

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



ESTABILIDAD DE COMPONENTES BIOACTIVOS DE TUNA ROJA (*Opuntia ficus indica*) EN LA ENCAPSULACIÓN Y DESARROLLO DE PRODUCTOS EXTRUDIDOS

TESIS

Presentada por

M.C. MARTHA GRACIELA RUIZ GUTIÉRREZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de

DOCTOR EN CIENCIAS CON ACENTUACIÓN EN ALIMENTOS

MONTERREY, N.L.

Junio, 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



ESTABILIDAD DE COMPONENTES BIOACTIVOS DE TUNA ROJA (*Opuntia ficus indica*) EN LA ENCAPSULACIÓN Y DESARROLLO DE PRODUCTOS EXTRUDIDOS

TESIS

Presentada por

M.C. MARTHA GRACIELA RUIZ GUTIÉRREZ

DIRECTORES DE TESIS

Dr. Carlos Abel Amaya Guerra

DIRECTOR

Dr. Armando Quintero Ramos

DIRECTOR EXTERNO

MONTERREY, N.L.

Junio, 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



ESTABILIDAD DE COMPONENTES BIOACTIVOS DE TUNA ROJA (*Opuntia ficus indica*) EN LA ENCAPSULACIÓN Y DESARROLLO DE PRODUCTOS EXTRUDIDOS

TESIS

Presentada por

M.C. MARTHA GRACIELA RUIZ GUTIÉRREZ

COMISIÓN DE TESIS

Dra. Ma. Guadalupe Alanís Guzmán

SECRETARIO

Dr. Juan Gabriel Báez González

1° VOCAL

Dra. Ma. Adriana Núñez González

2° VOCAL

Dr. Juan Gabriel Báez González

3° VOCAL

MONTERREY, N.L.

Junio, 2014

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, en especial a la Posgrado de la Facultad de Ciencias Biológicas, y todos sus integrantes por su apoyo para el desarrollo de mi programa de posgrado



Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo a través de la beca mediante la cual pude permanecer el programa de posgrado



A la Universidad Autónoma de Chihuahua y al Instituto Tecnológico de Monterrey, así como a sus integrantes por su apoyo en el desarrollo experimental del proyecto de tesis



Al Dr. Armando Quintero y al Dr. Carlos Amaya por ser mis directores, guías y apoyo durante todo desarrollo del programa



A los asesores que colaboraron durante el desarrollo del programa: Dra. Guadalupe Alanís, Dr. Juan Gabriel Báez, Dra. María Adriana Núñez y Dr. Javier Aguilera



A mis compañeros de programa, en especial a Jesús Vázquez, quién me apoyo constantemente en muchas actividades



A mis grandes amigos que siempre están ahí y me han tendido su mano apoyándome incondicionalmente en decisiones y proyectos



Y a todos aquellos que de alguna manera ayudaron a impulsar el desarrollo de mi proyecto de tesis y de mi programa de posgrado



Sinceramente ¡Gracias!

DEDICATORIA

A mis padres, Martha y Rubén por el apoyo que me han brindado en todas y cada una de las decisiones que he tomado, así como sus palabras de aliento y de cariño



A mis hermanas, Maru y Claudia, por su ayuda, compañía y amistad



A mi querido Oswaldo, por su paciencia, su ayuda, sus palabras, su fuerza y su amor

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
Agradecimientos.....	<i>i</i>
Dedicatoria.....	<i>ii</i>
Índice de contenido	<i>iii</i>
Índice de figuras.....	<i>v</i>
Índice de tablas.....	<i>viii</i>
Nomenclatura.....	<i>x</i>
Resumen.....	1
Abstract.....	2
I. Introducción.....	3
II. Descripción del problema.....	5
III. Objetivo general.....	6
3.1 Objetivos particulares.....	7
IV. Hipótesis.....	8
V. Antecedentes.....	9
5.1 Generalidades.....	9
5.2 Tuna roja.....	10
5.3 Procesamiento de la tuna roja.....	13
5.3.1 Encapsulación.....	14
5.3.1.1 Fibra dietética.....	17
5.3.2 Extrusión-cocción.....	20
VI. Materiales y Métodos.....	26
6.1 Desarrollo experimental.....	26
6.1.1 Caracterización de materia prima.....	26
6.1.2 Encapsulación mediante secado por aspersion.....	26
6.1.3 Proceso de extrusión-cocción.....	28
6.1.3.1 Determinación de la distribución de tiempos de residencia (DTR)	28
6.1.3.2 Estabilidad de componentes de encapsulados de tuna roja en el proceso de extrusión-cocción.....	30

6.1.3.3 Efecto del encapsulado de tuna roja sobre las características fisicoquímicas, sensoriales y en salud de cereales para desayuno.....	31
6.2 Métodos.....	33
6.2.1 Métodos físicos.....	33
6.2.2. Métodos químicos.....	37
VII. Resultados y Discusiones.....	42
7.1. Caracterización de la tuna roja.....	42
7.2. Encapsulación de componentes bioactivos de tuna roja.....	44
7.3. Estabilidad de componentes bioactivos de encapsulados de tuna roja en el proceso de extrusión-cocción.....	64
7.3.1 Determinación de la distribución de tiempos de residencia durante el proceso de extrusión.....	64
7.3.2 Efecto del proceso de extrusión-cocción sobre la estabilidad de componentes bioactivos de encapsulados de tuna roja.....	68
7.4. Efecto de la adición de encapsulado en las propiedades físico-químicas de cereales para desayuno mediante extrusión-cocción.....	82
VIII. Conclusiones.....	102
IX. Referencias.....	104
X. Apéndices.....	119
10.1 Curvas de calibración de métodos analíticos.....	120
10.2 Evaluación sensorial.....	123
10.2.1 Prueba afectiva.....	123
10.2.2 Prueba descriptiva.....	124
10.3 Análisis estadístico.....	126
10.3.1 Encapsulación de componentes bioactivos de tuna roja	126
10.3.2 Distribución de tiempos de residencia durante el proceso de extrusión.....	131
10.3.3 Efecto del proceso de extrusión-cocción sobre la estabilidad de componentes bioactivos de encapsulados de tuna roja.....	131
10.3.4 Efecto de la adición de encapsulado en las propiedades de cereales extrudido.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
Figura 1.	Fotografía de algunas variedades de tuna	10
Figura 2.	Estructuras químicas de los principales flavonoides presentes en tuna roja (<i>Opuntia ficus indica</i>).....	11
Figura 3.	Estructuras químicas de las principales betalainas presentes en tuna roja (<i>Opuntia ficus indica</i>).....	12
Figura 4.	Diagrama de proceso de secado por aspersión.....	16
Figura 5.	Esquema de las funciones de la fibra en el intestino grueso	18
Figura 6.	Estructura de la fibra soluble (β -glucanos)	19
Figura 7.	Proceso de extrusión-cocción	21
Figura 8.	Procedimiento para la encapsulación de jugo de tuna roja mediante secado por aspersión	27
Figura 9.	Procedimiento para la determinación de la distribución de los tiempos de residencia a diferentes condiciones de extrusión-cocción.....	29
Figura 10.	Procedimiento para evaluar la estabilidad de componentes de encapsulados de tuna roja en el proceso de extrusión-cocción.....	30
Figura 11.	Procedimiento para evaluar el efecto de la adición de encapsulados de tuna roja en las propiedades de productos extruidos.....	32
Figura 12.	Tuna roja (<i>Opuntia ficus indica</i>) utilizada.....	42
Figura 13.	Encapsulado obtenido con 22.5% de fibra soluble, secado a 160 °C.....	44
Figura 14.	Diagrama de relación de h^o con el color puro.....	49
Figura 15.	Micrografías de encapsulados obtenidos a diferentes temperaturas y porcentajes de fibra soluble.....	51
Figura 16.	Contenido de polifenoles totales en encapsulado de tuna roja.....	53

Figura 17.	Actividad antioxidante en polvo encapsulado de tuna roja.....	54
Figura 18.	Cromatogramas obtenidos por HPLC para análisis de flavonoides.....	57
Figura 19.	Contenido de betacianinas en polvo encapsulado de tuna roja...	58
Figura 20.	Contenido de betaxantinas en polvo encapsulado de tuna roja...	59
Figura 21.	Identificación de betanina e indicaxantina en tuna roja por HPLC-MS-TOF.....	60
Figura 22.	Análisis de HPLC de betacianinas y betaxantinas.....	61
Figura 23.	Distribución de tiempos de residencia del material en el extrusor de doble tornillo a 325 rpm y 100 °C.....	65
Figura 24.	Función de distribución de tiempos de residencia de diferentes temperaturas y velocidades de tornillo.....	66
Figura 25.	Contenido de polifenoles totales en extrudido utilizando encapsulado de tuna roja a diferentes condiciones de extrusión-cocción.....	71
Figura 26.	Actividad antioxidante en extrudido utilizando encapsulado de tuna roja, a diferentes condiciones de extrusión-cocción.....	72
Figura 27.	Contenido de betaxantinas en extrudido utilizando encapsulado de tuna roja a diferentes condiciones de extrusión-cocción.....	74
Figura 28.	Contenido de betacianinas en extrudido utilizando encapsulado de tuna roja a diferentes condiciones de extrusión-cocción.....	75
Figura 29.	Degradación de betaxantinas en el proceso de extrusión-cocción a diferentes condiciones de extrusión-cocción...	76
Figura 30.	Degradación de betacianinas en el proceso de extrusión-cocción a diferentes condiciones de extrusión-cocción.....	77
Figura 31.	Gráfico de Arrhenius para la degradación de betacianinas y betaxantinas durante extrusión-cocción.....	78
Figura 32.	Cromatogramas de flavonoides de extrudido y mezcla de	

	estándares (quercetina, kaempferol e isoharmetina).....	80
Figura 33.	Cereales para desayuno obtenidos con diferentes contenidos de encapsulados de tuna roja.....	82
Figura 34.	Cinéticas de absorción de agua y leche de cereales elaborados con diferentes porcentajes de encapsulado de tuna roja.....	86
Figura 35.	Gráfico de textura obtenido de cereal para desayuno pigmentado con encapsulado de tuna roja.....	90
Figura 36.	Concentración de glucosa sérica de ratas alimentadas 21 días con cereales con diferentes porcentajes de encapsulado..	97
Figura 37.	Concentración de colesterol sérico de ratas alimentadas 21 días con cereales con diferentes porcentajes de encapsulado..	98
Figura 38.	Concentración de triglicéridos séricos de ratas alimentadas 21 días con cereales con diferentes porcentajes de encapsulado.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
Tabla 1.	Funciones y beneficios de la fibra dietaría en la salud humana.....	18
Tabla 2.	Características de jugo de tuna roja	43
Tabla 3.	Análisis físico de encapsulados de tuna roja mediante secado por aspersión usando fibra soluble	46
Tabla 4.	Parámetros de color de encapsulados de tuna roja mediante secado por aspersión usando fibra soluble.....	50
Tabla 5.	Contenido de flavonoides de encapsulados de tuna roja mediante secado por aspersión usando fibra soluble.....	56
Tabla 6.	Retención del contenido de pigmentos específicos en encapsulados de tuna roja mediante secado por aspersión usando fibra soluble.....	61
Tabla 7.	Coefficientes de correlación para las variables determinadas en encapsulados de tuna roja a diferentes condiciones de proceso... ..	63
Tabla 8.	Tiempos de residencia medios (tr_m) y varianza (σ^2) a diferentes condiciones de extrusión	67
Tabla 9.	Análisis de color de extrudidos a diferentes condiciones de proceso.....	69
Tabla 10.	Efecto de la temperatura sobre velocidad de degradación y energía de activación de betalainas en el proceso de extrusión-cocción	77
Tabla 11.	Retención del contenido de betacianinas en extrudidos obtenidos utilizando encapsulado de tuna roja	79
Tabla 12.	Coefficientes de correlación para las variables determinadas en extrudidos a diferentes condiciones de proceso pigmentados con encapsulados de tuna roja	81

Tabla 13.	Propiedades físicas de extrudidos obtenidos a diferentes concentraciones de encapsulado de tuna roja utilizado...	83
Tabla 14.	Características de color de los cereales obtenidos a diferentes concentraciones de encapsulado de tuna roja	88
Tabla 15.	Textura de cereales para desayuno obtenidos con diferentes contenidos de encapsulados de tuna roja	90
Tabla 16.	Análisis químico de cereales obtenidos utilizando diferentes porcentajes de encapsulados de tuna roja	92
Tabla 17.	Análisis proximal cereales pigmentados con diferentes porcentajes de encapsulado de tuna roja	93
Tabla 18.	Análisis sensorial de cereales para desayuno pigmentados con encapsulados de tuna roja	94
Tabla 19.	Prueba de aceptación sensorial de cereales para desayuno pigmentados con encapsulados de tuna roja	95
Tabla 20.	Coefficientes de correlación para las variables determinadas en cereales para desayuno pigmentados con encapsulados de tuna roja.....	101

NOMENCLATURA

Símbolo	Significado
<i>arctan</i>	Arcotangente
bar	Bares
bh	Base húmeda
bs	Base seca
cm	Centímetros
°C	Grado centígrados
dL	Decilitros
<i>exp</i>	Exponencial
g	Gramos
h	Horas
kg	Kilogramos
kv	Kilovoltios
L	Litros
L/D	Relación longitud/diámetro
<i>ln</i>	Logaritmo natural
min	Minutos
mL	Mililitros
mm	Milímetros
mmol	Milimoles
mol	Moles
m/z	Relación carga/masa
µm	Micrómetros
µL	Microlitros
N	Newton
nm	Nanómetros
p	Peso
R	Radical

rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundos
v	Volumen
[M+H] ⁺	Masa protonada
x g	Fuerza centrífuga

RESUMEN

La tuna roja es fuente potencial de colorante para la industria alimentaria además de que posee alta actividad antioxidante debido a sus componentes, sin embargo, dichos componentes son afectados por las condiciones de procesamiento. El objetivo fue evaluar la estabilidad de compuestos bioactivos de tuna roja durante su encapsulación con uso de fibras solubles y su aplicación en el desarrollo de extrudidos. Jugo de tuna roja fue mezclado con fibra soluble [β -glucanos] (15, 22.5 y 30%) y secado mediante aspersión (160, 180 y 200 °C) evaluando en los polvos sus propiedades fisicoquímicas. En la extrusión-cocción fueron determinados los tiempos de residencia medios a diferentes velocidades de tornillo (225, 275 y 325 rpm) y temperaturas (80, 100 y 120 y 140 °C), además de evaluar el efecto de las condiciones de extrusión sobre polifenoles, flavonoides, betalainas y actividad antioxidante presentes en el polvo de tuna, seleccionando las condiciones de proceso que permitan evaluar el efecto del contenido de polvo encapsulado (2.5, 5.0 y 7.5%) sobre las características físicas, químicas y sensoriales del cereal, así como el efecto del consumo del mismo sobre glucosa y lípidos séricos en ratas (Winstar). Los resultados mostraron que la fibra soluble es un material que se puede utilizar como agente acarreador para la obtención de polvo de tuna roja con buenas características fisicoquímicas, obteniendo el polvo con mayor contenido de compuestos bioactivos y buenas propiedades físicas a 160 °C utilizando 22.5% de fibra soluble. El polvo de tuna roja obtenido se utilizó en el proceso de extrusión-cocción, para ello se determinaron tiempos de residencia medio de 36.62 a 60.13 s, encontrándose que a mayor temperatura y velocidad de tornillo hay una reducción del tiempo de residencia medio. El proceso de extrusión-cocción afectó la retención polifenoles totales (36-47%), betacianinas (33-51%), betaxantinas (46-63.5%) y actividad antioxidante (55-77%) presentes en el polvo de tuna roja, las condiciones de extrusión seleccionadas fueron 325 rpm y 100 °C. El análisis de degradación mostró que las betaxantinas son más sensibles a la temperatura. El cereal obtenido presentó buenas características de calidad, sin embargo sensorialmente el cereal más aceptado fue el cereal con menor contenido de polvo de tuna roja (2.5%) debido a que presentó menor dureza. El consumo de cereal no mostró efecto sobre glucosa, colesterol y triglicéridos séricos, sin embargo contribuye al consumo de fibra y compuestos con actividad biológica.

ABSTRACT

Red cactus pear is potential dye for food industry source besides having high antioxidant activity due to its components, however, these components are affected by processing conditions. The aim of this study was to evaluate the stability of red cactus pear bioactive compounds during encapsulation with soluble fiber use and their application in the development of extruded products. Red cactus pear juice was mixed with different percents of soluble fiber [β -glucan] (15, 22.5 and 30%) and dehydrated by spray drying (160, 180 and 200 °C) evaluating in the obtained powders their physicochemical properties. The red cactus pear powders were used in extrusion-cooking process, mean residence times at different screw speeds (225, 275 and 325 rpm) and temperatures (80, 100, 120 and 140 °C) were determined, as well as the effect of extrusión-cooking conditions on polyphenols, flavonoids, betalains and antioxidant activity of the red cactus pear powder, selecting the process conditions to evaluate the effect of encapsulated poder contents (2.5, 5.0 and 7.5%) on physical, chemical and sensory characteristics of extruded cereal, and the consumption cereal effect on serum levels of glucose, cholesterol and tryglicerides in laboratory rats (Winstar). The results showed that the soluble fiber is a material that can be used as the carrier agent for the manufacturing of red cactus pear powder with good physicochemical characteristics, obtaining a powder with a higher content of bioactive compounds and good physical properties at 160 °C using 22.5% soluble fiber. The red cactus pear powder obtained was used in extrusion-cooking process, for that mean residence times of 36.62 to 60.13 s were determined, it was found that at higher temperatures and screw speed there is a reduced the mean residence time. The extrusion-cooking process affected the retentions of total polyphenol (36-47%), betacyanins (33-51%), betaxantinas (46-63.5%) and antioxidant activity (55-77%) presents in the red cactus pear powder, extrusion conditions selected were 325 rpm and 100 °C. The degradation analysis showed that betaxanthins are more sensitive to temperature. The extruded cereal obtained presented good quality characteristics, however most accepted cereal by the consumers was the cereal with low red cactus pear powder content (2.5%) because this had lower hardness. Cereal consumption showed no effect on serium levels of glucose, cholesterol and triglycerides, but contributes to consumption fiber and biologically active compounds.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un creciente interés por incluir en la dieta alimentos que contengan componentes bioactivos, que presentan efectos beneficios en la salud. Una fuente rica en este tipo de componentes son las frutas y hortalizas (Yağis y Göğus 2008; Moure *et al.*, 2001). Un fruto típico, de consumo tradicional es la tuna, proveniente de nopal tunero y por lo tanto de su fruto denominado tuna. Éste fruto se consume tradicionalmente como producto fresco, sin embargo en años recientes, la exportación de la tuna se ha incrementado, debido a que además de su valor nutricional, se ha demostrado que produce efectos benéficos en la salud del consumidor, tales como la disminución en el riesgo de enfermedades cardio y cerebro vasculares, oculares, neurológicas y en la disminución de ciertos tipos de cáncer (Ames *et al.*, 1993; Hertog *et al.*, 1993; Chávez-Santoscoy *et al.*, 2009), además se ha usado para tratar padecimientos como el artritis, gastritis, hiperglucemia y reducir el estrés oxidativo (Galati *et al.*, 2003), entre otros.

Por lo anterior, la industria de alimentos se ve en la necesidad de adicionar componentes que le den el valor agregado a sus productos, siendo la tuna una excelente opción para producir alimentos a base de ingredientes naturales, con propiedades funcionales y además que permitan expandir el mercado a productos regionales como es dicho fruto. Sin embargo durante el procesamiento de este fruto se afecta el contenido natural de compuestos bioactivos (Gharras *et al.*, 2008). En especial, los pigmentos presentes en la tuna, estos pigmentos son afectados por factores como temperatura, pH, actividad de agua y presencia de oxígeno y luz, siendo más afectados por procesos donde se emplean altas temperaturas. Por lo que, es de importancia evaluar el efecto de procesos de conservación y uso de la tuna roja para su industrialización y desarrollo de nuevos productos. Un proceso mediante el cuál se puede lograr la conservación de estos componentes, es el empleo de tecnologías novedosas como la encapsulación, que puede ser utilizada para conservar la bioactividad de componentes de interés. Dentro de las cuales, el secado por aspersion, es una tecnología conveniente por la relación de costos con la calidad del producto, y adicionalmente la versatilidad en el empleo de agentes o

componentes de posean su propio valor funcional proporcionando valor agregado a los polvos obtenidos, como es el uso fibras solubles como agentes acarreadores.

Los polvos encapsulados obtenidos pueden ser utilizados en procesos que permitan la obtención de una mayor variedad de productos que contengan los componentes con alto valor funcional tanto de la tuna roja como del agente encapsulante, como es el caso del proceso de extrusión-cocción. El cuál es un proceso de alta temperatura-cortos tiempos, que permite obtener una amplia gama de productos. Sin embargo, durante este proceso se producen una serie de cambios tanto físicos como químicos en el material, que definirán las características de los productos obtenidos. Siendo los cambios en materiales termo-sensibles de gran importancia cuyo se desea obtener productos con actividad biológica o antioxidante.

Este estudio permitirá desarrollar información acerca de la estabilidad de los compuestos bioactivos como flavonoides y betalainas contenidos en la tuna roja, durante el procesamiento térmico, su contenido en productos secos y uso en el desarrollo de productos extrudidos, así como las condiciones a las cuales se deberán procesar para asegurar un contenido mínimo de compuestos con alta actividad biológica en el producto final.

II. DEFINICION DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El consumo de alimentos elaborados a base de ingredientes naturales y que contengan componentes bioactivos, tales como polifenoles, flavonoides y pigmentos, en alimentos industrializados se ha incrementado en los últimos años. En México existen frutos típicos tradicionales con alto contenido de compuestos bioactivos, como la tuna, que goza de una aceptación por el consumidor y cuyo consumo es principalmente en fresco, debido a que es un fruto perecedero que deriva en pérdidas del 25 hasta el 80% durante su manejo. Este fruto, tienen alto valor nutricional y promueve efectos benéficos al consumidor, debido a su contenido polifenólico y de pigmentos, los cuales además representan una fuente potencial de pigmentos naturales para la industria alimentaria. Sin embargo, debido a la termo-sensibilidad de los componentes presentes en la tuna roja, los procesos para su conservación y uso mediante tratamientos térmicos deben ser evaluados ya que pueden provocar cambios estructurales y degradación de componentes de interés lo que lleva a la pérdida de la funcionalidad de los productos obtenidos. Es importante la búsqueda de nuevas tecnologías y aplicaciones para el aprovechamiento de la tuna y la obtención de productos funcionales en el desarrollo de nuevos productos, que cumplan con las necesidades actuales de los consumidores y generen alternativas atractivas para la industria de alimentos. La máxima actividad biológica y el efecto benéfico dependen de la máxima estabilidad de los compuestos bioactivos o mínima degradación de estos durante el procesamiento, por lo que es deseable estudiar los cambios tanto físicos como químicos para predecir el comportamiento de componentes de interés y que puedan ser utilizados en la industrialización de nuevos productos que amplíen el uso y el consumo de los ingredientes naturales con beneficios a la salud del consumidor.

El presente estudio derivará en información acerca del aprovechamiento de la tuna roja como un colorante natural alimentario, además de explorar el uso de la fibra soluble como material auxiliar para elaborar un producto estable y funcional a partir de la tuna roja, que se pueda utilizar para el desarrollo de nuevos productos como el cereal y que aporte fibra soluble y compuestos antioxidantes en la dieta diaria de los consumidores.

III. OBJETIVO GENERAL

Evaluar los cambios en los compuestos bioactivos de tuna roja (*Opuntia ficus indica*) durante la encapsulación por aspersión con ayuda de fibras solubles (β -glucanos) y su aplicación en el desarrollo de un producto extrudido, evaluando la relación de las características físicas, químicas y sensoriales así como su efecto sobre el contenido de glucosa, colesterol y triglicéridos en ratas de laboratorio.

