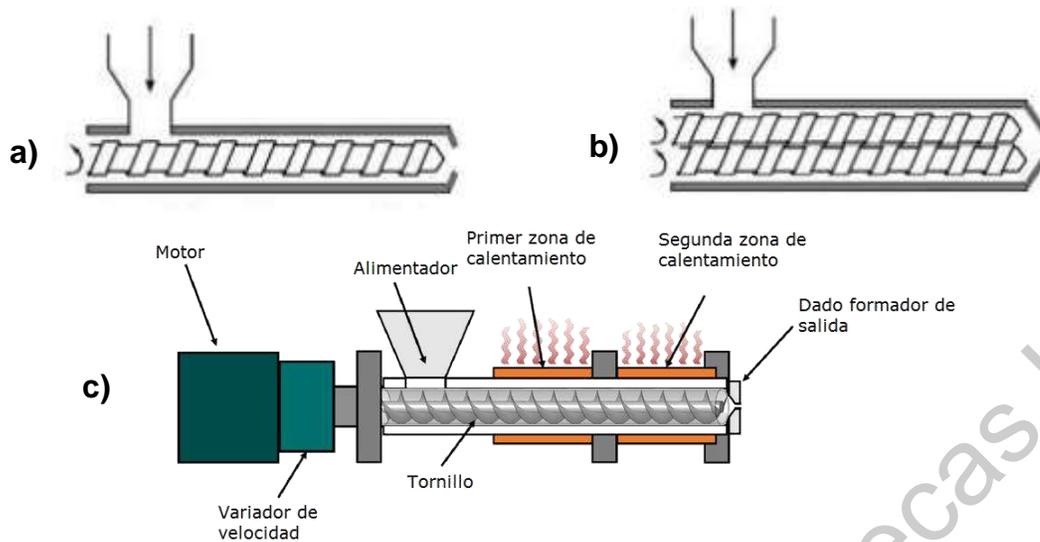


Figura 2. Proceso de extrusión.

Fuente: Huq y Hossain (2014); Cervantes-Ramírez *et al.* (2020).

En la Figura 2c se muestran las partes de un extrusor de tornillo simple, estas partes constan de tres zonas principales, la primera es la zona de alimentación, en ésta se compacta el alimento en forma sólida densa bajo ciertas condiciones de temperatura y velocidad para después ser transportado hacia la siguiente zona. La segunda es la zona de compresión, en ésta el material se compacta dejando escapar el aire del material por la tolva de alimentación. Por último, la tercera es la zona de dosificado, en ésta el material fundido es homogeneizado y presurizado para forzarlo a pasar a través de la boquilla o dado (Huq y Hossain, 2014). Teniendo como resultado el producto semiterminado.

2.5 Optimización aplicada al desarrollo de botanas de tercera generación.

Para Gutiérrez (2012) optimización es una técnica matemática que sirve para conocer la información sobre el punto óptimo de un modelo. Según Natabirwa (2018), la optimización consiste en la selección de la mejor alternativa, en algún sentido, de las demás posibles. Y para Benson y Hande (2002) un problema de optimización es el cálculo de puntos extremos (máximos, mínimos o estacionarios) de una función objetivo sobre un conjunto de restricciones y variables reales desconocidas.

La optimización aplicada en el desarrollo de botanas no siempre es fácil, pues se tienen que controlar distintas variables para obtener el producto deseado, por lo que, se han realizado estudios sobre ello. Los métodos más utilizados para la optimización de estos procesos son las redes neuronales artificiales (ANN), la aplicación de pruebas estadísticas y el diseño de experimentos. La ANN es un modelo computacional basado en neuronas artificiales, que simulan el cerebro humano para poder tomar decisiones (Chongjun, Kowalski, Lei, y Ganjyal, 2017; Cubeddu *et al.* , 2014; Fan *et al.* , 2013). Por otra parte, la aplicación de pruebas estadísticas son fáciles de aplicar y dan la respuesta óptima al problema (Bhat, Wani, Hamdani, y Gani, 2018) 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, y Ganjyal, 2018).

La optimización consiste en la selección de una alternativa mejor, en algún sentido, que las demás alternativas posibles. Los proyectos de optimización se componen generalmente de la función objetivo, la cual es una medida cuantitativa del funcionamiento de sistema que se desea optimizar, las variables, las mismas representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo, y las restricciones, que representan el conjunto de relaciones que ciertas variables están obligadas a satisfacer. Resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones (Ramos *et al.*, 2010).

Uno de los métodos para resolver problemas de optimización es el diseño de experimentos, el cual consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas por el experimentador sobre determinada situación (Gutiérrez, 2012).

2.6 Trabajos de optimización en botanas de segunda y tercera generación fortalecidas nutricionalmente.

Ruiz-Armenta *et al.* (2018) utilizaron un diseño central compuesto para evaluar el efecto de la temperatura de extrusión, el contenido de humedad y el contenido de bagazo naranjita deshidratado sobre el índice de expansión, la fuerza de penetración, la aceptabilidad sensorial y los carotenoides totales, de una botana de tercera generación a base de maíz amarillo adicionada con bagazo de naranjita. Los resultados nos indican que con bajo contenido de humedad y aumentando la temperatura de extrusión, los valores del índice de expansión tienden a aumentar. Las condiciones óptimas de procesamiento son 125 °C en la temperatura del extrusor, un contenido de humedad del 23 % y un 8,03 % de bagazo de naranjita.

Otro proyecto que utilizó diseño central compuesto fue el desarrollado por Camacho *et al.* (2014), en donde añadieron harina de maíz azul y almidón de maíz a una botana de tercera generación. El índice de expansión aumento con el aumento de la temperatura del barril, mientras que al incrementar la humedad este índice disminuyó. Los resultados óptimos se obtuvieron al trabajar con una velocidad de 80 rpm, una humedad del 20 % y una temperatura de 120 °C.

Polizko *et al.* (2019) llevaron a cabo un estudio añadiendo harina de calabaza a una botana de tercera generación a base de maíz. Se utilizó un Análisis de varianza unidireccional para evaluar las variables. La adición de harina de calabaza alteró las propiedades físicas del producto, afectando la tasa de expansión, pues al aumentar la harina de calabaza, la expansión disminuía. Otra conclusión a la que llegaron fue que con un incremento de temperatura el proceso de gelatinización del almidón es más efectivo, por lo que obtiene una mayor expansión.

Kharat *et al.* (2018) estudiaron las características fisicoquímicas de una botana extruida fortificada con harinas de tres variedades de mijos (dedo, cola de zorro y perla). Se evaluaron las variables de humedad, velocidad del tornillo y temperatura del barril, con ayuda de un análisis de varianza. Como resultados obtuvieron que la relación de expansión aumentó cuando aumentó la temperatura, la humedad de alimentación y la velocidad.

Por otro lado, Philipp *et al.* (2018) trabajaron en adicionar chícharos a una botana a base de almidón de arroz, tomando en cuenta las variables de temperatura y velocidad del tornillo en el proceso de extrusión. Se procesaron los datos con ayuda de un análisis de varianza, donde se concluyó que al aumentar la velocidad aumenta el índice de expansión.

La Tabla 4 muestra un resumen de los trabajos realizados para la optimización de botanas, definiendo la metodología estadística utilizada, las variables estudiadas, la materia prima añadida y los resultados.

Tabla 4. Resumen de trabajos sobre botanas expandidas

Metodología	Variables	Fortificado con:	Resultados	Referencia
Diseño central compuesto	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de extrusión • Contenido de humedad • Contenido de bagazo naranjita 	Bagazo naranjita	Con bajo contenido de humedad y altas temperaturas de extrusión, los valores del índice de expansión tienden a aumentar. El índice de expansión aumento con el aumento de la temperatura, mientras que al incrementar la humedad el índice disminuyó.	Ruiz-Armenta <i>et al.</i> (2018)
Diseño central compuesto	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Humedad 	Maíz azul	El índice de expansión aumento con el aumento de la temperatura, mientras que al incrementar la humedad el índice disminuyó. El contenido de harina de calabaza disminuyó el índice de expansión,	Camacho <i>et al.</i> (2014)
Análisis de varianza unidireccional	<ul style="list-style-type: none"> • Harina de Calabaza • Temperatura 	Harina de calabaza	mientras que una mayor temperatura tuvo una mayor expansión.	Polizko <i>et al.</i> (2019)
Análisis de varianza.	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad • Velocidad • Temperatura 	Tres variedades de mijos (dedo, cola	Al aumentar las variables aumenta el índice de expansión	Kharat <i>et al.</i> (2018)

		de zorro y perla).		
Análisis de varianza.	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Velocidad 	Chicharos	Aumentar la velocidad aumenta el índice de expansión.	Philipp <i>et al.</i> (2018)

2.7 Diseño de experimentos.

Según Gutierrez (2012) el diseño de experimentos consiste en planear y llevar a cabo un conjunto de pruebas con el fin de generar datos, que, al analizarlos estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que nos permitan resolver interrogantes sobre determinada situación. Además, menciona que es la aplicación de técnicas estadísticas y de ingeniería, las cuales permiten comprender mejor, situaciones complejas de causa-efecto.

