



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN ALIMENTOS

Título del proyecto de tesis:

Desarrollo y caracterización de un alimento tipo botana de segunda generación elaborado a partir de harina de maíz rojo (*Zea mays L.*) y amaranto (*Amaranthus hypochondriacus L.*) adicionado con polvo de cúrcuma (*Curcuma longa L.*)

PRESENTA:

JESICA FRAGOSO AMADOR

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RICARDO OMAR NAVARRO CORTEZ

ASESORES:

DR. APOLONIO VARGAS TORRES

DR. JUAN PABLO HERNÁNDEZ URIBE

DRA. HEIDI MARÍA PALMA RODRÍGUEZ

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hgo; México, junio de 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos

Academic Area of Agroindustrial engineering and Food Engineering

Tulancingo de Bravo, Hidalgo., a 10 de junio de 2026

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado

Directora de Administración Escolar de la UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado a la pasante de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos, **Jesica Fragoso Amador**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **“Desarrollo y caracterización de un alimento tipo botana de segunda generación elaborado a partir de harina de maíz rojo (*Zea mays* L.) y amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) adicionado con polvo de cúrcuma (*Curcuma longa* L.)”**, que después de revisarlo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del jurado:

PRESIDENTE Dr. Apolonio Vargas Torres
SECRETARIO Dr. Juan Pablo Hernández Uribe
VOCAL 1 Dr. Ricardo Omar Navarro Cortez
SUPLENTE 1 Dra. Heidi María Palma Rodríguez

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente

“Amor, Orden y Progreso”



Dra. Beatriz del Carmen Coutiño Laguna
Coordinadora Ingeniería en Alimentos

“Amor, Orden y Progreso”

Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo, Santiago
Tulantepec. C.P. 43775. Hidalgo, Mexico.
Teléfono: 7717172000 Ext. 42021
ricardo_navarro@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx



DEDICATORIA

Dedico esta tesis principalmente a mis padres Ma. Felix y Eugenio, por su apoyo incondicional, tanto económico como emocional, y por todos los sacrificios que realizaron para hacer posible la culminación de mis estudios. Gracias por creer siempre en mí, por motivarme a seguir adelante y por ser el pilar fundamental en cada etapa de mi vida.

A mis hermanos Miguel, y a mi también colega, Emmanuel, por su apoyo constante y por acompañarme siempre en este camino. Gracias por compartir conmigo tus conocimientos, experiencias y enseñanzas, las cuales han sido de gran inspiración durante mi formación.

A mi tía Juana y primo Santiago, por apoyarme y acompañarme durante mi etapa universitaria, sin su ayuda no hubiera sido fácil el camino, gracias por estar siempre cuando más lo necesite.

A mis amigos, quienes estuvieron presentes durante toda mi etapa universitaria y en el proceso de titulación. Gracias por cada palabra de aliento, por su amistad sincera y por acompañarme en este importante camino.

A mis profesores, especialmente a mi director de tesis, el Dr. Ricardo Navarro, por la confianza brindada, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencia, y por guiarme para hacer de este trabajo un proyecto más satisfactorio y enriquecedor.

Asimismo, agradezco al Dr. Juan Pablo, a la Dra. Heidi y al Dr. Apolonio, por todo el apoyo, orientación y ayuda brindada durante el desarrollo de este proyecto de tesis, especialmente en mis dudas y necesidades dentro del laboratorio.

Finalmente, agradezco profundamente a Dios por darme la oportunidad de alcanzar este gran logro, tan significativo e importante para mi vida. Gracias por darme fortaleza, esperanza y por no permitirme dejar de creer en mí misma. Gracias por acompañarme y ayudarme a culminar esta etapa tan importante.

Gracias a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a hacer realidad este sueño.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN.....	3
III. MARCO TEÓRICO.....	5
1. Alimentos tipo botana	5
1.1 Antecedentes y definición.....	5
1.2 Clasificación de los alimentos tipo botana.....	5
1.3 Consumo de alimentos tipo botana en México	6
2. Materias primas para la elaboración de alimentos extruidos tipo botana.....	6
2.1 Generalidades de las materias primas	6
3. Amaranto	7
3.1 Importancia y relevancia del amaranto.....	7
3.2 Morfología de la planta de las principales especies de amaranto de grano.....	8
a. <i>Amaranthus cruentus</i> L.	8
b. <i>Amaranthus caudatus</i> L.	8
c. <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L.	9
3.3 Grano de amaranto	10
3.4 Composición nutrimental del grano de amaranto	11
a. Proteínas.....	11
b. Grasas.....	11
c. Minerales.....	12
d. Vitaminas	12
e. Carbohidratos.....	12

f. Fibra dietética.....	13
g. Metabolitos secundarios (fitoquímicos)	13
3.5 Propiedades funcionales del amaranto en alimentos.	13
3.6 Importancia nutricional y aplicaciones tecnológicas del amaranto	14
4. Maíz rojo	15
4.1 Importancia y relevancia del maíz	15
4.2 Morfología y estructura del grano de maíz	15
4.3 Almidón de maíz.....	16
4.4 Composición nutricional y propiedades funcionales	18
4.5 Aplicaciones del maíz en alimentos.....	20
5. Cúrcuma	20
5.1 Composición y propiedades funcionales de la cúrcuma.....	21
5.2 Propiedades tecnológicas de la cúrcuma como aditivo alimentario	22
6. Elaboración de botanas extruidas.....	22
6.1 Principios del proceso de extrusión	22
6.2 Tipos de extrusores.	23
6.2.1 Extrusor de tornillo simple	23
6.2.2 Estructura de un extrusor de tornillo simple	25
6.2.3 Ventajas del extrusor de tornillo simple.....	26
6.3 Aplicaciones de la extrusión en alimentos	27
6.4 Condiciones de la materia prima para el proceso de extrusión	27
6.5 Cambios en el alimento durante el proceso de extrusión	28
6.5.1 Cambios estructurales del almidón durante la extrusión	28
6.5.2 Cambios estructurales de las proteínas durante la extrusión.....	29
6.5.3 Cambios estructurales de la grasa durante la extrusión	29
6.5.4 Cambios estructurales de la fibra durante la extrusión	30
6.5.5 Efecto del agua durante la extrusión	31
6.6 Parámetros que afectan el proceso de extrusión	31
7. Alimentos funcionales	32

7.1 Antocianinas	33
IV. OBJETIVOS	37
Objetivo general.....	37
Objetivos específicos	37
V. MATERIALES Y MÉTODOS	38
1. Obtención de la materia prima	38
2. Acondicionamiento de la materia prima	38
3. Diseño experimental para la obtención de productos extruidos.....	38
4. Preparación de la materia prima	38
5. Proceso de extrusión	40
6. Análisis proximal de la materia prima	40
6.1. Humedad.....	40
6.2. Grasa	42
6.3. Proteína.....	42
6.4. Fibra cruda	43
6.5. Cenizas	44
7. Análisis fisicoquímicos de los productos extruidos	45
7.1. Índice de expansión (IE).....	45
7.2. Densidad aparente (DA).....	45
7.3. Índice de absorción en agua (IAA) e Índice de solubilidad (ISA).....	46
7.4. Determinación de la diferencia total de color (ΔE)	46
8. Análisis funcional de los productos extruidos	49
8.1. Determinación de antocianinas monoméricas totales (CAT).....	49
8.2. Cuantificación de fenoles totales (FT)	49

9. Análisis estadístico	51
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
1. Análisis proximal de la materia prima	52
2. Modelo matemático de las variables de respuesta	52
3. Análisis de varianza de los modelos ajustados para las respuestas evaluadas	
53	
3.1. Coeficiente de regresión o determinación (R ²) en el ANDEVA.....	54
3.2. Prueba de falta de ajuste	54
3.3. Precisión adecuada.....	55
4. Análisis fisicoquímico de los productos extruidos	58
4.1. Índice de expansión (IE).....	58
4.2. Densidad aparente (DA).....	62
4.3. Índice de absorción en agua (IAA)	64
4.4. Índice de solubilidad en agua (ISA).....	68
4.5. Diferencia total de color (ΔE).....	71
5. Análisis funcionales de los productos extruidos.....	75
5.1. Contenido de Antocianinas Monoméricas Totales (CAT).....	75
5.2. Contenido de Fenoles Totales (CFT)	80
VII. CONCLUSIONES.....	84
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. (a) hábito, (b) bráctea, (c) tépalo, (d) flor masculina, (e) flor femenina. Fuente: (Das, 2016)	9
Figura 2. <i>Amaranthus caudatus</i> L. (a) hábito, (b) bráctea, (c) tépalo, (d) flor masculina, (e) flor femenina. Fuente: (Das, 2016)	10
Figura 3. <i>Amaranthus cruentus</i> L. (a) hábito, (b) una pequeña parte de inflorescencia, (c) bráctea, (d) bractéola, (e) tépalo, (f) flor masculina, (g) flor femenina. Fuente: (Das, 2016)	10
Figura 4. Corte longitudinal del grano de amaranto. a. cubierta (episperma), b. endosperma, c. embrión (cotiledones), d. perisperma. Fuente: (Nieto Cabrera, 1989).....	11
Figura 5. Morfología del grano de maíz. Fuente: Hosene y Delcour (2010).	17
Figura 6. Estructura química de componentes del almidón. Fuente: Díaz-Ortega (2020).	17
Figura 7. Estructura básica de un extrusor de tornillo simple. Fuente: Berk, (2013).	25
Figura 8. Diagrama de flujo general para el procesamiento de un alimento tipo botana extruido a partir de harina de maíz rojo, amaranto y cúrcuma en polvo.....	41
Figura 9. Coordenadas del color de acuerdo al sistema Hunter Lab. Fuente: Mathias Rettig y Ah Hen, (2014).....	48
Figura 10. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre el índice de expansión (IE) de los productos extruidos obtenidos a partir de maíz rojo-amaranto adicionados con polvo de cúrcuma.	60
Figura 11. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre la densidad aparente (DA) de los productos extruidos.	63
Figura 12. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre el índice de absorción en agua (IAA) de los productos extruidos.	67
Figura 13. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre el índice de solubilidad en agua (ISA) de los productos extruidos.....	70
Figura 14. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre la diferencia total de color (ΔE) de los productos extruidos.	74

Figura 15. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre el contenido de antocianinas totales (CAT) de los productos extruidos.....	79
Figura 16. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre el contenido de fenoles totales (CFT) de productos extruidos.	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición proximal del grano de amaranto de la especie <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L.	14
Tabla 2. Composición proximal del grano de maíz dentado.....	19
Tabla 3. Composición nutrimental de <i>Curcuma longa</i> L.....	21
Tabla 4. Clasificación general de los fitoquímicos.....	33
Tabla 5. Diseño de experimentos central compuesto rotatable para la obtención de productos extruidos a partir de harina de maíz rojo y amaranto con dos variables independientes (temperatura del dado de salida (°C) y concentración de amaranto (%)) con un $\alpha=1.414$	39
Tabla 6. Análisis químico proximal de la harina de maíz rojo, harina de amaranto y polvo de cúrcuma.....	53
Tabla 7. Análisis de varianza de la respuesta índice de expansión (IE) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.....	56
Tabla 8. Análisis de varianza de la respuesta densidad aparente (DA) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.....	57
Tabla 9. Coeficientes de regresión del modelo cuadrático ajustado y nivel de significancia para las variables de respuestas índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), índice de absorción en agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), diferencia total de color (ΔE), contenido de fenoles totales (CFT) y antocianinas totales (CAT) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.	59
Tabla 10. Análisis de varianza de la respuesta índice de absorción en agua (IAA) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.....	65

Tabla 11. Análisis de varianza de la respuesta índice de solubilidad en agua (ISA) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.	69
Tabla 12. Análisis de varianza de la respuesta diferencia total de color (ΔE) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.	72
Tabla 13. Análisis de varianza de la respuesta contenido de antocianinas totales (CAT) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.	77
Tabla 14. Análisis de varianza de la respuesta contenido de fenoles totales (CFT) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.	81

I. RESUMEN

El consumo de botanas en México se ha incrementado en los últimos años como resultado de los cambios en los hábitos alimentarios de la población, la cual prefiere productos de fácil acceso, que satisfagan una necesidad inmediata y resulten sensorialmente atractivos. La creciente demanda de botanas de segunda generación ha impulsado el desarrollo de investigaciones orientadas al uso de ingredientes que aporten valor nutricional y funcional, de modo que estos productos no solo cumplan la función de aperitivo, sino que también generen un efecto benéfico en el organismo del consumidor.

El maíz es el ingrediente más utilizado en la elaboración de botanas extruidas, debido a su alto contenido de almidón, el cual es responsable de la gelatinización de la masa y de la expansión del producto durante el proceso de extrusión. No obstante, es posible incorporar otros ingredientes que complementen su perfil nutricional. Tal es el caso del amaranto, el cual constituye una buena fuente de proteínas y aminoácidos esenciales, como la lisina, aminoácido limitante en el maíz.

Asimismo, pueden añadirse ingredientes funcionales con el fin de otorgar un valor nutracéutico al producto y mejorar sus características sensoriales, particularmente el color, como ocurre con el polvo de cúrcuma. Por otra parte, el uso de maíces pigmentados, como el maíz rojo, en la elaboración de botanas extruidas aporta propiedades nutracéuticas al producto final, debido a la presencia de antocianinas localizadas en el pericarpio del grano.

Sin embargo, se sabe que las antocianinas y los compuestos fenólicos son sensibles a las altas temperaturas, por lo que resulta importante evaluar el efecto de las condiciones del proceso sobre su estabilidad. En este sentido, la presente investigación evaluó el efecto de la temperatura y de la concentración de amaranto sobre las características fisicoquímicas y funcionales de un producto extruido.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la temperatura (120–160 °C) y de la concentración de amaranto (50–100 %) durante el proceso de extrusión sobre las propiedades fisicoquímicas de productos extruidos de segunda generación

elaborados a partir de harina de maíz rojo, amaranto y cúrcuma. Los productos fueron elaborados en un extrusor de laboratorio de tornillo simple, utilizando un diseño central compuesto rotatable para el análisis estadístico de los datos.

Las propiedades fisicoquímicas evaluadas fueron: índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), diferencia total de color (ΔE), densidad aparente (DA) e índice de expansión (IE). Los resultados mostraron que las mayores concentraciones de amaranto dieron lugar a productos con menor índice de expansión y mayor densidad aparente. Los valores de IAA fueron mayores a bajas concentraciones de amaranto y altas temperaturas, mientras que el ISA se vio afectado principalmente por la concentración de amaranto. La diferencia total de color presentó valores más elevados a altas concentraciones de amaranto y temperaturas elevadas. Asimismo, se obtuvieron mayores contenidos de antocianinas y fenoles totales a bajas temperaturas y menores concentraciones de amaranto.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el uso de harina de maíz rojo, amaranto y polvo de cúrcuma como materias primas resulta favorable para la elaboración de botanas de segunda generación con características fisicoquímicas y funcionales aceptables, representando una alternativa viable para el desarrollo de productos con valor agregado.

II. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la producción y consumo de botanas o snacks, han ido en aumento debido a la demanda de productos que se adapten a las preferencias y necesidades dietéticas individuales de los consumidores. Esta tendencia ha motivado a la industria alimentaria a desarrollar productos con un perfil nutricional mejorado, caracterizados por disminuir el contenido de grasa y sodio, e incrementando el contenido proteína y fibra dietética; así como, el uso de aditivos clasificados como GRAS. De esta manera, no solo se busca satisfacer las expectativas sensoriales del consumidor, sino también ofrecer productos con valor nutricional y funcional agregado (Serna Saldívar, 2022). El término snack se utiliza de manera equivalente a botana, refiriéndose a productos alimenticios listos para consumo entre comidas que combinan conveniencia y aspectos sensoriales por parte del consumidor (Félix Medina et al., 2020).

El proceso de extrusión es una tecnología eficiente y versátil ampliamente aplicada en la elaboración de botanas de segunda generación, debido a que permite transformar mezclas de materiales en productos expandidos con propiedades fisicoquímicas y texturales deseadas. Este proceso continuo de alta temperatura y cizallamiento mejora características como expansión, textura y digestibilidad, y facilita la incorporación de ingredientes funcionales, contribuyendo a la diversificación de productos saludables en el mercado. Estudios recientes demuestran que optimizar las variables del proceso de extrusión puede incrementar el contenido de compuestos fenólicos y la actividad antioxidante de las botanas extruidas, al tiempo que se mantienen propiedades físicas aceptables para el consumidor (Sánchez Nuño et al., 2025; Félix Medina et al., 2020).

El uso de ingredientes con valor nutritivo y funcional, como el maíz rojo y el amaranto, responde a tendencias actuales de alimentación saludable. El maíz pigmentado, como el maíz rojo, contiene antocianinas y otros compuestos fenólicos que han sido asociados con propiedades antioxidantes y potenciales efectos protectores frente al estrés oxidativo y enfermedades crónicas, aspectos que van más allá de su valor meramente energético (Bello Pérez et al., 2016). Por su parte, el amaranto es un pseudocereal rico en proteínas de alta calidad, fibra dietética, vitaminas y minerales, y

posee compuestos bioactivos con actividad antioxidante y antiinflamatoria evidenciada en revisiones científicas recientes, lo que lo convierte en un insumo prometedor para el desarrollo de alimentos funcionales (Terzieva et al., 2026).

La cúrcuma (*Curcuma longa*), por su parte, ha sido ampliamente estudiada por su principal compuesto bioactivo, la curcumina, con reconocidas propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y funcionales, además de su uso tradicional como colorante natural en alimentos procesados debido a su pigmentación amarilla característica. Esto la convierte en un ingrediente funcional atractivo para la formulación de productos extruidos nutraceuticos.

La literatura científica indica que la formulación con ingredientes funcionales combinados y la manipulación de parámetros de extrusión (como temperatura, humedad y proporción de ingredientes) influyen de manera significativa en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los productos extruidos. Por ejemplo, estudios han reportado que mezclas de harinas funcionales pueden mejorar el contenido de compuestos saludables (como fenoles totales y capacidad antioxidante) y que variables de proceso como temperatura y velocidad de tornillo modulan aspectos como expansión, densidad, dureza y retención de compuestos bioactivos (Sánchez Nuño et al., 2025; Ramos Diaz et al., 2015).

Estos hallazgos destacan la importancia de un enfoque integral para desarrollar botanas extruidas con beneficios nutricionales y funcionales, como el producto propuesto en esta tesis.

III. MARCO TEÓRICO

1. Alimentos tipo botana

1.1 Antecedentes y definición

En la literatura científica, el término snack se emplea para describir a los alimentos tipo botana, los cuales se definen como alimentos ligeros que son consumidos entre periodos de comidas regulares (Lusas y Rooney, 2001). Generalmente se consumen en cantidades pequeñas y son productos listos para consumir, que pueden ser salados o dulces, además de que son bajos en contenido de humedad y estables a temperatura ambiente (Serna Saldívar, 2022).

1.2 Clasificación de los alimentos tipo botana

La clasificación de los alimentos tipo botana suele basarse principalmente en su origen alimentario y en el proceso tecnológico utilizado para su elaboración. Aunque los cereales y tubérculos representan las materias primas más comunes, también existen alimentos botana formulados a partir de frutos secos, frutas y hortalizas. En función del procesamiento, la mayoría de estos productos se agrupan en botanas de primera, segunda y tercera generación (Serna Saldívar, 2022).

Las botanas de primera generación corresponden a productos de elaboración sencilla y mínima transformación. En este grupo se incluyen los granos enteros tostados, cacahuates, frutos secos, frutas o verduras deshidratadas, así como palomitas de maíz y papas fritas (Serna Saldívar, 2022).

Las botanas de segunda generación comprenden productos de forma simple obtenidos mediante extrusión directa o por procesos como laminado y horneado. Algunos ejemplos de estos son los totopos de maíz, hojaldres expandidos, papas fritas, barras de granola y panes tostados (Serna Saldívar, 2022).

Finalmente, las botanas de tercera generación se caracterizan por la incorporación de formulaciones con un mayor número de ingredientes y por requerir un proceso de fabricación en dos etapas. Primero, se producen pellets densos pregelatinizados mediante extrusión-cocción y modelado; posteriormente, estos pellets

son sometidos a fritura, horneado o cocción por microondas para obtener el producto final listo para consumo (Serna Saldívar, 2022).

1.3 Consumo de alimentos tipo botana en México

En México, el consumo de botanas ha crecido de forma sostenida en las últimas décadas, consolidándose como una parte importante de la dieta cotidiana de muchas personas. Según datos recientes, en 2025 el consumo promedio de botanas en el país se estimó en 10.9 kg por persona al año, cifra que supera, en más del doble el promedio mundial para ese mismo período (Santiago, 2025).

Este elevado consumo responde a múltiples factores, entre los que destacan cambios en los estilos de vida (como el ritmo de vida acelerado, la urbanización y la búsqueda de prácticas alimentarias convenientes), así como una oferta creciente y diversificada de productos (Statista, 2025).

En cuanto a las preferencias de los consumidores, cerca del 59 % de los mexicanos declara comprar botanas saladas, cifra cercana al promedio global. Entre los alimentos tipo botana más populares se encuentran las palomitas de maíz, seguidas por galletas saladas, crackers, botanas a base de papa, frutos secos y botanas a base de maíz (Innova Market Insights, 2024).

Además, en respuesta a cambios en estilos de vida y una creciente conciencia sobre salud y nutrición, hay un impulso genuino hacia botanas “más saludables”: que sean funcionales, con menor contenido de aditivos, elaboradas a base de ingredientes naturales, sin gluten o con valor agregado nutricional (Innova Market Insights, 2024).

2. Materias primas para la elaboración de alimentos extruidos tipo botana

2.1 Generalidades de las materias primas

Los cereales son las principales materias primas utilizadas en la elaboración de alimentos extruidos tipo botana debido a su alto contenido de almidón, el cual es el responsable de aportar estructura, expansión y textura a estos productos. Además, los cereales proporcionan cantidades moderadas de proteínas, niveles moderados de grasa, fibra, y bajos niveles de azúcares, vitaminas y minerales. Entre los cereales más

empleados en la formulación de botanas extruidas se encuentran el maíz, trigo, arroz y avena (Frame, 1994).

El amaranto ha sido incorporado de manera creciente en la elaboración de botanas extruidas debido a su elevado valor nutricional y a su capacidad para complementar el almidón de otros cereales durante el proceso de extrusión. Su aporte de proteínas, fibra dietética y compuestos bioactivos lo hace un ingrediente atractivo para el desarrollo de alimentos botana con un mejor perfil nutricional y características funcionales (Serna Saldívar, 2022).