3.1. OBJETIVOS PARTICULARES

1. Evaluar el uso de fibras solubles (β -glucanos) como agente acarreador en el proceso de encapsulación por aspersión.
2. Evaluar la estabilidad de compuestos bioactivos de tuna roja mediante encapsulación, determinando las mejores condiciones de proceso.
3. Determinar los tiempos de residencia medios durante la extrusión-cocción a diferentes condiciones de proceso.
4. Estudiar el efecto de la extrusión-cocción sobre encapsulados de tuna roja, obtenidos mediante secado por aspersión utilizando fibra soluble.
5. Evaluar de las propiedades físicas, químicas y sensoriales de cereal para desayuno pigmentado con diferentes contenidos de polvo encapsulado de tuna roja.
6. Evaluar el efecto sobre niveles séricos de glucosa, colesterol y triglicéridos de ratas alimentadas con cereal pigmentado con diferentes contenidos de polvo encapsulado de tuna roja.

IV. HIPÓTESIS

La encapsulación por aspersión con el uso de fibras solubles (β -glucanos) permite la obtención de polvos encapsulados de tuna roja, que al ser utilizados como ingredientes en la extrusión-cocción, se obtienen productos extrudidos que presentan actividad antioxidante y contenido fibra soluble, el cual es capaz de disminuir la glucosa y perfil de lípidos séricos conservando características físicas y sensoriales aceptables.

V. ANTECEDENTES

5.1 Generalidades

El interés del consumidor en la búsqueda de productos alimenticios con valor nutricional adecuado y formulados con ingredientes que deriven en beneficios en la salud o disminuyan el riesgo de padecimiento de ciertas enfermedades, especialmente las enfermedades de tipo crónico, ha conducido a que la industria alimentaria emplee mas frecuentemente ingredientes naturales en el desarrollo de alimentos, que presentan una mayor funcionalidad y con posibles beneficios en la salud del consumidor (Cleysdale, 2004). Las frutas y vegetales son una fuente rica de estos componentes que básicamente son compuestos bioactivos, es decir que presentar actividad biológica aportando beneficios a la salud, algunas de éstas sustancias o componentes son los polifenoles, los pigmentos, las fibras tanto soluble como insoluble, aceites esenciales, etc.

Dentro de amplio grupo de los vegetales se encuentran las cactáceas que no sólo son representativas del paisaje de México, si no que mucho de sus frutos y tallos se utilizan en la cocina, como ingredientes para la elaboración de platillos y para la obtención se sustancias químicas de interés farmacológico y de beneficios en la salud. Dentro de estas se encuentra el nopal (*Opuntia sp*), que es un ingrediente insustituible y típico de la cocina mexicana. Es la principal fruta de las zonas áridas y semiáridas, representa una alternativa a los problemas de obesidad y diabetes, por lo que los productos a base de nopal se han diversificado en los últimos años (SRREP, 2007). El cultivar de mayor importancia es el Nopal tuna, que producen 344 mil toneladas del fruto llamado tuna (SAGARPA, 2011), éste fruto es más aceptado en el mercado mexicano que el mismo nopal, además es exportado a diversos países. En México, en la producción de tuna participan alrededor de 20 mil productores y ocupa una superficie aproximada de 53 000 hectáreas concentrada en tres regiones: Puebla (Acatzingo y Quecholác), Valle de México (Estado de México e Hidalgo) y el Altiplano Potosino-Zacatecano (Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato, San Luis Potosí y Zacatecas) (SAGARPA, 2011).

5.2 Tuna roja

La tuna roja (*Opuntia ficus indica*), es un fruto de la familia de las cactaceas que posee una diversidad de formas, tamaños y colores tales como blanco, amarillo, rojo y púrpura (Moßhammer *et al.*, 2006) los cuales se muestran en la Figura 1.



Figura 1. Fotografía de algunas variedades de tuna (Todd Coleman, 2011)

Hasta hace algunos años este fruto había sido ignorado para motivos de investigación. Sin embargo, la tuna roja (Figura 1, fruto No. 2), puede ser considerada como una fuente rica de un gran número de componentes como azúcares, vitamina C, pigmentos y minerales como Ca, Na, Mg, Zn, Fe, Mn y Se (Moßhammer *et al.*, 2006), además de que en recientes años se ha demostrado que el consumo puede dar protección contra el daño oxidativo (Galati *et al.*, 2003; Gurrieri *et al.*, 2000) y posee propiedades

hipocolesterómicas, inhibición de ulceración estomacal, efecto antiinflamatorio (Galati *et al.*, 2003; 2007), efecto hipoglucémico y propiedades antidiabéticas. Las anteriores propiedades han sido relacionadas con componentes como polifenoles de tipo flavonoide, los cuales son un grupo muy grande de componentes ya que se han identificado más de 6 000 flavonoides y derivados (Erlund, 2004). Algunas de sus actividades biológicas reportadas son efectos antibacteriano, anticancerígeno, antioxidante, antimutagénico, antiinflamatorio y antialérgico (Erlund, 2004; Harborne y Williams, 2000; Hsu y Yen, 2008; Peterson y Dwyer, 1998; Zhang *et al.*, 2010). Sin embargo, de todos los flavonoides presentes en las plantas en las cactaceas, en específico en la tuna, se ha reportado la presencia de flavonol 3-*O*-glicosidos (quercetina, kaempferol e isohermetina mostrados en la Figura 2), dihidroflavonoles, flavonones y flavanonoles (Kuti *et al.*, 2004). Aunque este tipo de componentes han demostrado potencial para provocar efectos benéficos en el consumidor son compuestos térmicamente sensibles, por lo que el procesamiento termico de estos puede causar degradación y por lo tanto cambio en la bioactividad de los mismos (Heras-Ramirez *et al.*, 2012).

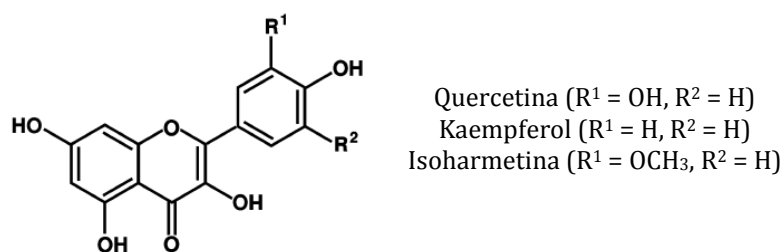


Figura 2. Estructuras químicas de los principales flavonoides presentes en tuna roja (*Opuntia ficus indica*), Kuti *et al.*, 2004

Además, los efectos benéficos de la tuna roja han sido relacionados con otros componentes presentes en el fruto como los pigmentos denominados betalainas, ya que se ha comprobado que gran parte de la actividad antioxidante de la tuna es atribuible a dichos pigmentos (Butera *et al.*, 2002; Castellanos y Yahia, 2008; Castellar *et al.*, 2003), entre otros efectos como el antiviral y el antimicrobiano (Strack *et al.*, 2003). Estos pigmentos, betalainas, provienen del ácido betalámico, y presentan algunas propiedades

como ser solubles en agua y pueden ser útiles para sustituir los pigmentos sintéticos. Dichos pigmentos se dividen en dos grupos estructurales en la Figura 3, se muestran algunas de las estructuras de ambos grupos. Las betaxantinas, presentan formas ácidas y coloraciones en tonalidades amarillo-naranja, entre los principales pigmentos clasificados en este grupo se encuentran indicaxantina, miraxantina II, y vulgaxantina I, II y IV. Por su parte, las betacianinas presentan forma de base y coloraciones en la gama rojo-violeta, entre los principales pigmentos que se encuentran clasificados dentro de este grupo se encuentran betanina, filocactina y neobetanina (Stintzing *et al.*, 2001; 2002; Fernández-López *et al.*, 2001). El color que presenta finalmente el fruto está dado por la combinación del contenido de los pigmentos de ambos grupos, causando una diversidad de colores.

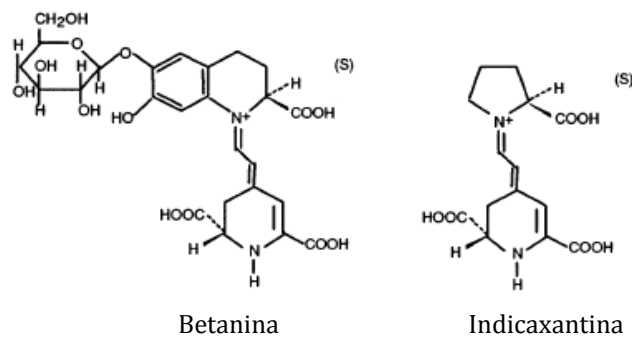


Figura 3. Estructuras químicas de las principales betalainas presentes en tuna roja (*Opuntia ficus indica*), Butera *et al.*, 2002.

Con estos antecedentes se puede concluir que la tuna roja puede ser considerada como alimento alto en propiedades funcionales, esto aunado a la tendencia del consumo de productos que promuevan la salud como son los alimentos nutraceuticos están incrementando el mercado de estos (Piga, 2004).

5.3 Procesamiento de la tuna roja

Actualmente, apartir de la tuna se industrializan productos como jugos, quesos, productos fermentados, mermeladas, jaleas, entre otros (Moßhammer *et al.*, 2006). Pero la mayor parte de la producción se comercializa, exporta y consume como producto fresco. Sin embargo, durante el manejo post-cosecha de la tuna se han reportado pérdidas entre un 25 – 80% debido a un mal manejo, debido a que la tuna presenta un carácter altamente perecedero y una manipulación deficiente puede causar daños mecánicos, deshidratación de la piel y ataque de microorganismos patógenos causantes de pudrición en frutos y vegetales (González *et al.*, 2001). Es por ello que la preservación puerden presentar una ventaja ante la pérdida de producto además de que el procesamiento de la tuna roja a nivel industrial prodría ampliar la gama de productos que se obtienen apartir de dicho fruto y por lo tanto diversificar el consumo de este fruto que a su vez conlleva al aprovechamiento de su capacidad nutricional y de su actividad biológica.

Sin embargo, una desventaja cuyo se desea procesar alimentos que contienen componentes como los polifenoles y pigmentos es que la estructura de estos es afectada por distintas condiciones de procesamiento, lo que igualmente puede causar cambios en la biodisponibilidad y bioactividad de los mismos. Entre las condiciones de proceso que afectan física y químicamente los materiales y sus compuestos se encuentran pH, actividad de agua, presencia de oxígeno y luz, además de la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso. Este último factor es uno de los factores más importantes, donde la estabilidad de la bioactividad de componentes depende de la magnitud y la duración del calentamiento (Sapers y Hornstein, 1979; Castellar *et al.*, 2003). Por lo que, la degradación de los pigmentos durante la aplicación de métodos de conservación o nuevas tecnologías para el uso de tuna roja a nivel industrial debe ser evaluada. Reportes muestran que la degradación de las betalainas sigue una cinética de primer orden (Chandrán *et al.*, 2012), siguiendo éste antecedente la pérdida de betalainas puede ser descrita mediante la siguiente ecuación:

$$\ln (C_t - C_0) = -kt \tag{1}$$

donde C_0 es la medición inicial del componente, C_t es la medición en el tiempo t , k es la constante de velocidad de reacción y t es el tiempo. La dependencia de la constante de la velocidad de reacción (k) con la temperatura puede ser descrita mediante la ecuación de Arrhenius:

$$k = A_0 \exp(-E_a/RT) \quad (2)$$

donde A_0 es el factor frecuencia (1/s) como una constante pre-exponencial, E_a (J/mol) es la energía de activación de la reacción, R (8.3143 J/K·mol) es la constante universal de los gases y T es la temperatura absoluta (K).

El conocimiento de los parámetros cinéticos permitirá evaluar el efecto que ejercen algunas variables de proceso en la estabilidad de los pigmentos, y por lo tanto la estabilidad de las propiedades que estos presenten y permite además la obtención de condiciones optimizadas en el proceso para la obtención de productos con alto contenido de componentes de interés.

5.3.1 Encapsulación

Una alternativa para conservar alimentos es el secado, este es un proceso de preservación ampliamente utilizados para extender y preservar la vida útil de los productos y se ha utilizado para la preservación de nopal, más que para tuna, sin embargo el enfoque de los estudios existentes está orientado en el tipo de proceso utilizado y a la calidad física del producto final obtenido (Medina-Torres *et al.*, 2008; Lahsasni *et al.*, 2004). Sin embargo, cuando se aplican altas temperaturas durante el secado además de afectar las propiedades de color, textura, densidad, porosidad y características de absorción de los materiales (Krokida *et al.*, 1998) se puede causar degradación (Chantaro *et al.*, 2008). Por lo tanto también se pueden producir cambios en la bioactividad de los compuestos térmicamente sensibles, siendo la estabilidad de los pigmentos uno de los parámetros más afectados por la aplicación de temperatura. Se ha reportado que el proceso térmico puede inducir cambios químicos en polifenoles que resultan en la formación de productos de descomposición que pueden mantener o

incluso poseer una mayor actividad antioxidante (Buchner *et al.*, 2006; Dewanto *et al.*, 2002), aunque ciertos estudios reportan el efecto contrario, es decir, un aumento del contenido en antioxidantes, derivados de los cambios estructurales en los tejidos que pueda liberar limitada concentración de polifenoles resultando en un aumento de la actividad antioxidante a pesar de los tratamientos térmicos aplicados a los materiales de los alimentos (Xu y Chang, 2009; Turkmen *et al.*, 2005), por lo que los resultados en los componentes de interés dependen del material a procesar y del método de procesamiento específico.

Un factor importante para la conservación de la estabilidad de los componentes bioactivos durante el secado es el tiempo de exposición al calor, siendo el secado por aspersión uno de los procesos con tiempos de secado más cortos, sin embargo la degradación durante el secado se puede reducir mediante la aplicación de pre-tratamientos auxiliares en el proceso de secado, tales como el escaldado, el uso de aditivos químicos (Xu y Chang, 2009), la encapsulación, etc.

La encapsulación o microencapsulación es una novedosa tecnología que ha ido adquiriendo importancia en los últimos años, está permite proteger de la pérdida de componentes y de los cambios indeseables en los materiales, además permite liberar controladamente principios activos termolábiles de gran valor agregado, como son los componentes con actividad biológica (Shahidi y Han, 1993). Otra de las funciones de la encapsulación es desarrollar envolturas que proporcionan un medio de envasar, separar y almacenar compuestos a escala microscópica, de tal manera que su desempeño o funcionalidad es maximizado (Desai y Park, 2005) por lo que este tipo de tratamientos pueden inhibir o reducir la degradación térmica y aumentar la retención de componentes bioactivos como los carotenoides (Sutter *et al.*, 2007; Kha *et al.*, 2010), limoneno (Kaushik y Ross, 2007), sabores (Busso *et al.*, 2007) y lípidos (Gharsallaoui *et al.*, 2007).

Existen diferentes tipos de métodos de encapsulación (Shahidi y Han, 1993), estos pueden ser:

- a. Físicos, como el secado por aspersión y lecho fluidizado.
- b. Químicos, como la inclusión molecular y polimerización interfacial.

c. Fisicoquímicos, como la coacervación y la separación de fase orgánica.

Uno de los métodos encapsulación de mayor uso en la industria alimentaria es el secado por aspersión debido a que es un proceso simple y económico, el proceso de secado a través del secador por aspersión se muestra en la Figura 4, aunque se requiere una fuerte inversión inicial. Sin embargo para poder realizar la encapsulación mediante aspersión es necesario que el material encapsulante tenga baja viscosidad, buena actividad superficial, baja difusividad y alta energía de activación (Shahidi y Han, 1993).

Entre los diferentes agentes encapsulantes se encuentran polisacáridos (almidones, maltodextrinas, jarabes de maíz y gomas), lípidos (ácido esteárico, mono y di glicéridos), proteínas (gelatina, caseína, suero de leche, soya y trigo), siendo las maltodextrinas el polisacárido más utilizado como agente acarreador. Sin embargo, no son los únicos materiales acarreadores, existen otros acarreadores como la inulina que recientemente ha sido utilizada para aprovechar su valor nutricional y su efecto prebiótico, para encapsular los componentes de la tuna (Saéñz *et al.*, 2009).

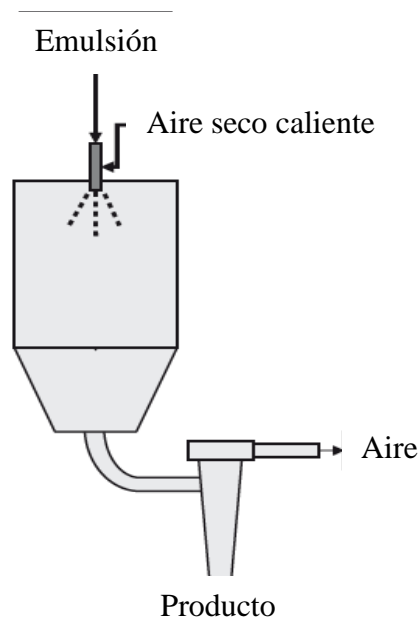


Figura 4. Diagrama de proceso de secado por aspersión

Diferentes estudios han descrito la obtención de polvos estables con diferentes propiedades físico-químicas del secado por aspersión de gac (Kha *et al.*, 2010), piña (Abadio *et al.*, 2004), mango (Cano-Chauca *et al.*, 2005), açai (Tonon *et al.*, 2008; 2010), papa dulce (Ahmed *et al.*, 2010), remolacha roja (Azeredo *et al.*, 2007; Pitalua *et al.*, 2010), sandía (Quek *et al.*, 2007), jugos de plátano (Wang *et al.*, 2011) y pitaya (Tze *et al.*, 2012), pigmentos de amaranto (Cai y Corke 2000), extractos obtenidos de tuna (Sáenz *et al.*, 2009, Gandía-Herrero *et al.*, 2010), y betalainas purificadas (Gandía-Herrero *et al.*, 2013). Sin embargo, todos estos estudios han utilizado maltodextrina y goma arábica, principalmente, como acarreadores. Pocos estudios han utilizado otros materiales, tales como la proteína de suero de leche, lactosa, lecitina de soja, caseinato de sodio (Hong-Kwong *et al.*, 2012), y gelatina y sacarosa (Shu *et al.*, 2006) encontrando un impacto significativo en la eficiencia de encapsulación de compuestos bioactivos (Sun-Waterhouse *et al.*, 2012). Estudios recientes, muestran el empleo de fibras como materiales de agentes acarreadores, como es el caso de Sáenz *et al.* (2009) quienes reportan el uso de inulina como auxiliar en el secado por aspersión de extractos de tuna roja para aumentar el uso y el consumo de fibra.

5.3.1.1 Fibra dietética

La fibra dietaría está compuesta por dos tipos de fibra: la insoluble y la soluble, está última de interés para el presente estudio. Ambas fibras tienen una función específica a nivel intestinal, funciones mediante las cuales se ha logrado explicar el efecto de éstas sobre disminución de glucosa y colesterol en sangre durante su consumo (Foschia *et al.*, 2013). En la Figura 5 se muestra un diagrama que ejemplifica el efecto de la fibra cuyo pasa por el intestino grueso. El consumo de fibra causa aumento del volumen de la masa fecal, disminución del tiempo de tránsito intestinal, el colesterol y los niveles de glucemia, además que es capaz de atrapar sustancias que pueden ser peligrosas como agentes mutagénicos y carcinogénicos y puede estimular la proliferación de la flora intestinal (Heredia *et al.*, 2002; Beecher, 1999).

En la Tabla 1 se enlistan las funciones y beneficios que puede causar el incluir en la dieta fibra dietaría, la forma más usual para clasificar la fibra dietética es por su solubilidad, dividiendo este grupo en fibra soluble y fibra insoluble.

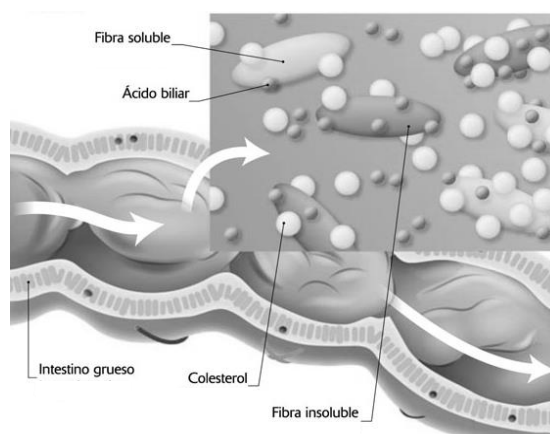


Figura 5. Esquema de las funciones de la fibra en el intestino grueso (icarito.cl, 2010)

TABLA 1
FUNCIONES Y BENEFICIOS DE LA FIBRA DIETARÍA EN LA SALUD HUMANA*

Funciones	Beneficios
Aumento de densidad de la dieta	Puede reducir el apetito
Liga agua y se convierte en gel durante la digestión, atrapando carbohidratos y lenta absorción de la glucosa	Reduce la variación en los niveles de azúcar en la sangre
Reduce el colesterol total y LDL	Reduce el riesgo de enfermedades del corazón
Regula la presión arterial	Puede reducir el riesgo de aparición o síntomas del síndrome metabólico y la diabetes
Agiliza el paso de los alimentos a través del sistema digestivo	Facilita la regularidad
Añade volumen a las heces fecales	Alivia el estreñimiento
Regula el pH intestinal y estimula la fermentación intestinal para la producción de ácidos grasos de cadena corta	Puede reducir el riesgo de cáncer colorrectal

* Dhingra *et al.*, 2012

Siguiendo ésta línea acerca del uso de la fibra en matrices alimentarias es posible el uso de agentes encapsulantes, en el secado por aspersión que tengan actividad funcional propia. Existe un componente que ha tomado auge en recientes años: los β -glucanos, ya que se encuentran dentro de los denominados alimentos funcionales debido a que es fibra soluble y por lo tanto posee propiedades prebióticas. Los β -glucanos son homopolisacáridos de enlaces consecutivos (1 \rightarrow 4) β -D-glucosídico que están separados por un enlace sencillo β -(1 \rightarrow 3). Aunque la estructura de estos biopolímeros consiste principalmente en residuos de celotriosa (3 glucosas) y celotetraosa (4 glucosas) entrelazados por enlaces β -(1 \rightarrow 3) (Izydorczyk *et al.*, 2008; Lazaridou *et al.*, 2009), en la Figura 6 se muestra un esquema de la estructura de los β -glucanos.

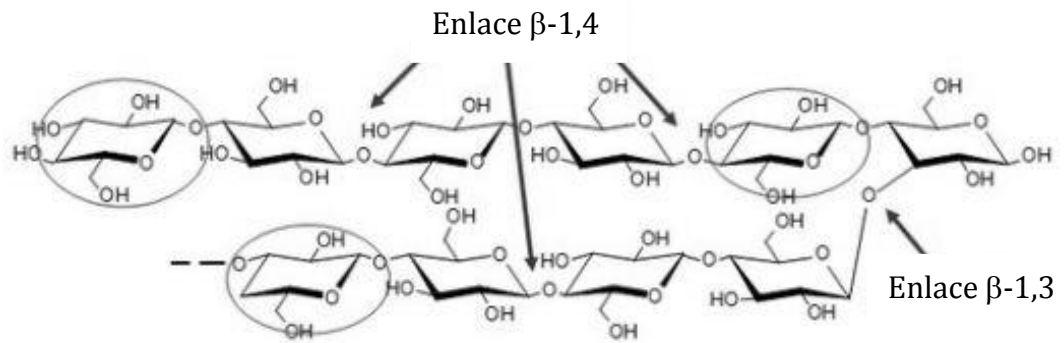


Figura 6. Estructura de β -glucanos (Parrish *et al.*, 1960)

Los β -glucanos exhiben diversidad con respecto a sus características moleculares/estructurales, como son el peso molecular, la proporción de tri- a tetrámeros, la cantidad de oligómeros celulósicos y la proporción de enlaces β -(1-3)/ β -(1-4) (Johansson, 2006; Lazaridou *et al.*, 2009), aproximadamente el 70% de los enlaces son β -(1-4) y el resto β -(1-3) (Duss *et al.*, 2004). Es importante señalar que este tipo de componente no ha sido utilizado como agente auxiliar o acarreador en procesos de encapsulación, sin embargo si se ha utilizado en procesos alimentarios como en la formulación de salchichas (Morin *et al.*, 2004), productos lácteos (Sahan *et al.*, 2007) y pastas (Chillo *et al.*, 2011) debido a que se ha demostrado su efecto en la reducción de

índice glicémico (Ahmed *et al.*, 2011; Chillo *et al.*, 2011), niveles de colesterol sérico y reducción anti-mutagénica en enfermedades crónicas (Mantovani *et al.*, 2008).