Según Gutiérrez (2012) los diseños experimentales se pueden clasificar como: diseños para comparar dos o más tratamientos, diseños para estudiar el efecto de factores sobre una o varias variables respuesta, diseños para optimizar procesos, diseños robustos y diseños de mezclas. En la Figura 3 se muestran los diseños que se utilizan en cada diseño antes mencionado.

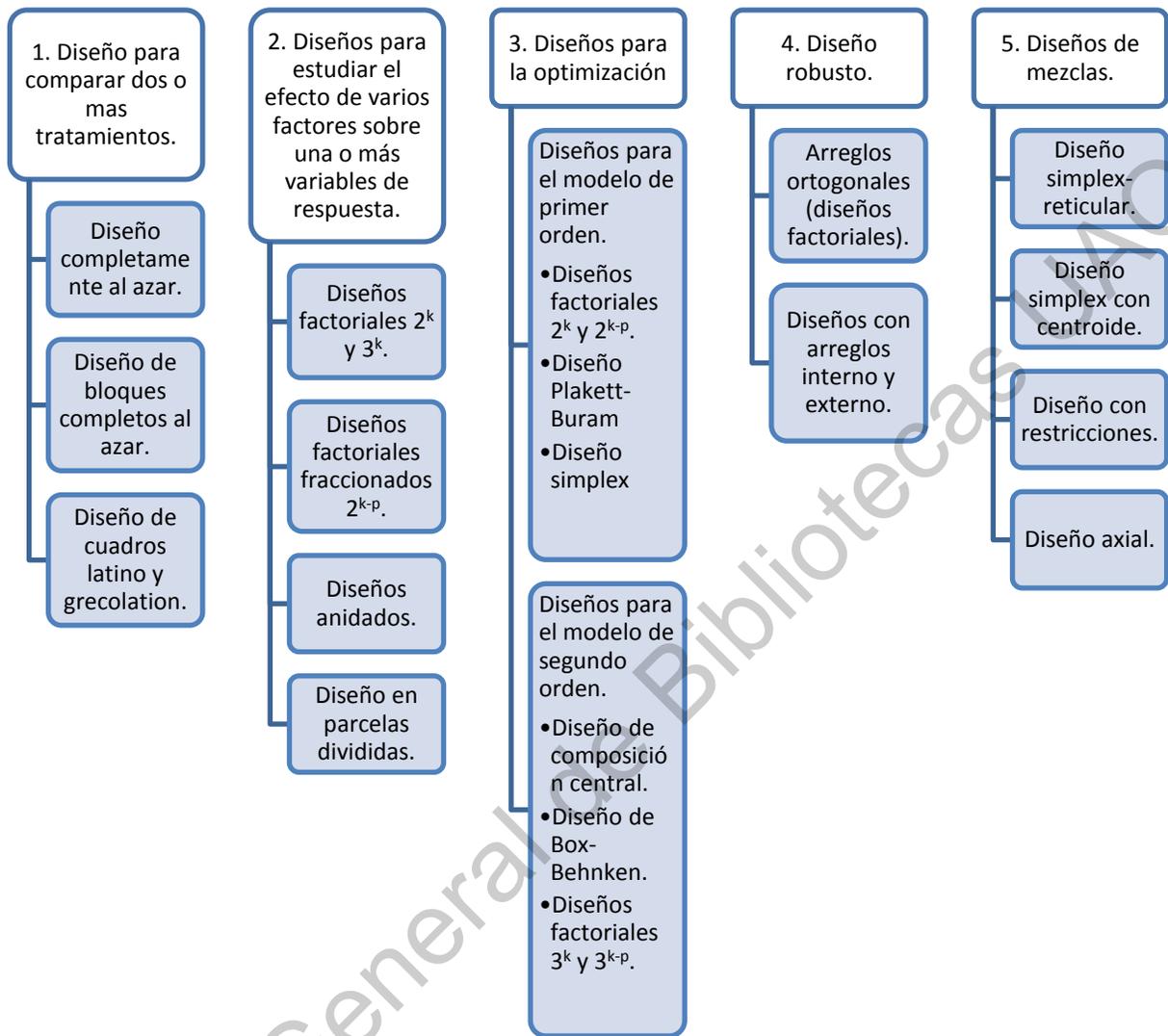


Figura 3. Clasificación de los diseños experimentales.

Fuente: Gutiérrez (2012)

Los diseños de primer orden suponen que sólo son importantes los efectos principales de cada factor, se utilizan principalmente para ajustar modelos en los que sólo son importantes los efectos principales y no existen efectos de interacción. Entre estos diseños de encuentran diseños factoriales 2^k , diseños factoriales fraccionados 2^{k-p} , diseño de

Plackett-Burman y diseño simplex, los cuales se utilizan generalmente como exploratorios (Gutiérrez, 2012).

Por otro lado, los diseños de segundo orden son aquellos que permiten estudiar, además de los efectos lineales, de interacción y los cuadráticos. Estos se utilizan cuando se requiere evaluar una región más compleja o cuando se requiere encontrar el punto óptimo. Por lo que estos diseños son ampliamente utilizados para optimizar procesos (Gutiérrez, 2012).

Como se muestra en la Figura 3, existen diseños de experimentos enfocados a la optimización de procesos, dentro de los cuales se encuentran diseños de primer y segundo orden. Por lo que para la realización de este proyecto se utilizará el diseño de experimentos como base para la identificación de las variables significativas del proceso y con la generación del modelo se optimizará la respuesta.

2.8 Análisis R y R

El análisis R y R es una metodología estadística que ayuda a evaluar un sistema de medición, en cuanto a su repetibilidad y reproducibilidad. La repetibilidad es la variación de medias que se obtiene mediante un operador, usando el mismo método y herramientas para medir alguna característica en las partes. Por otra parte, la reproducibilidad es la variación de las medias que se obtiene mediante el mismo método y herramienta por parte de varios operadores (Socconini, 2015).

Este análisis está conformado por:

- Las partes para medir.
- El instrumento de medición.
- Los operadores que realizan la medición.

Para que un sistema de medición sea aceptado, el Grupo de Acción de la Industria Automotriz (AIAG por sus siglas en inglés) (2010) propone que el porcentaje de contribución de la variación del total RR sea menor a 10 %, para que el sistema de medición sea aceptable

dependiendo de la aplicación, el costo del dispositivo de medición, el costo de la reparación u otros factores, se necesita una contribución entre 10 y 30 %, y al sobre pasar el 30 % el sistema de medición no es aceptado.

III. Hipótesis

Las variables de humedad, velocidad y temperatura en el proceso de extrusión de una botana de tercera generación influyen de manera significativa en el índice de expansión de una botana de tercera generación.

IV. Objetivos

4.1 Objetivo General

Lograr una expansión de 4 en la botana de tercera generación expandida por aire caliente.

4.2 Objetivos específicos

- Validar el sistema de medición, mediante un análisis R y R.
- Estandarizar la formulación de una botana de tercera generación, a través del uso de diseño de experimentos, aplicado en las condiciones de preparación.
- Identificar variables significativas en el proceso de extrusión, implementando un diseño de experimentos.
- Validar la eficiencia de la ecuación para optimizar el proceso de extrusión.

V. Materiales y métodos

5.1 Materiales

Los materiales utilizados para cumplir con el objetivo se enlistan a continuación:

- Materia prima (Harina de trigo, harina de garbanzo, almidón de maíz, sal, azúcar, agua, emulsificante).
- KitchenAid Professional 600.
- Extrusor de tornillo simple con una relación $L/D=21$ mm, una longitud de cana del 18 mm y una profundidad de canal de 3 mm. Cuenta con dos zonas de calentamiento (A y B) y el dado de salida es una placa metálica de acero inoxidable con una ranura rectangular de 2 mm de ancho por 20 mm de largo, facilitado por CICATA-Unidad Querétaro.
- Deshidratador Excalibur de nueve bandejas (California, Estados Unidos).
- Máquina de aire caliente Sunbeam, modelo FPSBPP7052 con potencia de 60Hz.
- Software RStudio ®. Este software es de código abierto y se utiliza en entorno informático estadístico.