La cúrcuma puede incorporarse como ingrediente funcional en la formulación de botanas extruidas con el fin de mejorar su color, capacidad antioxidante y valor nutracéutico. Su contenido de curcuminoides, particularmente la curcumina, permite desarrollar productos con propiedades bioactivas sin afectar el desempeño del almidón durante la extrusión, siempre que se utilicen proporciones moderadas dentro de la mezcla base. El uso de cúrcuma en alimentos se ha recomendado en buena medida debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y su estabilidad relativa en matrices extruidas (Amalraj et al., 2017).

3. Amaranto

3.1 Importancia y relevancia del amaranto.

El amaranto es una planta herbácea Dicotiledónea perteneciente a la familia Amaranthaceae, que ha sido cultivada desde épocas ancestrales en varias partes del mundo, siendo Asia y América los principales continentes donde se ha descubierto su origen desde hace miles de años (Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2010). El amaranto es considerado como un pseudocereal debido a que produce semillas con fuentes ricas de almidón similares a la quinoa y trigo sarraceno (Belton y Taylor, 2002).

Existen entre 60 y 70 especies de amaranto, las cuales se cultivan en todo el mundo y desarrollan en diferentes climas (templado, subtropical y tropical) (Fatuma et al., 2017). Sin embargo, son 3 especies de amaranto las que se utilizan para la producción de grano; *Amaranthus cruentus* L., originaria de América Central

(principalmente distribuida en Guatemala y el sureste de México), *Amaranthus caudatus* L., proveniente de los Andes y *Amaranthus hypochondriacus* L. cuyo origen se sitúa en México, donde actualmente es cultivado al igual que en los Himalayas de Nepal y en el sur de la India (Espitia Rangel et al., 2010).

En general, todos los tipos de plantas de la variedad de especies de amaranto maduran en un periodo corto que va desde los 75 a los 90 días, son resistentes a la sequía lo cual les permite crecer en cualquier tipo de suelo ya sea rico o pobre en nutrientes. Al igual que otros cultivos con metabolismo fotosintético C4, utiliza el CO₂ con alta eficiencia y reduce la pérdida de agua por transpiración, lo que le permite tolerar condiciones de calor y déficit hídrico (Belton y Taylor, 2002).

En cuanto al rendimiento de la cosecha del amaranto no se tienen cifras exactas, pero si se muestra un rendimiento potencial, aunque presenta pequeños inconvenientes en la recolección del grano, ya que al ser una semilla pequeña suele caerse de la planta y perderse fácilmente en el suelo (Belton y Taylor, 2002).

3.2 Morfología de la planta de las principales especies de amaranto de grano.

a. *Amaranthus cruentus* L.

Esta especie se cultiva en zonas cálidas de los estados mexicanos de Morelos, Puebla y Guerrero y se caracterizan por alcanzar una altura de 1.5 a 2.5 m, poseen hojas rómbicas que varían de color ya sea el verde, dorado, rosa, rojo o púrpura, con una inflorescencia apical predominante, como se aprecia en la **Figura 3**. Cada inflorescencia presenta de 36 a 56 panículas semicolgantes con 1 o 3 ramas cada una (Espitia Rangel et al., 2010). El color de las semillas varía del blanco al marfil con tintes rojizos o amarillentos, ocasionalmente son de un tono marrón oscuro con un tamaño de 1.2-1.6 mm de diámetro (Das, 2016).

b. *Amaranthus caudatus* L.

Esta especie tiene origen en la zona alta andina de Argentina, Perú y Bolivia, y se caracteriza por poseer inflorescencias colgantes de color rojo intenso con espigas o panículas colgantes, como se ilustra en la **Figura 2**. Es una planta anual erecta que crece

hasta 2 m, cuyas hojas son largas y pecioladas y da semillas brillantes de color blanco cremoso o gris con un borde grueso amarillo y un centro traslucido que llegan a medir de 0.75 a 1.25 mm de diámetro (Das, 2016).

c. *Amaranthus hypochondriacus* L.

Esta especie es la más robusta y de mayor rendimiento en comparación con las otras especies de amaranto de grano. Fue domesticado en el centro de México desde hace 1500 años, aunque tuvo origen en Centroamérica, actualmente se cultiva en la India mayormente. Puede crecer en climas secos y zonas tropicales a grandes altitudes. Es una planta herbácea anual erecta que alcanza una altura de 3 m, cuyos tallos son de color verde o púrpura rojizo, como se muestra en la **Figura 1**, que se ramifican en inflorescencias robustas con panículas erectas gruesas de colores rojo intenso y poco frecuente de color amarillo o verde. Las semillas son blancas, rosadas, negras o de color marrón rojizo y miden de 1-1.4 mm de diámetro (Das, 2016).



Figura 1. *Amaranthus hypochondriacus* L. (a) hábito, (b) bráctea, (c) tépalo, (d) flor masculina, (e) flor femenina. **Fuente:** (Das, 2016)



Figura 2. *Amaranthus caudatus* L. (a) hábito, (b) bráctea, (c) tépalo, (d) flor masculina, (e) flor femenina. **Fuente:** (Das, 2016)



Figura 3. *Amaranthus cruentus* L, (a) hábito, (b) una pequeña parte de inflorescencia, (c) bráctea, (d) bractéola, (e) tépalo, (f) flor masculina, (g) flor femenina. **Fuente:** (Das, 2016)

3.3 Grano de amaranto

Las semillas de amaranto, de aproximadamente 1 a 1.5 mm de diámetro, son de forma circular y presentan diversas coloraciones que varían entre blanco, amarillo, dorado, rosado, rojo y negro, dependiendo de la especie de la planta. Por su anatomía (**Figura 4**), el grano está compuesto de tres partes: el episperma, que es la cubierta o capa de células muy fina; la segunda capa, formada por los cotiledones, que es la más rica en proteínas; y una última capa interna, rica en almidón, conocida como perisperma (Nieto Cabrera, 1989).

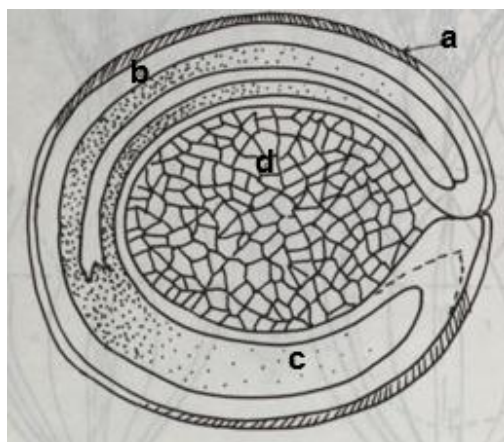


Figura 4. Corte longitudinal del grano de amaranto. a. cubierta (episperma), b. endosperma, c. embrión (cotiledones), d. perisperma. **Fuente:** (Nieto Cabrera, 1989).

3.4 Composición nutricional del grano de amaranto

a. Proteínas

Los granos de amaranto se caracterizan por su elevado contenido proteico, el cual oscila entre el 11.7 y 18.4%, superando al de otros cereales como el trigo, que aporta únicamente entre 8 y 16% de proteína (Añon, 2019). Del total de proteínas presentes en el amaranto, aproximadamente el 65% se localiza en el germen y en la cubierta de la semilla, mientras que el 35% restante se encuentra en el perispermo, una fracción rica en almidón. En cuanto a la fracción proteica, predominan las albúminas ($\approx 40\%$) y las globulinas ($\approx 20\%$), seguidas por las gluteninas (25-30%) y las prolaminas (2-3%). Dentro de estas, las globulinas destacan por su alta capacidad emulsificante (Belton y Taylor, 2002).

Desde el punto de vista nutricional, el amaranto presenta un contenido elevado del aminoácido esencial lisina, en concentraciones superiores a las de otros cereales e incluso a las de la soja. Asimismo, contiene arginina e histidina en menores proporciones, aminoácidos que resultan esenciales durante la etapa de lactancia (Belton y Taylor, 2002).

b. Grasas

El amaranto presenta una elevada concentración de grasas localizadas principalmente en el germen y en la cáscara de la semilla. La proporción de ácidos grasos saturados e insaturados es de 0.29 y 0.43 %, respectivamente. Entre los principales ácidos grasos presentes en el amaranto se encuentran los ácidos grasos saturados palmítico y esteárico, así como los ácidos grasos insaturados linoleico, oleico y linolénico. Asimismo, el aceite de semilla de amaranto se distingue por su alto contenido de escualeno, con valores que oscilan entre 7 a 8 % y hasta 11 %, superando ampliamente al aceite de oliva, el cual contiene aproximadamente 1 % de este compuesto (Das, 2016).

c. Minerales

El amaranto presenta un alto contenido de minerales como calcio, magnesio, hierro, potasio y zinc, los cuales se concentran principalmente en el salvado y germen del grano. No obstante, el contenido final de estos minerales puede variar en función de los distintos métodos de procesamiento a los que se somete el grano de amaranto, lo que puede influir en su disponibilidad y concentración (Belton y Taylor, 2002).

d. Vitaminas

El amaranto presenta un contenido de tiamina superior al del trigo, aunque menor en comparación con otros cereales. Constituye una buena fuente de riboflavina (vitamina B₂) y de ácido ascórbico (vitamina C). Asimismo, contiene vitamina E, reconocida por su efecto antioxidante, la cual contribuye a prolongar la estabilidad oxidativa del aceite (Belton y Taylor, 2002).

e. Carbohidratos

El amaranto presenta un menor contenido total de carbohidratos en comparación con el trigo. Dentro de los carbohidratos de bajo peso molecular se encuentran la sacarosa (1.08–2.26 %), la rafinosa (0.45–1.23 %) y, en menores proporciones, la estaquiosa (0.02–0.15 %) y la maltosa (0.02–0.36 %). El almidón constituye el principal componente de la fracción glucídica y se localiza en las células del perispermo en forma de pequeños gránulos. Cabe destacar que los gránulos de almidón de *Amaranthus hypochondriacus* pueden ser digeridos hasta cinco veces más rápido que los del almidón de maíz (Belton y Taylor, 2002).

f. Fibra dietética

El contenido de fibra dietética del amaranto es mayor en la fracción de salvado que en el perispermo. Las fracciones de fibra dietética insoluble varían entre 19.5 y 27.9 % en *A. cruentus* y entre 33.1 y 49.3 % en *A. hypochondriacus* (Belton y Taylor, 2002).

g. Metabolitos secundarios (fitoquímicos)

Los vegetales producen sustancias que son aprovechadas por el organismo humano como metabolitos primarios; sin embargo, también sintetizan metabolitos secundarios, conocidos como fitoquímicos, los cuales cumplen funciones específicas en la planta, aunque no son esenciales para el metabolismo humano. En la industria alimentaria, estas sustancias suelen eliminarse parcial o totalmente durante el procesamiento, por ejemplo, mediante el descascarado de las semillas. Tradicionalmente, los fitoquímicos han sido considerados compuestos indeseables debido a sus posibles efectos negativos sobre el valor nutricional o las características sensoriales de los alimentos. No obstante, investigaciones recientes indican que estos compuestos pueden ejercer efectos benéficos en el organismo cuando se consumen en concentraciones adecuadas, ya que, al igual que las vitaminas y los oligoelementos, presentan rangos de deficiencia, niveles óptimos y dosis potencialmente nocivas. Entre los principales fitoquímicos presentes en el grano de amaranto se encuentran el ácido fítico, los taninos y las saponinas (Belton y Taylor, 2002).

3.5 Propiedades funcionales del amaranto en alimentos.

El amaranto posee propiedades nutritivas y funcionales en la dieta de las personas con el fin de mantener su salud, ya que sus granos tienen un contenido de proteínas rico en aminoácidos y también presentan niveles favorables de vitaminas y minerales, y un alto contenido de fibra, lo que lo hace ideal para personas con enfermedades cardiovasculares, ya que el amaranto contiene sustratos nutricionales que reducen el riesgo de padecer estas enfermedades. Además, el amaranto no contiene gluten, lo que

lo hace adecuado para la dieta de personas con enfermedad celíaca o intolerancia al gluten (Espitia Rangel et al., 2010).

3.6 Importancia nutricional y aplicaciones tecnológicas del amaranto

El grano de amaranto contiene mayor porcentaje de proteína que el maíz, y es rico en lisina, un aminoácido limitante en otros cereales como el maíz, trigo y arroz. Según datos de la FAO/OMS, los niveles del contenido proteico recomendado es similar al contenido proteico total del grano de amaranto, aunque si se combina con otros cereales podría aumentar su calidad nutricional (Das, 2016).

Debido a su fácil digestión, el amaranto es un alimento que tiene un alto índice glucémico, por lo que es recomendable combinarlo con frutos secos, semillas, legumbres y verduras para aprovechar mejor sus beneficios. Asimismo, es buena fuente de fibra soluble (la cual reduce el colesterol) y de flavonoides y ácidos fenólicos que actúan como antioxidantes (Das, 2016). En la **Tabla 1** se muestra la composición proximal del grano de amaranto perteneciente a la especie *Amaranthus hypochondriacus* L.

Tabla 1. Composición proximal del grano de amaranto de la especie *Amaranthus hypochondriacus* L.

Componentes (g/100g)	<i>A. cruentus</i>	<i>A. caudatus</i>	<i>A. hypochondriacus</i>
Proteína cruda	13.8-21.5	13.1-21.0	15.0-16.6
Grasa cruda	5.6-8.1	5.8-10.9	6.1-7.3
Fibra cruda	3.1-4.2	2.7-4.9	4.9-5.0
Carbohidratos	63.1-70.0	63.7-76.5	67.9
Cenizas	3.0-3.8	2.5-4.4	3.3-3.4
Lisina	4.9-6.1	5.9	4.9-6.0
Escualeno (% en aceite)	2.2-6.9	3.8-6.7	1.9-4.6

Fuente: Das (2016)

Las propiedades tecnológicas del amaranto se deben principalmente al bajo peso de sus semillas y su alta capacidad de absorción de agua, lo que contribuye a que los productos, como el pan, se mantengan suaves y flexibles por más tiempo. Además, su pequeño tamaño le confiere una elevada solubilidad y digestibilidad. También presenta propiedades de gelatinización y resistencia a procesos de congelación y descongelación, lo que lo hace especialmente útil en la industria alimentaria (Das, 2016).

4. Maíz rojo

4.1 Importancia y relevancia del maíz

El maíz rojo (*Zea mays* L.) es una variedad pigmentada de maíz que se ha cultivado desde tiempos prehispánicos en América. Se considera originario de Mesoamérica, particularmente de la región que comprende el sur de México (regiones como Oaxaca, Chiapas, Puebla y el Estado de México) y partes de Centroamérica, donde fue domesticado a partir del teocintle hace aproximadamente 9,000 años (Matsuoka et al., 2002). En México, el maíz rojo forma parte de una amplia diversidad que comprende más de 60 razas nativas, y su cultivo se ha mantenido gracias al conocimiento tradicional de las comunidades campesinas (SAGARPA y CONABIO, 2012).

Desde la perspectiva alimentaria e industrial, el maíz representa una fuente esencial de carbohidratos, principalmente en forma de almidón, lo que le confiere un papel relevante como materia prima en la elaboración de harinas, botanas extruidas y productos de tercera generación (Watson, 1987).

4.2 Morfología y estructura del grano de maíz

Fisiológicamente, el maíz rojo comparte las características generales del maíz, al ser una planta monocotiledónea, anual, perteneciente a la familia Poaceae, que puede alcanzar alturas de entre 1.5 y 3 metros. Produce inflorescencias femeninas (mazorcas) y masculinas (espigas), y su coloración rojiza se debe a la acumulación de antocianinas, principalmente en el pericarpio, aleurona y gluma (López Martínez et al., 2009). Estas antocianinas cumplen funciones fisiológicas de protección frente a radiación ultravioleta,

estrés oxidativo y patógenos, además de tener un papel atractivo para la polinización y dispersión (Abdel Aal y Hucl, 2003).

Anatómicamente, el grano está compuesto por tres fracciones principales: el pericarpio, el endospermo y el germen o embrión (Watson y Ramstad, 1987).

El pericarpio es la capa externa y cumple una función protectora; en el caso del maíz rojo, esta fracción es relevante debido a la acumulación de compuestos fenólicos responsables de la coloración característica. Debajo del pericarpio se localiza la capa de aleurona, rica en proteínas, lípidos, minerales y enzimas. El endospermo representa la mayor proporción del grano y está constituido principalmente por almidón y proteínas de reserva, mientras que el germen contiene lípidos, proteínas de alta calidad biológica y micronutrientes esenciales (**Figura 5**) (Belton y Taylor, 2002; Watson y Ramstad, 1987).

4.3 Almidón de maíz

El maíz rojo presenta gránulos de almidón de 5 a 20 μm con formas poligonales y globulares, cuya composición varía según el contenido de amilosa y amilopectina. Puede contener desde bajos niveles de amilosa (maíces cerosos) hasta un 70% (amilo-maíces). Estos almidones poseen temperaturas de gelatinización altas (superiores a 120 °C) en dispersión diluida con agua (Frame, 1994).

El almidón es un polisacárido presente en las semillas de cereales, como el maíz y el trigo; así como, en raíces y tubérculos. Está constituido por dos polímeros: la amilosa y la amilopectina. Esta última responsable de la estructura cristalina del almidón, debido a la formación de puentes de hidrógeno entre sus ramificaciones. Se considera que la amilopectina corresponde a la fracción insoluble del almidón, mientras que la amilosa representa la fracción soluble (Díaz Ortega, 2020).

La amilosa es un polímero de estructura lineal, formado por unidades de glucosa unidas mediante enlaces $\alpha(1-4)$. Representa aproximadamente entre el 20 y 25% del contenido total de almidón, aunque en algunos cereales céreos, como el maíz ceroso, está prácticamente ausente (Díaz Ortega, 2020).

Por su parte, la amilopectina es un polímero ramificado, compuesto por unidades de α -glucosa unidas principalmente por enlaces $\alpha(1-4)$, con puntos de ramificación mediante enlaces $\alpha(1-6)$ cada 20 a 25 residuos de glucosa (Díaz Ortega, 2020).

La estructura química de los polímeros de amilosa y amilopectina del almidón se ilustran en la **Figura 6**.

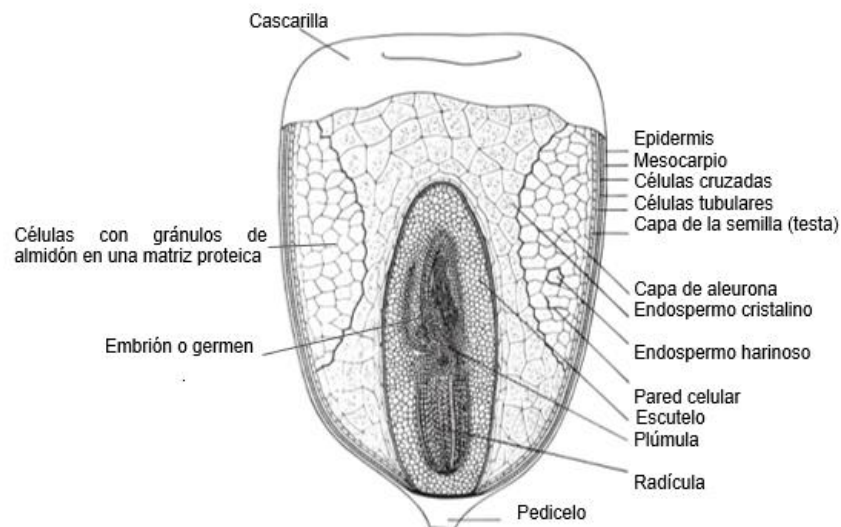


Figura 5. Morfología del grano de maíz. **Fuente:** Hosene y Delcours (2010).

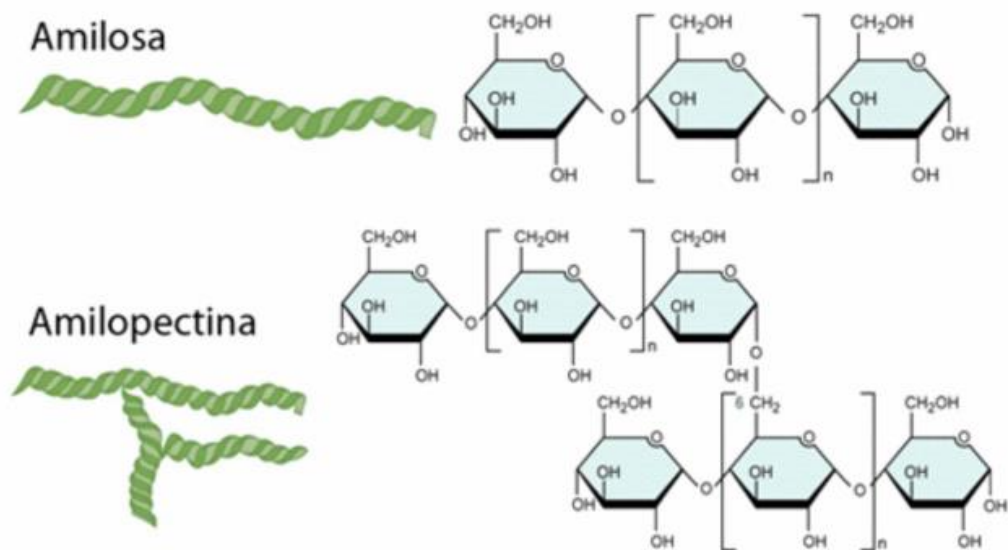


Figura 6. Estructura química de componentes del almidón. **Fuente:** Díaz-Ortega (2020).

Durante procesos térmicos como la extrusión, el almidón sufre gelatinización, desorganización estructural y, en algunos casos, dextrinización, lo que favorece la expansión, la digestibilidad y la textura de los productos extruidos (Guy, 2001).

La gelatinización del almidón consiste en la hinchazón de los gránulos en presencia de agua y calor, seguida de modificaciones estructurales irreversibles, como la liberación parcial de amilosa al medio y la pérdida de la estructura granular original a partir de una temperatura específica para cada almidón (50–70 °C) (Astiasarán y Martínez, 2000).

La dextrinización del almidón consiste en una hidrólisis parcial inducida por la acción combinada de ácidos y calor, mediante la cual se generan distintos tipos de dextrinas con propiedades fisicoquímicas diferentes. Dependiendo de las condiciones de temperatura, tiempo y concentración de ácido, pueden formarse pirodextrinas, dextrinas blancas o dextrinas amarillas, las cuales difieren en grado de ramificación, peso molecular, color, solubilidad y resistencia a la retrogradación y a la hidrólisis enzimática. En particular, las pirodextrinas se obtienen a altas temperaturas (170–210 °C) y presentan un alto grado de ramificación, mientras que las dextrinas blancas y amarillas se producen a temperaturas menores y con mayor predominio de reacciones de hidrólisis. Estas dextrinas no cristalizan y se emplean ampliamente como agentes espesantes y estabilizantes en la industria alimentaria (Badui Dergal, 2006).