Por lo que, el uso de fibra soluble (β -glucanos) durante la encapsulación por aspersión de jugo de tuna roja es un método alternativo para la retención de los compuestos y su actividad biológica, aprovechando además el potencial de beneficios en la salud de la fibra soluble, aumentando el valor de los productos desarrollados.

5.3.2 Extrusión-cocción

Un proceso alimentario en el que se puede utilizar los encapsulados obtenidos a partir de la tuna roja como ingredientes es la extrusión-cocción. Actualmente, existen pocos estudios en los que se hayan empleado encapsulados en este proceso (Yuliani *et al.*, 2006; Camire *et al.*, 2007). En estos reportes se ha demostrado que es posible su uso y que las características de los productos obtenidos dependen directamente de las condiciones del proceso, con muy buenos resultados en la retención de D-limoneno encapsulado con β -ciclodextrinas en extrudidos obtenidos (Yuliani *et al.*, 2006).

El proceso de extrusión-cocción es una tecnología versátil que permite la obtención de una gama de productos alimenticios con diferentes formas y características, que ha permitido el desarrollo en los últimos años (Harper, 1989). Su aplicación ha permitido la obtención de una lista de productos dentro de los cuales tenemos botanas, cereales, pastas, proteínas vegetales texturizadas, alimentos para animales, productos de bebidas instantáneas, análogos de carne, barras energéticas, productos rellenos. El proceso es mostrado en la Figura 7, éste generalmente involucra la conversión de formulaciones basadas en biopolímeros plastificante a una masa viscoelástica procesada uniformemente y formada a productos por un dado. La energía térmica y mecánica empleada para transportar el material a través de tornillos simples o rotatorios helicoidales y dadas las altas presiones se producen cambios físicos y químicos en el material alimentado. Las transformaciones químicas y estructurales que ocurren en el material, durante el proceso de extrusión-cocción son la gelatinización de almidón, desnaturalización de proteínas, formación de complejos entre amilosa y lípidos y reacciones de degradación de

vitaminas, pigmentos, antioxidantes (Larrea *et al.*, 2005; Camire *et al.*, 2007; Ilo y Berghofer, 1999). Dichas transformaciones dependen de las condiciones a la que se lleve a cabo el proceso de extrusión-cocción entre las que se encuentran principalmente la temperatura del cañón, la humedad de la mezcla de alimentación y la velocidad, tipo y configuración del tornillo (Kumar *et al.*, 2008).

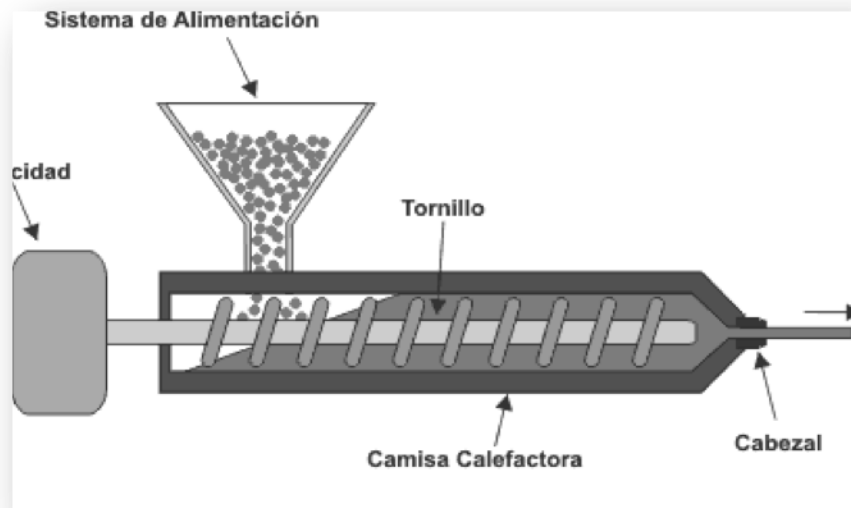


Figura 7. Proceso de extrusión-cocción

Estudios recientes sobre el proceso de extrusión se han centrado en la obtención de productos funcionales adicionando para ello legumbres (Anton *et al.*, 2009), cereales (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2009), frutas (Khanal *et al.*, 2009; Yağci, y Göğüs), extractos de frutas (Hirth *et al.*, 2014) y verduras (Stojceska *et al.*, 2008). A través de estos estudios, se encontró que el proceso de extrusión-cocción puede causar una disminución en la concentración de compuestos con actividad antioxidante, tales como carotenoides, antocianinas y flavonoles. Entre los que se encuentran el L-ácido ascórbico (Plunkett y Ainsworth, 2007), la vitamina E y la astaxantina debido principalmente al incremento de la temperatura del proceso (Anderson y Sunderly, 2002). Contradictoriamente, en otros estudios se ha reportado que durante la extrusión se produce un aumento de algunos componentes como ácidos fenólicos libres debido a la

conversión de un tipo de fenoles a otro tipo (Zieliński *et al.*, 2001), aumento en compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante debido a la formación de nuevos compuestos que presentan actividad antioxidante producto de la reacción de Maillard (Stojceska *et al.*, 2009; Camire *et al.*, 2007; Pokorny y Schmidt, 2006). Una de las explicaciones a el aumento en compuestos termosensibles es que la extrusión provoca rompimiento de la matriz alimentaria, lo que ocasiona una mejor extracción de dichos componentes (White *et al.*, 2009).

Camire *et al.* (2007) estudiaron el uso de polvos de frutas (arándanos, uva y frambuesa) para pigmentar cereales extruidos. Encontrando que a pesar de que los cereales obtenidos tenían un buen color, los contenidos de antocianinas y compuestos polifenólicos disminuyeron hasta 10 veces. Otros estudios informaron el uso de polvos encapsulados en el proceso de extrusión para mejorar la retención de los componentes. Yuliani *et al.* (2006) utilizaron polvo encapsulado de D-limoneno en el proceso de extrusión-cocción y reportan una mayor retención del compuesto en relación con otros estudios, concluyendo que esto se debe a la formación de complejos de inclusión con almidón, con esto se demuestra que el uso de componentes encapsulados conduce a una menor degradación de componentes de interés. Sin embargo, el comportamiento de los compuestos bioactivos de tuna roja, por ejemplo betalainas transformadas mediante la cocción por extrusión no se ha investigado. A pesar del potencial como colorante y actividad antioxidante de éste fruto, es ideal para desarrollar productos alimenticios extruidos pigmentados naturalmente y altos en la actividad antioxidante.

El impacto en las propiedades físicas de los materiales extruidos como el color, la densidad aparente, los índices de absorción y solubilidad en agua e índice de expansión dependen también de las variables del proceso entre las que se encuentran composición y humedad de la mezcla de alimentación, velocidad y diseño del tornillo, temperatura del cañón y diseño de dado, entre otros (Harper, 1989).

El efecto del proceso de extrusión-cocción en el color se determina mediante los parámetros colorímetros L (luminosidad), a (- verde a + rojo) y b (- azul a + amarillo), donde se observa una disminución en el valor de b y puede ser principalmente por dos factores: a. debido al oscurecimiento no enzimático y b. a la destrucción de pigmentos;

debido a la destrucción de carotenoides, mientras que el valor a es afectado por la temperatura, velocidad del tornillo y humedad de alimentación (Ilo y Berghofer, 1999), sin embargo cuando se adicionan concentrados naturales de pigmentos la coloración final depende de la concentración inicial, a mayor concentración de bagazo de fruta o vegetal mayor es la tonalidad (Altan *et al.*, 2008). Los cambios en color pueden ser relacionados con los cambios químicos o con la pérdida de valor nutricional (Apruzzese *et al.*, 2000).

Otras características del producto final obtenido del proceso de extrusión-cocción son el índice de solubilidad e índice de absorción en agua, densidad aparente, estas propiedades físicas pueden variar en base a las diferentes condiciones del proceso y su importancia radica en que estos describen la calidad del producto final que llegará al consumidor y han sido estudiadas en base a variación de las condiciones de proceso en algunos estudios (Stojceska *et al.*, 2009; Altan *et al.*, 2008; Hashimoto y Grossman, 2003; Yağci y Göğus, 2008; Sacchetti *et al.*, 2004)

Un factor importante es el efecto de la adición de fibra en la mezcla de alimentación para obtener productos funcionales. Se ha encontrado que el aumento en la cantidad de fibra de la mezcla de alimentación, el aumento de la temperatura y la velocidad del tornillo producen una disminución en el índice de expansión, debido principalmente a la ruptura de las burbujas de aire y una violenta evaporación del agua en la salida (Lue *et al.*, 1990; Hashimoto y Grossman, 2003). Sin embargo, se ha demostrado como benéfico en el metabolismo humano una mejora en la separación y homogenización de las partículas de la fibra, haciéndola más disponible para la fermentación, durante la absorción de los ingredientes en el intestino como es la glucosa, al utilizar los β -glucanos como agentes encapsulantes en los ingredientes de las mezclas de extrusión-cocción, se incrementará el porcentaje de fibra en los productos extrudidos. La mezcla de ingredientes altos en compuestos bioactivos está siendo estudiada, por la importancia que deriva en la obtención de productos altos en antioxidantes (Camire *et al.*, 2007; Yağci y Göğus, 2008; Larrea *et al.*, 2005). Sin embargo, la importancia de retener estos componentes bioactivos y comprender los cambios que sufren durante el proceso de extrusión de tal manera que ejerzan su función como compuestos bioactivos ha sido poco estudiada. La razón de esto es debido a que la tecnología de extrusión-cocción es

una tecnología basada en altas temperaturas y tiempos cortos, por lo que el aspecto de temperatura y tiempo de proceso está íntimamente relacionada con los tiempos de residencia.

Una forma común de determinar la distribución de tiempos de residencia (*DTR*) y su tiempo de residencia medio (tr_m) es mediante procedimiento propuesto por Levenspiel (1972). Primeramente, se contruye una curva concentración-tiempo, dada en la siguiente ecuación:

$$\int_0^{\infty} C(t) dt \quad (3)$$

La curva C , obtenida es útil para la construcción de la función de distribución de tiempos de residencia $E(t)$, ésta última describe en forma cuantitativa cuanto tiempo han pasado en el extrusor diferentes elementos y está dada en la siguiente ecuación:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (4)$$

El cálculo de los tr_m , está dado por la ecuación 3 y representa el valor promedio del tiempo que pasó el material en el extrusor.

$$tr_m = \int_0^{\infty} tE(t) dt \quad (5)$$

donde i es el índice de la muestra, t es el tiempo y $E(t)$ es la curva de distribución de tiempos de residencia.

El conocimiento de la *DTR* es importante para la comprensión de la degradación de nutrientes, seguridad de alimentos y calidad del producto (Ilo y Berghofer, 1999) para ello el material alimentado al extrusor deberá ser procesada bajo un tiempo óptimo específico y controlable. La *DTR*, se desarrolla como un resultado de patrones de flujo y mezclado, es altamente dependiente de las variables de proceso, tales como humedad del

material alimentado, temperatura de proceso, velocidad de tornillo, configuración del tornillo y dado, etc. (Kumar *et al.*, 2008). Un buen número de reportes muestran modelos y predicción la distribución de tiempos de residencia (Kumar *et al.*, 2006; Braun *et al.*, 2007; Pansawat *et al.*, 2008) algunas de las expresiones desarrolladas han sido fundamentadas en modelos conceptuales de reactores químicos, donde se describen modelos simples y de múltiples etapas, los cuales han servido para desarrollo de modelos completos de DTR (Kumar *et al.*, 2008), donde se consideran una gama de variables que afectan al proceso de extrusión. La importancia del conocimiento de la DTR y tiempos de residencia medios en el extrusor es fundamental ya que esto permite explicar como afectan las condiciones del proceso de extrusión-cocción la degradación y estabilidad de los componentes bioactivos de interés presentes en el material extruido así como la conversión de estos a otros componentes, incidiendo directamente en la composición, funcionalidad y aceptabilidad del producto final. Asimismo, la DTR proporciona información útil en labores de escalamiento y traslado de procesos. Este conocimiento, además, permite facilitar y mejorar el diseño y manufactura de alimentos extruidos altos en fibra o en antioxidantes para que su consumo derive en beneficios en la salud, logrando reducir de esta manera la incidencia de enfermedades cardiovasculares y de tipo crónico.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 *Desarrollo experimental*

6.1.1 **Caracterización de materia prima**

Tuna roja de la región de Puebla, fue clasificada, lavada, desinfectada y procesada mediante un extractor para obtener jugo. El jugo fue filtrado a 25 μm para eliminar los sólidos en suspensión. Una pequeña parte del jugo fue liofilizado para la caracterización, mediante la cual se determinarán los contenidos de humedad, proteína, grasa, fibra cruda y cenizas, además de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$), pH, actividad antioxidante, así como contenido de polifenoles totales, flavonoides, quercetina, kaempferol, isoharmetina, y pigmentos betacianinas y betaxantinas. Posteriormente, el jugo filtrado fue congelado y el almacenamiento a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la oscuridad, hasta su uso.

Otro material utilizado durante el procesamiento del jugo de tuna roja fue la fibra soluble [(1-3) (1-4) β -D-glucano], está presentó un pH de 5, y fue obtenida a partir de cebada, este material fue utilizado como agente acarreador o auxiliar en el proceso de encapsulación mediante secado por aspersión.

6.1.2 **Encapsulación mediante secado por aspersión**

En la Figura 8 se muestra el procedimiento para la encapsulación del jugo de tuna roja mediante secado por aspersión utilizando fibra soluble. Se prepararon mezclas con 1 L de jugo y 15, 22.5 y 30% de fibra soluble (β -glucanos) incorporando mediante un homogenizador basico Ultra-Turrax IKA T-18 con una herramienta de dispersión S18N-19G (IKA Works, Inc., Wilmington, NC) durante 10 min. Las mezclas homogenizadas fueron deshidratadas utilizando un secador por aspersión Niro A/S DK-2860 2001 (GEA Company, Soeborg, DK) a 160, 180 y 200 $^{\circ}\text{C}$ de temperatura de entrada y 85 $^{\circ}\text{C}$ de temperatura de salida, a 4.5 bar de presión de aire. Cada uno de los polvos encapsulados obtenidos se almacenaron en bolsas de plástico, para posteriormente ser evaluados físicamente en cuanto a propiedades como densidad aparente, color (L^* , a^* , b^* , croma^* y hue°), contenido de humedad, actividad de agua, índice de absorción y de solubilidad

en agua y temperatura de transición vítrea; químicamente para propiedades como actividad antioxidante, contenidos de polifenoles totales, quercetina, kaempferol, isoharmetina, betacianinas, betaxantinas; y morfológicamente mediante microscopía electrónica de barrido. Los tratamientos se realizaron por duplicado y cada determinación fue realizada por triplicado.

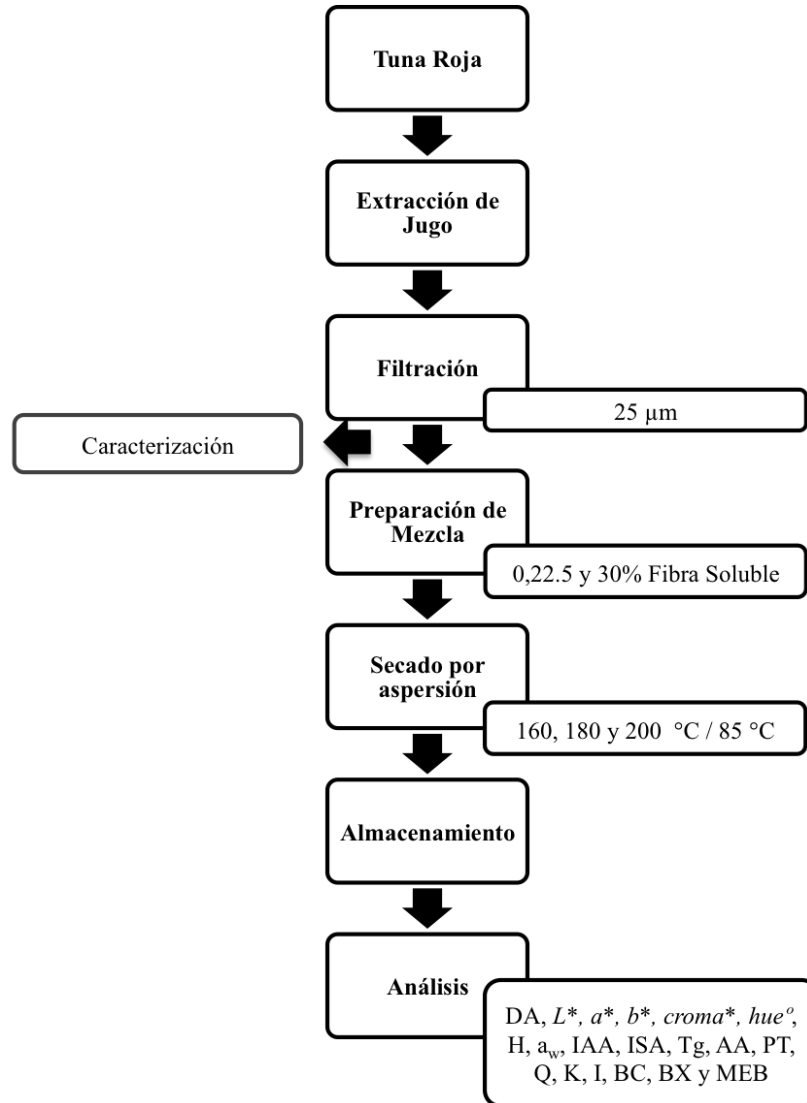


Figura 8. Procedimiento para la encapsulación de jugo de tuna roja mediante secado por aspersión

Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente mediante un diseño factorial completo 3×3 por duplicado, donde las variables independientes fueron el contenido de fibra adicionado y la temperatura de secado. Para el análisis se utilizó el programa Minitab versión 16 (2010), mientras que las comparaciones de medias de los encapsulados fueron analizados mediante una prueba de Tukey con un nivel de confianza de 95%.

De los polvos encapsulados obtenidos se seleccionó el polvo con mejores características funcionales para ser utilizados como ingrediente en el proceso de extrusión-cocción, seleccionando las condiciones de 22.5% de fibra soluble y una temperatura de secado de 160 °C.

6.1.3 Proceso de extrusión-cocción

6.1.3.1 Determinación de la distribución de tiempos de residencia (DTR)

Para la determinación de los tiempos de residencia medios se utilizó la técnica de respuesta de estímulo de acuerdo al método descrito por Ilo y Berghofer (1999). El procedimiento completo es mostrado en la Figura 9. El pigmento eritrosina fue usado como trazador en el proceso de extrusión-cocción utilizando como base almidón de maíz, para tal proceso fue utilizado un extrusor de doble tornillo marca Bühler con control de temperatura, velocidad de tornillo y entrada de agua (BTSK 30/20 D 2007, Suiza). El extrusor se operó a tres velocidades de tornillo (225, 275 y 325 rpm) y a temperaturas del cañón de 80, 100, 120 y 140 °C, ésta última se mantuvo constante en las últimas tres secciones del cañón, mientras que la primera zona fue usada solo como transporte del material con una velocidad de alimentación constante a una humedad de 0.22 kg de agua/kg de material alimentado. Al estabilizar las condiciones del extrusor se adicionó una pre-mezcla constituida de 30 mg de eritrosina con 1 g de almidón de maíz a la entrada del tornillo alimentador, esta adición se marcó como tiempo cero o tiempo inicial. El producto extrudido se colectó a la salida del cañón cada 10 s y fue deshidratado a 45 °C en una estufa de convección forzada (San Son Tecnología, México). Posteriormente, los extrudidos fueron molidos, tamizados (0.25 mm) y

almacenados hasta su análisis de color. En las muestras obtenidas fue determinado el parámetro de color a^* [tendencia de azul (-) a rojo (+)].

Con los datos obtenidos de a^* fueron construidas las curvas concentración-tiempo, DTR y tr_m . Cada proceso de extrusión se realizó por duplicado y cada determinación por triplicado. El análisis estadístico de los datos se realizó mediante un diseño factorial completo 4×3 por duplicado utilizando el programa Minitab versión 16 (2010), donde las variables independientes fueron la temperatura del cañón y la velocidad del tornillo del extrusor. Las comparaciones de las medias de los extrudidos fueron realizadas mediante una prueba de Tukey con un nivel de confianza de 95%.

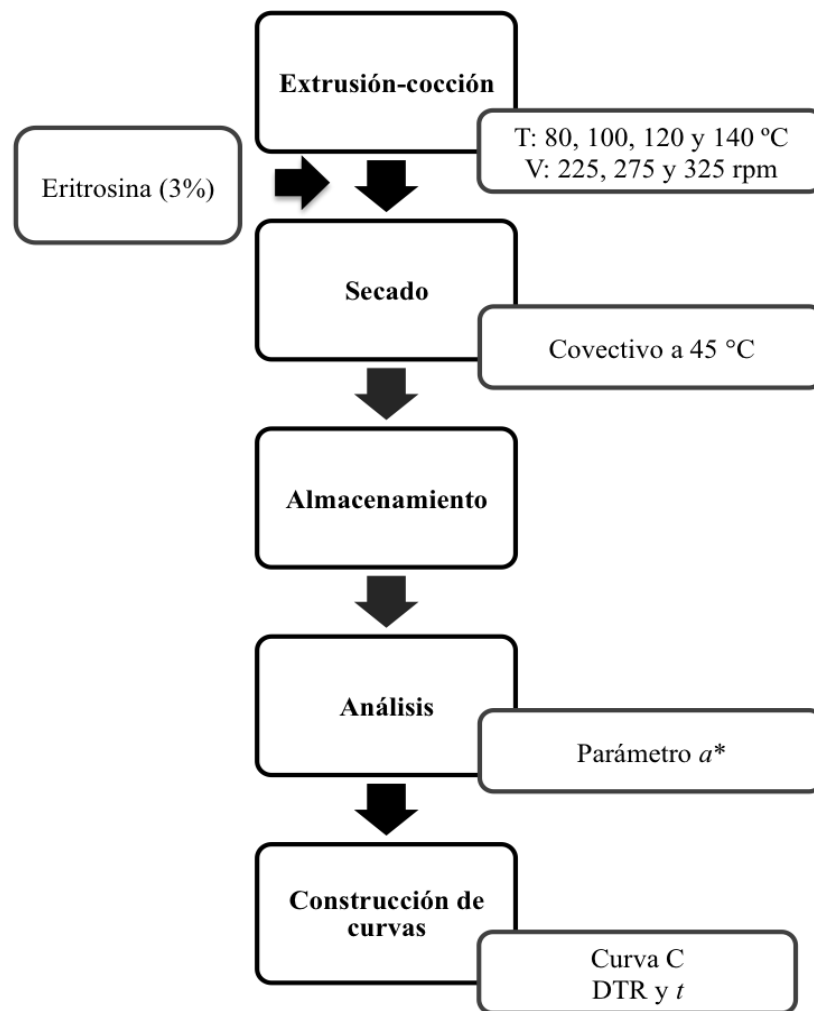


Figura 9. Procedimiento para la determinación de la distribución de los tiempos de residencia a diferentes condiciones de extrusión-cocción

6.1.3.2 Estabilidad de componentes de encapsulados de tuna roja en el proceso de extrusión-cocción

Para la evaluación de la estabilidad de los compuestos de interés presentes en el polvo encapsulado se utilizó el procedimiento presentado en la Figura 10. Una mezcla de almidón de maíz y encapsulado fue preparada con 2.5% de polvo encapsulado de tuna roja, dicha mezcla se caracterizó en cuanto a su composición física (color: L^* , a^* , b^* , $croma^*$ y hue , humedad) y química (actividad antioxidante, y contenidos de polifenoles totales, quercetina, kaempferol, isoharmetina, betacianinas, betaxantinas).