5.2 Procedimiento

La metodología propuesta consta de 5 pasos para alcanzar el objetivo (Figura 4), los cuales se describen detalladamente a continuación:

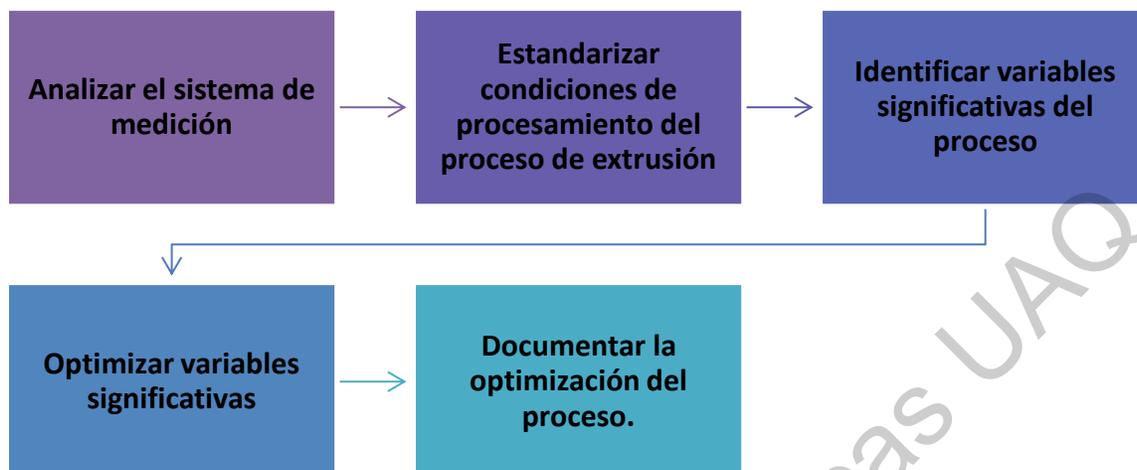


Figura 4. Procedimiento de metodología propuesta.

5.2.1 Analizar el sistema de medición.

Para realizar el estudio se midieron 10 muestras con 5 botanas expandidas, por 3 operadores y 3 repeticiones. El procedimiento para medir el índice de expansión se basa en el método de desplazamiento de volumen propuesto por Penfield y Campbell (1990).

Primeramente, se debe contar con un recipiente de volumen conocido, el cual se llenará con mijo y los pellets (producto intermedio), para hacerlo es necesario colocar una base universal con un embudo (por donde pasara el mijo) a una altura conocida, se coloca el recipiente justo debajo del embudo y se deja caer el mijo. Cuando el recipiente se está llenando y va a la mitad se agregan los pellets de forma aleatoria para que se entierren con el mijo (Ver Figura 5). Una vez lleno el recipiente se pasa una espátula de lado izquierdo al derecho por dos ocasiones para quitar el exceso, posteriormente se pesa. Este resultado es el volumen inicial. Para calcular el volumen final se sigue el mismo procedimiento, pero en lugar de los pellets se utiliza la botana ya expandida, ese es el volumen final. Por último, para calcular el índice de expansión se resta el volumen inicial, al volumen final y se divide entre el volumen inicial.



Figura 5. Método de medición del índice de expansión.

Los resultados de este estudio se pueden resumir en un análisis de la varianza (ANOVA), una tabla de porcentajes de contribución a la variación y un grupo de gráficas. Donde la “parte” hace referencia a la variación que se debe a las botanas, el “operador” representa la variación que se debe a los operadores. Error o repetibilidad hace referencia a la variación que no es explicada por los términos Parte u Operador.

5.2.2 Estandarizar condiciones de procesamiento del proceso de extrusión.

En este paso se estandarizaron algunas condiciones de procesamiento en el proceso de extrusión, para el cual se utilizó un diseño factorial mixto, donde se evaluaron las variables de Ciclos por el extrusor (1 y 2) y la humedad (55, 60 y 65 %), (Tabla 5).

Tabla 5. Tabla experimental para estandarizar la formulación de la masa.

Corrida	Ciclos	Humedad (%)
1	1	55
2	2	55
3	1	60
4	2	60
5	1	65
6	2	65

La mezcla es una proporción de 80 % de harinas (80 % harina de trigo, 20 % harina de garbanzo), 10 % de almidón (producido por Maizena), 6.8 % de azúcar, 3 % de sal, y 0.2 % emulsificante. Para preparar la masa fue necesario pre-gelatinizar el almidón e incorporar el emulsificante, para ello se puso a hervir 30 % del agua, una vez hervida se agregó el emulsificante y se dejó reposar 1 minuto, después se agregó el almidón (previamente disuelto en 30 % de agua fría). Posterior a eso se agregaron a la batidora los otros ingredientes (las harinas, el azúcar, la sal y el resto de agua) y se mezclaron. Luego se agregó la mezcla del emulsificante y el almidón, se mezcló hasta homogenizar en una batidora KitchenAid Professional 600.

El proceso de extrusión se realizó en un extrusor de tornillo simple, previamente descrito. La velocidad de tornillo fue de 10 rpm, y la temperatura del extrusor fueron 60 °C en la primera zona de calentamiento (A), y 120 °C en la segunda (B), tomando en cuenta que son los niveles en los que se obtuvo la mayor expansión en el proyecto anterior (Avalos-Esparza *et al.*, 2020). La humedad de la mezcla empleada en el varió según el modelo experimental. El material extrudido se cortó de manera manual en trozos de aproximadamente 1 cm, estos se secaron en un deshidratador marca Excalibur de nueve bandejas (California, Estados Unidos), a una temperatura de 52 °C por 24 h hasta llegar a un contenido de humedad entre 6 y 8 %. Después se dejan enfriar los pellets y se almacenan en bolsas de plástico hasta su posterior caracterización.

Una vez obtenido el producto extruido, se expandieron en la máquina de aire caliente Sunbeam. El índice de expansión (IE) se determinó de acuerdo con el método previamente

estandarizado, utilizando el método de desplazamiento de volumen con mijo. Se realizaron 3 repeticiones para cada tratamiento. Con los resultados se realizó un ANOVA, y gráficas de efectos principales, con los cuales se puede determinar la mejor corrida, y con ello estandarizar la forma en la que se realiza.

5.2.3 Identificar variables significativas del proceso de extrusión.

Una vez estandarizada algunas condiciones de procesamiento, se evaluó el proceso de extrusión con un diseño exploratorio factorial 2^3 , con un total de 8 corridas experimentales por réplica. La Tabla 6 muestra la tabla experimental, en donde se especifican las corridas a realizar, así como las variables y sus niveles a trabajar.

Tabla 6. Tabla experimental para definir variables significativas.

Corrida	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)
1	80	100	5
2	80	100	10
3	80	110	5
4	80	110	10
5	100	100	5
6	100	100	10
7	100	110	5
8	100	110	10

Para elaborar la masa se agregó 37 % harina de trigo, 16 % harina de garbanzo, 37 % de almidón (producido por Maizena), 6.8 % de azúcar, 3 % de sal, y 0.2 % emulsificante. Primeramente, se pre-gelatinizó el almidón y se incorporó el emulsificante, para ello se puso a hervir 30 % del agua, una vez hervida se agregó el emulsificante y se dejó reposar 1 minuto, después se agregó el almidón (previamente disuelto en el resto del agua fría). Posterior a eso se agregaron a la batidora los otros ingredientes (las harinas, el azúcar y la sal) y se

mezclaron. Luego se agregó la mezcla del emulsificante y el almidón, se mezcló hasta homogenizar en una batidora KitchenAid Professional 600.

El proceso de extrusión se realizó en el mismo extrusor anteriormente descrito. La velocidad de tornillo varió según el diseño experimental (5 y 10 rpm), la temperatura del extrusor quedó fija en la primera zona de calentamiento (A) en 80 °C, en la segunda zona (B) varió según el diseño (100 y 110 °C), y la humedad de la mezcla varió de 80 a 100 % según el diseño experimental (Ver Tabla 6). El material extrudido se cortó de manera manual en trozos de aproximadamente 2 cm, estos se secaron en un deshidratador marca Excalibur de nueve bandejas (California, Estados Unidos), a una temperatura de 52 °C por 15 h hasta llegar a un contenido de humedad entre 6 y 8 %. Posteriormente se dejaron enfriar los pellets y se guardaron en bolsas de plástico etiquetadas.

Para su caracterización se expandieron con la máquina de aire caliente (Sunbeam, modelo FPSBPP7052) por aproximadamente 60 segundos y se calculó su índice de expansión según el método previamente descrito.

Para analizar los resultados, primeramente, se realizó un ANOVA con todas las variables, con el fin de identificar cuáles son significativos y mandar al error los que no lo son, para posteriormente se realizó otro ANOVA solo con los factores significativos, y con ello identificar que variables son significativas. Además, se utilizaron herramientas como graficas de efectos principales, gráficas de interacciones, y comparación de medias, para entender cómo trabajan las variables en cada nivel.