4.4 Composición nutricional y propiedades funcionales

El grano de maíz está constituido principalmente por carbohidratos, los cuales representan aproximadamente entre el 70 y 75 % de su peso seco, siendo el almidón el componente predominante. En menor proporción, el maíz contiene proteínas (8–11 %), lípidos (3–5 %), fibra dietética, así como vitaminas del complejo B y minerales esenciales (Saldivar, 2010).

Las proteínas del maíz están formadas en mayor medida por prolaminas conocidas como zeínas, localizadas principalmente en el endospermo. Estas proteínas

presentan un bajo contenido de aminoácidos esenciales como lisina y triptófano, lo que limita la calidad proteica del maíz cuando se consume como única fuente de proteína. No obstante, su combinación con otros ingredientes ricos en aminoácidos esenciales permite mejorar el valor nutricional del producto final (Saldivar, 2010).

En cuanto a los lípidos, estos se concentran principalmente en el germen del grano y están compuestos por ácidos grasos insaturados, como el ácido linoleico y oleico, los cuales contribuyen al valor energético y nutricional del maíz. Asimismo, la fracción de fibra dietética se localiza principalmente en el pericarpio y la capa de aleurona, desempeñando un papel importante en la regulación del tránsito intestinal y en la respuesta glucémica (Saldivar, 2010).

Su principal valor agregado es la presencia de antocianinas, flavonoides y otros compuestos fenólicos con actividad antioxidante, capaces de neutralizar radicales libres, reducir procesos inflamatorios y prevenir enfermedades crónico-degenerativas (Abdel Aal y Hucl, 2003; López Martínez et al., 2009).

Dado que el maíz rojo corresponde generalmente a variedades de tipo dentado o semi-dentado, y que la pigmentación no modifica de manera significativa la composición proximal del grano, los valores reportados para maíz dentado fueron considerados como referencia para la composición nutricional del maíz rojo y se muestran en la **Tabla 2** (Watson, 1987; Saldivar, 2010).

Tabla 2. Composición proximal del grano de maíz dentado.

Componentes	Maíz dentado (%)
Proteínas	9.1
Grasas	4.4
Fibra cruda	3
Minerales	1.7

Fuente: Saldivar, (2010).

Las antocianinas son pigmentos polifenólicos pertenecientes al grupo de los flavonoides responsables de la coloración rojo-azulada en granos de maíz pigmentado, incluidos los maíces de grano rojo. Estas moléculas no solo determinan el color, sino que

también aportan valor nutracéutico debido a su capacidad antioxidante, ya que se encuentran como heterósidos en el pericarpio, aleurona y endospermo de los granos (Escalante Aburto et al., 2014)

4.5 Aplicaciones del maíz en alimentos

En México, el maíz rojo es utilizado tradicionalmente en la elaboración de tortillas, pinole, tamales, atoles y otros productos fermentados. Su uso también se ha extendido a la producción de harinas para botanas extruidas, bebidas antioxidantes y cosméticos naturales. A nivel industrial, su valor radica en la demanda creciente de ingredientes naturales con propiedades funcionales, lo que posiciona al maíz rojo como un recurso promotor en la formulación de productos con valor agregado (Del Pozo Insfran et al., 2006).

5. Cúrcuma

La cúrcuma (*Curcuma longa L.*), es una planta herbácea perenne perteneciente a la familia *Zingiberaceae*, originaria del sureste asiático, ampliamente utilizada como especia, colorante natural y planta medicinal. Su principal componente bioactivo es la curcumina, un polifenol responsable de su característico color amarillo intenso, al cual se atribuyen múltiples propiedades funcionales, entre ellas actividad antioxidante, antiinflamatoria, antimicrobiana, hipocolesterolémica y antitumoral (Hewlings y Kalman, 2017).

La actividad antioxidante de la curcumina se relaciona con la presencia de grupos hidroxilo en los anillos fenólicos de su estructura química, los cuales le permiten actuar como captador de radicales libres. Por su parte, la presencia de dobles enlaces conjugados y grupos keto en la molécula contribuye a su participación en la regulación de procesos inflamatorios y en la inhibición de mecanismos asociados al desarrollo del cáncer (Chirico, 2022).

5.1 Composición y propiedades funcionales de la cúrcuma

La cúrcuma (*Curcuma longa* L.) presenta una amplia variedad de nutrientes (**Tabla 3**), entre los que destacan los compuestos fenólicos, los aceites esenciales, la fibra dietética, los minerales y trazas de proteínas (Gupta et al., 2013).

Tabla 3. Composición nutrimental de *Curcuma longa* L.

Componentes	Cúrcuma g/100 g
Proteínas	7.66
Grasas totales	5.03
Cenizas	6.13
Fibra dietética total	21.38
Carbohidratos	49.22
Humedad	10.58

Fuente: Yadav y Upasana, (2022).

En la industria alimentaria, la cúrcuma se utiliza tanto como aditivo funcional como colorante natural (E100), y es valorada por su estabilidad térmica y su perfil de inocuidad.

De acuerdo con la European Medicines Agency (EMA), el consumo diario permitido de cúrcuma en polvo oscila entre 1 y 3 g (EMA, 2018), mientras que la FAO/OMS y la European Food Safety Authority (EFSA) han establecido un límite seguro para la curcumina pura de hasta 3 mg/kg de peso corporal (JECFA, 2004; EFSA, 2010). Diversos estudios han demostrado que la curcumina puede modular el estrés oxidativo y la microbiota intestinal; así como, contribuir a la prevención de enfermedades crónicas, incluyendo el síndrome metabólico, ciertos tipos de cáncer y enfermedades neurodegenerativas (Gupta et al., 2013; Hewlings & Kalman, 2017).

Su inclusión en alimentos extruidos o funcionales ha cobrado interés debido a su capacidad para aportar beneficios a la salud y mejorar el perfil nutracéutico del producto final (Biel et al., 2017).

5.2 Propiedades tecnológicas de la cúrcuma como aditivo alimentario

La cúrcuma, como aditivo alimentario, presenta una estabilidad variable dependiendo de las condiciones ambientales y del procesamiento. De acuerdo a Mateos Aparicio, (2017) la curcumina (componente activo de la cúrcuma) es sensible a la luz y a temperaturas elevadas, lo que puede provocar su degradación y pérdida de color y propiedades funcionales. Por ello, su uso en alimentos requiere controlar estas condiciones para preservar su estabilidad y efectividad como colorante o antioxidante.

6. Elaboración de botanas extruidas

6.1 Principios del proceso de extrusión

La extrusión se define como una tecnología de procesamiento termo-mecánico en la que intervienen distintas operaciones básicas que varían según el alimento y equipo utilizado, algunas de estas son el mezclado, amasado, ruptura por cizallamiento, transporte, calentamiento, enfriamiento, formado, secado e inflado (Brennan, 2006).

La extrusión tiene como finalidad la obtención de alimentos con forma y textura definidas, destinados al consumo instantáneo, elaborados principalmente a partir de cereales y semillas con alto contenido de almidón y proteínas. Este proceso permite la producción de productos expandidos con humedad controlada y geometría específica, mediante la aplicación combinada de tratamientos térmicos, presión y fuerzas de cizallamiento en cilindros especialmente diseñados (Tscheuschner, 2001).

Durante la cocción por extrusión se producen importantes cambios en el estado físico y químico del alimento, entre los que destacan la gelatinización y aglomeración del almidón, la desnaturalización de las proteínas, la formación o modificación de estructuras internas, el desarrollo de nuevas texturas, la reducción de la actividad enzimática, la eliminación de microorganismos y la generación de compuestos aromáticos (Tscheuschner, 2001).

Las condiciones de proceso son específicas para cada formulación, ya que dependen de los tiempos de residencia, la intensidad del cizallamiento; así como, la temperatura y la presión en las distintas zonas del extrusor. En este sentido, la composición y el contenido de humedad de la materia prima se consideran los principales

parámetros que influyen tanto en el desarrollo del proceso como en las características del producto final (Tscheuschner, 2001)

El extrusor es un equipo constituido por uno o más tornillos sinfín que actúan como una bomba, cuya función principal es mezclar, transportar y comprimir la materia prima, formando una masa semisólida que es moldeada, cocida y finalmente cortada para obtener el producto con la forma deseada (Barra, 2023).

6.2 Tipos de extrusores.

Existen diversos tipos de extrusores que difieren en su diseño, tamaño y modo de operación; no obstante, los más utilizados en la industria alimentaria se clasifican en tres categorías principales: extrusores de pistón, de rodillo y de tornillo. El extrusor de pistón es el más sencillo, ya que consta de un pistón único que impulsa el material a través de una boquilla hasta su descarga sobre una cinta transportadora (Brennan, 2006).

El extrusor de rodillo se alimenta mediante el espacio existente entre dos tambores dispuestos a corta distancia, los cuales giran en sentidos opuestos. Este tipo de extrusor se emplea principalmente para el procesamiento de materiales pegajosos que no requieren la aplicación de altas presiones para su conformado (Brennan, 2006).

Por su parte, los extrusores de tornillo son los más complejos y versátiles, ya que incorporan tornillos simples, dobles o múltiples que giran dentro de un cilindro estacionario, permitiendo el transporte, la mezcla, la compresión y la conformación del material hasta su salida por una boquilla de diseño específico (Brennan, 2006).

6.2.1 Extrusor de tornillo simple

Los extrusores de tornillo simple se emplean ampliamente en la producción de botanas infladas elaboradas a partir de harinas y sémolas de cereales. Durante el desplazamiento de la mezcla a lo largo del extrusor, ésta es sometida a un incremento de temperatura que puede superar los 150 °C, el calor generado se debe principalmente a la fricción y el cizallamiento, asociados a la rotación del tornillo. Posteriormente, la masa es forzada a pasar a través de una boquilla de salida de diámetro pequeño. La liberación súbita de la presión al emerger del orificio provoca la evaporación instantánea

del agua en forma de vapor, lo que da lugar a la expansión del producto y a la formación de su estructura característica (Brennan, 2006).

Para optimizar el proceso, los ingredientes de la mezcla se someten a un pre acondicionamiento previo, con el fin de aumentar el tiempo de residencia dentro del extrusor y reducir el consumo de potencia mecánica, lo que permite incrementar la capacidad operativa del equipo. Los parámetros de operación de los extrusores de tornillo simple dependen de los requerimientos de presión en la boquilla de salida, la temperatura de la pared del cilindro por la que se desliza la mezcla y la velocidad de alimentación del tornillo (Brennan, 2006).

En la **Figura 7** se ilustran las tres secciones que conforman un extrusor de tornillo simple, las cuales se describen a continuación:

Sección de alimentación. En esta etapa, el tornillo cumple la función de transportar el material desde la tolva de alimentación hacia las secciones subsecuentes del extrusor. Durante esta fase no se produce compresión significativa ni modificaciones relevantes en la estructura de la masa.

Sección de compresión. En esta sección la masa es sometida a un proceso de compresión progresiva, acompañado de un incremento de temperatura, lo que favorece su plastificación y preparación para las etapas posteriores.

Sección de fusión. En esta etapa final se produce un intenso cizallamiento y amasado de la mezcla, condiciones bajo las cuales ocurren reacciones fisicoquímicas y cambios estructurales que influyen en la textura y las propiedades finales del producto extruido.

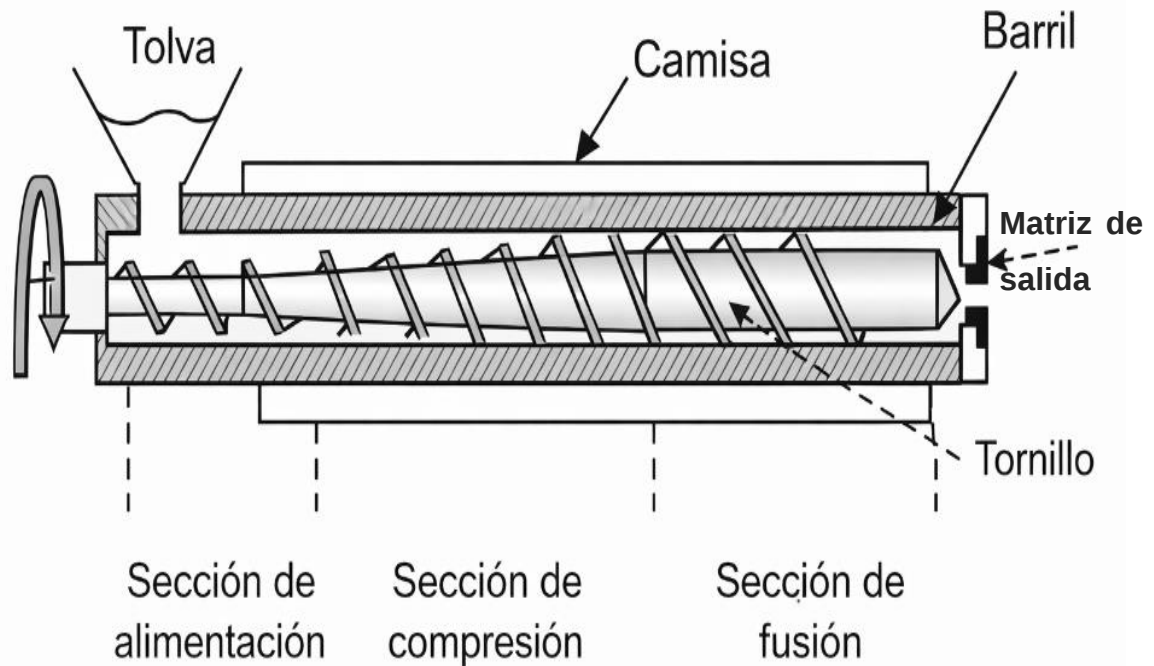


Figura 7. Estructura básica de un extrusor de tornillo simple. **Fuente:** Berk, (2013).

6.2.2 Estructura de un extrusor de tornillo simple

De acuerdo con Berk (2013), un extrusor de tornillo simple está constituido por los siguientes componentes principales:

- Cilindro o barril, que puede ser de superficie lisa o estriada, y dentro del cual se lleva a cabo el transporte y procesamiento del material.
- Tornillo sinfín o tornillo de Arquímedes, de construcción robusta, que gira dentro del cilindro. Este elemento está compuesto por una raíz ancha y paletas cortas, cuya función es impulsar y transportar el material a lo largo del canal de flujo formado entre la raíz del tornillo y la pared interna del cilindro.
- Matriz o boquilla de paso restringido, localizada en el extremo de salida del extrusor, que actúa como un dispositivo de liberación de presión y confiere al producto extruido la forma deseada, en función del tamaño y geometría de la abertura.

- Cuchilla giratoria, encargada de cortar de manera uniforme el material extruido a la salida de la matriz, de acuerdo con la longitud requerida del producto.
- Sistemas de transferencia de calor o frío al cilindro, tales como camisas de vapor o agua, calentadores de resistencia eléctrica y/o sistemas de calentamiento por inducción, que permiten el control térmico del proceso.
- Tolva de alimentación, diseñada para la dosificación del material mediante alimentación por gravedad o de tipo positiva.
- Puertos de inyección, destinados a la incorporación de vapor, agua u otros fluidos, según los requerimientos específicos del proceso.
- Instrumentación de medición y control, que permite regular y monitorear variables operativas como la velocidad de alimentación, la temperatura y la presión del sistema.

6.2.3 Ventajas del extrusor de tornillo simple

Algunas de las ventajas que ofrece el uso de un extrusor de tornillo simple, en comparación con otros tipos de extrusores, según (Berk, 2013) son las siguientes:

- Diseño mecánico sencillo, lo que facilita su operación y mantenimiento.
- Menor costo de adquisición y operación comparado con extrusores de doble tornillo.
- Operación continua y estable, adecuada para producción en gran escala.
- Buena eficiencia energética, especialmente en procesos de cocción rápida.
- Capacidad para controlar variables clave como temperatura, humedad velocidad del tornillo.
- Versatilidad para procesar distintas materias primas, tanto secas como con humedad ajustada.
- Adecuado para la cocción, gelatinización del almidón y desnaturalización de proteínas.
- Ideal para productos expandidos como botanas, cereales y harinas precocidas.
- Requiere una menor superficie de instalación en planta, en comparación con otras tecnologías de procesamiento.

6.3 Aplicaciones de la extrusión en alimentos

En la industria alimentaria, el proceso de extrusión se emplea ampliamente en la elaboración de botanas y cereales para desayuno, así como en la producción de alimentos con alto contenido proteico y productos de confitería. Cada una de estas aplicaciones utiliza parámetros específicos de extrusión, los cuales permiten obtener productos con características estructurales, sensoriales y funcionales particulares, con el objetivo de satisfacer las diversas demandas del mercado (Barra, 2023).

6.4 Condiciones de la materia prima para el proceso de extrusión

En el proceso de extrusión, las características de la materia prima son de suma importancia para la obtención de productos de alta calidad, con propiedades sensoriales y funcionales específicas. Por ello, es importante una buena selección, acondicionamiento y formulación de los ingredientes para obtener productos finales con óptimos grados de expansión, textura, dureza, color y perfiles nutricionales del extruido.

La humedad de la materia prima es un factor crítico, en general, se recomienda que las harinas o mezclas destinadas a extrusión presenten una humedad inicial entre 10 y 20%, en función del tipo de producto y del diseño del extrusor. Contenidos de humedad bajos (<12%) favorecen una mayor expansión y la obtención de texturas ligeras y crujientes, mientras que niveles de humedad más elevados tienden a disminuir la expansión y a generar productos más densos (Ilo y Berghofer, 1999; Guy, 2001).

El uso de harinas finas, con distribución homogénea y tamaños de partícula inferiores a 500 μm , permite un flujo más uniforme dentro del extrusor y una gelatinización más eficiente del almidón, lo que da como resultado productos extruidos con estructura más estable y apariencia uniforme. Por el contrario, partículas de mayor tamaño o con alta heterogeneidad pueden ocasionar obstrucciones en el equipo, variabilidad en la expansión y defectos superficiales en el producto final (Riaz, 2000).

En relación con la composición química, se considera óptimo trabajar con materias primas que contengan entre 60 y 75% de almidón, ya que este polisacárido es el componente principal responsable de la expansión del extruido, debido a su gelatinización y a la descompresión rápida al salir de la boquilla del extrusor. En cuanto

al contenido proteico, se recomienda mantener niveles moderados (10–20%), dado que concentraciones elevadas pueden limitar la expansión al favorecer la formación de estructuras más rígidas y menos porosas (Guy, 2001). Asimismo, el contenido de lípidos debe mantenerse bajo control, ya que valores superiores al 8–10% reducen la expansión del producto. Este efecto se atribuye a la acción lubricante de los lípidos, que disminuyen la fricción y el cizallamiento dentro del extrusor, provocando una gelatinización limitada del almidón. Por esta razón, cuando se emplean materias primas con alto contenido graso, es frecuente recurrir a procesos de desengrasado parcial previos a la extrusión (Frame, 1994).

En el caso de los productos fortificados o funcionales, como aquellos que incluyen ingredientes ricos en compuestos bioactivos, es necesario considerar que la incorporación de fibras, antioxidantes o proteínas adicionales puede modificar el comportamiento del sistema durante la extrusión. La fibra dietética, por ejemplo, tiende a reducir la expansión y generar texturas más densas, por lo que se recomienda ajustar la humedad y la temperatura de proceso para prevenir dichos efectos (Singh et al., 2007).

6.5 Cambios en el alimento durante el proceso de extrusión

Durante la sección de transporte del extrusor, el alimento experimenta cambios físicos relevantes como consecuencia del incremento de la temperatura, la presión y las fuerzas de cizallamiento, algunos de estos son las modificaciones en la textura, cambios estructurales en los nutrientes presentes, la evaporación de agua y de compuestos volátiles; así como, la forma característica del producto extruido (Berk, 2013).

6.5.1 Cambios estructurales del almidón durante la extrusión

Uno de los principales efectos químicos que se producen durante la cocción del alimento, por efecto de la alta temperatura y la presión en el proceso de extrusión es la gelatinización del almidón. Este fenómeno se define como el proceso mediante el cual los gránulos de almidón se hidratan y se hinchan, provocando la liberación de amilosa y amilopectina y la formación de una pasta viscosa continua. La gelatinización mejora la digestibilidad de los alimentos ricos en almidón, ya que el almidón gelatinizado es hidrolizado con mayor facilidad por las enzimas amilolíticas. Asimismo, este proceso da

lugar a la formación de una masa termoplástica capaz de desarrollar una estructura porosa y estable durante la etapa de expansión del producto extruido (Berk, 2013).

Otro efecto generado durante la extrusión, sobre el almidón es la dextrinización, la cual consiste en la ruptura parcial de sus cadenas poliméricas como consecuencia de las elevadas temperaturas, presión y fuerzas de cizalla, lo que da como resultado dextrinas de menor peso molecular. Este fenómeno incrementa la solubilidad del almidón y modifica sus propiedades funcionales, influyendo en la textura, expansión y digestibilidad del producto extruido (Frame, 1994).

6.5.2 Cambios estructurales de las proteínas durante la extrusión

Las proteínas se ven afectadas durante el proceso de extrusión, debido a las altas temperaturas y al contenido de humedad de la mezcla. Estos parámetros provocan la desnaturalización de las proteínas, proceso en el cual, pierden su estructura tridimensional, se despliegan y aumentan su capacidad de interacción con el agua. De manera similar a lo que ocurre con la gelatinización del almidón, la desnaturalización proteica durante la cocción por extrusión se ve favorecida en condiciones de baja humedad, al formarse una masa fundida de alta viscosidad (Berk, 2013).

En determinados alimentos puede presentarse la reacción de Maillard, una reacción térmica no enzimática entre azúcares reductores y grupos amino de las proteínas, responsable de las coloraciones marrones y la formación de compuestos responsables del aroma y sabor característicos del producto final extruido (Berk, 2013).

Asimismo, el empleo de altas temperaturas en los procesos de extrusión puede tener efectos tanto negativos como positivos sobre la calidad nutricional de los alimentos. Por un lado, puede ocasionar la degradación de ciertas vitaminas sensibles al calor; por otro, contribuye a la inactivación de factores antinutricionales, lo que mejora la biodisponibilidad de algunos nutrientes (Berk, 2013).

6.5.3 Cambios estructurales de la grasa durante la extrusión

Durante el proceso de extrusión, la grasa presente en las materias primas experimenta cambios físicos y químicos como consecuencia de la acción combinada de las elevadas temperaturas, las fuerzas de cizallamiento y la presión del sistema. En

primer lugar, los lípidos tienden a redistribuirse dentro de la matriz formada por el almidón y las proteínas, lo que puede favorecer una mayor interacción entre grasa y carbohidratos, modificando de esta manera la textura y el grado de expansión del producto final (Guy, 2001).

Asimismo, una fracción de la grasa puede actuar como agente lubricante dentro del cilindro del extrusor, reduciendo la viscosidad del material fundido y afectando parámetros clave del producto extruido, tales como la expansión, la densidad aparente y la crocancia (Frame, 1994).