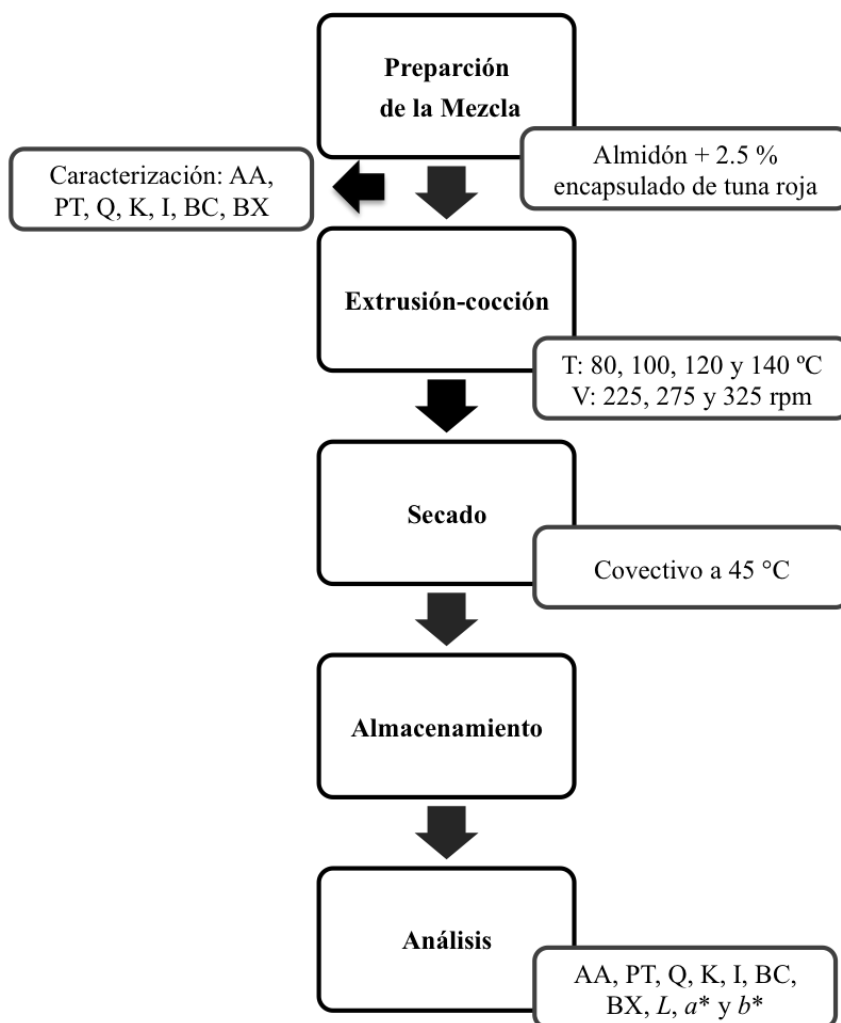


Figura 10. Procedimiento para evaluar la estabilidad de componentes de encapsulados de tuna roja en el proceso de extrusión-cocción

Posteriormente, la mezcla se sometió al proceso de extrusión-cocción, en un extrusor de doble tornillo Bühler con control de temperatura, velocidad de tornillo y entrada de agua (BTSK 30/20 D 2007, Suiza) a las mismas condiciones de extrusión usadas para la determinación de los tiempos de residencia medios. Dichas condiciones son temperaturas del cañón de 80, 100, 120 y 140 °C, la cuál se mantuvo constante en las últimas tres secciones del cañón, mientras que la primera zona fue usada solo como transporte del material con una velocidad de alimentación constante a una humedad de 0.22 kg de agua/kg de material alimentado y velocidades de tornillo de 225, 275 y 325 rpm. Los productos extrudidos obtenidos se secaron a una temperatura de 45 °C en una estufa de convección forzada (San Son Tecnología, México), luego fueron molidos, tamizados (0.25 mm) y almacenados hasta el análisis de su actividad antioxidante, contenido de polifenoles totales, quercetina, kaempferol, isoharmetina, betacianinas, betaxantinas, además de parámetros de color (L , a^* , b^*).

Cada extrudido se realizó por duplicado mientras que cada determinación se realizó por triplicado, los datos obtenidos se analizaron mediante un diseño factorial completo 4×3 por duplicado utilizando para ello el programa Minitab versión 16 (2010), donde las variables independientes fueron la temperatura del cañón y la velocidad del tornillo del extrusor. Las comparaciones de las medias de los extrudidos se analizaron mediante una prueba de Tukey con un nivel de confianza de 95%.

6.1.3.3 Efecto del encapsulado de tuna roja sobre las características físico-químicas, sensoriales y en salud de cereales para desayuno

Para la determinación del efecto del uso de encapsulado de tuna roja se realizó el procedimiento que se muestra en la Figura 11. Se prepararon mezclas con sémola de maíz y 2.5, 5.0 y 7.5% de polvo encapsulado de tuna roja, éstas mezclas se sometieron al proceso de extrusión-cocción utilizando un extrusor de doble tornillo Bühler con control de temperatura, velocidad de tornillo, entrada de agua y una relación $L/D=20$ (BTSK 30/20 D 2007, Suiza). Los parámetros de extrusión como la humedad de la mezcla, la temperatura del cañón y velocidad del tornillo fueron constantes para las diferentes mezclas, dichas variables fueron seleccionadas y fijados de los resultados obtenidos en

la etapa de estabilidad de componentes de encapsulados de tuna roja en el proceso de extrusión-cocción, las condiciones seleccionadas fueron 0.22 kg de agua / kg de material alimentado, 100 °C de temperatura del cañón y 325 rpm de velocidad del tornillo.

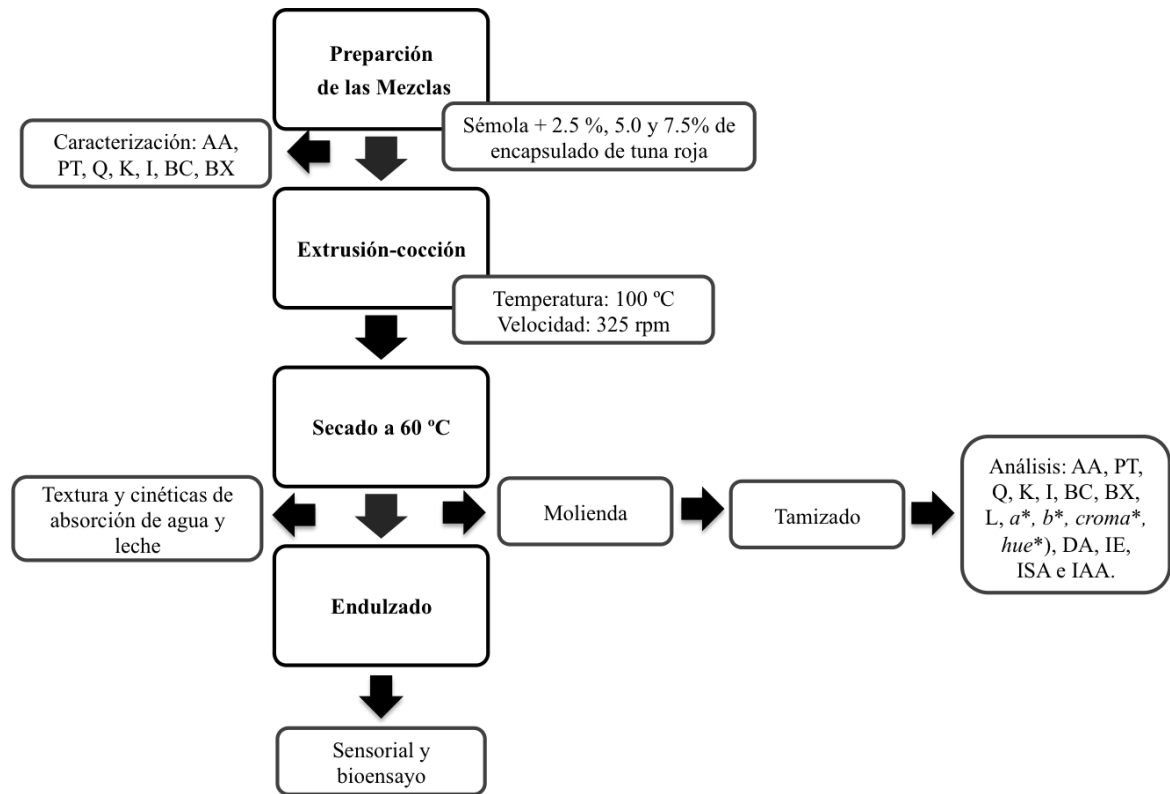


Figura 11. Procedimiento para evaluar el efecto de la adición de encapsulados de tuna roja en las propiedades de extrudidos

Los productos extrudidos de cada corrida experimental se colectaron en condiciones estables del proceso de extrusión, se deshidrataron a temperatura de 60 °C, en un secador de convección forzada (Edel Ingenieros, México). Posteriormente, una parte de los cereales obtenidos se endulzaron con un recubrimiento simple de azúcar (74 °Brix) utilizando una confitadora piloto, para proporcionarle el sabor dulce característico en los cereales para desayuno. Este cereal endulzado se utilizó para la evaluación sensorial de textura, color, sabor, olor, para la prueba de preferencia y para el análisis del efecto del consumo del cereal en la concentración de glucosa, colesterol y triglicéridos sanguíneos

en ratas de laboratorio. Otra parte de los extrudidos se almacenó como cereal entero y se utilizó para determinar el efecto del porcentaje de encapsulado en las propiedades de textura como la dureza y la crujibilidad del cereal. Además se evaluó la integridad del cereal, determinándose las cinéticas de absorción de agua y leche en el cereal obtenido. Finalmente, otra parte se molió, tamizó (0.25 mm) y almacenó para evaluar la actividad antioxidante, contenido de polifenoles totales, quercetina, kaempferol, isoharmetina, betacianinas, betaxantinas, parámetros de color (L^* , a^* , b^* , $croma^*$ y hue^*), densidad a granel, índice de expansión e índices de absorción y solubilidad de agua.

Cada tratamiento se realizó por duplicado y cada determinación por triplicado. El análisis estadístico de los datos se realizó mediante un diseño completamente al azar utilizando el programa Minitab versión 16 (2010), donde la variable independiente fue la concentración de encapsulado adicionado a la sémola de maíz. Las comparaciones de las medias de los tratamientos se realizaron mediante una prueba de Tukey con un nivel de confianza de 95%.

6.2 Métodos

6.2.1 Físicos

6.2.1.1 Preparación del jugo. La obtención del jugo de tuna roja se realizó de acuerdo a la técnica descrita por Obón *et al.* (2009). A los frutos se le eliminaron las espinas, se lavaron y se extrajo el jugo mediante un procesador de alimentos, lo obtenido se filtró a 2 mm para eliminar las semillas y los residuos de fibra, posteriormente el jugo obtenido se filtró a 25 μ m para eliminar las partículas mayores a ese tamaño.

6.2.1.2 pH. Se realizó mediante un potenciómetro manual (Hanna Instruments, pH 209, EUA), previamente calibrado a pH 7.0 y 4.0 con soluciones amortiguadoras estándar.

6.2.1.3 Sólidos solubles. Los °Brix fueron cuantificados utilizando un refractómetro manual (Atago, Japón).

6.2.1.4 Actividad de agua. Se determinó usando un medidor de actividad de agua AquaLab Serie 3 (Decagon Devices Inc., Pullman, E.U.A.), previamente calibrado.

6.2.1.5 Temperatura de transición vítrea (T_g). La temperatura de transición vítrea (T_g) se determinó utilizando el método de Ahmed *et al.* (2010). Para ello se utilizó un calorímetro diferencial de barrido TA Q-200 (Crawley, Reino Unido). Se colocaron 8 mg de polvo encapsulado en una celda de 40 μ L sellada herméticamente. Una celda vacía se utilizó como peso de referencia. El programa de detección de temperatura fue de -70 °C a 120 °C enfriando posteriormente a 30 °C, bajo una rampa de temperatura de 10 °C/min y una atmósfera de gas nitrógeno. Los termogramas fueron analizados utilizando el programa de Análisis Universal TA Instruments (Crawley, Reino Unido). La temperatura de transición vítrea se tomó como el punto medio.

6.2.1.6 Análisis de color. El color se determinó usando un colorímetro Konica Minolta CR-400/410 (Minolta Co., Osaka, Japón), calibrado con un mosaico estándar con valores de $X = 94,9$, $y = 0,3185$ y $x = 0,3124$. El color se expresó mediante los parámetros L^* [luminosidad; tendencia negro (0) – blanco (100)], a^* [tendencia verde (-) – rojo (+)], y b^* [tendencia azul (-) – amarillo (+)], estos valores se utilizaron para calcular $croma^*$ y hue° utilizando el método descrito por Kha *et al.* (2010). $Croma^*$ indica la intensidad del color y se determinó usando la siguiente ecuación:

$$Croma^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (6)$$

El ángulo hue° indica la pureza del color, los ángulos pueden variar entre 0° (color rojo), 90° (color amarillo), 180° (color verde) y 270° (color azul). El ángulo de color se calculó usando la siguiente ecuación:

$$H^\circ = \arctan(b^*/a^*) \quad (7)$$

6.2.1.7 Microscopía electrónica de barrido (MEB). La morfología de las partículas de los polvos encapsulados se observó 750X usando un microscopio

electrónico de barrido (JSM-5800 LV; JEOL, Tokio, Japón). El encapsulado se fijó en talones de MEB con cinta adhesiva de 2 caras y fue recubierto con una capa delgada de oro, y luego las muestras se observaron por MEB a 10 kv.

6.2.1.8 Índice de solubilidad (ISA). Esta característica se determinó de acuerdo al método descrito por Altan *et al.* (2008). La muestra se suspende en agua a temperatura ambiente (25 °C) en una relación 1:10, se agita durante 10 min se centrifuga a $1000 \times g$ por 15 min y el sobrenadante es decantado, después el sobrenadante es evaporado. El ISA es el peso de los sólidos secos en el sobrenadante expresados como un porcentaje del peso original de la muestra en base seca.

6.2.1.9 Distribución de tiempo de residencia (DTR) y tiempo de residencia medio (tr_m). Para la determinación de los tiempos de residencia medios se empleara una técnica de respuesta de estímulo de acuerdo al método descrito por Ilo y Berghofer (1999), el cual está basado en el procedimiento de Levenspiel (1972). Utilizando los datos de a^* obtenidos a diferentes tiempos para cada combinación experimental (Velocidad de tornillo y temperatura de cañón) fue construida la curva C , la cual es una curva concentración-tiempo, dada en la siguiente ecuación:

$$\int_0^{\infty} C(t) dt \quad (8)$$

La curva C obtenida es útil para la construcción de la función de distribución de tiempos de residencia $E(t)$, ésta última describe en forma cuantitativa cuanto tiempo han pasado en el extrusor diferentes elementos y está dada en la siguiente ecuación:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (9)$$

El cálculo de los tiempos de residencia medios (tr_m), está dado por la ecuación (10) y representa el valor promedio del tiempo que pasó el material en el extrusor.

$$tr_m = \int_0^{\infty} tE(t) dt \quad (10)$$

donde i es el índice de la muestra, t es el tiempo y $E(t)$ es la curva de distribución de tiempos de residencia.

6.2.1.10 Índice de absorción de agua (IAA). Este se determinó de acuerdo a Altan *et al.* (2008). El índice de absorción en agua es el peso del gel obtenido por gramo de muestra seca (IAA), el extrudido tamizado se suspende en agua a temperatura ambiente (25 °C) en una relación 1:10, se agita durante 10 min se centrifuga a $1000 \times g$ por 15 min y el sobrenadante es decantado. El IAA se calcula como el peso del sedimento obtenido después de la remoción del sobrenadante por unidad de peso original de sólidos.

6.2.1.11 Índice de expansión (IE). El IE se calculó de acuerdo al método empleado por Altan *et al.* (2008). Para ello se midió la expansión seccional (ancho y grosor) de 15 piezas de extrudidos los cuales fueron tomados al azar. El índice de expansión seccional se calculó utilizando la ecuación:

$$SEI = \frac{S_e}{S_d} = \frac{W_e h_e}{W_d h_d} \quad (11)$$

donde S_e y S_d son las áreas seccionales de los extrudidos y del dado; W_e y h_e son el ancho y el grosor del extrudido y W_d y h_d son el ancho y el grosor del dado, respectivamente.

6.2.1.12 Densidad aparente (DA). La DA se determinó de acuerdo al método descrito por Kha *et al.* (2010). El extrudido se colocó en una probeta graduada. El valor de la densidad aparente se calculó como la relación entre la masa (g) y el volumen ocupado en el cilindro (cm³).

6.2.1.13 Cinéticas de absorción de agua y leche del cereal para desayuno. Las cinéticas fueron realizadas de acuerdo al método descrito por Machado *et al.* (1998). El cereal para desayuno entero se sumergió en agua a 4 °C durante 2 h, registrando el peso ganado por el cereal a los 2, 5, 10, 20, 40, 60, 90 y 120 min. Este procedimiento fue

llevado a cabo también con leche a 4 °C. Con los datos obtenidos fueron realizadas las curvas de absorción de agua y leche de cereal para desayuno.

6.2.1.14 Análisis de textura de extrudidos. Se midieron las características de dureza y crujibilidad de acuerdo al método descrito por Ding *et al.* (2005), utilizando un analizador de textura TA-XT2 (Surrey, Reino Unido) equipado con un punzón de 2 mm. Para generar una curva de fuerza-tiempo, dicha curva fue analizada con el programa Texture Exponent 32 (Surrey, Reino Unido) para calcular la fuerza máxima (N) para determinar la dureza y el área bajo la curva (N/mm) para determinar la crujibilidad. Diez extrudidos se tomaron al azar de cada tratamiento.

6.2.2. Químicos

6.2.2.1 Análisis proximal. Para el análisis proximal del jugo de tuna roja los contenidos de humedad, proteína, grasa, fibra cruda y cenizas fueron realizados de acuerdo a los métodos 950.02, 960.52, 920.53, 920.39, 923.03 del AOAC (1998).

6.2.2.2 Extractos para determinación de betalainas. Los betalainas se obtuvieron mediante el método descrito por Castellanos y Yahia (2008) con algunas modificaciones. El material (jugo, encapsulado o extrudido) se mezcló con agua en una relación 1:10 durante 15 s utilizando un homogenizador IKA Ultra-Turrax T18 básico, con una herramienta de dispersión S18N-19G (IKA Works, Inc., Wilmington, NC, EUA). Las muestras se centrifugaron a $3\ 600 \times g$ a 10 °C durante 40 min en una centrífuga IEC Centra CL3R (Thermo Electron Corporation, EE.UU.); repitiendo el proceso para asegurar la extracción. Los sobrenadantes se filtraron en un filtro de nylon de 0.45 μm (Millipore Corp., Bedford, MA, E.U.A.). Los extractos fueron analizados por fotometría y por HPLC.

6.2.2.3 Cuantificación fotométrica de betalainas. Esta determinación se realizó de acuerdo a Castellanos y Yahia, 2008, utilizando un espectrofotómetro UV-Vis Lambda

25 (Perkin Elmer, EUA). La cuantificación de betacianinas se realizó aplicando la siguiente ecuación:

$$BC[mg/g] = [A(DF)(MW)Vd / \varepsilon LWd] \quad (12)$$

donde A es la absorción a 535 para betacianinas y 483 nm para betaxantinas; DF es el factor de dilución; Vd es el volumen de la solución (mL); Wd es el peso del producto deshidratado (g); L es longitud de la cubeta (1 cm); MW y ε son el peso molecular y el coeficiente de absorptividad molar [Betacianina = 550 g/mol; $\varepsilon = 60\,000$ L/(mol cm) en agua y Betaxantina $\varepsilon = 48\,000$ L/(mol cm)].

6.2.2.4 Identificación de betalainas específicas, por HPLC. La identificación de algunas betalainas específicas mediante cromatografía líquida de alta presión se realizó mediante el método descrito por Cai *et al.* (1998). 20 μ L de extracto se inyectaron en un equipo Agilent Technologies 1200 (Santa Clara, CA, E.U.A.) equipado con una columna nucleosil en fase reversa (C₁₈, 250 \times 4.6 mm; tamaño de partícula 0.5 μ m), y un detector de UV. La fase móvil A: metanol/KH₂PO₄ 0.05 M (18:82 v/v) pH=2.75 con ácido fosfórico, y la fase móvil B: metanol, se ajustaron a un gradiente de 100% de A hasta 80% de A y de 20% B en 20 min a una velocidad de flujo de 1 mL/min. La detección se realizó a 481 y 536 nm para betaxantinas y betacianinas, respectivamente. La retención (%), que se calculó con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Retención} = A/A_0 \times 100 \quad (13)$$

donde A es el área de la muestra y A_0 es el área que se obtiene en el análisis inicial.

6.2.2.5 Polifenoles Totales. El contenido de polifenoles totales se determinó por el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu descrito por Bucic-Kojić *et al.* (2007). Una mezcla se preparó combinando 0.2 mL de extracto, 1.8 mL de agua destilada, 10 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu (diluido 10 veces) y 8 mL de carbonato de sodio (7.5%). Las mezclas se agitaron durante 10 s en un Vortex, posteriormente se incubaron en un baño de agua a 45 °C. Después de 15 min, la reacción se detuvo con un baño de agua/hielo. La absorbancia fue medida a 765 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-Vis Lambda 25 (Perkin Elmer, E.U.A.). Una curva de calibración se elaboró usando

ácido gálico como estándar (Apéndice 10.1a) y los resultados se expresaron como mg EAG/cantidad de material.

6.2.2.6 Flavonoides por HPLC. La extracción y análisis de flavonoides (quercetina, kaempferol, isoharmetina) se realizó de acuerdo al método utilizado por Kuti *et al.* (2004). 2 g de producto se adicionaron con 25 mL de metanol frío, se homogenizó y filtró, lavando con metanol al 50% y ajustando el volumen final, posteriormente los flavonoides se hidrolizaron con HCl 1 N en metanol al 50% a 90 °C durante 30 min. Su determinación se realizó a 370 nm utilizando un equipo Agilent Technologies 1200 (Santa Clara, CA, E.U.A.) equipado con una columna nucleosil en fase reversa (C₁₈, 250 × 4.6 mm; tamaño de partícula 0.5µm), y un detector de UV. El solvente metanol:agua (35:65) ajustando el pH a 2.4 con ácido fosfórico a una velocidad de flujo de 1 mL/min fue utilizado. Una curva de calibración para cada flavonoide quercetina, kaempferol, isoharmetina fue utilizada como estándar (Apéndice 10.1b, c, d)

6.2.2.7 Actividad antioxidante. La actividad antioxidante se determinó según el método espectrofotométrico descrito por Kuskoski *et al.* (2005), para ello se utilizó el mismo extracto obtenido para la determinación de polifenoles totales. Este método se basa en la medición de la absorción de radicales DPPH[•]. A 0.1 mL de extracto se añadieron 3.9 mL de radical DPPH[•] (100 mM), se agitó y se dejó reaccionar en la oscuridad durante 3 h. La disminución en la concentración del radical fue medida a 517 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis Lambda 25 (Perkin Elmer, E.U.A.). Se utilizó una curva de calibración de Trolox (0.08 a 1.28 mM, apéndice 10.1e) expresando los resultados como mmol ET /100 g de material.

6.2.2.8 Fibra soluble e insoluble de cereal para desayuno. Estas determinaciones se realizaron de acuerdo al método 991.43, AOAC (1998). 1 g de cereal fue mezclado con 50 mL de solución amortiguadora de fosfato a pH de 6.0, posteriormente fue adicionado 0.1 mL de α-amilasa incubado a 95 °C durante 15 min, luego se ajustó el pH a 7.5 utilizando NaOH (0.275 N) para adicionar 0.1 mL de solución de proteasa (50 mg/mL, solución amortiguadora de fosfato pH de 6.0) incubando a 60 °C durante 30

min, posteriormente el pH se ajustó a 4.5 con HCl (0.325 N) para adicionar 0.1 mL de amiloglucosidasa e incubar a 60 °C durante 30 min. La solución obtenida fue filtrada en un crisol poroso (40-60 µm) a peso constante haciendo lavados con agua, luego el crisol fue secado a 105 °C (para coleccionar la fibra insoluble). En la solución restante se añade 4 veces el volumen de etanol al 95% para precipitar la fibra soluble dejando reposar toda la noche. La solución fue filtrada en un crisol poroso (40-60 µm) a peso constante, lavando con fracciones de etanol al 78%, etanol al 95% y acetona, finalmente el crisol fue secado a 105 °C (para coleccionar la fibra soluble), tanto en los residuos de fibra insoluble como de fibra soluble se analizaron cenizas y proteínas, por método gravimétrico y Kjeldahl, respectivamente. Se deben correr muestras problema y muestras blanco a la par. Los contenidos de fibra insoluble y soluble fueron calculados de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\%FI = [R_m - P_m - C_m - (R_b - P_b - C_b)/W_m] \times 100 \quad (14)$$

$$\%FS = [R_m - P_m - C_m - (R_b - P_b - C_b)/W_m] \times 100 \quad (15)$$

donde *FI* es fibra insoluble, R_m es el residuo de la muestra P_m es el peso de proteína de la muestra, C_m es el peso de la cenizas de la muestra, R_b es el residuo del blanco P_b es el peso de la proteína del blanco, C_b es el peso de la cenizas del blanco, W_m es el peso de la muestra y *FS* es fibra soluble.