5.2.4. Optimizar variables significativas

Una vez definidas las variables significativas del proceso y sus mejores niveles de trabajo, se modeló una ecuación. En la que se evaluó si es confiable y predictiva, además de determinar si es posible llegar a la expansión de 4.

5.2.5. Documentar la optimización del proceso.

Una vez optimizado el proceso de extrusión fue necesario documentar el procedimiento de la elaboración de la botana, con todas sus especificaciones, con el fin de estandarizar el proceso.

VI. Resultados y discusión

6.1 Estudio R y R

Los resultados del estudio R y R para confirmar la confiabilidad del método de medición se muestran en la Tabla 7. (Ver Anexo 1 para detalles de la programación en R). Los resultados muestran que “la muestra (las botanas)” es significativa con P-value de $2 e^{-16}$, con referencia a un α de 5 %, mientras que el operador tiene un P-value de 0.290, lo cual nos indica que las muestras son diferentes entre sí, y que entre operadores no existe diferencia significativa.

Tabla 7. Análisis de la varianza del estudio R y R del método de desplazamiento de semilla con mijo rojo.

Fuete	GL	SC	MC	F	P
Muestra	9	11.537	1.2819	465.208	$2 e^{-16}$
Operador	2	0.007	0.0034	1.229	0.290
Operador*Muestra	18	0.046	0.0026	0.926	0.552
Error	60	0.165	0.0028		

Donde: GL representa los grados en libertad, SC suma de cuadrados, MC los cuadrados medios, F el valor estadístico y P el P-value.

La Tabla 8 muestra que el porcentaje de contribución de la variación al sistema de medición, donde el total RR es 13.73 % y la parte a parte es de 99.05 %. La contribución de la variabilidad de repetibilidad es de 13.67 % y la de reproducibilidad es de 1.25 %. Además, el sistema de medición es capaz de distinguir entre 10 partes.

Tabla 8. Componentes de la varianza del estudio R y R del método de medición.

Fuente	CompVar	CompVar Cont (%)	Desviación estándar	Varianza	Var Cont (%)
Total RR	2.73 e^{-03}	1.8852	0.05226	0.3136	13.73
Repetibilidad	2.71 e^{-03}	1.8695	0.05204	0.3122	13.67
Reproducibilidad	2.26 e^{-05}	0.0156	0.00476	0.0286	1.25
Operador	2.26 e^{-05}	0.0156	0.00476	0.0286	1.25
Operador*Parte	0.00 e^{+00}	0.0000	0.00000	0.0000	0.00
Parte a Parte	1.42 e^{-01}	98.1148	0.37701	2.2620	99.05
Variación total	1.45 e^{-01}	100.0000	0.38061	2.2837	100.00

Número de categorías distintas = 10

Donde: CompVar representa la variación de cada apartado, CompVar Cont representa la contribución representativa de cada apartado en porcentaje y Var Cont representa al porcentaje de contribución de la variación.

Los componentes de la variación del sistema de medición se muestran en la Figura 6; los cuales están compuestos por el sistema total RR, la repetibilidad, reproducibilidad y la parte a parte. La parte a parte es el componente que aporta mayor variabilidad al proceso, por lo que podemos concluir que el método se hace de una manera similar. En la Figura 7 se muestra la interacción de los operadores y las partes, en donde se puede observar que los tres operadores tuvieron un desempeño muy similar, por lo que el método de medición es constante.

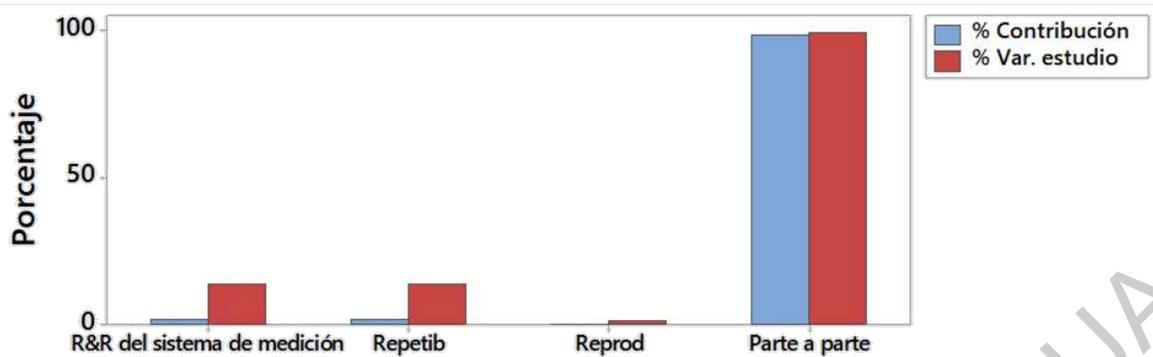


Figura 6. Componentes de variación del análisis R y R del método de medición de expansión.

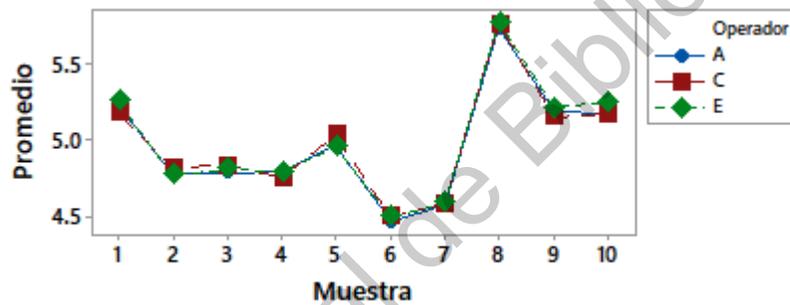


Figura 7. Interacción entre operador y muestra.

La Figura 8 muestra las mediciones de los operadores con sus medias y límites, en donde podemos observar que todos los diagramas de cajas y bigotes se comportan de manera similar.

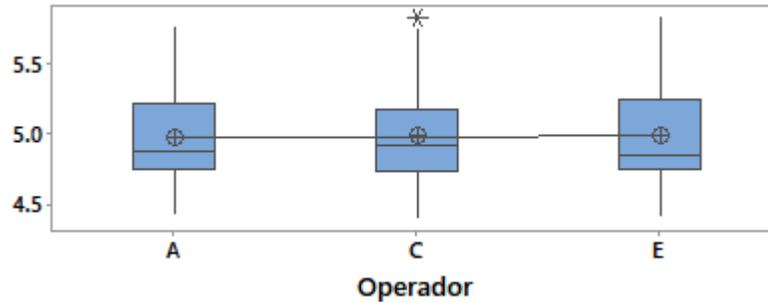


Figura 8. Promedio por operador en el análisis R y R del sistema de medición.

La AIAG (2010) sugiere que el método es aceptable (dependiendo de la aplicación) cuando la contribución de la variación total del sistema está entre 10 y 30 % y cuando el sistema puede diferenciar entre 5 o más partes. Los resultados del análisis nos indican que la variación del total RR es de 13.73 %, además el sistema de medición del índice de expansión puede identificar entre 10 partes, por lo que se puede concluir que el sistema de medición es aceptado, es decir que puede distinguir entre las partes de manera fiable.

6.2 Estandarizar condiciones de procesamiento del proceso de extrusión.

En un análisis previo se analizaron las variables para considerar que fueron los ciclos en que pasa la masa por el extrusor (1 y 2) y la humedad (55 %, 60 % y 65 %).

En la Tabla 9 se muestran los resultados a partir de un análisis de varianza (ANOVA). El diseño de experimentos tuvo como resultado que los dos factores tienen efecto significativo tomando en cuenta un alfa de 5% ($\alpha=0.05$), debido a que el P-value es 0.0441 y 0.0182 de los ciclos y la humedad, respectivamente. La interacción entre las variables no es significativa debido a que su P-value es de 0.3868 (Ver Anexo 2 para detalles de la programación en R).

En la Figura 9, se muestra el efecto que tienen tanto los ciclos como la humedad sobre el índice de expansión. Los resultados indican que la botana tiene un mayor índice de expansión utilizando dos pasadas por el extrusor, y utilizando una mayor humedad.

Tabla 9. Análisis de la varianza de la estandarización de las condiciones de procesamiento.

	GL	SC	MC	F	P
Ciclos	1	0.7357	0.7357	5.058	0.0441*
Humedad	2	1.6562	0.8281	5.693	0.0182*
Ciclos:Humedad	2	0.2994	0.1497	1.029	0.3868
Residuals	12	0.17453	0.1454		

Donde: GL representa los grados en libertad, SC suma de cuadrados, MC los cuadrados medios, F el valor estadístico y P el P-value.