6.5.4 Cambios estructurales de la fibra durante la extrusión

La fibra dietética incluye un conjunto de carbohidratos presentes en las paredes celulares de las plantas que son difíciles de digerir y absorber por el cuerpo humano, incluso algunos son fermentables en el intestino grueso. Los polisacáridos, oligosacáridos y ligninas son algunos ejemplos de carbohidratos que componen la fibra dietética, la cual tiene efectos positivos en el cuerpo, al actuar como laxante y reducir el colesterol y la glucemia (Sing et al., 2007).

Diversos autores como Sing et al. (2007) han investigado sobre los efectos de la extrusión sobre la fibra dietética, y han llegado a la conclusión de que al aplicarse condiciones leves o moderadas durante la cocción de la matriz alimentaria en el extrusor, no tiene modificaciones significativas sobre la misma, sin embargo en condiciones más severas, el contenido de fibra dietética suele aumentar por el incremento de la fibra soluble y las fracciones de almidón que se producen por la resistencia a las enzimas.

Por otro lado, Ali, et al. (2024) reportaron que durante la extrusión ocurren cambios estructurales en las paredes celulares de la fibra y otros componentes del material lo cual aumenta la solubilidad y disponibilidad de la fibra dietética.

Robin et al. (2012) afirma que los parámetros del proceso de extrusión como las altas temperaturas, el cizallamiento mecánico y la presión aplicada dentro del equipo, favorecen la despolimerización, solubilización y reacomodo de los componentes estructurales de la fibra, en especial hemicelulosas y pectinas.

3.5.5 Efecto del agua durante la extrusión

El agua es responsable de la plastificación de los biopolímeros y la gelatinización del almidón. La humedad actúa como un agente lubricante interno que reduce la viscosidad de la mezcla durante su transporte en el extrusor, lo que facilita el flujo del material (Frame, 1994).

6.6 Parámetros que afectan el proceso de extrusión

Algunos de los parámetros operativos y de formulación que determinan la estructura, calidad y propiedades finales del producto durante la extrusión son los siguientes:

La temperatura del barril cumple con la función de regular el grado de gelatinización del almidón, la desnaturalización de proteínas y la expansión del producto al salir del extrusor (Frame, 1994). Temperaturas elevadas tienden a incrementar la expansión, pero un exceso de las mismas puede degradar los biopolímeros y reducir la calidad del extruido.

La humedad de la mezcla actúa como lubricante dentro del extrusor, disminuyendo la viscosidad y el esfuerzo de cizalla. Niveles moderados favorecen la expansión, mientras que un exceso reduce el volumen a la salida debido a menor diferencia de presión y menor “flash-off” del vapor (Guy, 2001).

La velocidad del tornillo controla el tiempo de residencia y la energía mecánica disipada. Un aumento en la velocidad incrementa el cizallamiento y la temperatura generada por fricción, lo cual modifica la textura, color y densidad del extruido (Riaz, 2000).

La composición de la materia prima, particularmente el contenido de almidón, lípidos, fibra y proteínas, influye directamente en la expansión, textura y cohesividad. El almidón controla la expansión y la textura, las proteínas aportan cohesión y estabilidad estructural, los lípidos modulan el flujo y la fricción durante el proceso, y la fibra tiende a limitar la expansión y a aumentar la densidad y fragilidad del producto extruido (Pismag et al., 2024).

Finalmente, el diseño del dado y la relación L/D influyen en la presión, estabilidad del flujo y forma del producto. Dado que la presión en el dado determina el grado de expansión al liberar el vapor, un diseño inadecuado puede afectar negativamente la textura final (Singh et al., 2007).

7. Alimentos funcionales

El término “alimento funcional” fue propuesto en Japón en la década de 1980 y se define, en términos generales, como aquellos alimentos que forman parte de la dieta diaria, que además de cumplir con sus funciones nutricionales básicas, proporcionan beneficios metabólicos o fisiológicos que contribuyen a mejorar la salud física y mental; así como, reducir el riesgo de desarrollar enfermedades crónico-degenerativas. Estos alimentos pueden encontrarse de manera natural o bien obtenerse mediante la incorporación de componentes benéficos (extraídos a través de procesos tecnológicos o biológicos) a otros alimentos, con el fin de conferirles propiedades funcionales (Luengo Fernández, 2007).

Algunos ejemplos de alimentos funcionales incluyen aquellos que contienen minerales, vitaminas, ácidos grasos y/o fibra dietética, así como los alimentos a los que se les incorporan sustancias biológicamente activas, como fitoquímicos y antioxidantes, además de probióticos, los cuales contienen microorganismos vivos que aportan beneficios a la salud (Luengo Fernández, 2007).

Este trabajo se centra en entender que son los fitoquímicos y como aportan propiedades funcionales beneficiosas para el cuerpo humano.

Los fitoquímicos son metabolitos secundarios que producen las plantas como medidas de autodefensa contra insectos, plagas, animales, patógenos, exposición a la luz ultravioleta y cambios climáticos, y la mayoría de estos presentan propiedades antioxidantes y nutraceuticas (Egbuna et al., 2019).

La constante búsqueda y descubrimiento de nuevos fitoquímicos, no permite tener una clasificación uniforme en la actualidad; sin embargo, hasta hoy se han clasificado en tres grupos distintos de acuerdo a su composición química: los fenólicos, terpenos y los compuestos que contienen nitrógeno y azufre (**Tabla 4**).

Según lo mencionado por Egbuna et al. (2019) dentro de las principales funciones de los fitoquímicos en los organismos de los seres vivos se encuentran las siguientes:

1. Actividad antioxidante ya que previenen el daño oxidativo de ácidos nucleicos, proteínas y grasas.
2. Función antimicrobiana al actuar como agentes antibacterianos, antifúngicos, antivirales y bactericidas.
3. Estimulantes del sistema inmunológico.
4. Modulantes de enzimas desintoxicantes.
5. Función antiinflamatoria.
6. Reducción de las agregaciones plaquetarias.
7. Precursores de actividades fisiológicas.

7.1 Antocianinas

Las antocianinas son compuestos pigmentados pertenecientes al grupo de los flavonoides, que confieren colores rojos, rosas, morados y azules a las plantas; así como, a sus frutos y flores (Lincoln y Zeiger, 2006; Khoo et al., 2017).

Tabla 4. Clasificación general de los fitoquímicos.

Clase	Subclase	Ejemplos
Fenólicos	Polifenoles	Flavonoides, isoflavonoides, chalconoides, lignanos, estilbenoides (p. ej., resveratrol), curcuminoides, taninos (p. ej., ácidos protocatecuico y clorogénico)

Terpenos	Ácidos aromáticos	Ácidos fenólicos (p. ej., ácido gálico, ácido tánico, vainillina, ácido elágico), ácidos hidroxicinámicos (p. ej., cumarina)
	Monoterpenos (C ₁₀)	Geraniol, limoneno, piretroides, mirceno
	Sesquiterpenos (C ₁₅)	Costunólidos
	Diterpenos (C ₂₀)	Ácido abiético, cafestol, giberelinas
	Triterpenos (C ₃₀)	Azadiractina, fitoecdisonas
Terpenoides	Politerpenos (C ₅) _n	Tetraterpenos, por ej., carotenoides, caucho
	Carotenoides (tetraterpenoides)	β-caroteno, licopeno, fitoeno
	Xantofilas	Luteína, zeaxantina
	Triterpenoide	Saponinas, ácido ursólico
	Esteroides	Tocoferoles (vitamina E), fitoesteroles (βsitosterol, campesterol)

Nitrogenados (organonitruros)	Alcaloides	Nicotina, morfina, cafeína, teobromina, teofilina
	Glucósidos cianogénicos	
	Aminoácidos no proteicos	Canavanina, ácido azetidina-2-carboxílico
Azufrados (organosulfuros)	Alicina, aliina, piperina	
	Glutación, fitoalexinas	
Otros	Ácido fítico, ácido oxálico, ácido tartárico, ácido málico, ácido quínico	

Fuente: Egbuna et al., (2019)

Desde el punto de vista químico, están constituidas por una antocianidina (aglicona) unida a uno o más azúcares, generalmente glucosa, ramnosa o galactosa a través de enlaces glucosídicos. La naturaleza y posición de estos azúcares; así como, la posible acilación con ácidos orgánicos, influyen en la estabilidad, solubilidad y color de las antocianinas (Harborne y Williams, 2000)

Las antocianidinas más comunes en plantas incluyen cianidina, delphinidina, pelargonidina, peonidina, petunidina y malvidina. Desde una perspectiva química, estas moléculas difieren principalmente en el número y posición de grupos hidroxilo y metoxilo en el anillo B, lo que determina sus propiedades espectrales y su capacidad antioxidante. Por ejemplo, la cianidina-3-O-glucósido y la delphinidina-3-O-glucósido son algunas de las antocianinas mayoritariamente distribuidas en frutas, cereales y hortalizas (Wallace y Giusti, 2015).

En el maíz (*Zea mays* L.), las antocianinas se encuentran en variedades como el maíz azul, morado, rojo y negro; confiriendo al maíz pigmentado una alta capacidad antioxidante lo que ha despertado interés tanto nutricional como industrial, particularmente en el desarrollo de alimentos funcionales y colorantes naturales (Giusti y He, 2010).

El pericarpio es una de las principales regiones de acumulación de antocianinas, especialmente ricas en derivados de cianidina, pelargonidina y peonidina, generalmente en forma de glucósidos y acilglucósidos. La aleurona, es una capa rica en proteínas y compuestos bioactivos, también contiene antocianinas, aunque su perfil químico puede diferir del pericarpio. Estas diferencias se deben a la regulación genética de la biosíntesis de flavonoides en el grano de maíz (Salinas Moreno et al., 2013)

IV. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de la temperatura y concentración de amaranto sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de alimentos extruidos tipo botana de segunda generación elaborados a partir de harina de maíz rojo (*Zea mays L.*), harina de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus L.*) adiucionados con polvo de cúrcuma (*Curcuma longa L.*).

Objetivos específicos

- Determinar el índice de expansión, densidad aparente, índice de absorción en agua, índice de solubilidad en agua y diferencia total de color de los productos extruidos directamente expandidos obtenidos utilizando un diseño central compuesto rotatable a partir de harina de maíz rojo (*Zea mays L.*), harina de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus L.*) adicionados con polvo de cúrcuma (*Curcuma longa L.*)
- Evaluar el contenido de fenoles totales y antocianinas, de los productos extruidos directamente expandidos obtenidos utilizando un diseño central compuesto rotatable a partir de harina de maíz rojo (*Zea mays L.*), harina de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus L.*) y polvo de cúrcuma (*Curcuma longa L.*) mediante técnicas espectrofotométricas.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Obtención de la materia prima

Se utilizó grano de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) el cual fue adquirido a través de la plataforma de mercado libre®, y fue recibido en condiciones secas, empacado en bolsa sellada y conservado en un lugar fresco y seco hasta su utilización. El maíz rojo (*Zea mays* L.) se compró a un productor del Municipio de Tizayuca, Hidalgo, México. La cúrcuma se adquirió en forma de polvo en una tienda de productos a granel ubicada en la central de abastos de Tulancingo, Hidalgo.

2. Acondicionamiento de la materia prima

Para la obtención de la harina de amaranto, los granos fueron sometidos a molienda en un molino pulverizador (modelo 800A, ALDKitchen). El material molido se tamizó a través de una malla número 70 (210 μm) para obtener una harina de granulometría fina y homogénea. Por otro lado, los granos de maíz rojo fueron molidos utilizando un molino de cereales y posteriormente tamizados con una malla número 40 (400 μm), con el fin de obtener una harina uniforme.

3. Diseño experimental para la obtención de productos extruidos

Para la obtención de los productos extruidos se utilizó un diseño experimental central, compuesto, rotatable, cuyas variables independientes fueron la temperatura del dado de salida (120-160°C) y concentración de amaranto (0-100%) con un $\alpha=1.414$; cada factor tuvo cinco niveles, la combinación de los niveles de los factores dio como resultado 13 tratamientos experimentales (**Tabla 5**).

4. Preparación de la materia prima

Las harinas de amaranto y maíz rojo se mezclaron en diferentes proporciones de acuerdo al diseño de experimentos. A cada mezcla se le incorporó el 1% de cúrcuma en polvo con base al peso seco total de la mezcla.

Las harinas de maíz rojo y amaranto; así como la cúrcuma en polvo se mezclaron en una batidora para cocina. Las mezclas obtenidas se acondicionaron adicionando agua

Tabla 5. Diseño de experimentos central compuesto rotatable para la obtención de productos extruidos a partir de harina de maíz rojo y amaranto con dos variables independientes (temperatura del dado de salida (°C) y concentración de amaranto (%)) con un $\alpha=1.414$.

Tratamiento	Variables independientes			
	Codificadas		Decodificadas	
	X_1	X_2	Concentración de amaranto (%)	Temperatura (°C)
1	-1	-1	14.6	126
2	1	-1	14.6	154
3	-1	1	85.4	126
4	1	1	85.4	154
5	-1.414	0	50	120
6	1.414	0	50	160
7	0	-1.414	0	140
8	0	1.414	100	140
9	0	0	50	140
10	0	0	50	140
11	0	0	50	140
12	0	0	50	140
13	0	0	50	140

a las mezclas hasta alcanzar una humedad del 17%; las mezclas acondicionadas se almacenaron en bolsas de polietileno con sello hermético 12 h previas a su procesamiento.

5. Proceso de extrusión

Las mezclas acondicionadas se alimentaron a un extrusor de un solo tornillo (marca Brabender, GmbH & Co. KG, Alemania). El barril del extrusor estaba estriado y dividido en 3 zonas de calentamiento independientes mediante resistencias eléctricas; la temperatura del barril del extrusor se mantuvo constante (zona 1: 80°C, zona 2: 100°C, zona 3: 120°C), la zona 4 denominada temperatura del dado o matriz de salida se varió de acuerdo al diseño experimental (**Tabla 5**). La velocidad de alimentación de las mezclas fue de 2.1 kg/h. Se utilizó un tornillo sinfín con una relación de compresión 3:1 y una velocidad de rotación de 160 rpm. Las muestras extruidas se dejaron enfriar a temperatura ambiente; una vez frías se introdujeron dentro de bolsas de polietileno negras y se almacenaron en contenedores de plástico con tapa hermética para evitar que captaran humedad del ambiente.

Para algunas determinaciones los productos extruidos se molieron en un molino de granos y especias comercial, posteriormente se tamizaron con una malla número 40 (400 µm). La harina resultante se empleó para llevar a cabo algunos análisis posteriores. El proceso general para la elaboración de un alimento tipo botana extruido se muestra en la **Figura 8**.

6. Análisis proximal de la materia prima

6.1. Humedad

El contenido de humedad de las materias primas (maíz rojo, amaranto y cúrcuma) se determinó mediante una termobalanza (Serie MS, A&D Company Ltd., Japón) de acuerdo al método 925.10 de la AOAC (1999). Para cada una de las muestras se realizaron tres repeticiones. Se colocaron 5 g de muestra en el plato de calentamiento de la termobalanza y se sometieron al programa de secado automático del equipo a 110 °C hasta alcanzar peso constante. El equipo registró el porcentaje de humedad de cada réplica, y el valor final se reportó como el promedio de los tres análisis.

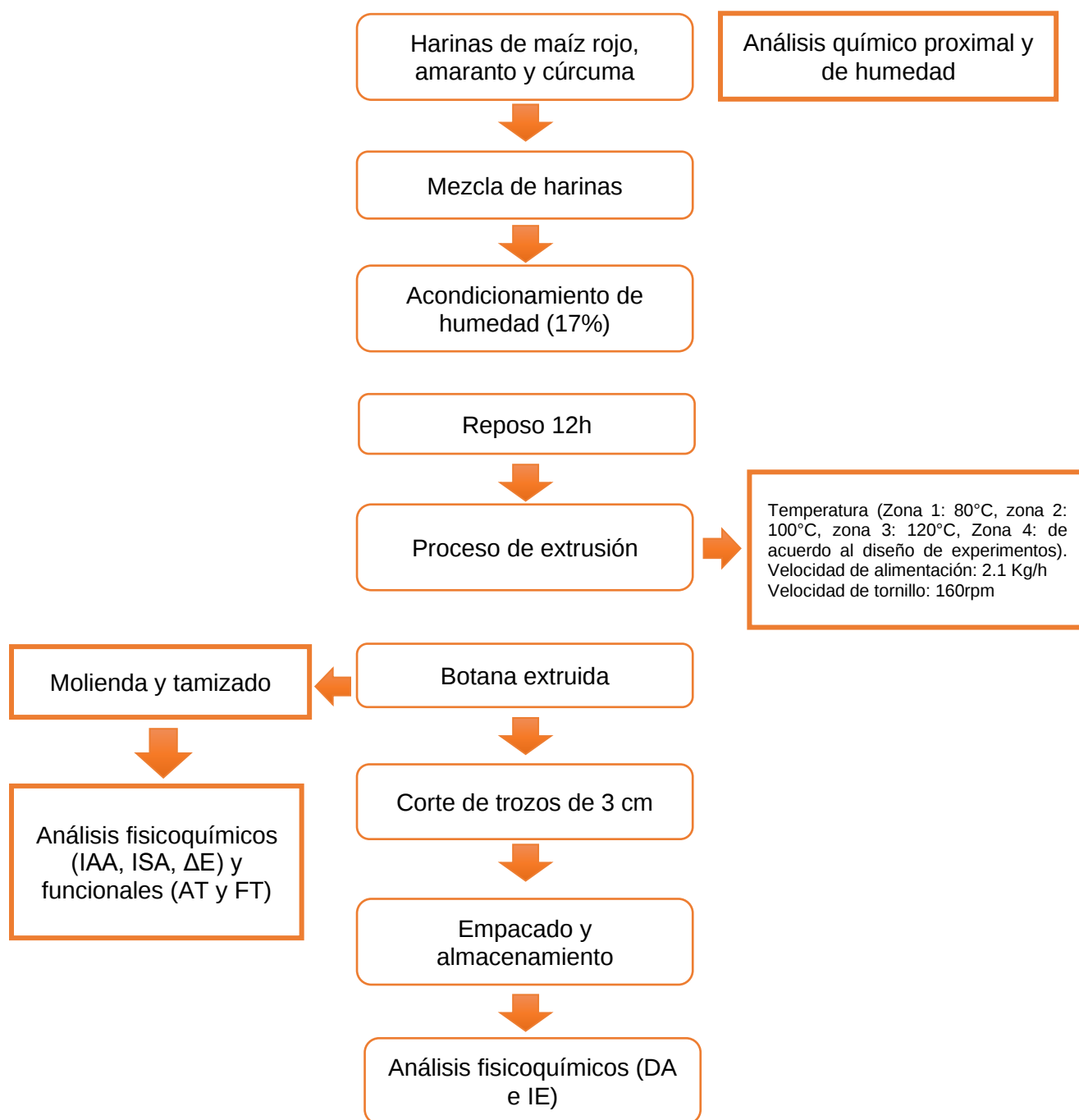


Figura 8. Diagrama de flujo general para el procesamiento de un alimento tipo botana extruido a partir de harina de maíz rojo, amaranto y cúrcuma en polvo.

6.2. Grasa

La determinación del contenido de grasa se realizó mediante el método de extracción Soxhlet utilizando éter como solvente extractor de acuerdo al método 920.39 de la AOAC, (1999). Para ello, se pesaron 5 g de muestra, los cuales se colocaron dentro de cartuchos de extracción de celulosa, previamente cubiertos en la parte superior con un tapón de algodón. Los cartuchos de celulosa con muestra se colocaron dentro de la cámara de extracción del equipo soxhlet, se adicionaron 60 mL de éter de petróleo en cada vaso extractor. La extracción se realizó en la unidad de extracción E-816 ECE (Büchi®) durante 4 horas, los vasos donde se extrajeron los lípidos se colocaron dentro de una estufa de secado a 100°C hasta la completa evaporación del disolvente, posteriormente se enfriaron en un desecador y finalmente se pesaron. El porcentaje de grasa cruda se calculó empleando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ grasa cruda} = \left(\frac{\text{Peso del matraz con grasa} - \text{Peso constante del matraz}}{\text{Peso de la muestra}} \right) * 100$$

6.3. Proteína

La cuantificación de proteína se realizó de acuerdo al método 955.04 de la AOAC (1999). Para ello, se pesaron 0.5 g de muestra seca en un papel libre de nitrógeno, posteriormente la muestra se colocó en un tubo Kjeldahl junto con 5 g de mezcla digestora (4.55 g de sulfato de potasio y 0.45 g de sulfato cúprico) y se añadieron 15 mL de ácido sulfúrico concentrado.

A continuación, la mezcla se llevó a digestión, encendiendo previamente el extractor de humos (Scrubber K-415) y el digestor (SpeedDigester K-439). La muestra se calentó hasta adquirir un color verde claro, una vez alcanzada la coloración, la mezcla se mantuvo en calentamiento durante una hora adicional. Finalizado este proceso, se dejó enfriar la mezcla y se procedió con la etapa de destilación.

Para la destilación, el tubo terminal del refrigerante del equipo (K-350 Distillation Unit) se conectó a un matraz Erlenmeyer que contenía 50 mL de ácido bórico al 2% y dos gotas de rojo de metilo. Paralelamente, se adicionó hidróxido de sodio al 35% y 20

mL de agua destilada al tubo de digestión Kjeldahl y se sometió al proceso de destilación. Asimismo, se preparó un blanco que contenía únicamente la mezcla digestora y el ácido sulfúrico concentrado.

Finalmente, el destilado obtenido se tituló con ácido sulfúrico 0.1 N, hasta observar el cambio de color a rosa claro.