6.2.3 Sensoriales

7.2.3.1 Prueba de preferencia por ordenamiento. En la prueba de preferencia participaron como jueces 30 personas consumidores de cereal. A los consumidores le fueron mostrados 4 cereales ordenados al azar, con la instrucción de ordenarlos del 1 al 4 de mayor a menor preferencia a criterio personal, en el apéndice 10.2.1 se muestra la encuesta presentada a los consumidores. Los datos obtenidos fueron analizados en el programa Minitab versión 16 (2010) mediante una prueba de Friedman con un nivel de confianza de 95%.

6.2.3.2 Perfil de sabor, color, olor y textura. Para la prueba subjetiva o sensorial de las características de sabor, color, olor y textura se utilizaron como jueces 30

personas consumidores de cereal. A los consumidores les fue presentado 4 cereales y para cada uno de estos debían dar las respuestas de acuerdo a los valores numéricos: 1: “Muy malo”, 2: “Malo”, 3: “Regular”, 4: “Bueno”, 5: “Muy bueno” para evaluar las características individualmente, en el apéndice 10.2.2 se muestra la encuesta presentada a los consumidores participantes. Los datos obtenidos fueron analizados en el programa Minitab versión 16 (2010) mediante una prueba de Friedman con un nivel de confianza del 95%.

6.2.4 Biológicos

El ensayo biológico se realizó en ratas Wistar machos en edad reproductiva (3-4 meses), los sujetos fueron alimentados *ab libitum* durante 21 días con los cereales que contenían 0, 2.5, 5.0 y 7.5% de polvo encapsulado de tuna roja y una muestra control con contenidos de 10% de caseína, 4% de celulosa, 4% de grasa, 1% de vitaminas y 1% de vitaminas. Las muestras de sangre fueron tomadas a los 0, 5, 10, 15 y 21 días. En estas muestras sanguíneas fueron analizados los contenidos séricos de glucosa, colesterol y triglicéridos en el laboratorio de análisis la Unidad de Hígado del Hospital Universitario de la Facultad de Medicina en la Universidad Autónoma de Nuevo León.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Caracterización de la tuna roja

La tuna roja utilizada en este estudio fue caracterizada física y químicamente, el fruto se muestra en la Figura 12. Este presentó un peso promedio de 150.55 ± 15.7 g, con dimensiones de $5.8 \pm 0.3 \times 5.3 \pm 0.2 \times 9.0 \pm 0.9$ cm.

En la Tabla 2 se presenta la el análisis proximal del jugo obtenido a partir de la tuna roja.

El fruto presentó alto contenido de polifenoles totales (14.67 mg EAG/g bs: 166.51 mg EAG/100g, bh) en comparación con otras frutas reportadas como moras 118.9 mg/100 g, uvas 117.1 mg/100 g, açai 136.8 mg/100 g y fresas 132.1 mg/100 g (Kuskoski *et al.*, 2005). Sin embargo, el contenido de polifenoles fue ligeramente inferior a la reportada en otros estudios realizados en este mismo fruto (Fernández-López *et al.*, 2010).

La actividad antioxidante determinada en el jugo de este fruto fue de 6.36 mmol ET/100 g bs, éste valor, es mayor a la actividad antioxidante reportada para tuna (Butera *et al.*, 2002; Stintzing *et al.*, 2005; Fernández-López *et al.*, 2010) y otros frutos como higo, pera, uva, piña y kiwi (García-Alonso *et al.*, 2004) y menor a los reportados en otros frutos tales como persimonia, mora, arándano, fresa, cereza, frambuesa (García-Alonso *et al.*, 2004).

Dentro de los componentes que poseen actividad antioxidante se encuentran los flavonoides quercetina, kaempferol e isoharmetina, estos fueron identificados y cuantificados, encontrándose contenidos de 2.76, 1.62, y 5.22 mg/100 g bs, respectivamente. El primero fue encontrado previamente en un contenido similar en trabajos reportados de tuna 43.20 mg/g (Kuti *et al.*, 2004) y de tomate 3.5 g/g (Crozier *et al.*, 1997), ambos reportados en pulpa fresca, mientras que isoharmetina y kaempferol fueron mayores que los reportados por Kuti *et al.* (2004), en donde se reportan valores



Figura 12. Tuna roja utilizada

de 24.1 y 2.2 mg/g, respectivamente en la tuna. Sin embargo, es importante recordar que el flavonoide más común y biológicamente importante es la quercetina (Ho, 1992).

TABLA 2
CARACTERÍSTICAS DE JUGO DE TUNA ROJA

Característica	Contenido*
Sólidos solubles (°Brix)	8.2 ± 0.1
pH	5.81 ± 0.02
Humedad (%)	88.65 ± 0.28
Fibra cruda (%)	0.31 ± 0.05
Carbohidratos (%)	90.06 ± 0.43
T _g (°C)	10.14 ± 0.26
Actividad Antioxidante (mmol ET/100g)	6.36 ± 0.13
Polifenoles Totales (mg EAG/g)	14.67 ± 0.14
Quercetina (mg/100g)	2.76 ± 0.01
Kaempferol (mg/100g)	1.62 ± 0.08
Isoharmetina (mg/100g)	5.22 ± 0.01
Betacianina (mg BC/g)	1.71 ± 0.01
Betaxantina (mg BX/g)	0.68 ± 0.01

*Media ± desviación estándar; T_g = Temperatura de transición vítrea; ET = Equivalentes Trolox; EAG = Equivalentes de Ácido Gálico; BC = Equivalentes Betacianinas; BX = Equivalentes de Betaxantinas

Por otra parte, el jugo de tuna presentó contenidos de betacianinas de 1.71 mg/g bs, este valor es similar a lo descrito en otros reportes de tuna roja (Castellar *et al.*, 2003; Fernández-Lopez *et al.*, 2010; Saénz *et al.*, 2009). Mientras que el contenido de betaxantinas fue menor que las betacianinas con valor de 0.68 mg/g bs, siendo también similar a valores reportados para este tipo de tuna (Saénz *et al.*, 2009). La relación que guardan los contenidos de los dos grupos de betalainas se presenta como la razón que existe entre las absorbancias de betacianinas y betaxantinas [$A(536nm)/A(481nm)$], este factor es importante ya que se relaciona con la calidad de color, en este estudio se encontró una razón de 1.75, lo que está dentro del rango de la proporción óptima (1.5 a 1.8) de tonos de color (Stintzing, 2007). Por lo tanto, este jugo se puede considerar de calidad adecuada para su uso como colorante de alimentos.

Una característica importante cuyo se va a utilizar el secado por aspersión es la temperatura de transición vítrea (T_g), el jugo presentó un valor bajo de T_g , lo cual era de esperarse, ya que los frutos tienen un alto contenido de compuestos de bajo peso molecular como los azúcares entre los que se encuentran glucosa y fructosa principalmente, además de ácidos orgánicos como cítrico y málico que poseen una baja T_g (Ahmed *et al.*, 2010).

7.2. Encapsulación de componentes bioactivos de tuna roja

Polvos encapsulados de tuna roja/fibra soluble fueron obtenidos a diferentes condiciones de procesamiento. La Figura 13 muestra uno de los encapsulados obtenidos; la caracterización física de los encapsulados es presentada en la Tabla 3. En ésta se muestra que el contenido de humedad no fue significativamente ($p>0.05$) afectado por la temperatura de secado ni por el porcentaje de fibra adicionado al jugo de tuna (Apéndice 10.3.1), con valores de humedad por debajo de 1% (p/p), este mismo comportamiento fue reportado por Candela-Cadillo *et al.* (2005) para pulpa de tomate secada utilizando maltodextrina como acarreador. Contenidos de humedad similares han sido reportados en otros polvos tales como los obtenidos de bayas de açai (Tonon *et al.*, 2008) y de jugo de uva pasa (Papadakis *et al.*, 2006).

Otras propiedades que no fueron significativamente afectadas ($p>0.05$) por las variables de estudio fueron la densidad aparente y la temperatura de transición vítrea (T_g) (Apéndice 10.3.1).

La densidad aparente presentó valores en un rango de 0.52 a 0.62 g/mL.



Figura 13. Polvo encapsulado de tuna roja obtenido a 160 °C utilizando 22.5% de fibra soluble

Ésta propiedad no mostró cambios a las diferentes condiciones de encapsulamiento, lo anterior está relacionado con el contenido de humedad en los polvos, un incremento en la humedad residual en el polvo incrementa a su vez la densidad aparente del producto seco (Masters, 1979), sin embargo, la humedad no mostró cambios en los diferentes encapsulados por lo tanto la densidad tampoco se ve afectada. Los valores de densidad aparente determinados se encuentran dentro del rango común de densidad aparente que se presenta en polvos, reportado con valores entre 0.4 y 0.7 g/mL (Chen y Mujumdar, 2008); y son resultados similares a los reportados para otros polvos de fruta como *Opuntia stricta* secada a temperaturas entre 80-160 °C utilizando como agente acarreador jarabe de glucosa (Obón *et al.*, 2009) y jugo de piña secado con maltodextrina (Abadio *et al.*, 2004).

Por su parte la T_g mostró valores de 32 a 38 °C. Ésta propiedad es muy importante ya que está relacionada con la estabilidad del producto en el almacenamiento. El producto debe mantenerse por debajo de la T_g , para limitar la difusión de moléculas a través del material de soporte de manera similar a como se produce en una fase cristalina (estado vítreo), en lugar de que el producto sea almacenado por encima del valor de T_g , donde el material de soporte se encuentra en estado gomoso y la difusión de las moléculas es relativamente rápida (Zuidam y Nedovic', 2010). Valores de T_g bajos indican una higroscopicidad más alta en el polvo (Cai y Corke, 2000), sin embargo todos los valores de T_g en los polvos fueron más altos que los encontrados para el jugo de tuna roja (Tabla 2). Esto debido a la contribución causada por la fibra soluble, empleada como acarreador, cuyo valor de T_g fue de 63.1 °C.

TABLA 3
ANÁLISIS FÍSICO* DE ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA MEDIANTE SECADO POR ASPERSIÓN UTILIZANDO FIBRA SOLUBLE

Temperatura (°C)	Fibra Soluble (%)	Humedad (%)	a _w	pH	Densidad Aparente (g/mL)	T _g (°C)	ISA
160	15.0	0.815 ± 0.236 ^a	0.138 ± 0.033 ^a	5.47 ± 0.097 ^b	0.522 ± 0.084 ^a	36.06 ± 6.6 ^a	0.764 ± 0.049 ^a
	22.5	0.924 ± 0.159 ^a	0.103 ± 0.020 ^b	5.53 ± 0.029 ^{ab}	0.622 ± 0.096 ^a	37.69 ± 8.1 ^a	0.711 ± 0.049 ^{ab}
	30.0	0.708 ± 0.340 ^a	0.105 ± 0.019 ^b	5.57 ± 0.089 ^{ab}	0.616 ± 0.063 ^a	38.11 ± 8.5 ^a	0.671 ± 0.053 ^{ab}
180	15.0	0.682 ± 0.288 ^a	0.117 ± 0.015 ^{ab}	5.50 ± 0.079 ^b	0.535 ± 0.071 ^a	32.27 ± 2.4 ^a	0.741 ± 0.069 ^{ab}
	22.5	0.697 ± 0.061 ^a	0.116 ± 0.025 ^{ab}	5.60 ± 0.076 ^{ab}	0.544 ± 0.068 ^a	35.11 ± 7.6 ^a	0.714 ± 0.039 ^{ab}
	30.0	0.508 ± 0.003 ^a	0.097 ± 0.017 ^b	5.61 ± 0.043 ^{ab}	0.552 ± 0.077 ^a	37.25 ± 6.9 ^a	0.645 ± 0.042 ^b
200	15.0	0.672 ± 0.178 ^a	0.127 ± 0.009 ^{ab}	5.50 ± 0.024 ^b	0.539 ± 0.087 ^a	34.48 ± 10.0 ^a	0.766 ± 0.050 ^{ab}
	22.5	0.692 ± 0.217 ^a	0.116 ± 0.017 ^{ab}	5.52 ± 0.072 ^{ab}	0.526 ± 0.100 ^a	35.57 ± 7.94 ^a	0.698 ± 0.047 ^{ab}
	30.0	0.726 ± 0.267 ^a	0.106 ± 0.015 ^b	5.68 ± 0.073 ^a	0.521 ± 0.079 ^a	36.02 ± 8.44 ^a	0.640 ± 0.029 ^b

* Media ± desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey. a_w = Actividad de agua; T_g = Temperatura de transición vítrea; ISA = Índice de solubilidad de agua.

El aumento en el valor de T_g es debido al aumento en el peso molecular del componente en las mezclas de jugo/acarreador (Ahmed *et al.*, 2010). Los valores de T_g obtenidos para los encapsulados fueron ligeramente más bajos que los polvos obtenidos para mucílago de *Opuntia*, secado sin acarreador, donde los valores de T_g obtenidos fueron de 45 °C (León *et al.*, 2010) y para polvos de betacianina obtenidos a partir de extractos de amaranto utilizando maltodextrina como acarreador, donde se reportaron valores entre 45 y 54 °C (Cai y Corke, 2000). Sin embargo, los valores fueron más altos que otros valores reportados, como los obtenidos en harina de papa dulce (Ahmed *et al.*, 2010).

Otras propiedades como pH, a_w e índice de solubilidad en agua (ISA), fueron significativamente ($p < 0.05$) afectadas por el porcentaje de fibra soluble adicionado al jugo de tuna (Apéndice 10.3.1). Los valores de pH fueron ligeramente más altos al aumentar el porcentaje fibra soluble adicionado al jugo, obteniéndose valores cercanos a 5.5; este valor de pH es adecuado ya que se encuentra dentro del rango de pH óptimo para mantener la estabilidad de pigmentos como la betanina, para el cual se ha reportado máxima estabilidad a pH entre 5 y 6 (Castellar *et al.*, 2003).

Por otra parte, se obtuvieron valores de a_w menores en los encapsulados obtenidos con un mayor porcentaje de fibra soluble adicionado, esto se debe a que la fibra soluble tiene la capacidad de ligar agua (Lazaridou y Biliaderis, 2007) con lo que hay una menor cantidad de agua disponible, disminuyendo con ello la actividad de agua de los polvos encapsulados obtenidos. Sin embargo, a pesar del cambio en a_w , todos los valores fueron menores a 0.138. Por lo tanto, en ésta condición, los polvos encapsulados pueden ser considerados estables, esto debido a la reducción de las reacciones de deterioro bioquímico, así como del crecimiento microbiológico (Tang y Yang, 2004). La estabilidad de los pigmentos como betanina se ha reportado a a_w menor a 0.63 (Cohen y Saguy, 1983), por lo que con los valores de a_w obtenidos en los encapsulados es posible mantener estables los pigmentos presentes en el polvo (Cai y Corke, 2000).

Los valores ISA mostraron una ligera disminución con el aumento en el porcentaje de fibra soluble adicionada en el jugo, obteniéndose bajos valores para los encapsulados con 30% fibra. Esto se puede atribuir a que al incrementar el contenido de fibra soluble en el jugo las cadenas de fibras están más cerca entre ellas y pueden formar

aglomerados, lo que disminuye la solubilidad de polvos (Fincher y Stone, 1986). Los valores de ISA se encuentran en un rango de 0.64 a 0.76, estos índices de solubilidad son más altos que los reportados en otros polvos, como en polvo de gac, en el cuál se utilizó maltodextrina como acarreador donde se obtuvieron valores de 0.36 a 0.38 (Kha *et al.*, 2010). La alta solubilidad encontrada en éste estudio puede ser debido a que los componentes del jugo de tuna como azúcares y pigmentos son solubles en agua, sin embargo se han reportado polvos que presentan una mayor solubilidad como el polvo obtenido de jugo de piña secado con maltodextrina, para el cual se obtuvieron porcentajes de solubilidad mayores al 80% (Abadio *et al.*, 2004).

Los parámetros de color del polvo encapsulado se muestran en la Tabla 4. El parámetro de color L^* , que representa la luminosidad [tendencia de negro (0) a blanco (100)], fue afectada significativamente ($p < 0.05$) por el porcentaje de fibra soluble adicionada al jugo (Apéndice 10.3.1). El aumento en el contenido de fibra soluble resultó en valores más altos de L^* , esto es debido a que la fibra soluble utilizada tiende a los más altos valores de luminosidad ($> 90\%$), por lo que al adicionar más fibra soluble de color con tendencia al blanco el encapsulado presentará una mayor luminosidad (tendencia al blanco). Resultados similares fueron reportados por Kha *et al.* (2010) y Abadio *et al.* (2004) para polvos de jugo de gac y de piña, respectivamente, utilizando maltodextrina como material acarreador.

El parámetro de color a^* , que representa la tendencia del verde (-) al rojo (+), no fue significativamente afectado ($p > 0.05$) por ninguna de las variables de estudio, temperatura de secado y porcentaje de fibra soluble adicionado (Apéndice 10.3.1). Los valores obtenidos presentan una tendencia al color rojo, ya que se encontraron solo valores positivos para este parámetro, lo anterior era visualmente detectable (Figura 13). Este mismo comportamiento se observó para $croma^*$ y ángulo hue (h^*) (Apéndice 10.3.1), los cuales indican la saturación (intensidad) y la pureza del color, respectivamente. Esto se esperaba debido a que ambos parámetros están relacionados con el comportamiento del parámetro a^* , presentando una correlación positiva (Tabla 7) de los parámetros $croma^*$ y h^* con a^* y b^* , respectivamente.

El *croma** mostró valores entre 38 y 41, mientras que *h** mostró valores cercanos a 0°, este último indica un ángulo muy cercano al color magenta puro, tal como se muestra en la Figura 14 donde se relaciona el ángulo *h** con el color puro que representa. Los valores de *a** [tendencia de verde (-) a rojo (+)] y *h** en los polvos encapsulados de tuna roja se deben a la presencia de betacianinas, las cuales presentan la gama de colores rojo-púrpura. Estos parámetros no mostraron cambios debido a las condiciones de procesamiento. Kha *et al.* (2010) no reportaron cambios la relación de color *a**/*b** por efecto de la temperatura de secado por aspersión de fruto gac, este comportamiento es similar a lo reportado en el presente estudio, sin embargo estos mismos autores reportan diferencias significativas en la relación de color *a**/*b** por efecto del incremento en la concentración del material acarreador. Es importante resaltar que dicho comportamiento se relacionó con efecto de dilución de los sólidos del fruto por adición de maltodextrina. Otros autores han reportado que aumento de las temperaturas utilizadas en el secado por aspersión de disminuye compuestos como licopeno y β-caroteno (Quek *et al.* 2007), sin embargo estos autores utilizaron menores contenidos de acarreador, por lo que el utilizar contenidos mayores de acarreador puede provocar una mayor protección de los componentes termo-sensibles.

El parámetro de color *b**, que representa las tendencia de coloración de azul (-) a amarillo (+), fue significativamente afectado ($p < 0.05$) por la temperatura de secado, por el porcentaje de fibra y por la interacción de ambas variables (Apéndice 10.3.1), observándose valores negativos muy cercanos a cero, indicando menor tendencia al color amarillo. Debido al efecto de interacción no es posible observar un comportamiento por efecto individual de la temperatura de secado ó por efecto individual del contenido de fibra soluble adicionado al jugo. Este parámetro se correlacionó positivamente con la actividad antioxidante (Tabla 7), esto se debe a que muchos de los componentes que presentan actividad antioxidante muestran coloraciones amarillas como los polifenoles presentes en la tuna y hasta los pigmentos betaxantinas.



Figura 14. Diagrama de relación de *h** con el color puro

TABLA 4
PARÁMETROS DE COLOR* DE ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA MEDIANTE SECADO POR ASPERSIÓN USANDO FIBRA SOLUBLE

Temperatura (°C)	Fibra Soluble (%)	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>Croma</i> *	<i>h</i> ^o
160	15.0	40.737 ± 1.34 ^{bcd}	39.547 ± 1.98 ^a	-4.552 ± 0.08 ^b	39.808 ± 1.97 ^a	0.115 ± 0.01 ^a
	22.5	43.270 ± 2.99 ^{ab}	38.183 ± 1.74 ^a	-5.503 ± 0.21 ^a	38.580 ± 1.70 ^a	0.144 ± 0.01 ^a
	30.0	43.357 ± 0.22 ^{ab}	39.057 ± 1.78 ^a	-4.330 ± 0.19 ^{bc}	39.297 ± 1.75 ^a	0.111 ± 0.01 ^a
180	15.0	39.653 ± 1.10 ^{bcd}	41.513 ± 3.66 ^a	-5.475 ± 0.40 ^a	41.873 ± 3.69 ^a	0.131 ± 0.01 ^a
	22.5	42.765 ± 2.82 ^{abc}	40.692 ± 2.21 ^a	-5.800 ± 0.12 ^a	41.103 ± 2.21 ^a	0.142 ± 0.01 ^a
	30.0	44.467 ± 2.13 ^a	38.488 ± 0.65 ^a	-5.222 ± 0.64 ^a	38.844 ± 0.74 ^a	0.135 ± 0.01 ^a
200	15.0	38.267 ± 0.1 ^d	40.680 ± 0.38 ^a	-4.057 ± 0.13 ^c	40.882 ± 0.39 ^a	0.099 ± 0.01 ^a
	22.5	41.670 ± 1.11 ^{abc}	38.770 ± 0.28 ^a	-5.090 ± 0.11 ^a	39.103 ± 0.28 ^a	0.131 ± 0.01 ^a
	30.0	44.073 ± 0.21 ^a	38.387 ± 0.78 ^a	-5.483 ± 0.32 ^a	38.777 ± 0.81 ^a	0.142 ± 0.01 ^a

* Media ± desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey.

El análisis microscópico (Figura 15) mostró un encapsulamiento de tipo matriz de forma esférica con presencia de algunas esferas comprimidas, las cápsulas presentan una superficie suave y no pegajosa con muy poca aglomeración entre éstas. La variación en los tamaños es dependiente de las condiciones a las cuales se llevo a cabo la encapsulación.