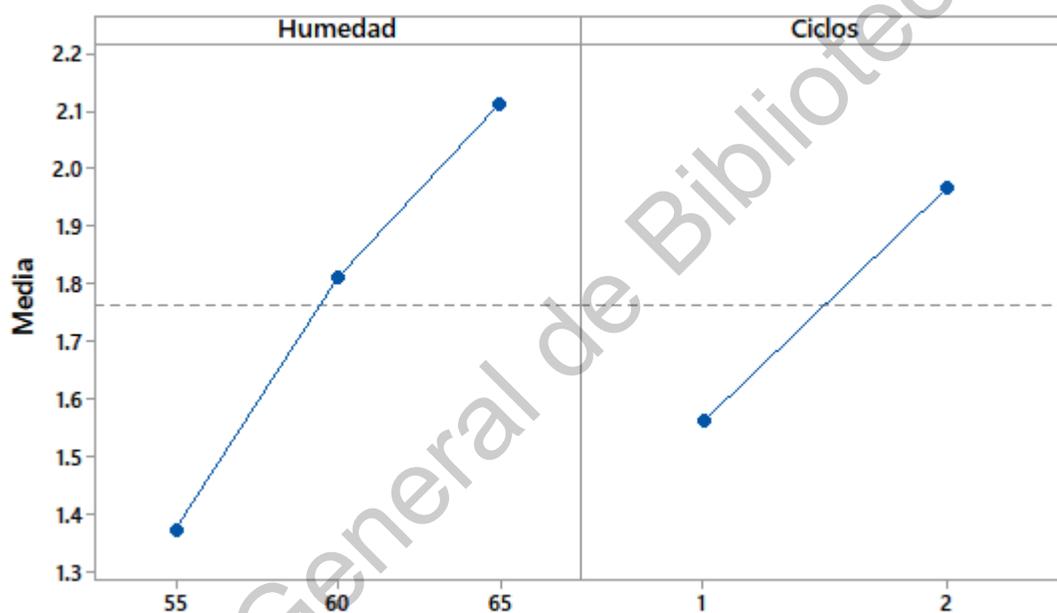


Figura 9. Efectos principales de los ciclos, el aditivo de maíz y aditivo contra el índice de expansión.

Los ciclos por el extrusor son una variable significativa, por lo que si estos aumentaran el índice de expansión podría incrementar, es por ello que se realizó un experimento pequeño con el fin de evaluar esa posibilidad, en donde se descubrió que al pasar la masa por más ciclos el producto sale expandido, posiblemente por la falta de humedad, lo que descarta la posibilidad de utilizarlo y se estandarizaron los ciclos en 2.

Por otra parte, al incrementar la humedad el índice de expansión aumenta, lo cual coincide con lo reportado por Kharat *et al.* (2018), por lo que se decide seguir evaluando esta variable.

6.3 Efecto de variables independientes en el proceso de extrusión sobre el índice de expansión de una botana de tercera generación.

Las variables comúnmente evaluadas en este proceso son las variables de humedad, velocidad y temperatura, por lo que partiendo de los resultados anteriores se evaluó la humedad en 80 y 100 %, la velocidad en 5 y 10 rpm y la temperatura entre 100 y 110 °C.

El análisis de varianza del diseño de experimentos realizado se muestra en la Tabla 10. Los tres factores lineales tienen efecto significativo tomando en cuenta un alfa de 5%, debido a que el P-value es 2.12×10^{-14} para la velocidad, 7.53×10^{-15} para la temperatura y 3.35×10^{-12} para la humedad. Las interacciones de segundo orden son significativas mientras que la interacción de tercer nivel no lo es. Por lo que se decidió continuar sin la interacción de tercer nivel para comprobar su efecto (Ver programación en R en Anexo 3).

Tabla 10. Análisis de varianza del diseño de experimentos.

	GL	SC	MC	F	P
Velocidad	1	3.634	3.634	653.060	2.12×10^{-14}
Temperatura	1	4.148	4.148	745.517	7.53×10^{-15}
Humedad	1	1.891	1.891	339.886	3.35×10^{-12}
Ve:Te	1	0.428	0.428	76.950	1.65×10^{-07}
Ve:Hu	1	0.360	0.360	64.745	5.14×10^{-07}
Te:Hu	1	0.492	0.492	88.450	6.41×10^{-08}
Ve:Te:Hu	1	0.002	0.002	0.298	0.593
Residuals	16	0.089	0.006		

Donde: GL representa los grados en libertad, SC suma de cuadrados, MC los cuadrados medios, F el valor estadístico y P el P-value.

La Tabla 11 muestra el análisis de varianza reducido, donde se puede observar que las tres variables (velocidad, temperatura y humedad) junto con sus interacciones son significativas por tener un P-value menor al Alpha de 5%.

Tabla 11. Análisis de varianza reducido del diseño de experimentos

	GL	SC	MC	F	P
Velocidad	1	3.634	3.634	681.19	3.72 e ⁻¹⁵
Temperatura	1	4.148	4.148	777.63	1.24 e ⁻¹⁵
Humedad	1	1.891	1.891	354.52	8.00 e ⁻¹³
Ve:Te	1	0.428	0.428	80.26	7.56 e ⁻⁰⁸
Ve:Hu	1	0.360	0.360	67.53	2.53 e ⁻⁰⁷
Te:Hu	1	0.492	0.492	92.26	2.79 e ⁻⁰⁸
Residuals	16	0.089	0.006		

Donde: GL representa los grados en libertad, SC suma de cuadrados, MC los cuadrados medios, F el valor estadístico y P el P-value.

El efecto que tienen las variables de velocidad (Ve), temperatura (Te) y humedad (Hu) sobre el índice de expansión, se muestra en la Figura 10. Los resultados indican que la botana tiene un mayor índice de expansión utilizando una velocidad de 10 rpm, una temperatura de 110 °C y una humedad del 80%.

En la Tabla 12 se muestran los índices de expansión de cada corrida, donde podemos observar que la corrida 4 muestra la mayor expansión con 3.31 ± 0.11 , trabajando con 80% de humedad, 110 °C y 10 rpm. Mientras que la corrida con una menor expansión fue la 5 con 1.16 ± 0.05 trabajando con 100% de humedad, 100 °C y 5 rpm. También se observa que al incrementar la velocidad y la temperatura aumenta el índice de expansión.

Tabla 12. Efecto de las variables independientes en el índice de expansión de una botana de tercera generación obtenida por extrusión.

Corrida	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	Resultado
1	80	100	5	1.1772 ± 0.05 ^c
2	80	100	10	1.9499 ± 0.13 ^c
3	80	110	5	2.0446 ± 0.03 ^{bc}
4	80	110	10	3.3184 ± 0.11 ^a
5	100	100	5	1.1638 ± 0.05 ^e
6	100	100	10	1.4132 ± 0.07 ^d
7	100	110	5	1.4251 ± 0.05 ^d
8	100	110	10	2.2421 ± 0.06 ^b

Se presenta la media ± la desviación estándar de ocho muestras independientes. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$).

Por otro lado, la Figura 11 muestra las gráficas de interacciones de las variables, en la primera interacción se puede observar que para los dos niveles de humedad se trabaja mejor con 110 °C y que la humedad de 80% fue la que presenta mayor expansión. En la segunda gráfica se puede observar que de igual manera se trabaja mejor con una humedad del 80% y que las botanas expandieron más al correrlas a 10 rpm. Por último, en la tercera gráfica, se muestra nuevamente que a la velocidad de 10 rpm tienen mejor rendimiento, y de igual manera la temperatura de 110 °C tuvo un mayor rendimiento. Con estas gráficas podemos corroborar con que los mejores niveles para trabajar son 80% de humedad, 110°C en la temperatura y a una velocidad de 10 rpm.

La ecuación que representa el modelo se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
 IE = & -27.49 - 0.525 \text{ Velocidad} + 0.2608 \text{ Temperatura} \\
 & + 0.3094 \text{ Humedad} + 0.01069 \text{ Velocidad} * \text{ Temperatura} \\
 & - 0.004901 \text{ Velocidad} * \text{ Humedad} - 0.002864 \text{ Temperatura} \\
 & * \text{ Humedad}
 \end{aligned}$$

La R cuadrada de la ecuación es de 99.19%, y ajustada es de 98.84%, por lo que la ecuación se considera predecible ya que su R es muy cercana a 100%.