El % de nitrógeno presente en la muestra se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{(mL \text{ problema} - mL \text{ blanco})(meq N)(Normalidad \text{ del ácido})}{Peso \text{ real de la muestra}}$$

Donde:

mL problema= mL de H₂SO₄ gastados en la titulación de la muestra

mL blanco= mL de H₂SO₄ gastados en la titulación de la muestra blanco

meq N= 0.014 miliequivalentes del nitrógeno

Normalidad del ácido = concentración (0.1 N) del ácido sulfúrico (H₂SO₄)

Peso real de la muestra= Peso de las muestras de amaranto, maíz rojo y cúrcuma en g

Finalmente, con el % de nitrógeno se pudo determinar el porcentaje de proteína de la muestra, utilizando la fórmula que se presenta a continuación:

$$\% \text{ Proteína} = \% \text{ de Nitrógeno} * \text{Factor de conversión (6.25)}$$

6.4. Fibra cruda

La determinación de fibra cruda se realizó de acuerdo al método 962.09 para fibra por digestión ácida/alcalina definido por la AOAC (1999), utilizando las muestras previamente desengrasadas, retenidas en los cartuchos tras la extracción de grasa. Se emplearon aproximadamente 4 g de muestra para iniciar la digestión ácida, la cual consistió en añadir 150 mL de H₂SO₄ al 1.25% en un vaso Berzelius y la mezcla se llevó a ebullición suave en el determinador de fibra durante 30 minutos, evitando el derrame de la muestra. Posteriormente, el contenido se filtró en una tela de lino español y se

realizaron tres lavados con 100 mL de agua destilada caliente, seguidos de la adición de 15 mL de NaOH al 1.25% y dos lavados adicionales. El residuo obtenido se recuperó con espátula y se transfirió a un vaso Berzelius limpio para llevar a cabo la digestión alcalina, agregando 150 mL de NaOH al 1.25% y manteniéndola en ebullición por 30 minutos en el determinador de fibra. Luego, la muestra se filtró y lavó dos veces con agua destilada caliente, se adicionaron 15 mL de H₂SO₄ al 1.25% y, tras dos lavados más con agua destilada, se agregaron 15 mL de etanol al 95%. El residuo se recuperó y se colocó en crisoles previamente llevados a peso constante, los cuales se deshidrataron en estufa a 105 °C durante dos horas, se enfriaron en desecador y se pesaron. Finalmente, el residuo se incineró y calcinó en una mufla a 550 °C durante 30 minutos, se dejó enfriar y se determinó su peso. El porcentaje de fibra cruda se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Fibra cruda} = \left(\frac{\text{Peso de residuo seco} - \text{Peso de cenizas}}{\text{Peso de muestra}} \right) * 100$$

6.5. Cenizas

La determinación del contenido de cenizas se realizó de acuerdo al método 942.05 descrito por la AOAC (1999) con algunas modificaciones. Para ello, se pesaron 3 g de muestra homogénea en crisoles previamente tarados. Posteriormente, las muestras se carbonizaron lentamente con ayuda de un triángulo de porcelana y un mechero Bunsen, evitando que se encendieran o derramaran. A continuación, los crisoles se trasladaron a una mufla y se calcinaron a 550 °C durante 4 horas, hasta obtener cenizas de color blanco grisáceo. Una vez finalizado el proceso, los crisoles se dejaron enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador, una vez fríos se pesaron con la muestra calcinada. Con los valores obtenidos se calculó el porcentaje de cenizas mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ cenizas} = \left(\frac{\text{Peso del crisol con muestra calcinada} - \text{Peso constante del crisol}}{\text{Peso de la muestra}} \right) * 100$$

7. Análisis fisicoquímicos de los productos extruidos

7.1. Índice de expansión (IE)

Para determinar el índice de expansión de los productos extruidos se cortaron al azar 20 pedazos de 3 cm de longitud por cada tratamiento, y se le realizaron mediciones a cada uno en la parte central, inferior y superior con un vernier digital marca Truper®. Al final se realizó un promedio de las mediciones y se dividió entre el diámetro de salida del orificio del extrusor para calcular el índice de expansión.

$$IE = \frac{\text{Diametro del pedazo extruido (mm)}}{\text{Diametro de la boquilla del extrusor (mm)}}$$

7.2. Densidad aparente (DA)

La densidad aparente de los productos expandidos por extrusión se determinó mediante el método geométrico, asumiendo una geometría cilíndrica del producto extruido. Para ello, se emplearon los mismos 20 segmentos utilizados en la determinación del índice de expansión. Cada segmento fue pesado individualmente y se midió su diámetro en la zona central y en ambos extremos de cada segmento extruido, a partir de estas mediciones se calculó el volumen correspondiente considerando la geometría de un cilindro. Finalmente, la densidad aparente se obtuvo como la relación entre la masa promedio de los segmentos extruidos y el volumen promedio calculado para los mismos. Las fórmulas utilizadas se muestran a continuación:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$v = \pi * r^2 * h$$

Las muestras que se utilizaron para los métodos de índice de absorción en agua (IAA), índice de solubilidad (ISA), diferencia total de color (ΔE), antocianinas totales (AT) y fenoles totales (FT) fueron las harinas de los 13 tratamientos de los productos extruidos.

7.3. Índice de absorción en agua (IAA) e Índice de solubilidad (ISA)

La determinación del índice de absorción en agua de la materia prima se realizó por triplicado, siguiendo el método descrito por (Anderson et al., 1969); se pesaron 1 g de cada muestra, posteriormente fueron disueltos en 10 mL de agua destilada en un tubo cónico para centrífuga de 15 mL, y puestas en agitación con un vortex hasta la suspensión de la mezcla, después se colocaron los tubos en un baño maría a temperatura ambiente y se sometieron en agitación constante de 150 rpm durante 30 minutos. Luego se agitaron una vez más los tubos con el vortex y se centrifugaron a 3500 g por 20 minutos. Se decantó el sobrenadante en unas charolas de aluminio previamente puestas a peso constante. El líquido de las charolas se secó en un horno a 120°C hasta su completa evaporación. Al final se pesaron las charolas. Se calculó el IAA mediante la siguiente fórmula:

$$IAA = \frac{\text{Peso del gel tras la centrifugación}}{\text{Peso de la muestra}}$$

El índice de solubilidad en agua se realizó siguiendo el mismo procedimiento experimental del IAA y se calculó mediante la siguiente fórmula en la cual se expresa el porcentaje de solubilidad en agua en relación al residuo de la evaporación y el peso seco de la muestra inicial.

$$ISA = \frac{\text{Peso del residuo de evaporación}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

7.4. Determinación de la diferencia total de color (ΔE)

El uso del método colorimétrico para la determinación del color, se basa en el cálculo de los coeficientes tricromáticos de una muestra a partir de la luz que esta refleja bajo un iluminante definido. A partir de estas mediciones se obtienen los valores triestímulo X, Y y Z. La diferencia de color se determina aplicando el teorema de Pitágoras para calcular la distancia en el espacio euclidiano (X, Y, Z) entre los puntos que representan el color de dos muestras; de esta manera, se cuantifica el cambio de color entre ellas (Mathias Rettig y Ah Hen, 2014).

La determinación del color se realizó por triplicado para cada muestra. Se empleó un colorímetro portátil 3NH®, modelo NR60CP (Shenzhen Threenh Technology Co., Ltd., China), previamente calibrado según las especificaciones del fabricante. Las mediciones se efectuaron en el sistema CIELAB, obteniéndose los parámetros L^* (luminosidad), a^* (componente rojo-verde) y b^* (componente amarillo-azul). A partir de estos valores, se calculó la diferencia total de color (ΔE) entre las muestras tratadas y la muestra de referencia, con el fin de evaluar la magnitud del cambio cromático. El cálculo de ΔE se realizó empleando la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}$$

donde L_0 , a_0 y b_0 corresponden a los valores del color de la muestra de referencia, y L , a y b los valores obtenidos para cada tratamiento. Todos los resultados se expresaron como el promedio de las tres repeticiones realizadas por muestra.

Como se aprecia en la **Figura 9**, la coordenada L^* representa la luminosidad del color y varía de 0 (negro) a 100 (blanco). La coordenada a^* indica la tendencia cromática hacia el rojo cuando es positiva y hacia el verde cuando es negativa, mientras que la coordenada b^* expresa la desviación hacia el amarillo para valores positivos y hacia el azul cuando es negativa (Mathias Rettig y Ah Hen, 2014).

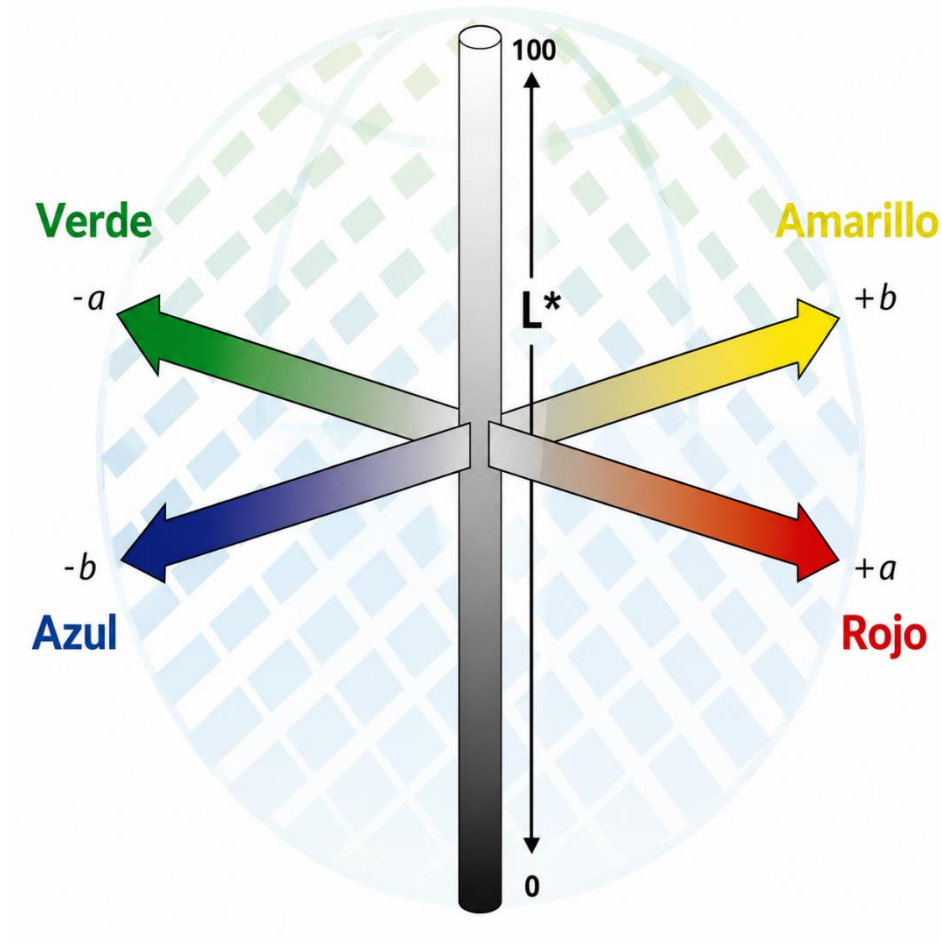


Figura 9. Coordenadas del color de acuerdo al sistema Hunter Lab. **Fuente:** Mathias Rettig y Ah Hen, (2014).

8. Análisis funcional de los productos extruidos

8.1. Determinación del contenido de antocianinas totales (CAT)

El contenido total de antocianinas se realizó siguiendo el método descrito por Abdel-Aal y Hucl (1999), con ligeras modificaciones. La determinación se realizó por triplicado. En un tubo para centrífuga de 15 mL cubierto con papel aluminio se pesó 1 g de muestra y se adicionaron 8 mL de una solución al 85% de etanol acidificado. La mezcla se agitó durante 20 minutos a temperatura ambiente en un baño maría con agitación constante de 155 rpm, posteriormente se centrifugó a 4500 g durante 15 minutos y el sobrenadante se colocó en un matraz volumétrico de 25 mL el cual se aforó con etanol acidificado.

La absorbancia del extracto (A) se midió a 535 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis, empleando una cubeta de cuarzo y etanol acidificado como blanco. El contenido total de antocianinas se expresó como miligramos equivalentes de cianidina-3-glucósido por kilogramo de muestra seca (mg C3G/kg ms), utilizando un coeficiente de absorción molar (ϵ) de $26,900 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ y una masa molar (MW) de 449.2 g/mol. Para calcular el contenido total de antocianinas se utilizó la siguiente fórmula:

$$C = \left(\frac{A}{\epsilon} \right) * \left(\frac{vol}{1000} \right) * MW * \left(\frac{1}{peso\ muestra} \right) * 10^6$$

8.2. Cuantificación de fenoles totales (CFT)

La cuantificación de fenoles totales se realizó siguiendo la metodología descrita por Singleton et al. (1999), con algunas modificaciones. En un tubo eppendorf se pesaron 0.2 g de harina y se le adicionaron 2 mL de metanol al 80% (v/v). La mezcla se transfirió a un tubo de centrífuga de 15 mL, se agitó en un vortex durante 30 segundos y posteriormente se mantuvo en agitación constante durante 1 hora en un agitador magnético digital marca ThermoScientific®. Después, la muestra se centrifugó a 3500 g por 15 minutos, el procedimiento de extracción se realizó tres veces; los sobrenadantes se colectaron en un matraz volumétrico de 10 mL y se aforó con agua destilada.

Para el ensayo de fenoles totales, se tomaron 100 µL del extracto, a los cuales se añadieron 500 µL de reactivo Folin-Ciocalteu, la mezcla se dejó reaccionar durante 3 a 5 minutos, posteriormente, se adicionaron 1500 µL de carbonato de sodio al 7.5% (p/v). Las muestras se incubaron en oscuridad, a temperatura ambiente durante 90 minutos.

Finalmente, la absorbancia de la muestra se determinó a una longitud de onda de 765 nm en un espectrofotómetro, utilizando como blanco agua destilada.

Para la curva de calibración, se prepararon soluciones de ácido gálico en concentraciones de 0, 6.25, 12.5, 25, 50 y 100 ppm, las cuales se procesaron bajo las mismas condiciones descritas para las muestras. Los valores de absorbancia obtenidos se representaron en un gráfico XY; donde X fue la concentración de las soluciones estándar y Y la absorbancia de las mismas; posteriormente se realizó un análisis de regresión lineal para obtener la ecuación de la recta del tipo $y=mx+b$, y de esta manera cuantificar el contenido de fenoles en la muestra. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido gálico/ g muestra (mg GAE/g de muestra) utilizando la siguiente fórmula:

$$CFT = (C_1 * V)/m$$

Donde:

CFT= Contenido fenólico total en mg GAE/g

C1= Concentración de ácido gálico establecida desde la curva de calibración en mg/L

V= Volumen del extracto en L

m= el peso de la muestra en g

9. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza para evaluar el efecto de los factores sobre las variables de respuesta con una $p \leq 0.05$ utilizando el software estadístico Design Expert versión 13.0.15 (Stat-Ease, Minneapolis, EE.U.U); posteriormente, se obtuvieron los coeficientes de regresión de un modelo polinomial de segundo orden el cual relaciona las variables de proceso y las respuestas de interés; por último, se obtuvieron gráficos de superficie de respuesta donde se representa la tendencia de los datos experimentales.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Análisis proximal de la materia prima

En la **Tabla 6** se muestran los resultados para el análisis químico proximal de la materia prima utilizada en la elaboración de productos extruidos a partir de harina de maíz rojo-amaranto adicionados con cúrcuma en polvo. Los resultados de la composición química proximal muestran que el amaranto posee el mayor contenido en proteínas, lípidos y fibra cruda. El polvo de cúrcuma contiene el mayor contenido en cenizas y el maíz rojo el mayor contenido de carbohidratos. Los resultados obtenidos para el análisis químico proximal del maíz rojo son similares a lo reportado por Pineda Quiroz et al. (2025) y Mex Álvarez et al. (2016).

El contenido de proteínas, extracto etéreo, cenizas, carbohidratos y humedad de la harina de amaranto estuvieron dentro de los rangos reportados por Singh y Punia (2020) y Tafadzwa Muchekeza et al. (2025), solo mostró un valor inferior en la fibra cruda, con respecto a los valores reportados por estos autores.

En cuanto a los valores del contenido de humedad, proteínas, fibra cruda y carbohidratos para el polvo de cúrcuma obtenidos en este estudio, concuerda con lo reportado por Vásquez-Bustamante (2024).

2. Modelo matemático de las variables de respuesta

Para determinar si existe una relación entre las variables independientes y las dependientes, los datos recopilados se sometieron a un análisis de regresión lineal múltiple utilizando el paquete estadístico Design Expert versión 13. La regresión lineal es un método estadístico para modelar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes. El objetivo es encontrar la ecuación que mejor se ajuste a los datos para predecir los valores de la variable dependiente en función de los valores de las variables independientes. Esto se consigue mediante el método de mínimos cuadrados, este método trata de minimizar las diferencias entre los valores observados de la variable dependiente y los valores predichos por el modelo (residuos). Los residuos se elevan al cuadrado y se suman. La mejor ecuación de regresión será aquella en la que esta suma de los cuadrados de los residuos tenga el valor más bajo (Arias, 2024).

Tabla 6. Análisis químico proximal de la harina de maíz rojo, harina de amaranto y polvo de cúrcuma

	Harina de maíz rojo	Harina de Amaranto	Polvo de Cúrcuma
Humedad (g/100g)	10.6 ± 0.03	9.3 ± 0.30	8.3 ± 0.06
Proteínas (g/100g)	5.9 ± 0.34	15.4 ± 0.23	7.4 ± 0.25
Extracto etéreo (g/100g)	4.0 ± 0.03	8.0 ± 0.26	1.9 ± 0.08
Cenizas (g/100g)	1.4 ± 0.02	3.2 ± 0.15	6.7 ± 0.07
Fibra cruda (g/100g)	1.4 ± 0.13	2.7 ± 0.09	5.2 ± 0.20
Carbohidratos (g/100g)	76.4 ± 0.46	61.5 ± 0.32	70.5 ± 0.41

Las variables dependientes se ajustaron a una ecuación polinomial de segundo orden (Danbaba, Nkama y Badau, 2015).

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

El modelo ajustado para cada determinación se examinó posteriormente mediante un análisis de varianza para comprobar su significancia, coeficiente de determinación R^2 , falta de ajuste y precisión de adecuación.

3. Análisis de varianza de los modelos ajustados para las respuestas evaluadas

En las **Tablas 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14** se presenta el análisis de varianza (ANDEVA) correspondiente a los modelos polinomiales de segundo orden ajustados a los datos experimentales para las respuestas índice de expansión (IE), densidad

aparente (DA), índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), diferencia total de color (ΔE), contenido de fenoles totales (CFT) y antocianinas totales (CAT); así como, la significancia de cada uno de los factores en su término lineal, cuadrático e interacción sobre las respuestas analizadas.

La prueba de significancia se realiza mediante un Análisis de Varianza (ANDEVA) calculando el valor F, el cual se obtiene de la división de los cuadrados medios de regresión dividido entre los grados de libertad.

3.1. Coeficiente de regresión o determinación (R^2) en el ANDEVA

El coeficiente de determinación (R^2) puede ser interpretado como la proporción de varianza en la variable dependiente que es predecible a partir de las variables independientes (Chicco, Warrents y Jurman, 2021).

Para probar si los modelos aplicados se ajustan a los datos, a menudo se utiliza el coeficiente de determinación (R^2). El valor de R^2 se toma como una medida de que tan bien el modelo de regresión describe los datos observados. Se sabe que cuando R^2 es 1, existe una relación lineal perfecta entre X, Y; es decir, el 100 % del cambio en Y se explica por el cambio en X. Cuando el valor de R^2 es 0 no toda la variación de Y se explica por la variación de X (Palma, 2022). Se han identificado algunos problemas tanto en la definición de R^2 como en su aplicación. Primero, este coeficiente puede incrementar artificialmente a medida que se incluyen más variables en el modelo; siendo que, este incremento no implica que estas variables independientes sean significativas e importantes para el modelo (Palma, 2022).

3.2. Prueba de falta de ajuste

La finalidad de la prueba de falta de ajuste es evaluar si el modelo obtenido a partir del Diseño Central Compuesto Rotable (DCCR) describe correctamente el comportamiento de los datos experimentales. Esta prueba permite identificar si el modelo presenta errores sistemáticos, al diferenciar los valores observados y los valores predichos que no pueden explicarse únicamente por el error experimental. Se evalúa

mediante la separación del error puro y la falta de ajuste. El error puro corresponde a la variabilidad natural del experimento y se obtiene a partir de repeticiones realizadas en las mismas condiciones, lo que son los puntos centrales del DCCR. Por otro lado, la falta de ajuste representa la variación adicional que el modelo no logra explicar. A partir de lo anterior se calcula un valor F que compara la variabilidad debida a la falta de ajuste con la variabilidad del error puro, con este análisis se puede determinar si las diferencias entre el modelo y los datos son estadísticamente significativas (Montgomery, 2020). El criterio principal para interpretar esta prueba es el valor p. Cuando el valor p es mayor a 0.05, se considera que la falta de ajuste no es significativa, lo que indica que el modelo representa adecuadamente los datos experimentales. En cambio, si el valor p es menor a 0.05, la falta de ajuste es significativa, lo que sugiere que el modelo no describe correctamente el sistema y podría requerir modificaciones (Myers, Montgomery, y Anderson Cook, 2016).

3.3. Precisión adecuada

La precisión adecuada mide la capacidad del modelo para distinguir entre los efectos reales de los factores y la variabilidad aleatoria presente en los datos. La precisión adecuada se expresa como una razón señal/ruido, y su interpretación es directa: valores elevados indican que el modelo posee una señal fuerte en comparación con el ruido experimental. En estudios de superficie de respuesta, se considera que un valor de precisión adecuada mayor a 4 es deseable, ya que indica que el modelo puede utilizarse de manera confiable para navegar el espacio experimental y realizar predicciones (Myers, Montgomery, y Anderson Cook, 2016).

Tabla 7. Análisis de varianza de la respuesta índice de expansión (IE) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	R ²	R ² ajustada	Precisión adecuada	C.V. (%)
Modelo	7.74	5	1.55	72.34	<0.0001	0.59	0.58	31.92	6.53
A	2.16	1	2.16	101.20	<0.0001				
B	3.20	1	3.20	149.55	<0.0001				
AB	0.10	1	0.10	4.87	<0.0282				
A ²	0.92	1	0.92	43.07	<0.0001				
B ²	1.14	1	1.14	53.16	<0.0001				
Falta de ajuste	1.76	3	0.59	40.22	<0.0001				

A: Concentración de harina de amaranto; **B:** Temperatura del dado de salida; **AB:** Interacción concentración de harina de amaranto- Temperatura del dado de salida.

Tabla 8. Análisis de varianza de la respuesta densidad aparente (DA) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	R ²	R ² ajustada	Precisión adecuada	C.V. (%)
Modelo	5.08E+05	5	1.02E+05	60.70	<0.0001	0.55	0.54	23.76	13.45
A	2.68E+05	1	2.68E+05	160.21	<0.0001				
B	57624.65	1	57624.65	34.40	<0.0001				
AB	4748.01	1	4748.01	2.83	<0.0935				
A2	1.76E+05	1	1.76E+05	43.07	<0.0001				
B2	2235.01	1	2235.01	104.97	<0.2492				
Falta de ajuste	87056.64	3	29018.88	21.63	<0.0001				

A: Concentración de harina de amaranto; **B:** Temperatura del dado de salida; **AB:** Interacción concentración de harina de amaranto- Temperatura del dado de salida

4. Análisis fisicoquímico de los productos extruidos

4.1. Índice de expansión (IE)

El índice de expansión describe el grado en que un producto extruido aumenta su volumen al salir de la matriz, reflejando la formación de una estructura porosa influenciada por la formulación y las condiciones de procesamiento (Guy, 2001).