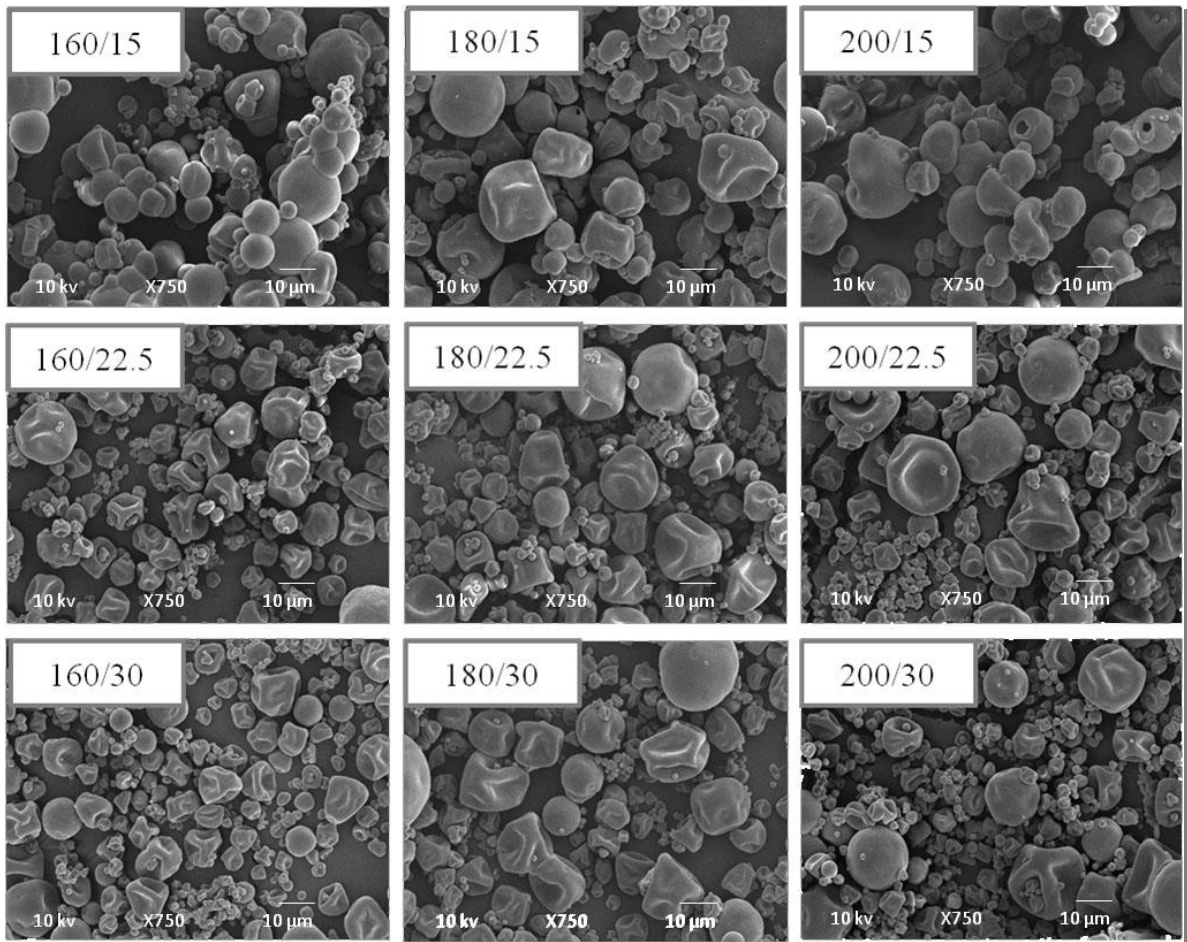


Figura 15. Micrografías obtenidas mediante MEB $\times 750$ encapsulados secados a 160, 180 y 200 °C con 15, 22.5 y 30% de fibra soluble

La matriz presentó la morfología típica para el proceso de encapsulación de secado por aspersión. Las formas no esféricas o irregulares podrían haber sido producidas por colapso de la pared debido a la evaporación del agua durante el proceso de secado (Alamilla *et al.*, 2005). La evaporación del agua deforma la forma esférica que

se observa en las cápsulas obtenidas (Figura 15), esto puede ser indicativo de la poca resistencia de la fibra soluble utilizada para encapsular, mostrando que este material de pared no es rígido. Esto se observa mayormente en las cápsulas obtenidas a 160 °C, donde se visualiza una mayor contracción de las capsulas atribuida a la lenta difusión del agua en comparación con las temperaturas de 180 y 200 °C, causando deformación y colapso de la estructura esférica de la cápsula (Alamilla *et al.*, 2005). Sin embargo, el polvo encapsulado obtenido con 15% de fibra soluble muestra capsulas aparentemente menos frágiles, ya que presentan forma esférica y de tamaño ligeramente mayor que los encapsulados obtenidos con mayor contenido de fibra soluble (22.5 y 30%). Lo anterior puede ser debido al efecto interactivo de la temperatura de secado y el porcentaje de fibra adicionado al jugo. Resultados similares han sido reportados en polvos obtenidos mediante secado por aspersión de jugo de *Opuntia* y pigmentos de amaranto (Cai y Corke, 2000; Gandia-Herrero *et al.*, 2010), utilizando en ambos maltodextrina como acarreador. Por otra parte, el incremento en el contenido de fibra soluble en el jugo causa aparentemente reducción en el tamaño de la esfera, esto debido a que cuando se aumenta la concentración de un componente, en este caso la fibra soluble, se produce un cambio en la tensión de las gotas y por lo tanto una disminución del tamaño de las mismas (Zuidam y Nedović, 2010). Una característica de importancia a observar es la aglomeración del encapsulado, la cual es debida a los efectos eléctricos estáticos (León *et al.*, 2010), en las micrografías se muestra muy poca aglomeración, lo que indica un bajo efecto de la electricidad estática.

Para el análisis químico del polvo encapsulado se determinó el contenido de polifenoles totales, quercetina, kaempferol, isoharmetina, betacianinas, betaxantinas y la actividad antioxidante.

El contenido de polifenoles totales fue afectado significativamente ($p < 0.05$) por el contenido de fibra soluble adicionada al jugo y por la interacción del contenido de fibra soluble y la temperatura de secado (Apéndice 10.3.1). La Figura 16 muestra el comportamiento del contenido de polifenoles de las mezclas antes del secado y de los polvos obtenidos a las diferentes condiciones de encapsulamiento. Tanto en las mezclas como en los polvos encapsulados se observa que a medida que el contenido de la fibra

soluble se incrementa el contenido de polifenoles totales es disminuido, esto está relacionado con el aumento en el contenido total de sólidos procedente de la fibra. Este resultado está de acuerdo con lo reportado por Ahmed *et al.* (2010) sobre el contenido de antocianinas de papa dulce procesada con maltodextrina. Sin embargo, también se observa que los encapsulados presentan un mayor contenido de polifenoles totales que sus respectivas mezclas (15, 22.5 ó 30% de fibra soluble adicionado al jugo de tuna) secadas a diferentes temperaturas, mostrando incrementos que van de 22 a 160% de aumento polifenólico total, este porcentaje de recuperación tiende a aumentar conforme se incrementó la temperatura de secado. Además, es posible observar que dicho incremento en el contenido polifenólico no es suministrado por la fibra soluble, ya que las mezclas presentan un menor contenido de polifenoles que los polvos encapsulados obtenidos y que el jugo de tuna. Este incremento ha sido reportado en polvos encapsulados obtenidos mediante secado por aspersion utilizando maltodextrina como agente acarreador (Sáenz *et al.*, 2009) y puede ser consecuencia de la hidrólisis de polifenoles conjugados presentes en el jugo de tuna roja durante el proceso de secado (Turkmen *et al.*, 2005).

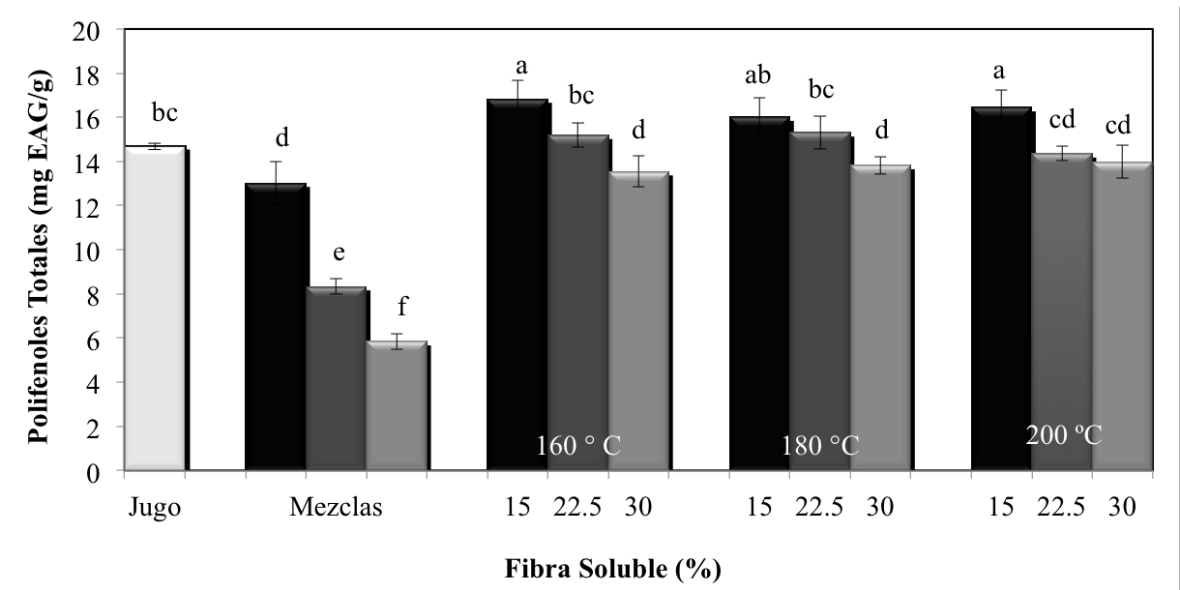


Figura 16. Contenido de polifenoles totales, en encapsulado de tuna roja, letras diferentes en las barras representan diferencia significativa ($p < 0.05$)

El contenido de polifenoles presentó una correlación positiva con la actividad antioxidante de los encapsulados (Tabla 7), indicando que al ser afectado el contenido de polifenoles durante el proceso de encapsulación se afecta la actividad de los componentes.

La actividad antioxidante tanto de las mezclas de jugo/fibra soluble antes del secado como de los encapsulados obtenidos se muestra en la Figura 17. En las mezclas la adición de fibra soluble produjo una disminución significativa ($p < 0.05$) de la actividad antioxidante esto debido al incremento en el contenido de sólidos en la solución. En los encapsulados se muestra que ésta propiedad no fue significativamente afectada ($p > 0.05$) por las variables del proceso, temperatura de secado y contenido de fibra soluble (Apéndice 10.3.1). Los valores de actividad son mucho menores a los reportados para otros polvos como los obtenidos con bayas de açaí, los cuales se encuentran por encima de $1000 \mu\text{mol/g}$ (Tonon *et al.*, 2010), sin embargo estos polvos fueron producidos con menor contenido de acarreador siendo de 3 a 5 veces menos a la cantidad utilizada en este estudio. La estabilidad de la actividad antioxidante atribuida a las betalainas fue reportado por Gandía-Herrero *et al.* (2013) demostrando que la bioactividad de los compuestos solubles puede ser conservada por encapsulación durante el almacenamiento de polvos encapsulados.

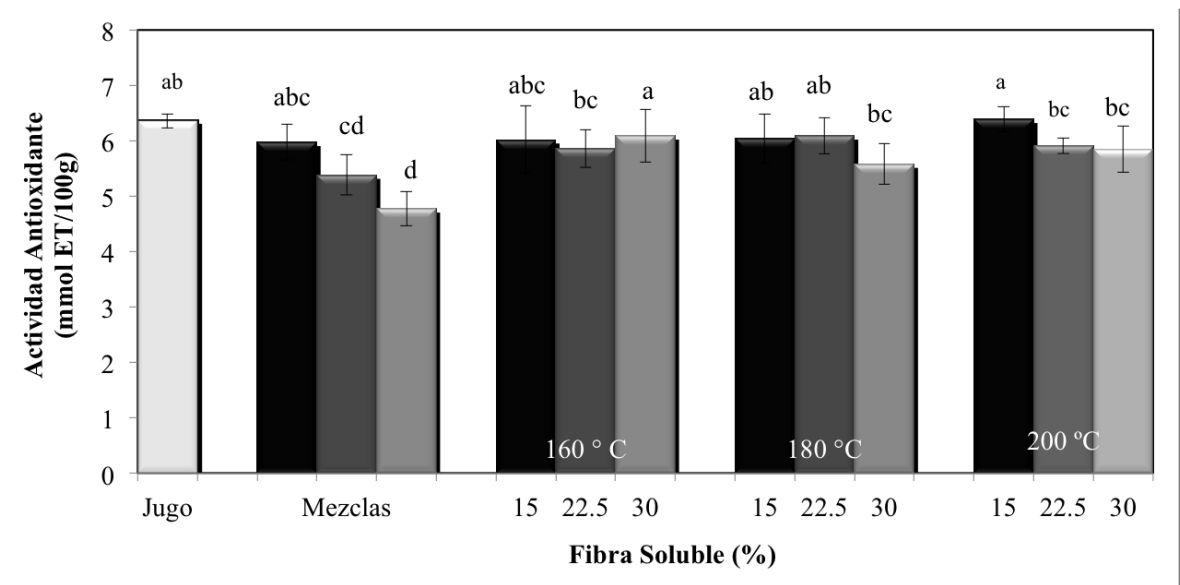


Figura 17. Actividad antioxidante, en polvo encapsulado de tuna roja, letras diferentes en las barras representan diferencia significativa ($p < 0.05$)

Ésta misma tendencia fue observada para el contenido de los flavonoides. En la Tabla 5 se muestra que los contenidos de kaempferol, quercetina e isoharmetina, siendo este orden de mayor a menor contenido encontrado, no fueron afectados significativamente ($p>0.05$) por la temperatura de secado ni por el contenido de fibra soluble añadida (Apéndice 10.3.1), respecto al contenido inicial de flavonoides en el jugo. Sin embargo, el contenido obtenido en las mezclas fue menor significativamente ($p<0.05$) al contenido flavonoideo del jugo, esto se debe al aumento en el contenido total de sólidos procedentes de la fibra adicionada al jugo al elaborar las mezclas. Por lo que, aparentemente el proceso de secado durante la encapsulación provocó un incremento en el contenido de cada uno de los flavonoides, sin embargo aunque el tiempo de secado por aspersión es muy corto la exposición a la temperatura del proceso causa degradación de componentes termosensibles, como los flavonoides, entonces, el aparente aumento puede ser debido a que este tipo de polifenoles en el fruto pueden estar formando complejos con otros componentes como proteínas o carbohidratos complejos, lo que puede causar que estos sean insolubles o inaccesibles durante la extracción para su determinación (Naczki y Shahidi, 2004) y cuyo el jugo del fruto ha sido tratado el procesamiento puede causar rompimiento de los complejos e hidrólisis de polifenoles conjugados presentes en el jugo de tuna roja (Turkmen *et al.*, 2005).

El contenido de kaempferol mostró una correlación positiva (Tabla 7) tanto con el contenido polifenoles totales como con la actividad de antioxidante, esto debido a que es el flavonoide mayoritario (de los flavonoides determinados), mientras que los contenidos de quercetina e isoharmetina presentaron una correlación positiva entre ellos, indicando que son afectados de igual manera por las condiciones de encapsulación.

TABLA 5
CONTENIDO DE FLAVONOIDES* DE ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA
MEDIANTE SECADO POR ASPERSIÓN USANDO FIBRA SOLUBLE

Temperatura (°C)	Fibra Soluble (%)	Quercetina (mg/100g)	Kaempferol (mg/100g)	Isoharmetina (mg/100g)
160	15.0	3.25 ± 0.18 ^a	1.84 ± 0.17 ^a	5.95 ± 0.70 ^a
	22.5	2.95 ± 0.38 ^a	1.85 ± 0.11 ^a	5.25 ± 0.85 ^a
	30.0	3.17 ± 0.08 ^a	1.71 ± 0.06 ^a	4.29 ± 0.66 ^a
180	15.0	2.97 ± 0.12 ^a	1.85 ± 0.09 ^a	6.51 ± 0.35 ^a
	22.5	3.16 ± 0.27 ^a	1.91 ± 0.12 ^a	5.71 ± 0.39 ^a
	30.0	2.86 ± 0.19 ^a	1.65 ± 0.08 ^a	6.27 ± 0.22 ^a
200	15.0	3.06 ± 0.07 ^a	1.83 ± 0.05 ^a	5.93 ± 0.79 ^a
	22.5	2.86 ± 0.16 ^a	1.75 ± 0.11 ^a	5.88 ± 0.39 ^a
	30.0	2.99 ± 0.07 ^a	1.67 ± 0.05 ^a	5.99 ± 0.18 ^a
Mezcla	15.0	2.35 ± 0.08 ^b	1.43 ± 0.10 ^b	4.44 ± 0.28 ^b
	22.5	2.04 ± 0.14 ^c	1.26 ± 0.06 ^c	4.15 ± 0.09 ^c
	30.0	1.78 ± 0.11 ^d	1.13 ± 0.05 ^d	3.55 ± 0.13 ^d

* Media ± desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey.

En la Figura 18 se muestran los cromatogramas obtenidos por HPLC para una mezcla estándar de quercetina, kaempferol e isoharmetina en ese orden de aparición con tiempos de retención de 21.27, 38.97 y 47.50 min, respectivamente; y de un extracto de encapsulado analizado, donde se puede observar las pequeñas áreas, que representan bajas concentraciones de estos componentes en los extractos obtenidos a partir de los encapsulados.

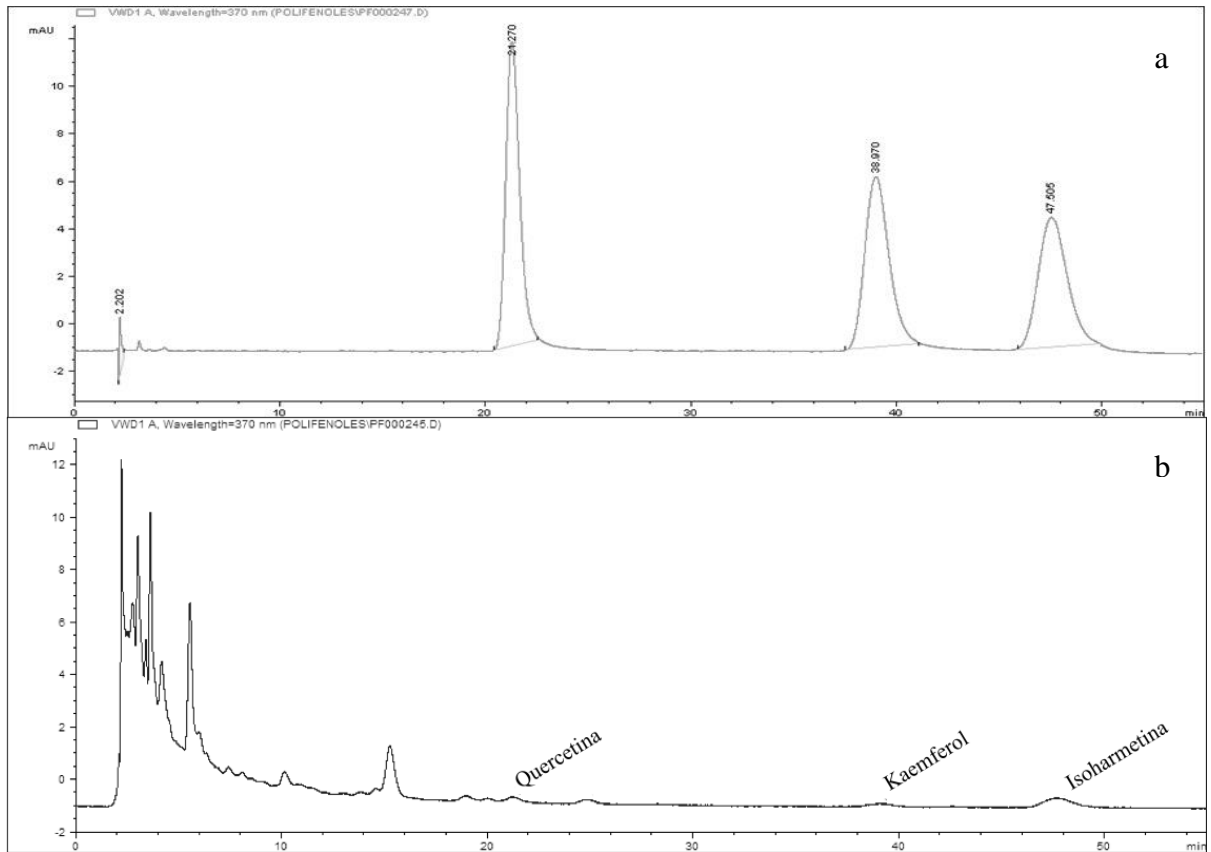


Figura 18. Cromatogramas obtenidos por HPLC para análisis de flavonoides, a. Mezcla de estándares de quercetina, kaempferol e isoharmetina; b. Extracto de un polvo encapsulado

Los dos grupos de pigmentos, betacianinas y betaxantinas, analizados en los encapsulados obtenidos mostraron diferentes tendencias.

Las betacianinas, que son pigmentos de color rojo-púrpura, fueron afectadas significativamente ($p < 0.05$) por la temperatura de secado (Apéndice 10.3.1). La Figura 19 muestra el efecto de la temperatura a 180 y 200 °C, observándose una disminución en el contenido del pigmento al incrementarse la temperatura del secado. Quek *et al.* (2007) reportaron la pérdida de nutrientes y el cambio de color de β -caroteno al deshidratarlo utilizando maltodextrina a temperaturas mayores de 165°C, mediante secado por aspersión. Mientras que Candela-Cadillo *et al.*, (2005) reporta una menor retención de licopeno utilizando el mismo agente acarreador (maltodextrina) al incrementar la temperatura de secado (de 170 a 180 °C), además de reportar, que incrementos en el porcentaje del acarreador conduce a una mayor retención del componente.

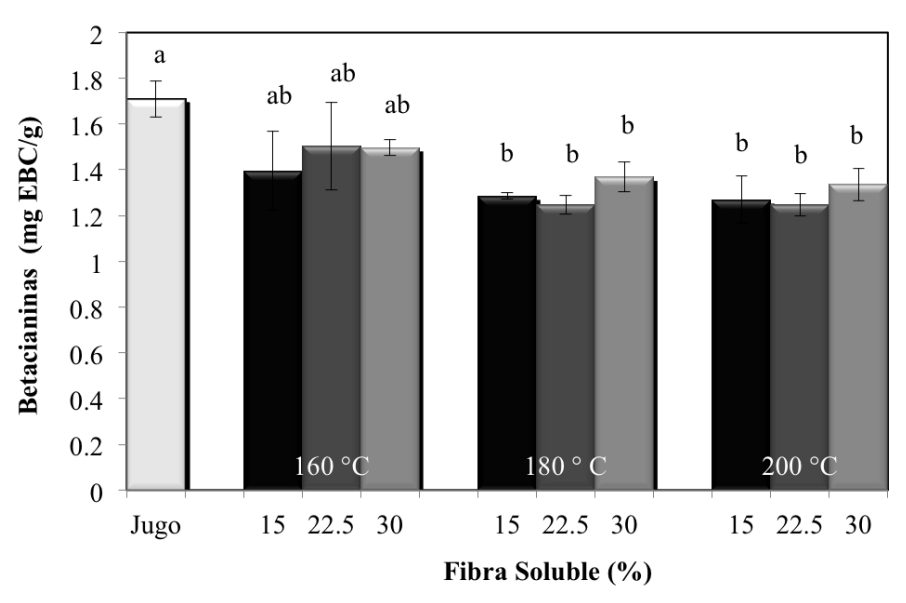


Figura 19. Contenido de betacianinas, en polvo encapsulado de tuna roja, letras diferentes en las barras representan diferencia significativa ($p < 0.05$)

Las tasas de retención calculadas para betacianinas en este estudio se encuentran entre 73% y 81%, dichos valores son mayores que los reportados en otros estudios. Sáenz *et al.*, (2009), el estudio de la encapsulación mediante secado por aspersión del extracto etanólico utilizando maltodextrina e inulina como materiales acarreadores, obtuvo un rendimiento de betacianinas de aproximadamente 60%. Sin embargo, Cai y Corke (2010) reportan una pérdida de betacianinas menor al utilizar maltodextrina como agente acarreador en un proceso de secado a temperatura similar a la utilizada en el presente estudio, llegando a la conclusión de que temperaturas de secado mayores a 180 °C no son adecuadas para la preservación betacianinas, ya que se produce una mayor degradación de estos componentes. Por lo tanto, la mejor temperatura de secado utilizado en este estudio fue de 160 °C, la cual arrojó un alto contenido de betacianinas.

Para este componente solo se encontró correlación positiva con el contenido de betaxantinas (Tabla 7, presentada al final de la sección), el otro grupo de pigmentos, ya que ambos grupos mantienen una relación en cuanto a la concentración.

Por otro lado, las betaxantinas, que son pigmentos de color amarillo-naranja, no fueron significativamente afectadas ($p > 0.05$) por la temperatura de secado ni por el contenido de fibra soluble añadido al jugo (Apéndice 10.3.1). Por lo que, el contenido betaxantinas no mostró cambios a las diferentes condiciones de procesamiento con respecto al jugo de tuna roja, esto se muestra en la Figura 20.