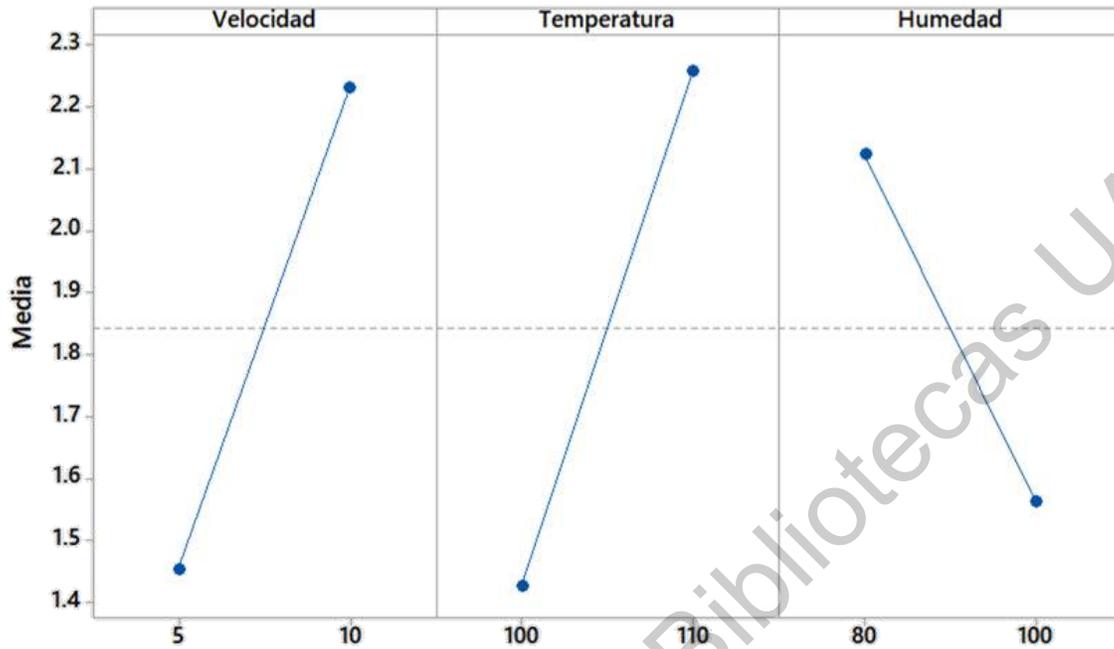


Figura 10. Efectos principales de las variables de velocidad, temperatura y humedad contra el índice de expansión.

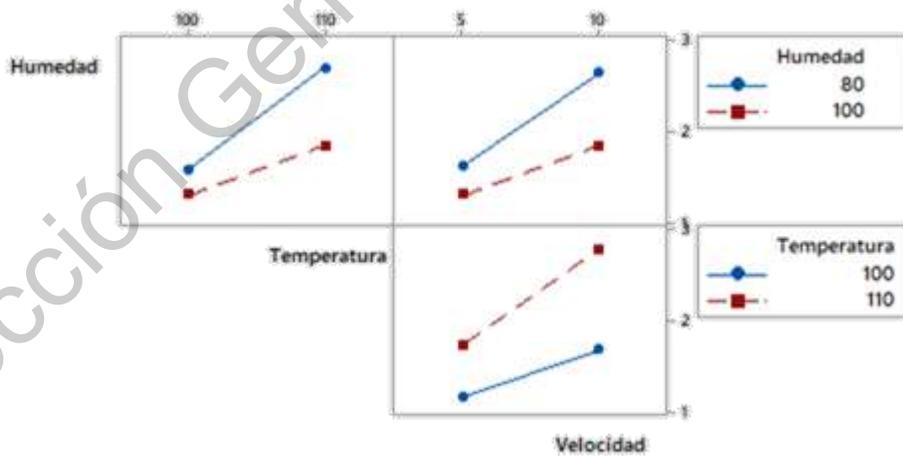


Figura 11. Interacción de las variables de independientes en el índice de expansión de una botana de tercera generación obtenida por extrusión.

Ruiz-Armenta *et al.* (2018) evaluaron el contenido de humedad y de bagazo naranjita deshidratado sobre el índice de expansión, sus resultados nos indican que el índice aumenta con un bajo contenido de humedad y aumentando la temperatura de extrusión. Camacho *et al.* (2014), llegaron a la misma conclusión, el índice de expansión aumenta con el aumento de la temperatura del barril y disminuye al incrementar la humedad, lo mismo que pasa en este proyecto.

Por otra parte, Polizko *et al.* (2019) mencionan que, con un incremento de temperatura, el proceso de gelificación del almidón es más efectivo, por lo tanto, se obtienen productos mayormente expandidos, demostrando que es mejor manejar temperaturas altas para obtener una mayor expansión.

En cambio, Kharat *et al.* (2018) reportan que, para la elaboración de botanas adicionadas con diferentes mijos, la relación de expansión aumentó cuando aumentó la temperatura, la humedad de alimentación y la velocidad, difiriendo en la conclusión respecto a la humedad, pues ellos reportan que hay una mayor expansión cuando aumenta la humedad de alimentación. Philipp *et al.* (2018) obtuvieron una mayor expansión al aumentar la velocidad del proceso de extrusión.

6.4 Optimización del modelo.

Una vez evaluado el proceso de extrusión, se determinó un modelo que representa el proceso. A continuación, se muestra una gráfica que evalúa los valores reales de experimentación contra los del modelo.

En la Tabla 13 se muestran los valores de las corridas experimentales con sus respectivos valores reales, así como los valores modelados (los provenientes del modelo del proceso). Los cuales tienen una correlación de Pearson de 0.99 con un P-value de $8.85e^{-11}$, lo que indica que los datos son muy similares entre sí (Ver programación de R en Anexo 4).

Tabla 13. Resultados reales contra modelados.

Velocidad (rpm)	Temperatura (%)	Humedad (%)	IE Real	IE Modelado
5	100	80	1.1772	1.1896
10	100	80	1.9499	1.9492
5	110	80	2.0446	2.0409
10	110	80	3.3184	3.335
5	100	100	1.1638	1.1595
10	100	100	1.4132	1.429
5	110	100	1.4251	1.438

Donde: Ve representa la velocidad, Te la temperatura, Hu la humedad e IE el índice de expansión.

Optimizando el proceso (dentro de los límites definidos por la experimentación anterior) se obtiene como resultado una IE de ajuste (la máxima para el modelo) es de **3.32** utilizando una velocidad de 10 rpm, una temperatura de 110 °C y una humedad del 80%.

Como la expansión máxima para el modelo del proceso es de 3.32 es necesario extrapolar los resultados, con el fin de identificar si existe una zona donde se pueda obtener un índice de expansión igual o mayor a 4, para el cual se proponen las corridas de la Tabla 14.

Tabla 14. Evaluación de niveles fuera del modelo.

Velocidad (rpm)	Temperatura (%)	Humedad (%)	IE Modelado	Límites	Deseabilidad
15	120	80	6.47	[6.01513, 6.92487]	0.999718
15	110	80	4.59	[4.39324, 4.80009]	0.999257
10	120	80	4.69	[4.48657, 4.89343]	0.999313
15	115	80	5.53	[5.21169, 5.85498]	0.999592

La Tabla 15 muestra los resultados de la experimentación de la extrapolación del modelo, donde se puede observar que para la corrida 1 y 4 no se logró el índice de expansión requerido, esto se puede deber a que al trabajar con temperaturas arriba de 110 °C y a una velocidad arriba de 10 rpm el producto no es uniforme, por lo que su IE se ve afectado. Por

otro lado, las corridas 2 y 3 mostraron buenos resultados. Relacionando todos los resultados con los valores modelados tenemos un P-value de 0.7667 y una correlación de -0.0959, por lo que no se pudiera predecir, pero al utilizar solo los datos de las corridas 2 y 3, se obtiene una correlación de 0.8894 y un p-value de 0.0176, por lo que se puede concluir que esas corridas están correlacionadas al modelo del proceso de extrusión. (Anexo 5 para ver programación en R).

Tabla 15. Resultados de la experimentación de la extrapolación del modelo

Velocidad (rpm)	Temperatura (%)	Humedad (%)	IE Modelado	IE Real
15	120	80	6.47	4.49 ± 1.16
15	110	80	4.59	4.56 ± 0.02
10	120	80	4.69	4.71 ± 0.06
15	115	80	5.53	4.65 ± 0.51

6.5 Documentar el procedimiento para la elaboración de la botana.

Por todo lo anteriormente discutido las condiciones de procesamiento se estandarizaron en 10 rpm, 120 °C y 80 % de humedad, teniendo como resultado un índice de expansión de 4.71 ± 0.06 (Ver Archivo de procedimiento).

Costos de inversión

Los costos para la inversión inicial incluyen la maquinaria necesaria (extrusor, deshidratadores, máquinas de aire caliente, empacadora, batidora, parilla eléctrica), así como la contratación de servicios, capacitación del personal y el arranque del proyecto, dando un total de \$160,220.00.

Tomando en cuenta que el 10 % de la población de la universidad (aproximadamente 3,000 personas) consumirá el producto y el consumo per cápita de las botanas en México (2.8 kg/ año) se tiene una demanda de 24,000 botanas al mes, las cuáles dan una utilidad de \$6.60

c/u, por lo que mensualmente se tendría una utilidad de \$158,395.60. Ver resultados completos en Anexo 6.