Los coeficientes de regresión del modelo cuadrático ajustado para el índice de expansión (IE), se muestran en la **Tabla 9**, donde se puede observar que tanto la concentración de amaranto como la temperatura presentaron efecto significativo en sus términos lineales y cuadráticos ($p \leq 0.05$); así como, la interacción concentración de amaranto-temperatura ($p \leq 0.05$), indicando que la combinación simultánea de ambos factores influye en el comportamiento del IE de los productos extruidos. Coeficientes de regresión positivos indican un incremento en la variable de respuesta; mientras que, coeficientes de regresión negativos indican una disminución en la respuesta en cuestión.

En la **Figura 10**, se muestra el gráfico de superficie de respuesta para la variable de IE, en la cual se presentaron valores dentro del rango de 1.72 a 2.80, donde el valor mínimo se obtuvo a 154°C con 85.4% de concentración de amaranto y el valor máximo fue obtenido a 126°C con 14.6% de concentración de amaranto. Se puede apreciar que la expansión disminuye moderadamente conforme se incrementa la temperatura, de igual manera disminuye conforme la concentración de amaranto supera niveles intermedios (mayor al 50%). Este comportamiento indica que la expansión del extruido está controlada principalmente por la composición de la mezcla, en la cual el contenido de amaranto desempeña un papel importante, mientras que el efecto térmico asume un papel secundario dentro del rango evaluado.

Abraham et al. (2025) reportan que valores elevados del índice de expansión (IE) se asocian con productos extruidos que presentan texturas más ligeras y crujientes. Por el contrario, una disminución del IE suele deberse a la presencia de un alto contenido de fibra y proteínas, lo que conduce a la formación de estructuras

Tabla 9. Coeficientes de regresión del modelo cuadrático ajustado y nivel de significancia para las variables de respuestas índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), índice de absorción en agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), diferencia total de color (ΔE), contenido de fenoles totales (CFT) y antocianinas totales (CAT) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.

Respuesta	Coeficientes de regresión					
	Intercepto	Lineales		Interacción	Cuadráticos	
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
IE	+12.065	+0.013 (<0.0001)	-0.133 (<0.0001)	-0.000073 (0.0282)	-0.000065 (<0.0001)	+0.000455 (<0.0001)
DA	+609.499	-3.883 (<0.0001)	-5.110 (<0.0001)	+0.015713 (0.0935)	+0.028539 (<0.0001)	+0.020351 (0.2492)
IAA	-3.948	-0.029 (<0.0001)	+0.116 (0.0483)	+0.000230 (0.0792)	-0.000111 (0.0082)	-0.000433 (0.0727)
ISA	-55.761	+0.327 (<0.0001)	+0.971 (0.3109)	-0.002200 (0.3116)	+0.002263 (0.0022)	-0.003271 (0.4448)
ΔE	+91.362	-0.036 (<0.0001)	-0.940 (0.0029)	-0.001570 (0.0051)	+0.002069 (<0.0001)	+0.003787 (0.0004)
CFT	+119.798	-0.441 (<0.0001)	-1.337 (0.0554)	+0.002634 (0.0089)	-0.000241 (0.4073)	+0.004138 (0.0277)
CAT	-483.458	-1.353 (<0.0001)	+8.164 (<0.9319)	+0.007017 (0.2005)	-0.001566 (0.4638)	-0.030373 (0.0068)

b_1 : coeficiente de regresión para el factor concentración de amaranto; b_2 : coeficiente de regresión para el factor temperatura del dado de salida.

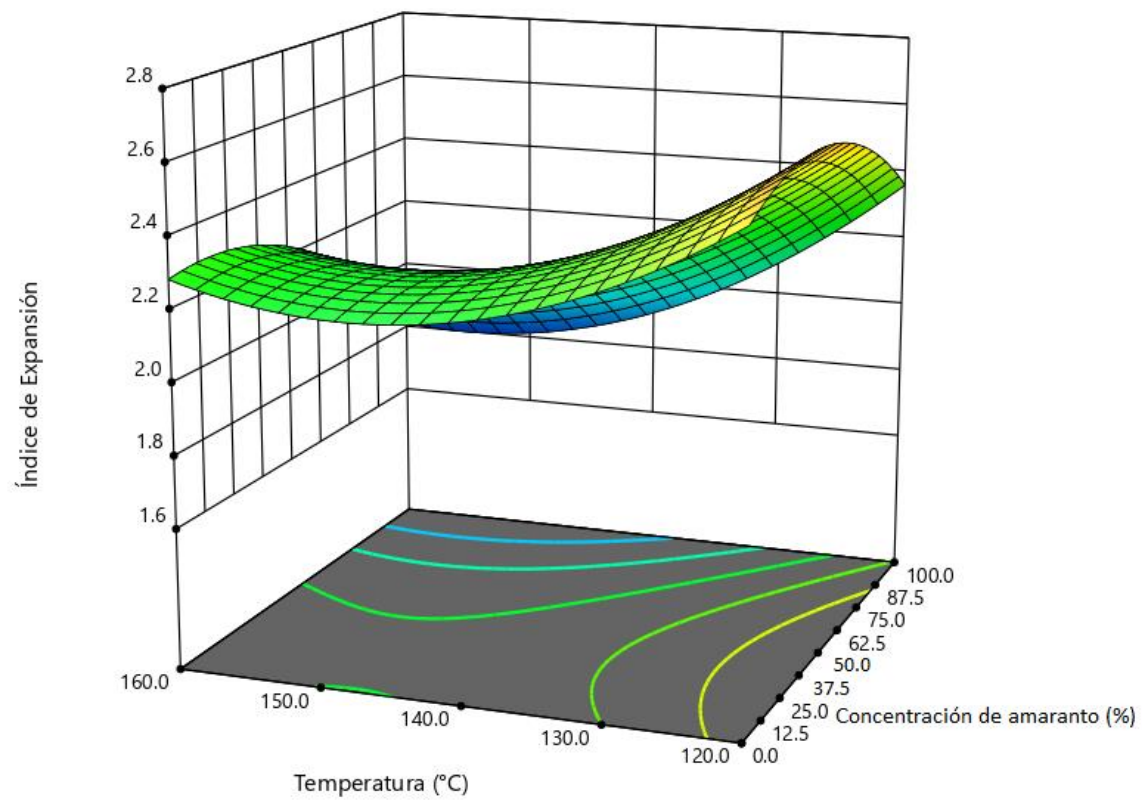


Figura 10. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre el índice de expansión (IE) de los productos extruidos obtenidos a partir de maíz rojo-amaranto adicionados con polvo de cúrcuma.

menos expandidas y más compactas. En el presente estudio, el producto expandido elaborado con la mayor concentración de amaranto, un pseudocereal caracterizado por un alto contenido proteico, presentó los valores más bajos de IE, lo cual concuerda con lo reportado por dichos autores.

De igual manera, el amaranto posee una mayor proporción de fibra dietética en comparación con el maíz, lo que explica el bajo índice de expansión observado en las formulaciones con mayor inclusión de este ingrediente. Según Abraham et al. (2025), la presencia o adición de fibra en matrices extruidas incrementa la viscosidad de la masa durante la extrusión, reduciendo el agua disponible para el proceso de gelatinización del almidón, lo que resulta en extruidos con expansión limitada. La fibra dietética compite directamente con el almidón por el agua disponible y, al aumentar la viscosidad del fundido, altera la matriz amilácea, dificultando la formación de burbujas de vapor y, en consecuencia, la expansión del producto.

Por otro lado, Ali et al. (2024) señalan que la temperatura del barril y el contenido de humedad son dos factores determinantes en la expansión radial durante la extrusión, ya que el incremento de la temperatura favorece el sobrecalentamiento del agua presente en la mezcla, promoviendo la generación de vapor y una mayor expansión. Sin embargo, en este estudio, las temperaturas más elevadas dieron como resultado valores menores de IE, lo que sugiere que la composición de la formulación tuvo un efecto más predominante que la temperatura del proceso sobre el comportamiento expansivo del extruido.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Sharifi et al. (2021), quienes observaron índices de expansión bajos en extruidos elaborados con altas proporciones de harina de soya, ingrediente rico en proteínas, los cuales además de presentar menor expansión desarrollaron estructuras más densas y compactas.

Asimismo, Allen et al. (2007) indican que el índice de expansión de los extruidos está influenciado por la composición estructural y las interacciones moleculares entre los componentes de la mezcla. Aunque el almidón es el principal componente responsable del fenómeno de expansión, otros constituyentes como proteínas, azúcares, lípidos y fibras actúan como diluyentes del almidón, disminuyendo el IE. En particular, la formación

de complejos amilosa–proteína limita la gelatinización y expansión del almidón, lo que da como resultado productos con menor volumen y mayor compactación.

4.2. Densidad aparente (DA)

La densidad aparente de los productos extruidos se define como la relación entre la masa y el volumen del material expandido, y se relaciona directamente con la capacidad de expansión durante la extrusión; un producto más expandido tendrá menor densidad aparente (Pismag et al., 2024).

Los coeficientes de regresión del modelo cuadrático para la densidad aparente (DA) (**Tabla 9**). Se observa que la concentración de amaranto tuvo un efecto significativo tanto en su término lineal como en su término cuadrático ($p \leq 0.05$). Por otro lado, la temperatura mostró un efecto significativo únicamente en su término lineal ($p \leq 0.05$); en cuanto a la interacción concentración de amaranto-temperatura no presentó efecto significativo un nivel de confianza del 95% sobre la respuesta evaluada.

Los resultados de DA mostraron un valor mínimo de 198.59 kg/m³ a 140 °C y 50 % de harina de amaranto; mientras que, el valor máximo fue de 492.54 kg/m³, y se obtuvo a 154 °C y 85.4 % de harina de amaranto. La gráfica de superficie de respuesta obtenida (**Figura 11**) mostró un incremento en la DA a mayores concentraciones de amaranto y altas temperaturas, y una disminución en la DA a medida que disminuye tanto la concentración de amaranto como la temperatura de extrusión.

Los resultados obtenidos se pueden fundamentar con lo reportado por Sharifi et al. (2021), quienes demostraron que el incremento en componentes estructurales como proteínas y fibra disminuye la expansión del extruido, generando productos con mayor densidad debido a una menor formación de celdas de aire durante el proceso. De forma similar, Allen et al. (2007) señalaron que matrices con mayor proporción de proteína tienden a presentar densidades más elevadas, ya que este componente interfiere con la gelatinización del almidón y reduce la expansión al momento de la salida del extrusor. Los valores máximos de DA obtenidos en este estudio bajo condiciones de 85.4 a 100 % de amaranto coinciden con estos hallazgos, reafirmando que la composición de la matriz influye directamente en la estructura del extruido.

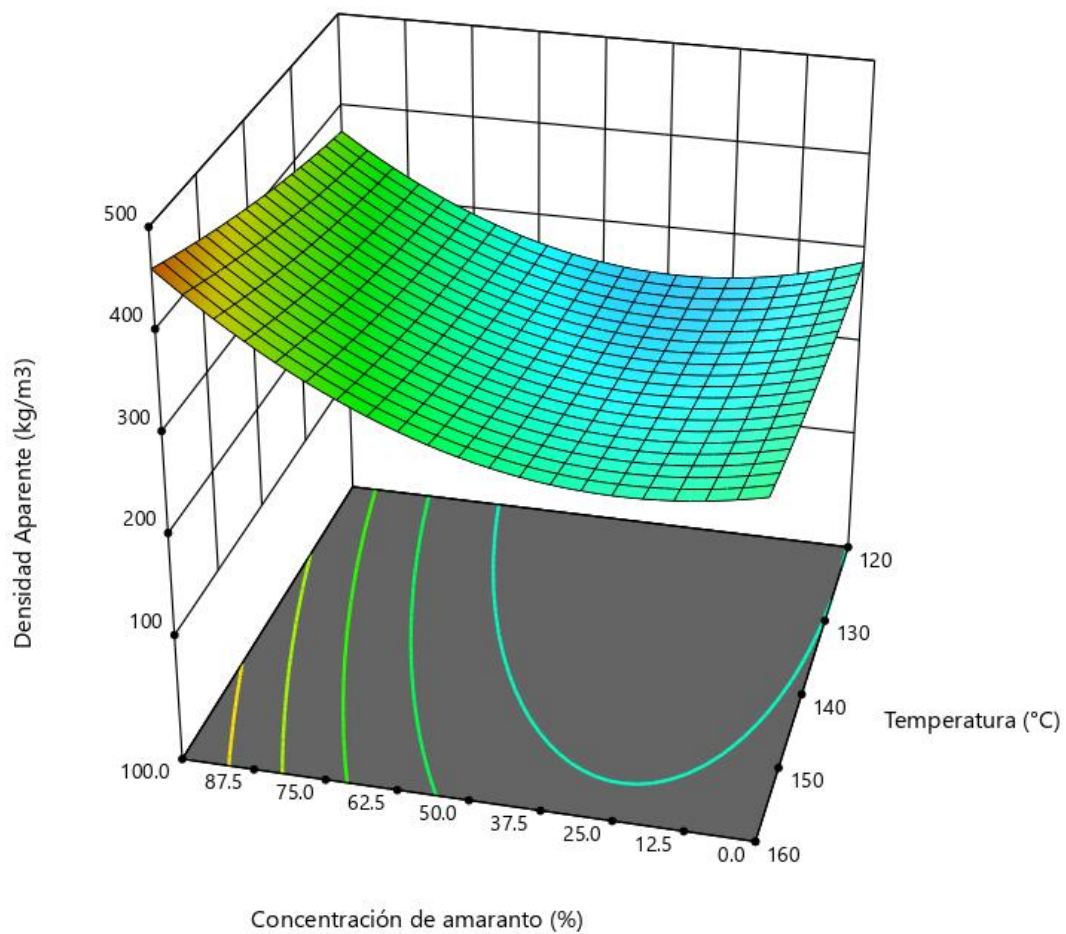


Figura 11. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre la densidad aparente (DA) de los productos extruidos.

Por su parte, estudios recientes como los de Gámez et al. (2021) han mostrado que la incorporación de harinas de amaranto en productos extruidos disminuye la expansión, debido al aporte de proteínas, fibra y minerales que rigidizan la matriz y restringen la formación de burbujas de vapor. Esto explica la ausencia de cambios drásticos en la superficie de respuesta: incluso con incrementos en la temperatura, la elevada proporción de sólidos proveniente del amaranto limita la expansión, manteniendo la densidad en rangos similares entre condiciones.

4.3. Índice de absorción en agua (IAA)

El índice de absorción en agua (IAA) indica la capacidad del almidón o del producto extruido para retener agua tras su hinchamiento, siendo útil como indicador del grado de gelatinización (Ruiz Armenta et al., 2022).

Los coeficientes de regresión del modelo cuadrático para la variable IAA se muestran en la **Tabla 9**, resaltando que valores positivos de los mismos indican un incremento en la variable de respuesta; mientras que, valores negativos indican una disminución en la respuesta en cuestión. De acuerdo con los valores obtenidos, la concentración de amaranto (b_1) y la temperatura (b_2) presentaron un efecto significativo en su término lineal ($p \leq 0.05$) y ($p = 0.0483$) respectivamente, indicando que ambas variables influyen de manera importante en el comportamiento del IAA.

La interacción entre la concentración de amaranto y la temperatura (b_{12}) presentó un efecto significativo sobre el IAA ($p = 0.08$), lo que sugiere que existe una influencia conjunta importante entre ambos factores. Finalmente, los términos cuadráticos b_{11} y b_{22} también fueron significativos ($p = 0.0082$ y $p = 0.0727$, respectivamente), lo que indica que las variaciones no lineales de estas variables sí tienen un impacto importante en el IAA.

Tabla 10. Análisis de varianza de la respuesta índice de absorción en agua (IAA) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	R ²	R ² ajustada	Precisión adecuada	C.V. (%)
Modelo	2.83	5	0.56	13.07	<0.0001	0.68	0.63	10.24	5.91
A	1.80	1	1.80	41.53	<0.0001				
B	0.18	1	0.18	4.24	0.0483				
AB	0.14	1	0.14	3.30	0.0792				
A2	0.34	1	0.34	8.03	0.0082				
B2	0.14	1	0.14	3.46	0.0727				
Falta de ajuste	0.13	3	0.04	1.02	0.4013				

A: Concentración de harina de amaranto; **B:** Temperatura del dado de salida; **AB:** Interacción concentración de harina de amaranto- Temperatura del dado de salida.

El IAA mostró valores entre 2.7 y 4.1, correspondientes a condiciones de 126 °C con 85.4 % de concentración de amaranto y 140 °C con 50 % de amaranto, respectivamente. En la **Figura 12**, la gráfica de superficie de respuesta muestra que el IAA aumenta conforme disminuye el contenido de amaranto; así como, cuando la temperatura alcanza valores intermedios (aproximadamente 140°C); mientras que tiende a disminuir con elevadas concentraciones de amaranto. Esta respuesta indica que la estructura final del extruido depende tanto del grado de modificación del almidón inducido por la temperatura como del aporte de componentes estructurales del amaranto.

Este comportamiento concuerda con estudios realizados por Ali et al. (2024), donde reportan que el índice de absorción en agua incrementa al aumentar la temperatura de extrusión, lo cual se asocia con una mayor gelatinización y desorganización del gránulo de almidón, favoreciendo la capacidad del material para retener agua. De manera similar, Ruiz et al. (2022) reportan que temperaturas elevadas favorecen la separación de las cadenas de amilosa y amilopectina, lo que conduce a la formación de una matriz expandible con mayor afinidad por el agua, incrementando así los valores de IAA.

Por otro lado, la disminución del índice de absorción en agua observada a mayores concentraciones de amaranto puede explicarse por el incremento en el contenido de proteínas y la reducción relativa del almidón en la formulación. Allen et al. (2007) demostraron que, en extruidos de maíz, el IAA disminuye considerablemente a medida que aumenta el nivel de proteína, ya que los extruidos con mayor contenido de almidón presentan una mayor capacidad de absorción de agua en comparación con aquellos con una mayor relación proteína-almidón. En este sentido, el almidón es considerado un parámetro determinante del IAA, debido a su capacidad de hinchamiento y retención de agua tras la gelatinización. Resultados similares fueron reportados por Sharifi et al. (2021), quienes observaron que el incremento de harina de soya, ingrediente rico en proteínas, provocó una disminución del IAA de 3.85 g/g a 3.63 g/g. Este comportamiento fue atribuido a la formación de agregados almidón-proteína; así como, a la cristalización de complejos amilosa-lípido y a la desnaturalización de proteínas durante el proceso de extrusión, fenómenos que limitan la disponibilidad de grupos hidrofílicos del almidón y, en consecuencia, reducen la absorción de agua.

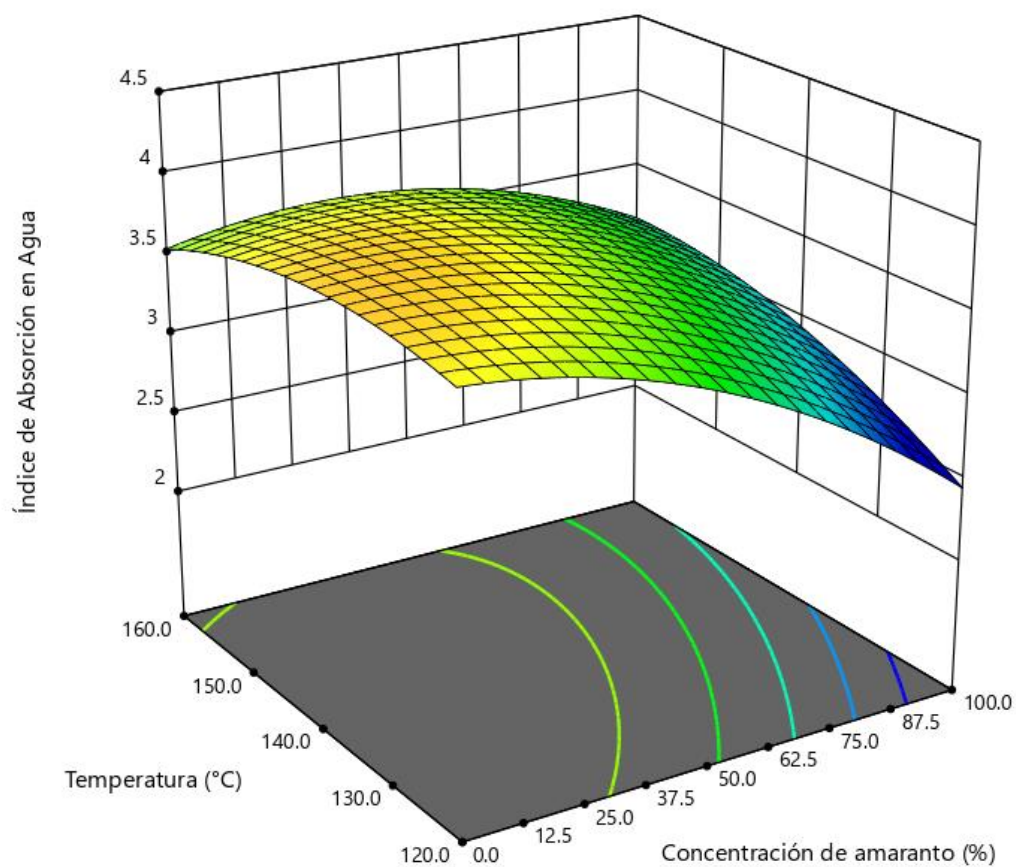


Figura 12. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre el índice de absorción en agua (IAA) de los productos extruidos.

4.4. Índice de solubilidad en agua (ISA)

El índice de solubilidad en agua (ISA) expresa la fracción de sólidos que se disuelven en agua tras el procesamiento, reflejando el grado de degradación o dextrinización del almidón. Un valor mayor indica la formación de moléculas más pequeñas y solubles. Este parámetro se usa comúnmente para evaluar cambios estructurales del almidón ocasionados por la extrusión (Ruiz Armenta et al., 2022).

Los coeficientes de regresión del modelo cuadrático utilizado para evaluar la variable ISA se presentan en la **Tabla 9**. De acuerdo con los valores obtenidos, el término lineal y cuadrático de la concentración de amaranto presentaron efecto estadísticamente significativo sobre el ISA; mientras el factor temperatura (b_2) y la interacción no presentó efecto significativo sobre el ISA.

En la **Figura 13** se muestra la superficie de respuesta correspondiente al ISA en función de la concentración de amaranto y la temperatura de extrusión. Se observa que el ISA se mantuvo prácticamente constante frente a los cambios en la temperatura de extrusión, mientras que aumentó conforme se incrementó la concentración de amaranto en la formulación. Este comportamiento sugiere que, la composición del alimento tuvo un efecto más determinante que la temperatura sobre la solubilidad del producto extruido.