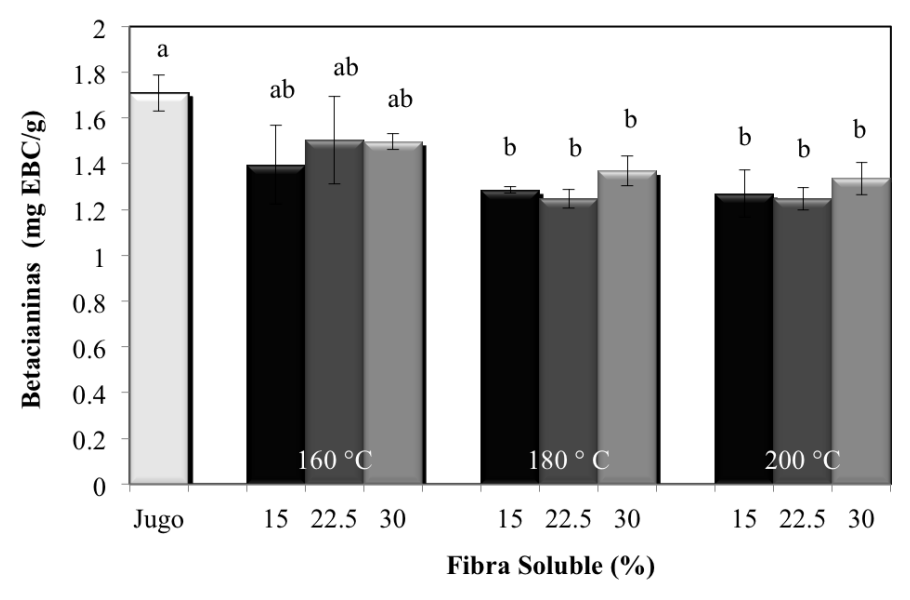


Figura 20. Contenido de betaxantinas, en polvo encapsulado de tuna roja, letras diferentes en las barras representan diferencia significativa ($p < 0.05$)

En estudios realizados sobre el secado por aspersión de este tipo de pigmentos se han reportado menores rendimientos. Sáenz *et al.*, (2009) obtuvieron un rendimiento betaxantinas de aproximadamente 80% durante el secado por aspersión de extracto etanólico utilizando maltodextrina e inulina como materiales acarreadores. En otro estudio, como el reportado por Gandía-Herrero *et al.*, (2010), donde se encapsula indicaxantina con maltodextrina los rendimientos obtenidos a temperaturas de secado similares a las utilizadas en este estudio en se encuentran en un rango de 90% a 93%. Por lo tanto, las betaxantinas muestran una menor sensibilidad a la temperatura en comparación con las betacianinas.

Los dos pigmentos con mayor contenido en la tuna roja son la betanina y la indicaxantina, representando a las betacianinas y a las betaxantinas, respectivamente.

Estos pigmentos específicos son los principales pigmentos reportados en tuna roja (Stintzing y Carle, 2007; Castellanos *et al.*, 2008).

Ambos pigmentos se identificaron por HPLC-MS-TOF en el jugo de tuna roja (Figura 21). La betanina en 551 m/z ($[M + H]^+$) y la indicaxantina a 309 m/z ($[M + H]^+$). Esta identificación se utilizó para determinar el grado de reducción de estos dos pigmentos específicos contenidos en los polvos encapsulados obtenidos a las diferentes condiciones de proceso.

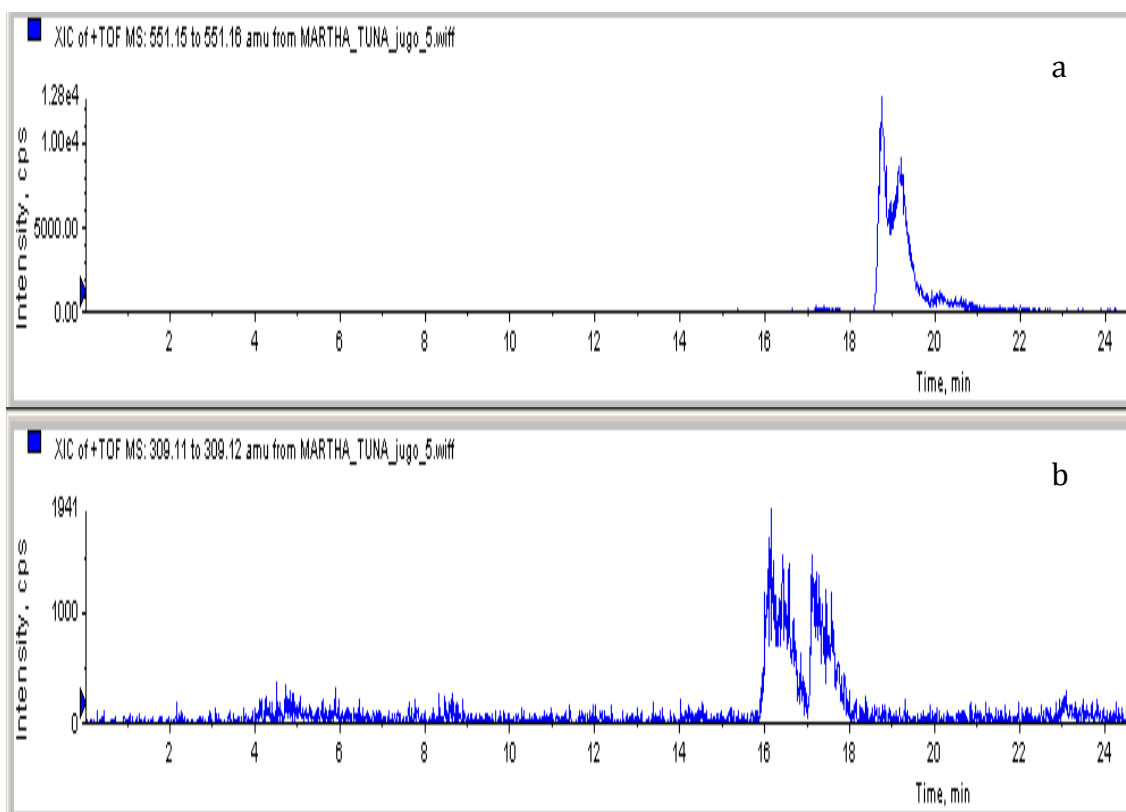


Figura 21. Identificación de a. betnina 551 m/z y b. indicaxantina 309 m/z en jugo de tuna roja.

Los tiempos de retención en los análisis de HPLC se presentan en la Figura 22, donde betanina y indicaxantina aparecen en 4.5 y 3.6 min, respectivamente. Mientras que la retención del contenido de estos pigmentos específicos en los polvos encapsulados obtenidos se muestran en la Tabla 6. El contenido de betanina fue conservado entre el 40% y el 57%, sin encontrar diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los encapsulados a diferentes temperaturas de secado y contenido de fibra soluble. Por

otra parte, la retención de la indicaxantina se encontró entre 36 y 57%, y fue significativamente ($p < 0.05$) diferente entre los encapsulados obtenidos con 15 y 30% de fibra soluble secado a 160 °C.

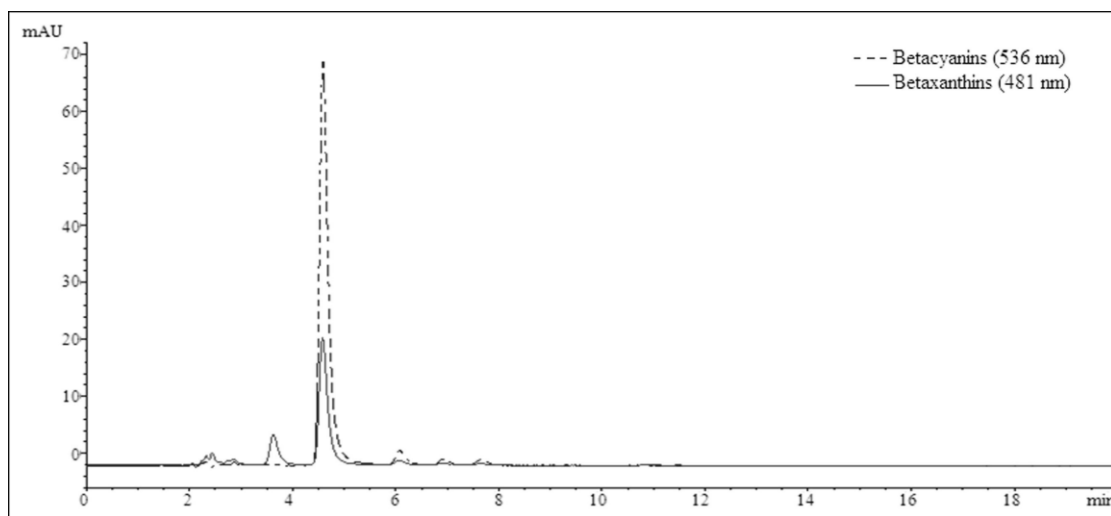


Figura 22. Análisis de HPLC de betacianinas (a 536 nm) y betaxantinas (a 481 nm)

TABLA 6
RETENCIÓN DEL CONTENIDO DE PIGMENTOS* ESPECÍFICOS EN
ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA MEDIANTE SECADO POR ASPERSIÓN
USANDO FIBRA SOLUBLE

Temperatura (°C)	Fibra Soluble (%)	Betanina (%)	Indicaxantina (%)
160	15.0	43.08 ± 5.90 ^a	63.56 ± 5.31 ^a
	22.5	59.25 ± 3.90 ^a	60.51 ± 3.84 ^{ab}
	30.0	54.96 ± 11.95 ^a	43.61 ± 5.85 ^b
180	15.0	44.45 ± 11.83 ^a	56.39 ± 4.73 ^{ab}
	22.5	51.36 ± 9.67 ^a	56.82 ± 9.68 ^{ab}
	30.0	59.34 ± 2.48 ^a	52.49 ± 1.01 ^{ab}
200	15.0	43.83 ± 8.18 ^a	53.93 ± 2.84 ^{ab}
	22.5	51.02 ± 3.54 ^a	47.62 ± 3.64 ^{ab}
	30.0	52.94 ± 6.04 ^a	47.94 ± 10.01 ^{ab}

* Media ± desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey.

Las diferencias observadas en el contenido de pigmentos a través de los análisis de HPLC en comparación a los análisis fotométricos y parámetros de color podría ser debido a los cambios estructurales en las betacianinas causadas por la exposición térmica, ésta última conduce a la isomerización y descarboxilación de betanina la cuál produce su estereoisómero-C15, que corresponde a isobetanina, sin embargo este cambio estructural no afecta el color y el aspecto global del producto (Stintzing *et al.*, 2006), generado por la presencia de las betalainas (Tabla 4 y Figuras 19). Las betaxantinas se consideran menos estables que las betacianinas a temperatura ambiente (Sapers y Hornstein, 1979) y en calentamiento (Singer y von Elbe, 1980; Herbach *et al.*, 2004). En jugo de tuna se ha demostrado que la isomerización de indicaxantina puede ser inducida por un proceso térmico (Stintzing *et al.*, 2006), por lo tanto el contenido total de betaxantinas no se modificó (Figura 20), mientras que el contenido específico de indicaxantina se redujo por el efecto térmico en el proceso de secado.

Los resultados muestran que la encapsulación de jugo de tuna con 22.5% de fibra soluble al jugo de tuna roja y secando a 160 °C, deriva en un mayor contenido de compuestos bioactivos y buenas propiedades físicas. Estas condiciones pueden ser utilizadas para obtener polvos encapsulados que podrían aplicarse como un ingrediente o colorante para desarrollar productos alimenticios con alto contenido de antioxidantes y fibra soluble.

TABLA 7
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARA LAS VARIABLES DETERMINADAS EN ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA A
DIFERENTES CONDICIONES DE PROCESO

	AA	BC	BX	PT	Q	K	I	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>H</i> *
BC	-0.059 ^{ns} 0.815	← Coeficiente de Pearson ← Probabilidad									
BX	-0.215 ^{ns} 0.391	0.934 ^{**} 0									
PT	0.446* 0.063	-0.199 ^{ns} 0.429	-0.181 ^{ns} 0.472								
Q	0.288 ^{ns} 0.247	-0.038 ^{ns} 0.881	0.086 ^{ns} 0.734	0.309 ^{ns} 0.212							
K	0.42* 0.082	-0.345 ^{ns} 0.161	-0.379 ^{ns} 0.121	0.637 ^{**} 0.004	0.305 ^{ns} 0.218						
I	0.362 ^{ns} 0.139	-0.355 ^{ns} 0.148	-0.268 ^{ns} 0.282	0.235 ^{ns} 0.348	0.437* 0.07	0.381 ^{ns} 0.119					
<i>L</i> *	-0.583 ^{**} 0.011	0.035 ^{ns} 0.892	0.124 ^{ns} 0.624	-0.622 ^{**} 0.006	0.152 ^{ns} 0.547	-0.107 ^{ns} 0.673	0.065 ^{ns} 0.798				
<i>a</i> *	0.393 ^{ns} 0.106	0.063 ^{ns} 0.804	0.158 ^{ns} 0.532	0.418* 0.085	0.108 ^{ns} 0.668	-0.078 ^{ns} 0.758	0.154 ^{ns} 0.541	-0.639 ^{**} 0.004			
<i>b</i> *	0.502* 0.034	0.116 ^{ns} 0.645	-0.064 ^{ns} 0.801	0.128 ^{ns} 0.613	0.141 ^{ns} 0.576	-0.08 ^{ns} 0.752	-0.04 ^{ns} 0.876	-0.39 ^{ns} 0.101	-0.1 ^{ns} 0.692		
<i>H</i> *	-0.634 ^{**} 0.005	-0.134 ^{ns} 0.597	0 ^{ns} 0.999	-0.287 ^{ns} 0.248	-0.165 ^{ns} 0.514	0.108 ^{ns} 0.671	-0.027 ^{ns} 0.916	0.641 ^{**} 0.004	-0.303 ^{ns} 0.222	-0.917 ^{**} 0	
<i>Croma</i> *	0.373 ^{ns} 0.128	0.058 ^{ns} 0.819	0.159 ^{ns} 0.528	0.411* 0.09	0.104 ^{ns} 0.683	-0.074 ^{ns} 0.769	0.155 ^{ns} 0.538	-0.62 ^{**} 0.006	0.999 ^{**} 0	-0.139 ^{ns} 0.582	-0.266 ^{ns} 0.287

AA = Actividad antioxidante; BC = Betacianinas; BX = Betaxantinas; PT = Polifenoles totales; Q = Quercetina; K = Kaempferol; I = Isoharmetina; ns = no significativo; * Significativo a $p < 0.1$; ** Significativo a $p < 0.05$, mediante correlación de Pearson.

7.3. Estabilidad de componentes bioactivos de encapsulados de tuna roja en el proceso de extrusión-cocción

7.3.1 Determinación de la distribución de tiempos de residencia durante el proceso de extrusión

La distribución de los tiempos de residencia (DTR) del material en el extrusor de doble tornillo que fue utilizado en el presente estudio bajo diferentes condiciones de extrusión (velocidad de tornillo y temperatura del barril) fue caracterizada mediante el tiempo de residencia medio (tr_m) y la varianza (σ^2).

Una distribución típica de tiempos de residencia del material en el extrusor de doble tornillo (325 rpm y 100°C) se muestra en la Figura 23, en esta se muestra un esquema de como se obtuvieron tr_m y σ^2 del material en proceso de extrusión mediante los diferentes gráficos obtenidos. La Figura 23a, muestra primeramente el gráfico el nivel del parámetro a^* contra el tiempo, la cual es necesaria para la construcción de la función de distribución de tiempos de residencia [$E(t)$] (Figure 23b), la cual describe, en forma cuantitativa cuanto tiempo ha pasado el material alimentado en el extrusor. La determinación del tiempo de residencia medio del material se obtuvo de la construcción de un gráfico $tE(t)$, este representa el promedio del tiempo. Finalmente la Figura 23c muestra un pico aproximadamente a los 40 s, este máximo representa el tiempo de residencia medio del material en el extrusor a las condiciones indicadas. Un valor promedio es reportado en la Tabla 8 a dichas condiciones de proceso, ya que los valores reportados fueron obtenidos apartir de duplicados.

En la Tabla 8 se muestran el tr_m y σ^2 obtenida a diferentes velocidades de tornillo y temperaturas del barril, en ésta se observa que los tiempos de residencia medio se encuentran en un rango de 36.62 a 60.13 s, estos tiempos representan el tiempo promedio que permanece el material dentro del barril del extrusor expuesto a alta temperatura y esfuerzo de corte, lo cual está relacionado con la formación de complejos o degradación de componentes de interés en el material a procesar.

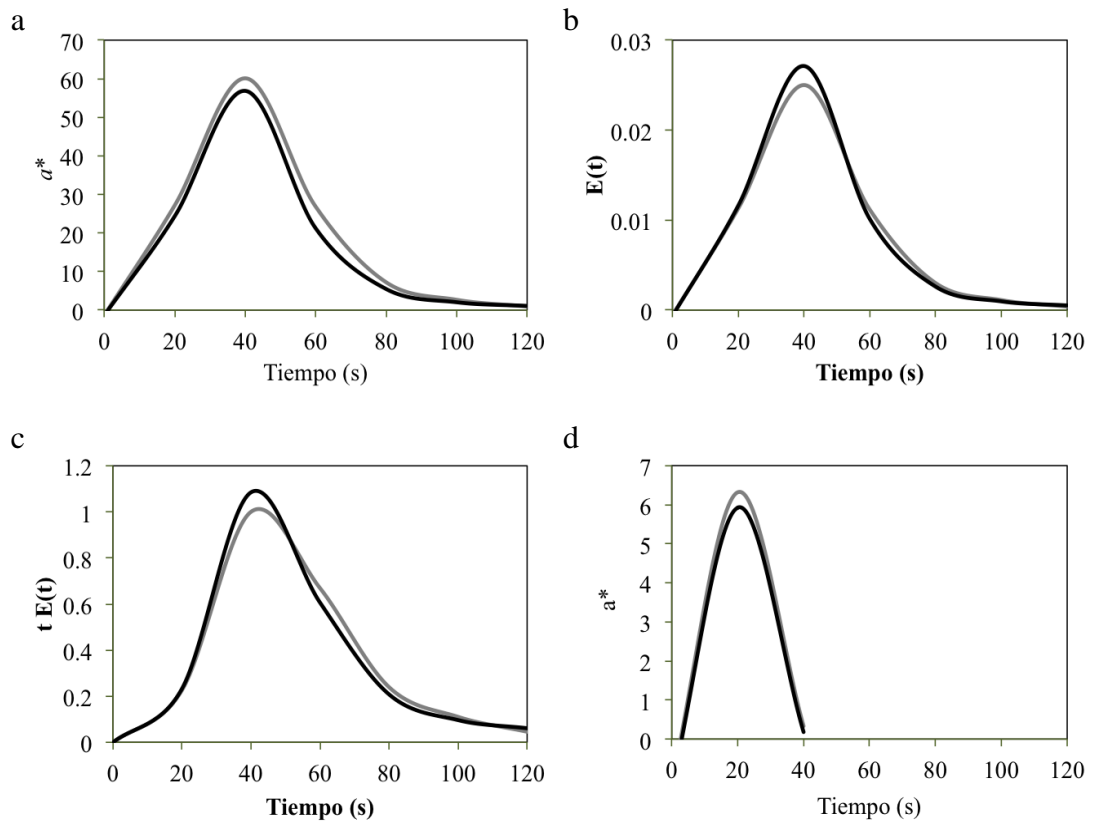


Figura 23. Distribución de tiempos de residencia del material en el extrusor de doble tornillo a 325 rpm y 100 °C; a. Gráfico de concentración-tiempo; b Función de distribución de tiempos de residencia; c. Gráfico de tiempo de residencia media; d. Desviación estándar; — Corrida y — duplicado.

El tr_m fue afectado significativamente ($p < 0.05$) por la temperatura del barril, la velocidad de tornillo y la interacción de los factores (Tabla 8) (Apéndice 10.3.2). Incrementos en la velocidad de tornillo en el extrusor a una misma temperatura causan una disminución del tiempo de residencia medio del material, esto es debido probablemente a una mayor disipación del calor, a un mayor esfuerzo de corte y a un mejor mezclado del material (Unlu y Faller, 2002; Ilo y Berghofer, 1999), obteniéndose los menores tiempos de residencia al extrudir a 325 rpm. Este mismo comportamiento ha sido reportado por otros autores (Pansawat *et al.*, 2008, Plunkett y Aisnworth, 2007).

Por otra parte, al incrementar la temperatura del barril se observa una disminución del tr_m , esto debido probablemente a la disminución de la viscosidad del material en

tránsito, lo cual produce un material más fluido a través del cañón y del tornillo (Unlu y Faller, 2002; Ilo y Berghofer, 1999).

Resultados similares han sido reportados por otros autores donde se han estudiado los factores de velocidad de tornillo y temperatura del barril sobre las DTR al igual que este estudio (Kumar *et al.*, 2006; Unlu y Faller, 2002; Pansawat *et al.*, 2008). En la Figura 24 se contrastan las DTR a las diferentes combinaciones de las condiciones de procesamiento y es posible observar las grandes diferencias que se presentaron por efecto de temperatura y velocidad del tornillo (Tabla 8).

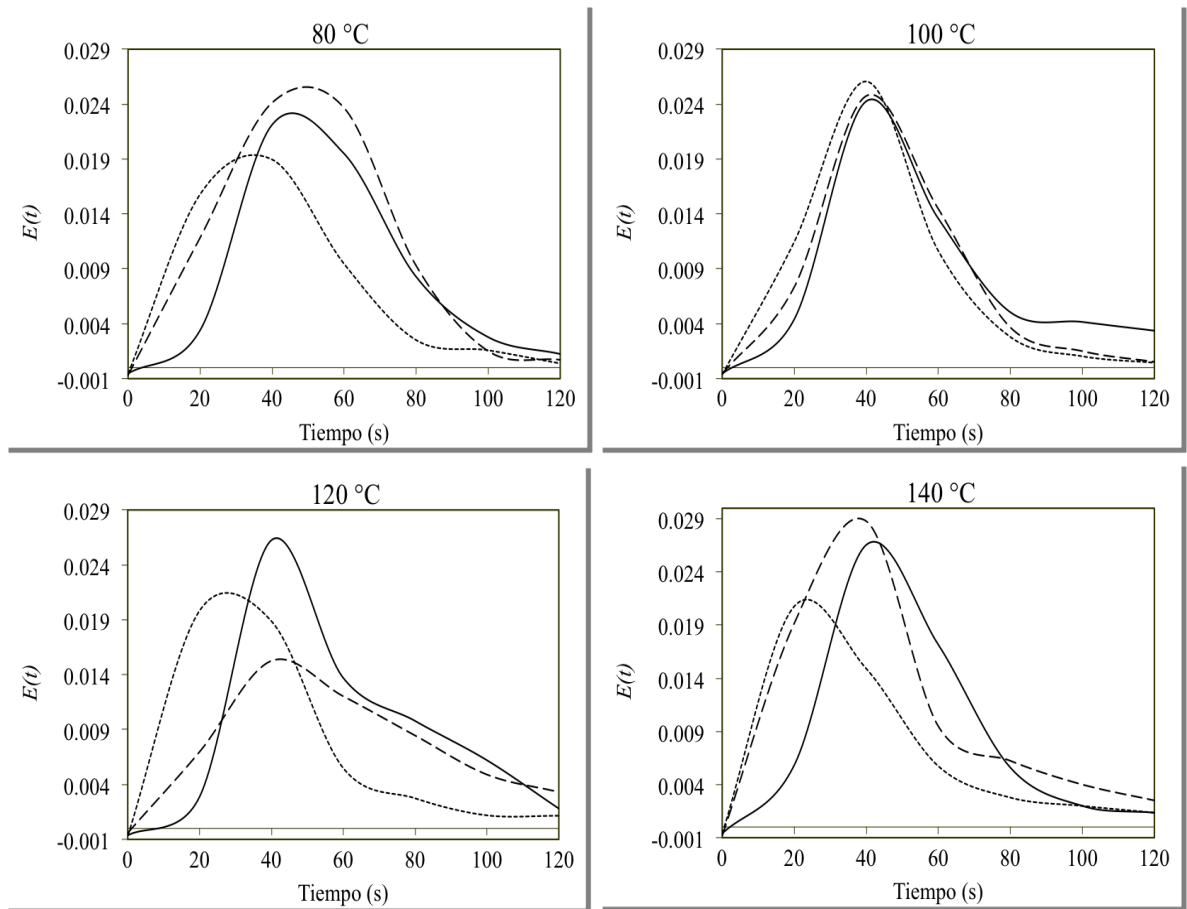


Figura 24. Función de distribución de tiempos de residencia de diferentes temperaturas (80, 100, 120 y 140 °C) y velocidades de tornillo (— 225, -- 275 y - - - 325 rpm) en un extrusor de doble tornillo

Recordando que el punto máximo obtenido en cada función representa el tiempo de residencia medio del material en el extrusor, se observa que a una misma temperatura

este punto máximo se logra en un menor tiempo conforme se incrementa la velocidad del tornillo de 225, 275 y 325 rpm. Por otra parte, si comparamos las diferentes temperaturas de extrusión-cocción se observa que al aumentar la temperatura del proceso los punto máximos tienden a disminuir, obteniéndose los menores tiempos de residencia del material en el extrusor a 140 °C.