VII. Conclusiones

El método de índice de expansión usado para medir la calidad de una botana de tercera generación es confiable, debido a que la variable que más contribuye a la variación es la parte a parte con un 99.05 %, mientras que el sistema RR tiene un aporte del 13.3 %, además el sistema tiene la capacidad de distinguir entre 10 partes.

Los ciclos que se le dan a la masa por el extrusor son significativos, debido a que aumenta la gelatinización del almidón, lo que influye significativamente en el índice de expansión de la botana. Éstos se estandarizaron en 2, debido a que tuvieron un mejor desempeño.

Las variables de temperatura, humedad y velocidad son significativas para el proceso de extrusión. El índice de expansión aumenta cuando la temperatura y la velocidad incrementan, mientras que al aumentar la humedad este índice disminuye.

Las condiciones óptimas de procesamiento se definieron en 80 % de humedad del producto, una temperatura de 120 °C para la segunda zona de calentamiento y una velocidad de 10 rpm, dando como resultado un índice de expansión de 4.71 ± 0.06 , por lo que se comprueba la hipótesis nula y se cumple con el objetivo del proyecto.

VIII. Referencias

Aguilera, N., Rodríguez, R., Sansores, D., & Gutiérrez, C. (2017). Impuestos en botanas. Su impacto en precio y consumo en México.

Anton A, Gary Fulcher R, & Arntfield S. (2009). Physical and nutritional impact of

fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. *Food Chemistry*, 113(4), 989–996. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.050>

Automotive Industry Action Group (AIAG) (2010). *Measurement Systems Analysis Reference Manual*, 4th edition. Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force.

Avalos-Esparza, LM., Gaytan-Martinez, M., Morales-Sanchez, E., Reyes-Vega, ML. (2018). Effect of Chickpea in the Physicochemical And Sensorial Properties of Third Generation Extruded Snacks. *International Journal of Food Sciences and Research*.

Bhat, N. A., Wani, I. A., Hamdani, A. M., & Gani, A. (2019). Effect of extrusion on the physicochemical and antioxidant properties of value added snacks from whole wheat (*Triticum aestivum* L.) flour. *Food Chemistry*, 276, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.170>

Camacho L, Zazueta J, Gallegos J, Aguilar E, Rocha N, Valenzuela J, & Gomez C. (2014). Effect of extrusion conditions on physicochemical characteristics and anthocyanin content of blue corn third-generation snacks. *Journal of Food*.

Cervantes-Ramírez J. E., Cabrera-Ramírez A. H., Morales-Sánchez E., Rodríguez-García M. E., Reyes-Vega M. L., Ramírez-Jiménez A. K., Contreras-Jiménez B. L., Gaytán-Martínez M. (2020). Amylose-lipid complex formation from extruded maize starch mixed with fatty acids, *Carbohydrate Polymers*, Volume 246, 116555, ISSN 0144-8617, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116555>

Chongjun, L., Kowalski, R., Lei, L., & Ganjyal, G. M. (2017). Extrusion Expansion Characteristics of Samples of Select Varieties of Whole Yellow and Green Dry Pea Flours. *Cereal Chemistry*.

Cortez, Ricardo, Castro-Rosas, Javier, Aguilar-Palazuelos, Ernesto, Rodríguez-Miranda, Jesus, Medrano Roldan, Hiram, Delgado, Efren, Acevedo, Otilio & Gomez-Aldapa, Carlos. (2014). *Alimentos Botana, Aceptabilidad y Nutrición Humana*. SN-978-607-

402-718-1.

Cubeddu, A., Rauh, C., & Delgado, A. (2014). Hybrid artificial neural network for prediction and control of process variables in food extrusion. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 21, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.10.010>

Diario Oficial de la Federación. (2010). NORMA Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5133449&fecha=01/03/2010

Euromonitor. (2015). *Reportes de investigación de mercado*. Retrieved from <https://www.euromonitor.com/es-reports>

Excelsior. (2015). No Title. Retrieved from <https://www.excelsior.com.mx/nacional/2015/06/25/1>

Fan, F. H., Ma, Q., Ge, J., Peng, Q. Y., Riley, W. W., & Tang, S. Z. (2013). Prediction of texture characteristics from extrusion food surface images using a computer vision system and artificial neural networks. *Journal of Food Engineering*, 118(4), 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.015>

Gaona-Pineda, Elsa B, Martínez-Tapia, Brenda, Arango-Angarita, Andrea, Valenzuela-Bravo, Danae, Gómez-Acosta, Luz M, Shamah-Levy, Teresa & Rodríguez-Ramírez, Sonia. (2018). Consumo de grupos de alimentos y factores sociodemográficos en población mexicana. *Salud pública Méx* 60 (3). <https://doi.org/10.21149/8803>.

García C, Carola. (2019). El consumo de los jóvenes mexicanos y la publicidad de alimentos de bajo valor nutritivo. *Brazilian Journal of Development*. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n6-204>.

Ghumman, A., Kaur, A., Singh, N., & Singh, B. (2016). Effect of Feed Moisture and Extrusion Temperature on Protein Digestibility and Extrusion Behavior of Lentil and Horsegram. *LWT - Food Science and Technology*.

Gutiérrez, H., & De La Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*.

Honi B, Mukisa I, & Mongi R. (2018). Proximate composition, provitamin A retention, and shelf life of extruded orange-fleshed sweet potato and bambara groundnut-based snacks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1), 1–8. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13415>

Huq, M., & Hossain, B. (2014). Processing and Characterization of Ready to Eat Co-Filled Single Screw Extrusion Technology. *LWT - Food Science and Technology*.

Kharat S, Medina-Meza I, Kowalski M, Hosamani A, Ramachandra C, Hiregourdar S, Ganjyal G. (2019). Extrusion processing characteristics of whole grain flours of select major millets (foxtail, finger, and pearl). *Food and Bioprocess Technology* (114) 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.07.002>

Kowalski, R. J., Li, C., & Ganjyal, G. M. (2018). Optimizing twin-screw food extrusion processing through regression modeling and genetic algorithms. *Journal of Food Engineering*, 234, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.004>

Kumar R, Xavier K, Lekshmi M, Dhanabalan V, Thachil M, Balange A, & Gudipati V. (2018). Development of functional extruded snacks by utilizing paste shrimp (*Acetes spp.*): process optimization and quality evaluation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(6), 2393–2401. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8731>

Menis-Henriquez M, Janzanti N, Andriot I, Sémon E, Berdeaux O, Schlich P, Conti-Silva AC. (2019). Cheese-flavored expanded snacks with low lipid content: Oil effects on the in vitro release of butyric acid and on the duration of the dominant sensations of the products. *LWT*, 105, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.052>

Morales S, Eduardo, Martínez F, Hector & Rodríguez V, Arturo. (2016). Evaluación nutricional de botanas y producto intermediarios a base de harina de trigo de alto consumo en México. *Revista multidisciplinaria de Avances de Investigación*. ISSN: 2448-5772.

Natabirwa H, Nakimbugwe D, Lung'aho M, & Muyonga J. (2018). Optimization of Robal

extrusion conditions and bean extrudate properties using response surface methodology and multi-response desirability function. *Lwt*, 96(April), 411–418. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.040>

Nawaz A, Xiongb Z, Lib Q, Xiong H, Irshadc S, Chena L, Wanga P, Zhanga M, Hinad S, Regensteine J. (2017). Evaluation of physico-chemical, textural and sensory quality characteristics of red fish meat based fried snacks. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9845>.

Nawaz A, Xiong Z, Xiong H, Chen L, Wang P, Ahmad I. (2019). The effects of fish meat and fish bone addition on nutritional value, texture and microstructure of optimised fried snacks. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 1045–1053. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13974>

Philipp C, Emin M, Buckow R, Silcock P, & Oey I. (2018). Pea protein-fortified extruded snacks: Linking melt viscosity and glass transition temperature with expansion behaviour. *Journal of Food Engineering*, 217, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.022>

Ramírez de León, José, Uresti, Rocio & Aldana, Lourdes (2013). Avances en ciencia y tecnología alimentaria en México. SN - 978-607-402-576-7. <https://doi.org/10.13140/2.1.3950.3683>.

Rodríguez, A. (2017). *Desarrollo de una botana expandible enriquecida baja en grasa*.