De acuerdo con Ali et al. (2024), el ISA es un parámetro de gran utilidad para evaluar el grado de dextrinización y degradación molecular inducido durante el proceso de extrusión, ya que el incremento de la temperatura de cocción puede provocar la ruptura de las macromoléculas de almidón, dando lugar a fracciones de menor peso molecular con mayor solubilidad en agua. Sin embargo, estos autores también señalan que el efecto de la temperatura sobre el ISA puede verse reducido cuando otras variables del sistema, como la composición de la formulación o el contenido de humedad, favorecen la estabilidad de la matriz fundida. Esto puede explicar por qué, en el presente estudio, el ISA no mostró variaciones significativas con el aumento de la temperatura de extrusión.

Por otro lado, el incremento en ISA observado a mayores concentraciones de amaranto puede deberse a los cambios en la composición química del sistema, particularmente al aumento del contenido de proteínas y a la modificación de la relación proteína–almidón.

Tabla 11. Análisis de varianza de la respuesta índice de solubilidad en agua (ISA) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	R ²	R ² ajustada	Precisión adecuada	C.V. (%)
Modelo	2029.22	5	405.84	29.61	<0.0001	0.83	0.80	16.41	15.34
A	1816.69	1	1816.69	132.54	<0.0001				
B	14.56	1	14.56	1.06	0.3109				
AB	14.52	1	14.52	1.06	0.3116				
A2	153.68	1	153.68	11.21	0.0022				
B2	8.22	1	8.22	0.59	0.4448				
Falta de ajuste	310.93	3	103.64	27.91	<0.0001				

A: Concentración de harina de amaranto; **B:** Temperatura del dado de salida; **AB:** Interacción concentración de harina de amaranto-temperatura del dado de salida.

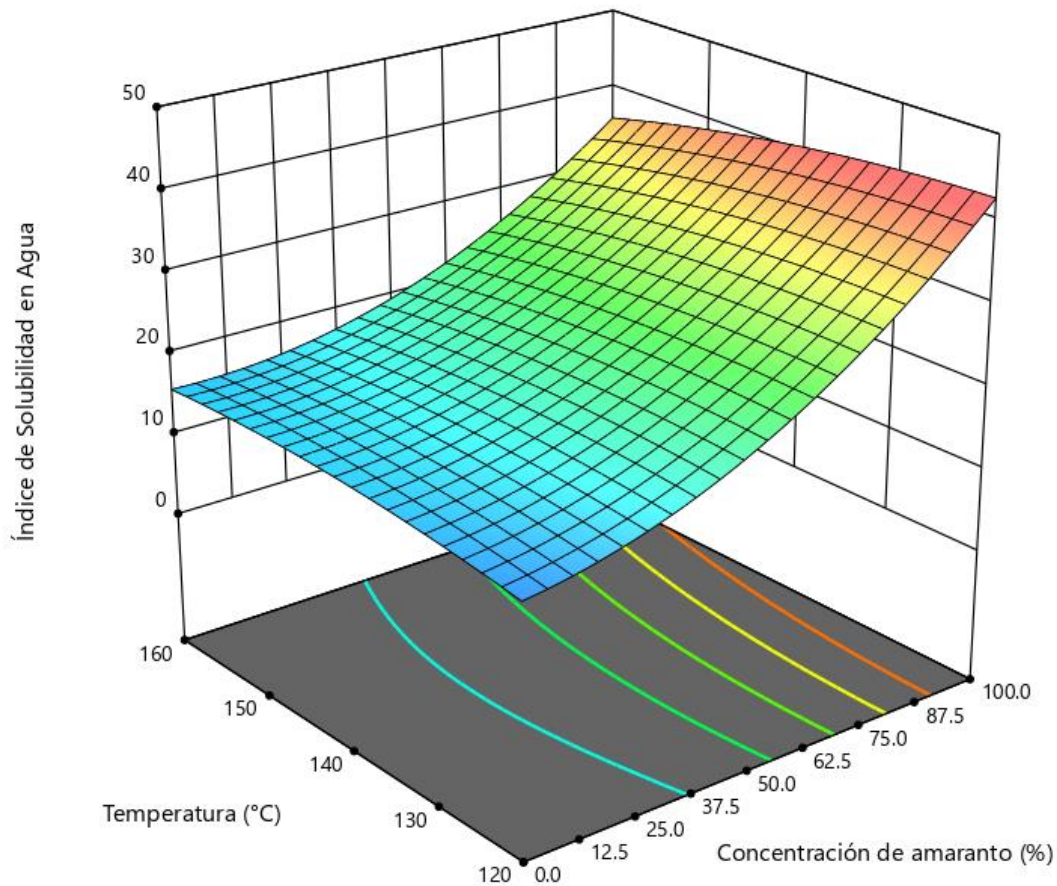


Figura 13. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre el índice de solubilidad en agua (ISA) de los productos extruidos.

Allen et al. (2007) reportaron que el ISA tiende a aumentar conforme disminuye el nivel de proteína, lo cual fue asociado con una mayor proporción de almidón dañado o dextrinizado durante la extrusión. En dichos sistemas, el almidón se convierte en el componente dominante de la matriz, favoreciendo una mayor solubilidad en agua.

No obstante, Ruiz et al. (2022) señalaron que el ISA de un producto extruido no depende exclusivamente del almidón, sino que está fuertemente influenciado por la composición global del alimento y por las interacciones entre sus componentes químicos y el agua. Estos autores destacan que, en formulaciones con mayor contenido proteico,

la interacción proteína–agua puede ser más relevante que la interacción almidón–agua, observando que harinas con niveles elevados de proteína presentan, de manera progresiva, valores superiores de solubilidad en agua.

4.5. Diferencia total de color (ΔE)

La diferencia total del color (ΔE) es un parámetro empleado para evaluar los cambios cromáticos en productos extruidos, ya que permite cuantificar de manera integral las variaciones en los valores L^* , a^* y b^* del sistema CIELAB. En procesos de extrusión, estos cambios suelen estar asociados al pardeamiento no enzimático, la degradación de pigmentos naturales y las reacciones de Maillard, las cuales se intensifican por las altas temperaturas y cizalla características del proceso (Maskan, 2001)

Asimismo, se ha señalado que la formulación, la humedad y la temperatura de extrusión influyen significativamente en ΔE , debido a que afectan la estabilidad térmica de compuestos como antocianinas, carotenoides y fenoles, modificando la apariencia final del producto (Guy, 2001).

En este estudio, los valores mínimos de ΔE se obtuvieron a 140 °C y 50 % de amaranto, mientras que los máximos se registraron a 154 °C y 14.6 % de amaranto, indicando que tanto la temperatura como la concentración de amaranto influyen significativamente en el cambio global de color del producto extruido.

Los coeficientes de regresión del modelo cuadrático para la diferencia total de color (ΔE) se presentan en la **Tabla 9**, en la tabla se observa un efecto significativo de los factores temperatura y concentración de amaranto en su término lineal y cuadrático; así como la interacción de ambos factores.

Tabla 12. Análisis de varianza de la respuesta diferencia total de color (ΔE) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	R ²	R ² ajustada	Precisión adecuada	C.V. (%)
Modelo	1137.64	5	227.53	52.32	<0.0001	0.59	0.58	20.21	7.35
A	316.40	1	316.40	72.75	<0.0001				
B	39.61	1	39.61	9.11	0.0029				
AB	34.97	1	34.97	8.04	0.0051				
A2	615.46	1	615.46	141.52	<0.0001				
B2	57.78	1	57.78	13.29	0.0004				
Falta de ajuste	248.36	3	82.79	27.63	<0.0001				

A: Concentración de harina de amaranto; **B:** Temperatura del dado de salida; **AB:** Interacción concentración de harina de amaranto- Temperatura del dado de salida.

En la **Figura 14**, se observa una disminución del ΔE a concentraciones intermedias de amaranto; sin embargo, este parámetro aumentó ligeramente cuando se emplearon bajas concentraciones de amaranto combinadas con altas temperaturas de extrusión. Este comportamiento sugiere que la estabilidad del color está relacionada en gran medida con la proporción de amaranto en la formulación y con la severidad térmica del proceso.

El incremento en la diferencia total de color a temperaturas elevadas puede deberse a la intensificación de las reacciones de pardeamiento no enzimático, principalmente la reacción de Maillard, la cual es favorecida por las altas temperaturas, presiones y esfuerzos de cizallamiento presentes durante la extrusión. Abraham et al. (2025) reportaron que estas condiciones promueven la formación de melanoidinas, compuestos responsables del desarrollo de tonalidades marrones en productos extruidos. Adicionalmente, fenómenos como la caramelización de azúcares, la degradación térmica de pigmentos naturales del maíz (antocianinas) y la oxidación lipídica contribuyen a la disminución de la luminosidad y al aumento de ΔE .

La materia prima utilizada en este estudio influyó de manera determinante en el color final de las botanas extruidas. El uso de maíz rojo y amaranto, materias primas ricas en compuestos fenólicos, antocianinas y proteínas, favoreció el desarrollo de tonalidades marrones durante el proceso de extrusión, particularmente bajo condiciones de alta temperatura. Sharifi et al. (2021) señalaron que la incorporación de harinas con alto contenido proteico puede intensificar la reacción de Maillard, promoviendo un mayor oscurecimiento del producto. Asimismo, las diferencias en la expansión y en las propiedades superficiales de los extruidos pueden modificar la reflexión de la luz, lo que impacta directamente en los parámetros de color.

Por otro lado, la adición de cúrcuma aportó tonalidades amarillas al producto final, debido a su contenido de pigmentos amarillos naturales. Se ha reportado que la inclusión de colorantes naturales no solo influye en los parámetros cromáticos, sino que también mejora el atractivo visual de los productos extruidos. En este sentido, la combinación de maíz rojo, amaranto y cúrcuma dio lugar a botanas extruidas con una coloración predominante entre amarilla y marrón, como resultado de la interacción entre los

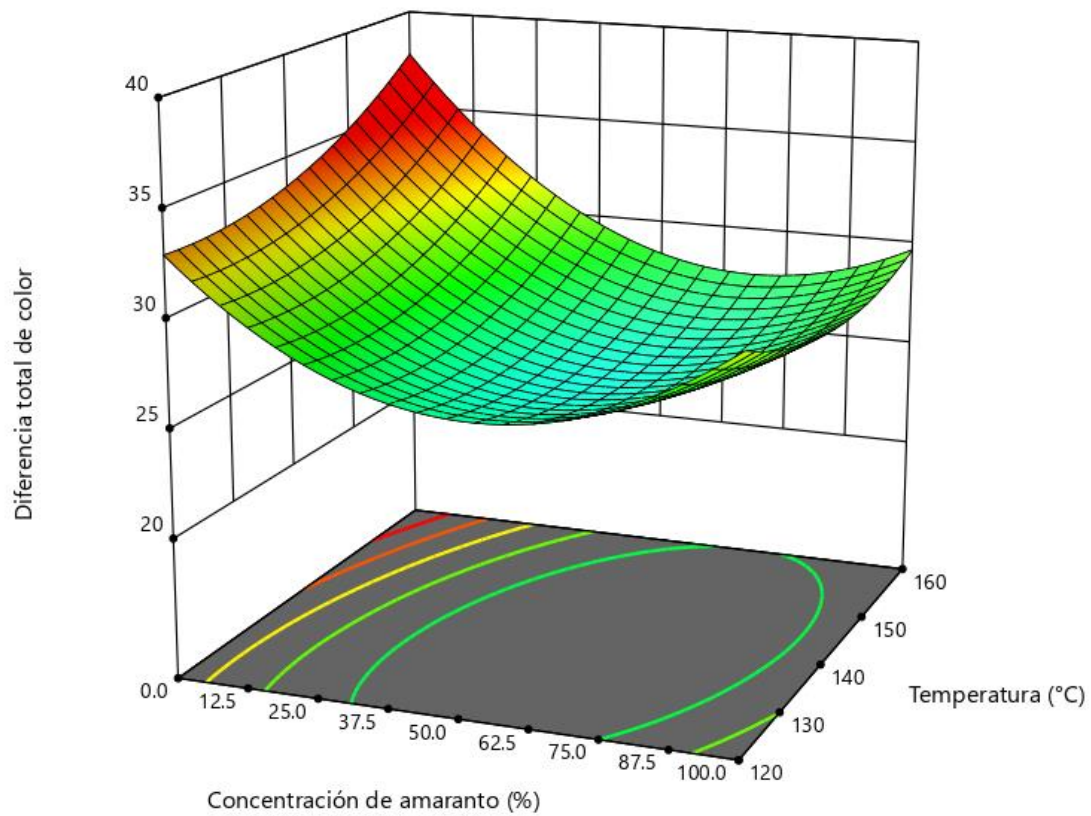


Figura 14. Efecto de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y concentración de amaranto (%) sobre la diferencia total de color (ΔE) de los productos extruidos.

pigmentos presentes en las materias primas y las reacciones inducidas durante la extrusión.

5. Análisis funcionales de los productos extruidos

En las **Tablas 13 y 14** se presenta el análisis de varianza para las respuestas de antocianinas totales (CAT) y fenoles totales (CFT) de los productos extruidos. Para ambas respuestas, los modelos de regresión resultaron significativos ($p \leq 0.05$). Los valores de R^2 ajustada fueron de 0.72 y 0.75 para CAT y FT, respectivamente, indicando que los modelos explican una proporción considerable de la variabilidad observada.

Los coeficientes de variación (C.V.) fueron de 26.15% para AT y 16.74% para FT, lo que refleja una precisión experimental aceptable, especialmente en el caso de los fenoles totales. Finalmente, la prueba de falta de ajuste mostró que ambos modelos presentaron falta de ajuste significativa, con valores de $p < 0.0001$ para CAT y $p = 0.0008$ para CFT.

5.1. Contenido de Antocianinas Totales (CAT)

La cuantificación de antocianinas totales es útil para evaluar la calidad nutricional y funcional de productos alimentarios, ya que estos pigmentos poseen una elevada capacidad antioxidante y participan en la prevención del daño oxidativo celular. Además, su concentración se utiliza como indicador de estabilidad de color y de la degradación térmica durante procesos como la extrusión, el secado o el almacenamiento (Giusti y Wrolstad, 2001).

Los coeficientes de regresión del modelo cuadrático para la respuesta de antocianinas monoméricas totales (CAT) se presentan en la **Tabla 9**. El término lineal correspondiente a la concentración de amaranto (b_1) resultó significativo ($p \leq 0.05$), lo cual indica que esta variable ejerce un efecto importante sobre el contenido de antocianinas. Por el contrario, el término lineal de la temperatura (b_2) no mostró efecto significativo estadístico ($p = 0.93$), lo que sugiere que, esta variable no influye de manera directa sobre el CAT.

En cuanto a los términos cuadráticos, el coeficiente asociado a la temperatura (b_{22}) presentó efecto significativo ($p = 0.0068$), lo cual refiere un efecto no lineal relevante de esta variable sobre CAT.

Tabla 13. Análisis de varianza de la respuesta contenido de antocianinas totales (CAT) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	R ²	R ² ajustada	Precisión adecuada	C.V. (%)
Modelo	6450.98	5	1290.20	16.83	<0.0001	0.76	0.72	11.69	26.15
A	4317.92	1	4317.92	56.33	<0.0001				
B	0.57	1	0.57	0.01	0.9319				
AB	132.22	1	132.22	1.72	0.2005				
A2	42.37	1	42.37	0.55	0.4638				
B2	663.92	1	663.92	8.66	0.0068				
Falta de ajuste	1226.75	2	613.38	19.21	<0.0001				

A: Concentración de harina de amaranto; **B:** Temperatura del dado de salida; **AB:** Interacción concentración de harina de amaranto- Temperatura del dado de salida.

Sin embargo, el término cuadrático de la concentración (b_{11}) no presentó significancia estadística ($p = 0.4638$). Finalmente, la interacción entre la concentración de amaranto y la temperatura (b_{12}) tampoco fue significativa ($p = 0.2005$), indicando ausencia de efectos combinados entre las variables independientes sobre la respuesta de antocianinas totales.

En la **Figura 15** se muestra el gráfico de superficie de respuesta correspondiente al contenido de antocianinas totales (CAT) (mg/kg) en función de la concentración de amaranto y la temperatura de extrusión. El valor mínimo reportado en este estudio fue de 0 mg/kg ya que ese tratamiento no incluía maíz rojo en su formulación, mientras que el valor máximo fue de 60.52 mg/kg de antocianinas a 126°C y 14.6% de concentración de amaranto. Se observó que los mayores valores de CAT se obtuvieron a bajas temperaturas y bajas concentraciones de amaranto, mientras que el incremento de ambas variables ocasionó una disminución significativa del contenido de antocianinas.

Los bajos valores de antocianinas totales obtenidos en las formulaciones extruidas de este estudio pueden deberse a la disminución en la proporción de maíz rojo utilizado en las mezclas, siendo este ingrediente la principal fuente de antocianinas de las mezclas formuladas. Diversos estudios han señalado que el contenido final de antocianinas en productos procesados depende de la concentración inicial de materias primas ricas en estos pigmentos, especialmente en matrices a base de cereales pigmentadas (Giusti y Wrolstad, 2003).

Asimismo, la disminución del contenido de antocianinas con el aumento de la temperatura concuerda con lo reportado por otros autores. Las antocianinas son compuestos muy sensibles al calor; por lo que, su estabilidad puede verse afectada cuando se someten a tratamientos térmicos drásticos. Se ha documentado que el incremento de la temperatura favorece la degradación de su estructura química mediante la ruptura de enlaces glucosídicos y la apertura del anillo flavílico, lo que origina compuestos incoloros o de menor actividad antioxidante (Castañeda et al., 2009). En procesos como la extrusión, donde se combinan altas temperaturas, presión y esfuerzos de corte, la degradación de antocianinas se intensifica y suele surgir una cinética de primer orden dependiente de la temperatura (Patras et al., 2010).

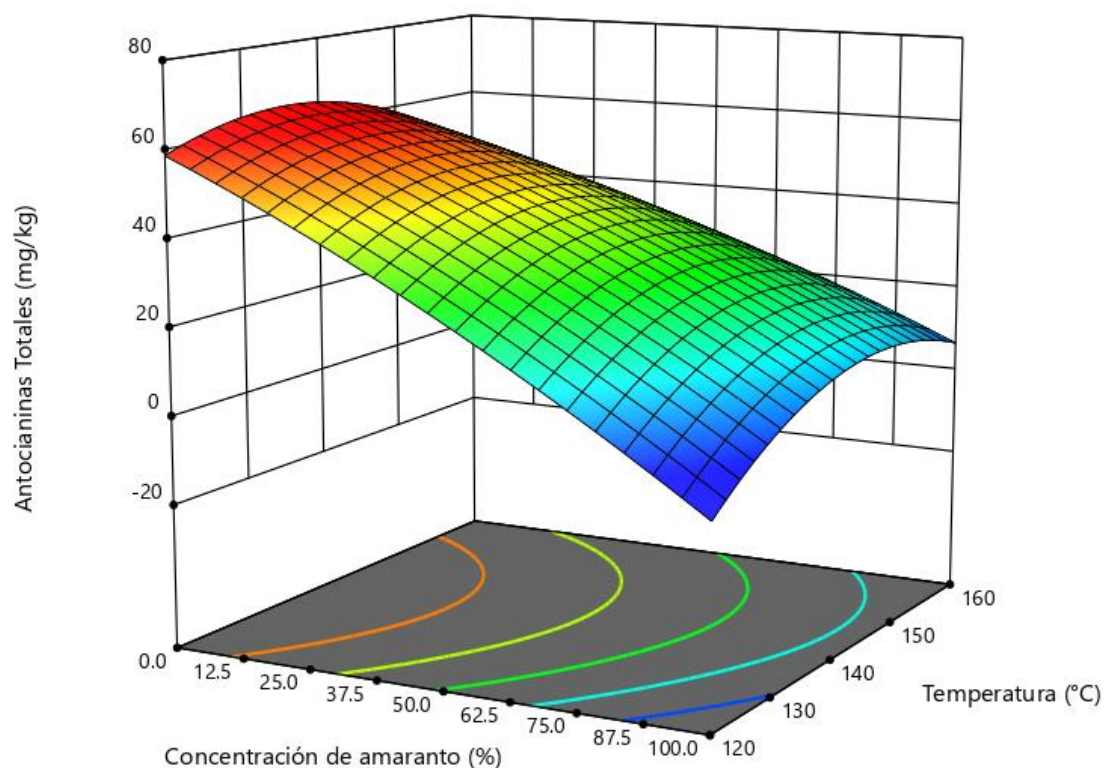


Figura 15. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre el contenido de antocianinas totales (CAT) de los productos extruidos.

Estudios realizados en extractos de maíz púrpura han demostrado pérdidas significativas de antocianinas conforme aumenta la temperatura del proceso (Jing et al., 2007).

Por otra parte, el aumento en la concentración de amaranto pudo haber contribuido a la reducción del contenido de antocianinas totales al diluir la fracción de maíz rojo dentro de la formulación y modificar la matriz alimentaria, afectando así la protección estructural de estos pigmentos durante la extrusión. Este efecto de dilución ha sido descrito previamente en sistemas multicomponente donde la sustitución parcial

de ingredientes ricos en antocianinas resulta en menores concentraciones finales tras el procesamiento (Giusti y Wrolstad, 2003).

5.2. Contenido de Fenoles Totales (CFT)

Los fenoles totales son compuestos bioactivos de gran relevancia en productos extruidos, ya que contribuyen a la actividad antioxidante, mejorando la estabilidad del producto frente al deterioro oxidativo, prolongando su vida útil y conservando sus propiedades nutricionales (Shahidi y Wanasundara, 1992).

Los coeficientes de regresión para el contenido fenoles totales (FT) se muestran en la **Tabla 9**. El término lineal asociado a la concentración de amaranto (b_1) fue estadísticamente significativo ($p < 0.0001$), indicando un efecto directo de la concentración sobre el contenido de fenoles. El término lineal de la temperatura (b_2) no presentó efecto significativo ($p = 0.0554$). En cuanto a la interacción, el coeficiente b_{12} mostró significancia estadística ($p = 0.0089$), lo que sugiere un efecto combinado relevante entre concentración y temperatura. Respecto a los términos cuadráticos, el término correspondiente a la concentración (b_{11}) no fue significativo ($p = 0.4073$), mientras que el término cuadrático de la temperatura (b_{22}) sí resultó significativo ($p = 0.0277$), señalando un efecto no lineal de la temperatura sobre los fenoles totales.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el contenido de fenoles totales (FT) en los productos extruidos tuvo mayor relación con la composición de la mezcla, que con la temperatura de extrusión cuando esta se mantuvo constante. El valor mínimo fue de 4.77 mg GAE/g se registró en los extruidos procesados a 126 °C con una proporción elevada de amaranto (85.4 %), mientras que el valor máximo fue de 17.46 mg

Tabla 14. Análisis de varianza de la respuesta contenido de fenoles totales (CFT) de productos extruidos elaborados a partir de harina de maíz rojo y amaranto adicionados con cúrcuma en polvo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	R ²	R ² ajustada	Precisión adecuada	C.V. (%)
Modelo	326.01	5	65.20	24.21	<0.0001	0.78	0.75	17.57	16.74
A	276.73	1	276.73	102.75	<0.0001				
B	10.62	1	10.62	3.94	0.0554				
AB	20.82	1	20.82	7.73	0.0089				
A2	1.90	1	1.90	0.70	0.4073				
B2	14.29	1	14.29	5.31	0.0277				
Falta de ajuste	37.39	3	12.46	7.26	0.0008				

A: Concentración de harina de amaranto; **B:** Temperatura del dado de salida; **AB:** Interacción concentración de harina de amaranto- Temperatura del dado de salida.

GAE/g se obtuvo a la misma temperatura, pero con una menor proporción de amaranto (14.6 %). La disminución de contenido de fenoles totales puede estar asociada a la disminución de ingredientes con mayor aporte de compuestos fenólicos, como el maíz rojo.

En la **Figura 16**, se puede apreciar que, a mayores concentraciones de amaranto y menores temperaturas de extrusión, el contenido de compuestos fenólicos tiende a disminuir. Este resultado concuerda con lo reportado por Repo Carrasco Valencia et al. (2009), quienes señalan que el amaranto contiene menores cantidades de ácidos fenólicos y flavonoides, en comparación a las reportadas en cereales pigmentados. Por otro lado, el maíz rojo es un cereal que posee un alto contenido de compuestos fenólicos, particularmente antocianinas y ácidos fenólicos como el ácido ferúlico, los cuales contribuyen en mayor medida al contenido total final de fenoles en los productos extruidos (López Martínez et al., 2009; Mora Rochín et al., 2010).

Asimismo, el incremento en el contenido de compuestos fenólicos observado a bajas temperaturas de extrusión sucede debido a una menor degradación térmica de estos compuestos. Diversos estudios han reportado que temperaturas elevadas durante la extrusión pueden provocar la degradación o transformación de compuestos fenólicos sensibles al calor, reduciendo su concentración final (Zielinski et al., 2006; Camire, Camire y Krumhar, 1990). Por el contrario, temperaturas moderadas favorecen la conservación de estos compuestos e incluso pueden facilitar su liberación desde la matriz alimentaria, incrementando su extractabilidad (Dewanto et al., 2002).

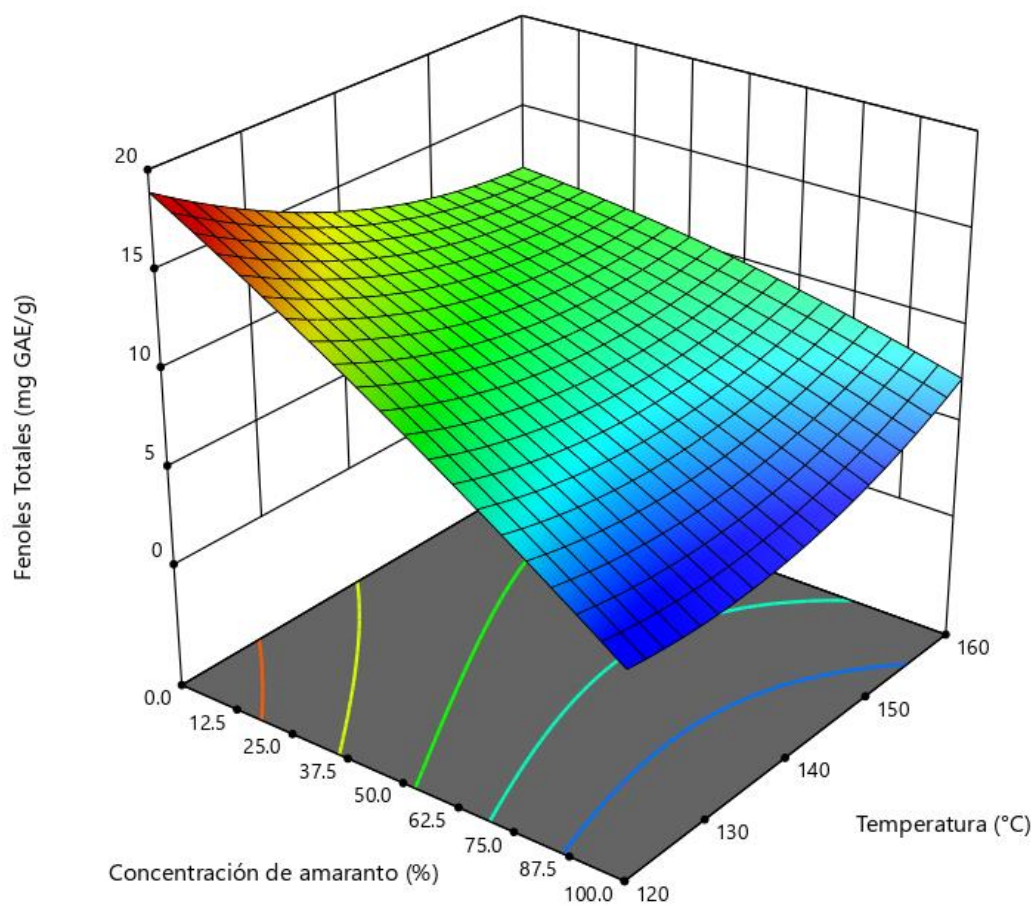


Figura 16. Efecto de la temperatura (°C) y concentración de amaranto (%) sobre el contenido de fenoles totales (CFT) de productos extruidos.

VII. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el efecto de la temperatura y la concentración de amaranto sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la botana de segunda generación elaborada a partir de harina de maíz rojo y amaranto, adicionada con polvo de cúrcuma.

En base a las propiedades fisicoquímicas de la botana extruida se determinó que las variables del proceso tuvieron influencia significativa sobre el índice de expansión y la densidad aparente. Los resultados mostraron que las condiciones de extrusión y formulación del producto modificaron la estructura y textura del producto final.

En relación con las propiedades funcionales, se observó que los productos extruidos conservaron compuestos bioactivos como fenoles totales y antocianinas, aunque su contenido pudo verse afectado por las condiciones de procesamiento. La incorporación de harina de amaranto y polvo de cúrcuma contribuyó al valor funcional y nutricional del producto, por lo cual estas materias primas representan una alternativa de interés para su aplicación en futuras investigaciones y en el desarrollo de alimentos funcionales mediante tecnología de extrusión.

De manera general, se concluye que el uso de la harina de maíz rojo, harina de amaranto y polvo de cúrcuma representa una alternativa viable para la elaboración de botanas extruidas con características físicas aceptables y compuestos funcionales de interés nutricional. Asimismo, el uso del diseño central compuesto rotatable permitió identificar las condiciones de procesamiento con mayor influencia sobre la calidad del producto final.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Abdel Aal, E. S., y Hucl, P. (1999). A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry*, 350-354.
- Abdel Aal, E. S., y Hucl, P. (2003). Composition and stability of anthocyanins in blue-grained wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2174-2180.
- Abraham, B., Shakeela, H., Pathrakadavil Ajayan, P., Brennan, C., Mantri, N., Adhikari, B., y P., N. (2025). Nutrient-rich puffed snacks developed using blended flours and lignin Pickering emulsions containing curcumin and vitamin D₃. *Sustainable Food Technology*, 425-435.
- Ali, I. M., Forsido, S. F., Kuyu, C. G., Ahmed, E. H., Andersa, K. N., Chane, K. T., y Regasa, T. K. (2024). Effects of extrusion process conditions on nutritional, anti- nutritional, physical, functional, and sensory properties of extruded snack: A review. *Food Science & Nutrition*, 8755–8761.
- Ali, M. F., Noman, M. T., Rahman, A., Rehman, A., y Rashid, M. I. (2024). Effects of extrusion process conditions on nutritional, anti-nutritional, physical, functional, and sensory properties of extruded snacks: A review. *Frontiers in Nutrition*.
- Allen, K. E., Carpenter, C. E., y Walsh, M. K. (2007). Influence of protein level and starch type on an extrusion-expanded whey product. *International Journal of Food Science and Technology*, 953-960.
- Amalraj, A., Pius, A., Gopi, S., y Gopi, S. (2017). Biological activities, beneficial effects, and safety of turmeric and curcumin. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 205-233.

- Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., y Griffin, E. L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll- and extrusion-cooking. *Cereal Science Today*, 4-12.
- Añon, M. C. (2019). Proteínas de trigo. En *Trigo: un cereal único* (pp. 123-140). Universidad Nacional de Villa María.
- AOAC International. (2005). *Official methods of analysis of AOAC International (18th ed., Method 943.02)*. AOAC International.
- Arias, M. M. (2024). Un baile épico. Técnicas de regularización en regresión múltiple. *Revista Electrónica AnestesiaR*, 16(5), 4.
- Astiasarán, I., y Martínez, J. A. (2000). *ALIMENTOS. Composición y propiedades*. Madrid: Mc Graw Hill Interamericana.
- Badui Dergal, S. (2006). *Química de los alimentos*. Edo. de México: PEARSON.
- Barra, T. P. (2023). *Principios básicos de la ciencia y tecnología de alimentos*. Puno : Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C.
- Bello Pérez, L. A., Camelo Mendez, G. A., Agama Acevedo, E., y Utrilla Coello, R. G. (2016). Apectos nutraceuticos de los maíces pigmentados: digestabilidad de los carbohidratos y antocianinas. *Agrociencia*, 50, 1041-1063.
- Belton, P. S., y Taylor, J. R. (2002). *Pseudocereals and less common cereals*. New York: Springer.
- Berk, Z. (2013). *Food Process Engineering and Technology*. Food Science and Technology, International Series.
- Biel, W., Jarecki, W., y Jaroszewska, A. (2017). Effect of turmeric (*Curcuma longa*) powder on the nutritional value and antioxidant properties of extruded corn snacks. *Journal of Cereal Science*, 186-191.

- Brennan, J. G. (2006). *Manual del procesado de los alimentos*. Zaragoza: ACRIBIA, S.A.
- Camire, M. E., Camire, A., y Krumhar, K. (1990). Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 29(1), 35-57.
- Castañeda Ovando, A., Pacheco Hernández, M. L., Páez Hernández, M. E., Rodríguez, J. A., y Galán Vidal, C. A. (s.f.). Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*, 859-871.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.001>
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj computer science*, 7, e623.
- Chirico, L. (2022). Especies que prometen: cúrcuma. *Rev Esp Nutr Comunitaria*, 36-37. **<https://doi.org/10.14642/RENC.2022.28.S2.5416>**
- Danbaba, N., Nkama, I., & Badau, M. H. (2015). Application of response surface methodology (RSM) and central composite design (CCD) to optimize minerals composition of rice-cowpea composite blends during extrusion cooking. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, 5(1), 40-52.
- Das, S. (2016). *Amaranthus: a promising crop of future*. West Bengal: Springer.
- Del Pozo Insfran, D., Brenes, C. H., y Talcott, S. T. (2006). Phytochemical composition and pigment stability of anthocyanin-rich maize (*Zea mays* L.) varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 5784–5789.
- Department of Agriculture, Forestry and Fisheries. (2010). *Amaranthus. Production guideline*. Pretoria: Agriculture, forestry & fisheries.

- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. K., y Liu, R. H. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 3010-3014.
- Díaz Ortega, J. L. (2020). *Propiedades nutricionales y funcionales de los alimentos*. Chimbote-Perú: Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote.
- Egbuna, C., Ifemeje, J. C., Udedi, S. C., y Kumar, S. (2019). *Phytochemistry, Volume 1: Fundamentals, Modern Techniques, and Applications*. Apple Academic Press.
- Escalante Aburto, A., Torres Chávez, P., Ramírez Wong, B., y Ponce García, N. (2014). Pigmented maizes: Anthocyanin profile and content. *Handbook of Anthocyanins: Food Sources, Chemical Applications and Health Benefits*, 411-428.
- Espitia Rangel, E., Mapes Sánchez, C., Escobedo López, D., De la O Olán, M., Rivas Valencia, P., Martínez Trejo, G., . . . Hernández Casillas, J. M. (2010). Conservación y uso de los Recursos Genéticos de Amaranto en México. *INIFAP*, 200.
- European Food Safety Authority (EFSA). (2010). Scientific opinion on the re-evaluation of curcumin (E 100) as a food additive. *EFSA Journal*, 1679.
- European Medicines Agency (EMA). (2018). *Public statement on the use of herbal medicinal products containing Curcuma longa*. EMA/HMPC/582796/2018.
- FAO/WHO Joint Expert Committee on Food Additives (JECFA). (2004). *Safety evaluation of certain food additives and contaminants: Curcumin*. WHO Food Additives Series 52.
- Fatuma, O. G., Njiru, E. N., Mutisya, D. L., Karoki, M. M., Ruto, R., Malusi, C., . . . Ayemba, J. (2017). *Grain Amaranth Training Manual*. Nairobi, Kenya: Kenya Agricultural and Livestock Research Organization.

- Félix Medina, J. V., Montes Ávila, J., Reyes Moreno, C., Perales Sánchez, J. K., Gómez Favela, M. A., Aguilar Palazuelos, E., y Gutiérrez Dorado, R. (2020). Second-generation snacks with high nutritional and antioxidant value produced by an optimized extrusion process from corn/common bean flours mixtures. *LWT*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109172>.
- Frame, N. D. (1994). *The Technology of Extrusion Cooking*. Springer.
- Gámez Valdez, L. C., Gutiérrez Dorado, R., Gómez Aldapa, C. A., Perales Sánchez, J. X., Milán Carrillo, J., Cuevas Rodríguez, E. O., . . . Reyes Moreno, C. (2021). Effect of the extruded amaranth flour addition on the nutritional, nutraceutical and sensory quality of tortillas produced from extruded creole blue maize flour. *Biotecnia*, 103-112.
- Giusti, M. M., y He, J. (2010). Anthocyanins: Natural Colorants with Health-Promoting Properties. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1, 163-187.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.food.080708.100754>
- Giusti, M. M., y Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and measurement of anthocyanins by UV–visible spectroscopy. En *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. New York: John Wiley & Sons.
- Giusti, M. M., y Wrolstad, R. E. (2003). Acylated anthocyanins from edible sources and their applications in food systems. *Biochemical Engineering Journal*, 217-225. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(02\)00221-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1369-703X(02)00221-8)
- Gupta, S. C., Patchva, S., y Aggarwal, B. B. (2013). Therapeutic roles of curcumin: lessons learned from clinical trials. *The AAPS Journal*, 195-218.
- Guy, R. (2001). *Extrusion Cooking: Technologies and Applications*. Woodhead Publishing.

- Harborne, J. B., y Williams, C. A. (2000). Advances in flavonoid research since 1992. *Phytochemistry*, 55(6), 481-504. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)00235-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00235-1)
- Hewlings, S. J., y Kalman, D. S. (2017). Curcumin: A review of its' effects on human health. *Foods*, 92. <https://doi.org/10.3390/foods6100092>
- Hoseney, R. C., y Delcour, J. A. (2010). *Principles of cereal science and technology*. AACC International, Inc.
- Ilo, S., y Berghofer, E. (1999). Kinetics of color changes during extrusion cooking of maize grits. *Journal of Food Engineering*, 73-80.
- Innova Market Insights. (2024). *Snacks market trends in Mexico*. <https://www.innovamarketinsights.com/reports/snacks-market-trends-in-mexico/>
- Jing, P., Giusti, M. M., y Wrolstad, R. E. (2007). Degradation kinetics of anthocyanins in purple corn extract. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 8534-8540. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/jf0711682>
- Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., y Lim, S. M. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food & Nutrition Research*, 61(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>
- Lincoln, T., y Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal*. Universitat Jaume I.
- López Martínez, L. X., Oliart Ros, R. M., Valerio Alfaro, G., Lee, C. H., Parkin, K. L., y García, H. S. (2009). Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican maize. *LWT - Food Science and Technology*, 1187-1192.
- Luengo Fernández, E. (2007). *Alimentos funcionales y nutraceuticos*. Madrid: Sociedad Española de Cardiología.

- Lusas, E. W., y Rooney, L. W. (2001). *Snack Foods Processing*. Lancaster, Pennsylvania: CRC PRESS.
- Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 169-175. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00154-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00154-0)
- Mateos Aparicio, I. (2017). *Aditivos alimentarios*. España: DEXTRA.
- Mathias Rettig, K., y Ah Hen, K. (2014). El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro Sur*, 57-66.
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sanchez, J., Buckler, E., y Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 6080-6084.
- Mex Álvarez, R. M., Garma Quen, P. M., Bolívar Fernández, N. J., y Guillén Morales, M. M. (2016). análisis proximal y fitoquímico de cinco variedades de maíz del Estado de Campeche, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 12(2), 74-80.
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
- Mora Rochín, S., Gutiérrez Uribe, J. A., Serna Saldívar, S. O., Sánchez Peña, P., Reyes Moreno, C., y Milán Carrillo, J. (2010). Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization or extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 502-508.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Wiley.

- Nieto Cabrera, C. (1989). *El cultivo de Amaranto Amaranthus spp una alternativa agronómica para Ecuador*. Quito-Ecuador: INIAP.
- Palma, R. P. (2022). Análisis crítico del coeficiente de determinación (R^2), como indicador de la calidad de modelos lineales y no lineales. *Matemática*, 20(2).
- Patras, A., Brunton, N. P., O'Donnell, C., y Tiwari, B. K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science & Technology*, 3-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>
- Pineda Quiroz, J., Hernández Rivera, J. A., Pérez Xochipa, I., López, P. A., y Carrasco Carballo, A. (2025). Determination of Antioxidant Activity and Proximate Composition of a Variety of Red Pigmented Zea mays L. from Puebla, Mexico. *AppliedChem*, 5(18). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/appliedchem5030018>
- Pismag, R. Y., Rivera, J. D., Hoyos, J. L., Bravo, J. E., y Roa, D. F. (2024). Effect of extrusion cooking on physical and thermal properties of instant flours: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 01-16.
- Ramos Diaz, J. M., Suuronen, J. P., Deegan, K. C., Serimaa, R., Tuorila, H., y Jouppila, K. (2015). Physical and sensory characteristics of corn-based extruded snacks containing amaranth, quinoa and kañiwa flour. *LWT - Food Science and Technology*, 64(2), 1047-1056. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.011>.
- Repo Carrasco Valencia, R., Hellström, J. K., Pihlava, J. M., y Mattila, P. H. (2009). Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa, kaniwa and kiwicha. *Food Chemistry*, 120(1), 128-133.
- Riaz, M. N. (2000). *Extruders in Food Applications*. CRC Press.

- Robin, F., Schuchmann, H. P., y Palzer, S. (2012). Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 23-32.
- Ruiz Armenta, X. A., Ruiz Armenta, J. E., Espinoza Moreno, R. J., Gutiérrez Dorado, R., Aguilar Palazuelos, E., Zazueta Morales, J. J., y Gómez Favela, M. A. (2022). Use of sesame by-product and optimized extrusion to obtain a functional flour with improved techno-functional, nutritional and antioxidant properties. *Acta Universitaria*, 32. <https://doi.org/http://doi.org/10.15174.au.2022.3494>
- SAGARPA & CONABIO. (2012). *Catálogo de razas de maíz nativo de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Saldivar, S. O. (2010). *Cereal Grains: Properties, processing and nutritional attributes*. CRC Press.
- Salinas Moreno, Y., Pérez Alonso, J. J., Vázquez Carrillo, M. G., Aragón Cuevas, F., Velázquez Cardelas, G. A., y Rubio Hernández, D. (2013). Anthocyanins and antioxidant activity in maize grains and tortillas from landraces and commercial hybrids. *Journal of Cereal Science*, 57(2), 214-222.
- Sánchez Nuño, Y. A., Nuño, K., Martínez Preciado, A. H., Silva Jara, J., Velázquez Carriles, C. A., Gomez Aldapa, C. A., y Villarruel López, A. (2025). Design and Optimization of a Second-Generation Extruded Snack Using Carrot Waste, Blue Corn Flour, and Ellagic Acid as Functional Ingredients. *Foods*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/foods14101657>
- Santiago, J. (13 de Agosto de 2025). *Mexicanos consumen 10.9 kg de snacks al año, el doble del promedio mundial*. EL Economista: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/mexicanos-consumen-10-9-kg-snacks-ano-doble-promedio-mundial-20250813-772589.html>

- Serna Saldívar, S. R. (2022). *Snack foods: processing, innovation, and nutritional aspects*. Boca Raton: CRC Press.
- Shahidi, F., y Wanasundara, P. K. (1992). Phenolic antioxidants. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 67-103.
- Sharifi, S., Majzoobi, M., y Farahnaky, A. (2021). Development of healthy extruded maize snacks; Effects of soybean flour and feed moisture content. *International Journal of Food Science and Technology*, 3179–3187.
- Singh, A., y Punia, D. (2020). Characterization and Nutritive Values of Amaranth Seeds . *Current Journal of Applied Science and Technology* , 39(3), 27-33.
<https://doi.org/10.9734/cjast/2020/v39i330511>
- Singh, S., Gamlath, S., y Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 916-929.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., y Lamuela Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin–Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178.
- Statista. (2025). *Snack Food-Mexico*. Statista:
<https://www.statista.com/outlook/cmo/food/confectionery-snacks/snack-food/mexico>
- Tafadzwa Muchekeza, J., Nantanga, K. K., Moyo, M., y Itege, T. O. (2025). Quinoa and Amaranth Flours and Solvent-Free Extracted Starches: Proximate Composition, Technological and Functional Properties . *Food Science and Technology*, 13(2), 127-136.
<https://doi.org/10.13189/fst.2025.130202>
- Terzieva, S., Baycheva, S., Tzanova, M., Ivanova, T., Dimitrova, D., y Grozeva, N. H. (2026). Multifunctional Edible Amaranths: A Review of Nutritional Benefits, Anti-Nutritional Factors, and Potential in Sustainable Food

- Tscheuschner, H.-D. (2001). *Fundamentos de tecnología de los alimentos*. Zaragoza : Acribia, S.A. Zaragoza.
- Vasquez Bustamante, M. (2024). EFECTO DE LA COCCIÓN Y PELADO SOBRE LOS COMPUESTOS BIOACTIVOS, COLOR Y COMPOSICIÓN QUÍMICO PROXIMAL EN LA *Curcuma longa* (Cúrcuma). *TESIS*. Tingo María, Perú.
- Wallace, T. C., y Giusti, M. M. (2015). Anthocyanins. En *Handbook of food analytical chemistry* (pp. 463-483). John Wiley & Sons.
- Watson, S. A., y Ramstad, P. E. (1987). *Corn: Chemistry and Technology*. St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists (AACC).
- Yadav, L., y Upasana, U. (2022). *Golden Spice Turmeric and its Health Benefits*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.103821>
- Zielinski, H., Kozłowska, H., y Lewczuk, B. (2006). Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 7(3), 159-169.