Roman, L., Gomez, M., Hamaker, B. R., & Martinez, M. M. (2018). Shear scission through extrusion diminishes inter-molecular interactions of starch molecules during storage. *Journal of Food Engineering*, 238(June), 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.019>

Ruiz-Armenta X, Zazueta-Morales J, Aguilar-Palazuelos E, Delgado-Nieblas C, López-Díaz A, Camacho-Hernández I, Martínez-Bustos F. (2018). Efecto de la extrusión sobre el contenido de carotenoides, propiedades físicas y sensoriales de alimentos botana adicionados con bagazo del fruto de naranjita: optimización del proceso. *CYTA - Journal of Food*, 16(1), 172–180. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1368717>

- Siddiq, M., Sogi, D., & Dolan, K. (2013). Antioxidant properties, total phenolics, and quality of fresh-cut “Tommy Atkins” mangoes as affected by different pre-treatments. *LWT - Food Science and Technology*.
- Socconini, L. (2015). *Lean Six Sigma Green Belt*. Barcelona: Marge Books.
- Valdés, E. (2009). *La actualidad del seguimiento de las botanas en México*.
- Yan, X., Ye, R., & Chen, Y. (2015). Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran. *Food Chemistry*, 180, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.127>
- Zhong, L., Patel, K., Al-Ali, H., Fang, Z., Wahlqvist, M. L., Hodgson, J. M., & Johnson, S. K. (2019). Extrusion cooking increases soluble dietary fibre of underutilised lupin seed coat 1. *LWT - Food Science and Technology*, 99(October 2018), 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.018>

IX. Anexos.

Anexo 1. Programación en R para análisis R y R del sistema de medición.

```
> library("qualityTools")
> diam = gageRRDesign(Operators=3,Parts=10,Measurements=3,randomize=FALSE)
>
> y <-c
(5.25,5.22,5.18,4.75,4.83,4.85,4.83,4.85,4.78,4.80,4.76,4.70,5.00,4.98,5.07,4.50,4.47,4.54,4
.62,4.57,4.53,5.80,5.77,5.74,5.16,5.23,5.11,5.22,5.13,5.17,5.33,5.21,5.17,4.82,4.75,4.78,4.8
1,4.75,4.87,4.75,4.83,4.82,4.99,4.90,4.97,4.42,4.47,4.54,4.52,4.57,4.63,5.83,5.71,5.83,5.16,
5.22,5.19,5.25,5.12,5.16,5.20,5.26,5.19,4.75,4.77,4.82,4.80,4.76,4.84,4.83,4.81,4.75,4.88,5.
03,5.07,4.57,4.44,4.40,4.62,4.57,4.58,5.71,5.76,5.75,5.33,5.14,5.17,5.29,5.28,5.19)
> response(diam)=y
```

```
> diam.f=as.data.frame(diam)
```

```
> diam.f
```

```
> gdo=gageRR(diam)
```

```
> plot(gdo)
```

Anexo 2. Programación en R para el análisis del diseño preliminar.

```
> require(DoE.base)
```

```
> factores<-list(Ci=c(1,2), Hu=c(55,60,65))
```

```
> fd<-fac.design(factor.names = factores,replications = 3,randomize = F)
```

```
> fd
```

```
>
(1.615,1.579,1.356,1.597,1.700,1.614,1.292,1.281,1.347,2.622,2.141,2.454,1.090,1.376,1.6
60,2.276,1.858,2.899)
y< -c
```

```
> FD<-add.response(design = fd,response = y)
```

```
> FD
```

```
> SS<-summary(aov(y~Ci*Hu,data = FD))
```

```
> SS
```

```
> plot.design(FD, fun="mean", main=" Gráfica de efectos principales", ylab= "Índice de
expansión", xlab="Factor")
```

Anexo 3. Programación en R del diseño experimental.

```
> require(DoE.base)
```

```

> factores<-list(Ve=c(5,10), Te=c(100,110), Hu=c(80,100))

> fd<-fac.design(factor.names = factores,replications = 3,randomize = F)

> fd

>
y<-
c(1.2087,2.0044,2.0110,3.2166,1.1412,1.4395,1.4740,2.3068,1.1991,1.8053,2.0522,3.3012,
1.1286,1.3325,1.4184,2.1980,1.1237,2.0401,2.0705,3.4373,1.2216,1.4677,1.3830,2.2215)

> FD<-add.response(design = fd,response = y)

> FD

> SS<-summary(aov(y~Ve*Te*Hu,data = FD))

> SS

> SS2<-summary(aov(y~Ve+Te+Hu,data = FD))

> SS2

> plot(allEffects(FD))

> plot.design(FD, fun="mean", main=" Gráfica de efectos principales", ylab= "Índice de
expansión", xlab="Factor")

> coefficients(FD)

```

Anexo 4. Correlación de los datos reales contra los modelados

```

> Real <- c(1.1772,1.9499,2.0446,3.3184,1.1638,1.4132,1.4251)

> Modelado <- c(1.1896,1.9492,2.0409,3.3350,1.1595,1.4290,1.4380)

> cor.test(Real,Modelado)

```

Anexo 5. Correlación de los datos reales contra los modelados de la extrapolación.

>Real<-c

(5.1793,4.5403,4.7747,4.7938,3.1503,4.5645,4.7277,5.0839,5.1578,4.5808,4.6454,4.0901)

> Modelado <-c (6.47,4.59,4.69,5.53,6.47,4.59,4.69,5.53,6.47,4.59,4.69,5.53)

> cor.test(Real,Modelado)

> Real <- c (4.5403,4.7747,4.5645,4.7277,4.5808,4.6454)

> Modelado <- c (4.59,4.69,4.59,4.69,4.59,4.69)

> cor.test(Real,Modelado)

Anexo 6. Estudio económico

Inversión inicial

Activos fijos	Precio unitario	Total
Maquinaria principal		\$137,720.00
1 Extrusor	\$50,000.00	\$50,000.00
10 Deshidratador	\$6,700.00	\$67,000.00
2 Maquina de aire caliente	\$560.00	\$1,120.00
1 Sellador automático (Empaquetado)	\$6,000.00	\$6,000.00
1 Batidora industrial	\$10,000.00	\$10,000.00
1 Parilla eléctrica	\$600.00	\$600.00
3 Juego de sartenes	\$1,000.00	\$3,000.00
Equipo de limpieza		\$3,000.00
		\$140,720.00
Activos diferidos		
Contratación de servicios		\$5,500.00
Capacitación de personal		\$6,000.00
Puesta en marcha		\$8,000.00
		\$19,500.00

TOTAL \$160,220.00

Pronóstico de la demanda

Población UAQ	30,000	Personas
Población que compre el producto (10%)	3,000	Personas
Consumo per cápita al mes.	8	Botanas/mes
Producción de botanas para cumplir la demanda	24,000	Botanas/mes
Producción semanal de botanas	6,000	Botanas/semana
Producción diaria de botanas	857.142857 ~ 858	Botanas/día

Costos de operación para un mes

	Precio unitario	Total
Materia prima		\$36,104.40
300 Harina de trigo	\$10.90	\$3,270.00
128 Harina de garbanzo	\$99.00	\$12,672.00
300 Almidón de maiz	\$60.00	\$18,000.00
1.6 Emulsificante	\$54.00	\$86.40
24 Sal	\$10.00	\$240.00
54 Azucar	\$34.00	\$1,836.00
Luz		\$5,000.00
Agua		\$1,000.00
Mano de obra		\$27,500.00
5 Operadores	\$5,500.00	\$27,500.00
Empaques/Etiquetas	\$500.00	\$12,000.00
		\$81,604.40
Costo de producción por botana		\$3.40

Ingresos mensuales según la demanda

24,000 botanas /mes	\$10.00	\$240,000.00
	Utilidad	\$158,395.60

MAQUINARIA

Extrusor

Capacidad de producción	110 Botanas/hora
Capacidad de botanas en un día	880 Botanas/día

Deshidratador

Deshidratadores para cumplir la demanda 9.53333333 ~ **10 Deshidratadores**

Máquina de aire caliente

Capacidad de máquina de aire caliente	2 botanas/min	*Se debe dejar
Botanas producidas en turno de 8 horas	60 Botanas/hora	descansando el
		deshidratador
		por 1 min antes
		de usarlo
Capacidad de botanas en un día	480 Botanas/día	nuevamente.

Máquina para empaque

Selladora automática	12 metros/min
----------------------	---------------

MATERIA PRIMA

Harina de trigo	9768 g/858 botanas
	10 kg/día
	300 kg/mes

Almidón de maíz	9768 g/858 botanas
	10 kg/día
	300 kg/mes

Harina de garbanzo	4224 g/858 botanas
	4.25 kg/día
	127.5 kg/mes

Azúcar	1796 g/858 botanas
	1.796 kg/día
	53.88 kg/mes

Sal	792 g/858 botanas
	0.792 kg/día
	23.76 kg/mes

Emulsificante	52.8 g/858 botanas
	1584 g/mes

Bolsas con etiquetado

Bolsas con etiquetado	1,000 Bolsas etiquetadas/rollo
Rollos por mes	24 rollos/ mes

Dirección General de Bibliotecas UAQ