TABLA 8
TIEMPOS DE RESIDENCIA MEDIOS (tr_m) Y VARIANZA (σ^2) A
DIFERENTES CONDICIONES DE EXTRUSIÓN

Temperatura (°C)	Velocidad de tornillo (rpm)	tr_m (s)	σ^2 (s ²)
80	225	60.13 ± 2.95 ^a	287.41 ± 15.82 ^{ab}
	275	47.82 ± 0.13 ^b	515.97 ± 152.07 ^{ab}
	325	40.84 ± 0.82 ^{cde}	483.71 ± 85.68 ^{ab}
100	225	56.20 ± 2.28 ^a	571.84 ± 232.22 ^{ab}
	275	48.59 ± 1.67 ^b	396.01 ± 3.38 ^{ab}
	325	43.12 ± 0.76 ^{bcd}	396.66 ± 12.67 ^{ab}
120	225	56.18 ± 0.09 ^a	599.94 ± 81.99 ^{ab}
	275	48.74 ± 0.66 ^b	726.90 ± 158.89 ^a
	325	36.62 ± 1.63 ^e	482.04 ± 9.01 ^{ab}
140	225	47.72 ± 1.43 ^b	237.54 ± 11.33 ^b
	275	46.75 ± 2.81 ^{bc}	618.22 ± 173.54 ^{ab}
	325	37.53 ± 0.98 ^{de}	576.72 ± 1.69 ^{ab}

* Media ± desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa (p<0.05), mediante prueba de Tukey.

La σ^2 es un parámetro que caracteriza el ancho de la distribución del tiempo de residencia, este parámetro fue significativamente afectado por la interacción de la velocidad del tornillo y la temperatura del barril (Tabla 8), sin embargo se observa que para la mayoría de los valores no presentan diferencia significativa entre ellos, excepto al extrudir a la mayor temperatura (140 °C) a la más baja velocidad del tornillo (225 rpm), la cual presenta el valor más bajo de varianza en comparación con la varianza determinada en las demás condiciones de proceso.

7.3.2 Efecto del proceso de extrusión-cocción sobre la estabilidad de componentes bioactivos de encapsulados de tuna roja

Se obtuvieron extrudidos que muestran la elaboración de cereales expandidos pigmentados con colorantes naturales utilizando los encapsulados de tuna roja seleccionados en la primera etapa del estudio, éste se obtuvo a partir de la mezcla de jugo de tuna roja y 22.5% de fibra soluble secada a 160 °C como temperatura de entrada. Con lo anterior se muestra uno de los diversos usos que se le puede dar a este tipo de polvos encapsulados obtenidos a partir de la conservación del jugo de tuna roja mediante secado por aspersión utilizando fibras solubles como material acarreador.

Los materiales extrudidos presentaron un contenido de humedad promedio de $9.26\% \pm 0.3$, esto es de esperarse ya que los extrudidos obtenidos fueron secados bajo las mismas condiciones para obtener un contenido de humedad similar para todos los extrudidos.

El análisis de color se muestra en la Tabla 9. Los tres parámetros evaluados, L^* , a^* y b^* fueron significativamente afectados ($p < 0.05$) por ambos factores estudiados, la temperatura del barril y la velocidad del tornillo, así como por la interacción de los mismos (Apéndice 10.3.3).

Para la luminosidad (L^*) se puede observar que los valores menores fueron obtenidos en la extrusión realizada a la mayor temperatura utilizada (140 °C) en especial al procesar a la más alta velocidad del tornillo (325 rpm), esto puede indicar la formación de algunos productos de reacciones de maillard que causan oscurecimiento en los extrudidos. Este comportamiento ha sido reportado por otros autores (Sacchetti *et al.*, 2004).

En el parámetro a^* , el cual representa la tendencia del verde al rojo, se observa que todos los productos tienden al color rojo, ya que los valores encontrados son positivos, además se puede ver que los valores más altos fueron obtenidos al extrudir a velocidades de 225 y 325 rpm a la mayor temperatura de proceso (140 °C), lo que representa extrudidos con una mayor tendencia al color rojo. Esta tendencia puede deberse a una

mayor conservación del color o de los componentes del color causada por el menor tiempo de residencia del material en el extrusor (Tabla 9), ó por el incremento en la formación de productos de la reacción de Maillard debido al aumento en la temperatura del proceso (MacDougall y Granov, 1998).

TABLA 9
ANÁLISIS DE COLOR* DE EXTRUDIDOS A DIFERENTES CONDICIONES DE PROCESO

Velocidad del tornillo (rpm)	Temperatura (°C)	tr_m (s)	L^* (Luminosidad)	a^* (verde-rojo)	b^* (azul-amarillo)
225	80	60.13	82.2 ± 3.7^a	23.2 ± 0.9^{bc}	4.3 ± 0.1^f
	100	56.20	83.1 ± 2.1^a	23.3 ± 1.5^{bc}	5.4 ± 0.4^{def}
	120	56.18	82.4 ± 4.5^a	22.5 ± 1.4^{cd}	6.1 ± 0.9^{cd}
	140	47.72	75.6 ± 2.3^{bc}	25.2 ± 0.9^a	9.7 ± 0.4^a
275	80	47.82	84.0 ± 2.0^a	20.7 ± 0.4^{def}	5.0 ± 0.1^f
	100	48.59	85.3 ± 2.0^a	20.4 ± 0.7^{ef}	5.6 ± 0.1^{def}
	120	48.74	81.8 ± 1.4^a	21.4 ± 0.9^{cd} e	6.8 ± 0.3^c
	140	46.75	80.8 ± 4.4^{ab}	19.4 ± 1.2^f	8.3 ± 0.1^b
325	80	40.84	83.6 ± 2.0^a	19.8 ± 0.5^{ef}	5.2 ± 0.1^f
	100	43.12	83.6 ± 2.1^a	19.6 ± 0.8^{ef}	5.8 ± 0.3^{de}
	120	36.62	85.4 ± 3.2^a	18.9 ± 0.9^f	7.8 ± 0.4^b
	140	37.53	72.5 ± 3.1^c	24.7 ± 0.7^{ab}	10.1 ± 0.4^a

+ Media \pm desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey.

En el parámetro de color b^* , el cual representa la tendencia del azul al amarillo, se obtuvieron solo valores positivos indicando la tendencia al amarillo, además se observa que al elevar la temperatura del barril en el proceso de extrusión a la misma velocidad del tornillo la tendencia al amarillo se incrementa; los mayores valores de b^* fueron encontrados en los extrudidos obtenidos a la más alta temperatura del proceso (140 °C). Lo anterior puede ser debido al incremento en la formación de productos de la reacción de Maillard debido al aumento en la temperatura del proceso (MacDougall y Granov, 1998).

Los parámetros de color se correlacionan positivamente (Tabla 12), además para el parámetro de color b^* se encontró una correlación positiva con el contenido de betaxantinas y la actividad antioxidante, esta tendencia es de esperarse ya que estos pigmentos presentan la gama de colores entre amarillo y naranja, y estos pigmentos presentan alta actividad antioxidante (Butera *et al.*, 2004).

En los materiales extrudidos también fueron analizados componentes tales como polifenoles totales, actividad antioxidante y contenidos de flavonoides y betalainas presentes en la mezcla de alimentación con el objetivo de observar el efecto de las condiciones de extrusión sobre dichos componentes de interés.

El contenido de polifenoles totales se presenta en la Figura 25, en ésta se observa que dicho parámetro fue afectado significativamente ($p < 0.05$) por la temperatura del barril y la velocidad de tornillo (Apéndice 10.3.3). El mayor contenido polifenólico fue obtenido en los extrudidos procesados a la más alta velocidad del tornillo utilizada (325 rpm) a temperaturas de cocción de 100 y 140 °C. Éste comportamiento está relacionado con el tiempo de residencia medio del material en el extrusor, un menor tiempo de residencia de la mezcla en el cañón de extrusión representa un menor tiempo de exposición de los componentes de interés a las condiciones de proceso como temperatura, presión y esfuerzo de corte, encontrándose uno de los menores tiempos de residencia a la mayor velocidad del tornillo utilizada (Tabla 8), lo que representa una menor degradación de compuestos polifenólicos.

Además se muestra una reducción significativa ($p < 0.05$) de los polifenoles totales con respecto al contenido inicial de estos componentes en la mezcla antes de extrudir, calculándose porcentajes de retención de 36 a 47% en las diferentes condiciones de extrusión. Estos resultados indican que el proceso de extrusión causa la degradación de los compuestos fenólicos, tal vez debido a la descarboxilación de ácidos fenólicos por la temperatura utilizada en el proceso (Brennan *et al.*, 2011). Esto, junto con un alto contenido de humedad, puede promover la polimerización de fenoles, reduciendo así la capacidad de extracción (Dlamini *et al.*, 2007; Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2009). La disminución en compuestos fenólicos se ha observado en la

extrusión usando otros materiales, por ejemplo, en frijoles la cantidad de compuestos fenólicos se redujo de 10 hasta 70% (Anton *et al.*, 2009) y en amaranto se reportó una reducción de 80.3% (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2009).

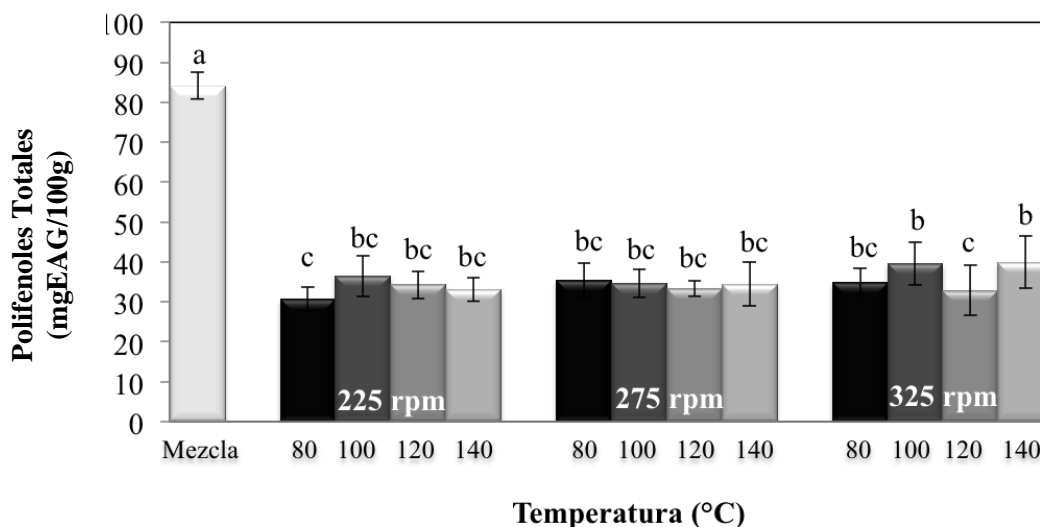


Figura 25. Contenido de polifenoles totales, extrudido utilizando encapsulado de tuna roja a diferentes condiciones de extrusión-cocción, letras diferentes en las barras representan diferencia significativa ($p < 0.05$)

El contenido de polifenoles totales presentó una correlación positiva con el contenido de betacianinas (Tabla 12), esto puede ser debido a que las betacianinas son los pigmentos mayoritarios en el encapsulado de tuna roja utilizado para pigmentar el cereal.

El mismo comportamiento observado en polifenoles totales fue encontrado para la actividad antioxidante de los extrudidos. La Figura 26, muestra como este parámetro fue significativamente afectado ($p < 0.05$) por la temperatura del barril y la velocidad del tornillo (Apéndice 10.3.3), observándose un aumento en la actividad antioxidante al incrementarse tanto la velocidad del tornillo como la temperatura en el proceso de extrusión-cocción, encontrándose los mayores valores de actividad antioxidante en los extrudidos procesados a 325 rpm y 140 °C. Lo anterior está relacionado con un menor tiempo de residencia medio de la mezcla en el extrusor, lo que representa un menor

tiempo de exposición de los componentes con actividad antioxidante, como los flavonoides quercetina, kaempferol e isoharmetina y los pigmentos betalaínicos, bajo las condiciones de proceso como la temperatura, causyo una menor pérdida o una mayor retención de antioxidantes y su actividad. Sin embargo, todos los valores de actividad son mucho menores al valor determinado en la mezcla almidón/encapsulado antes del proceso de extrusión-cocción.

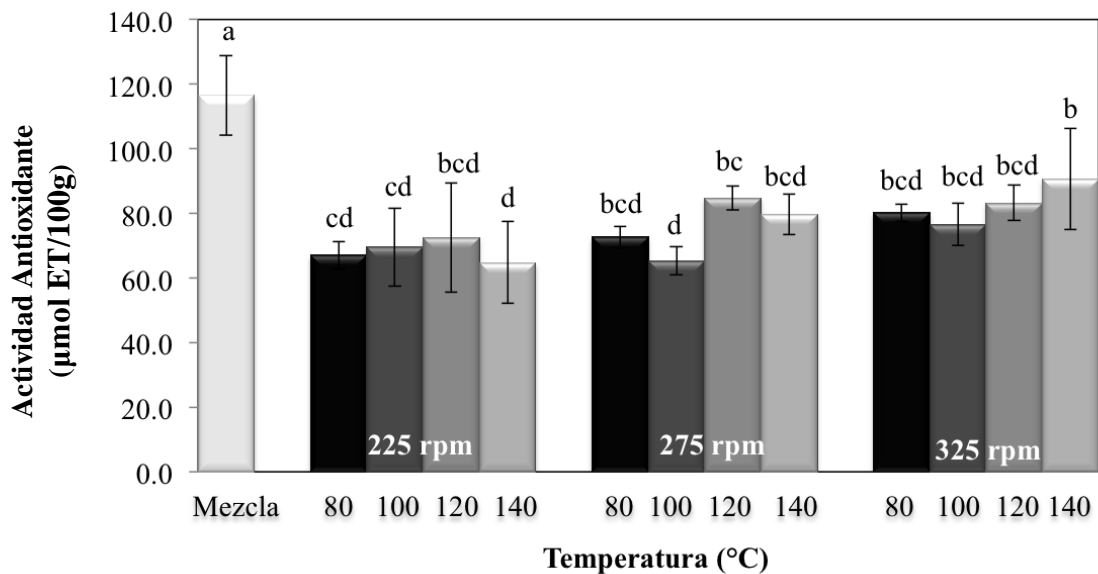


Figura 26. Actividad antioxidante, extrudido utilizando encapsulado de tuna roja, a diferentes condiciones de extrusión-cocción, letras diferentes en las barras representan diferencia significativa ($p < 0.05$)

La retención de la actividad antioxidante fue calculada entre 55 y 77% para las diferentes condiciones de procesamiento utilizadas, observándose la mayor retención a la condición más alta de velocidad/temperatura. Éstos valores de retención están relacionados con el tiempo de residencia medio del material en el extrusor a cada condición, encontrándose los menores tiempos de residencia a condiciones de alta velocidad del tornillo pero mayor temperatura (Tabla 8). La disminución de la actividad antioxidante puede estar relacionada con la degradación de los polifenoles y los pigmentos durante el proceso, debido a que estos componentes tienen actividad

antioxidante. Además, las altas temperaturas y alta humedad pueden promover la polimerización de fenoles, reduciendo así la actividad antioxidante (Dlamini *et al.*, 2007; Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2009). Otros estudios reportan rangos o variaciones mayores de retenciones de 35 a 88% de la actividad antioxidante a menores temperaturas y velocidades de tornillo utilizadas en el proceso de extrusión (Anton *et al.*, 2009), debido a que el factor que impacta más en los componentes de interés y en la actividad antioxidante de los mismos es la temperatura (Castellar *et al.*, 2003), por lo que una menor temperatura de proceso puede causar una mayor retención de los mismos.

La actividad antioxidante mostró una correlación positiva con el contenido de betacianinas y betaxantinas (Tabla 12), esta correlación indica que la actividad antioxidante en los extrudidos es debida principalmente a los pigmentos presentes.

El análisis de las betalainas mostró que el contenido de betaxantinas, el cual se presenta en la Figura 27, fue significativamente afectado ($p < 0.05$) por la temperatura del barril, la velocidad de tornillo y la interacción de ambos factores (Apéndice 10.3.3), encontrándose los más bajos contenidos en las condiciones a 225 y 140 °C y 275 rpm a 80 y 100 °C respectivamente. Esto está relacionado con los tiempos de residencia medios del material en el extrusor, un mayor tiempo de residencia de la mezcla en el cañón de extrusión representa un mayor tiempo de exposición de los componentes termosensibles a las condiciones de proceso como la alta temperatura, esto causa mayor degradación de los pigmentos ya que son sensibles a la acción térmica (Fernández-López *et al.*, 2001). Además se observa una alta pérdida de betaxantinas debido al proceso de extrusión-cocción con porcentajes de retención entre 46 y 63.5% con respecto a la mezcla alimentada al extrusor.

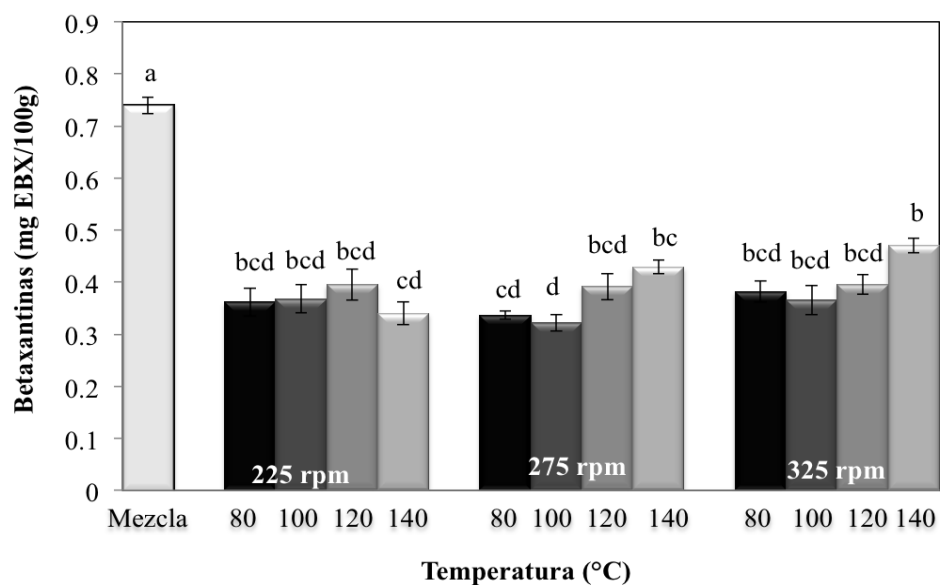


Figura 27. Contenido de betaxantinas, extrudido utilizando encapsulado de tuna roja, a diferentes condiciones de extrusión-cocción, letras diferentes en las barras representan diferencia significativa ($p < 0.05$)

Mientras que el contenido de betacianinas fue significativamente afectado ($p < 0.05$) por la velocidad de tornillo y por la interacción temperatura-velocidad de tornillo (Apéndice 10.3.3), esto se muestra en la Figura 28. Se observa un mayor contenido de betacianinas en los extrudidos obtenidos a las más altas velocidades de tornillo (275 y 325 rpm) y a la mayor temperatura (140 °C). Este efecto es debido a que a dichas condiciones de extrusión la mezcla tuvo el tiempo de residencia medio más corto, en comparación con todas las condiciones de extrusión probadas en este estudio. Lo anterior conduce a que a las más bajas temperaturas de extrusión y velocidades de tornillo causan una mayor degradación de los componentes termosensibles, tales como los pigmentos. En otros estudios se ha reportado que incrementos en la temperatura del barril causa aumentos en la retención de ciertas vitaminas posiblemente debido a la disminución en el esfuerzo cortante resultado de la disminución de la viscosidad del estado fundido a altas temperaturas (Björck y Asp, 1983). Además se observa pérdida de este tipo de pigmentos debido al proceso, ya que con respecto al contenido de betacianinas presentes en la mezcla base alimentada al extrusor se calcularon porcentajes

de retención de 33 a 51%, lo que indica que más de la mitad de estos componentes fueron perdidos durante el proceso de extrusión-cocción.

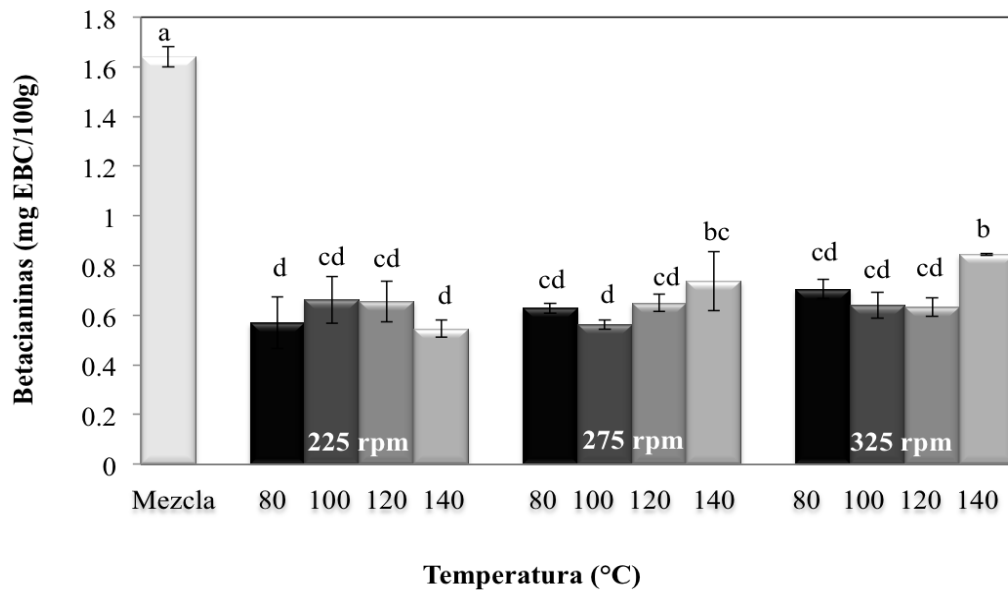


Figura 28. Contenido de betaninas, extrudido utilizando encapsulado de tuna roja, a diferentes condiciones de extrusión-cocción, letras diferentes en las barras representan diferencia significativa ($p < 0.05$)

Se ha reportado que la betanina, el pigmento principal de tuna roja, puede ser degradado por isomerización o descarboxilación durante el tratamiento térmico (Huang y von Elbe, 1985). La pérdida de pigmento causada por el proceso de extrusión-cocción ha sido reportada previamente. Durge *et al.* (2013) reportan de una retención de 50% para el pigmento de remolacha procesada por cocción por extrusión, sin embargo, en este estudio, sólo se midió la retención del color, no la presencia de los compuestos. Khanal *et al.* (2009) proceso orujo de arándanos por extrusión y reportaron una disminución en el contenido total de antocianinas de 33 a 42% aplicando temperaturas más altas (160 y 180 °C) y velocidades de tornillo inferiores (150 y 200 rpm) en comparación con el presente estudio. Otros autores mostraron reducciones de pigmentos de 64 a 90% durante la elaboración de cereal para desayuno a la que se añadió

concentrados de diferentes bayas (Camire *et al.*, 2002), y del 90% en productos extruidos obtenidos mediante la adición de polvos de frutas de arándanos, frambuesas y uvas (Camire *et al.*, 2007).

La degradación térmica de las betalainas sigue una cinética de reacción de primer orden, (Gandía-Herrero *et al.*, 2013), en los gráficos presentados en las Figuras 29 y 30 se relaciona la concentración en el tiempo con la concentración inicial (C/C_0) para betacianinas y betaxantinas, respectivamente, a las diferentes temperaturas de proceso (80, 100, 120 y 140 °C). En la Tabla 10 se presentan las constantes de decaimiento ($-k$) determinadas acompañadas de sus respectivos ajustes de acuerdo a los coeficientes de determinación calculados (R^2), se observa que las constantes de decaimiento a las temperaturas utilizadas en el extrusor (80, 100, 120 y 140 °C) son muy similares.

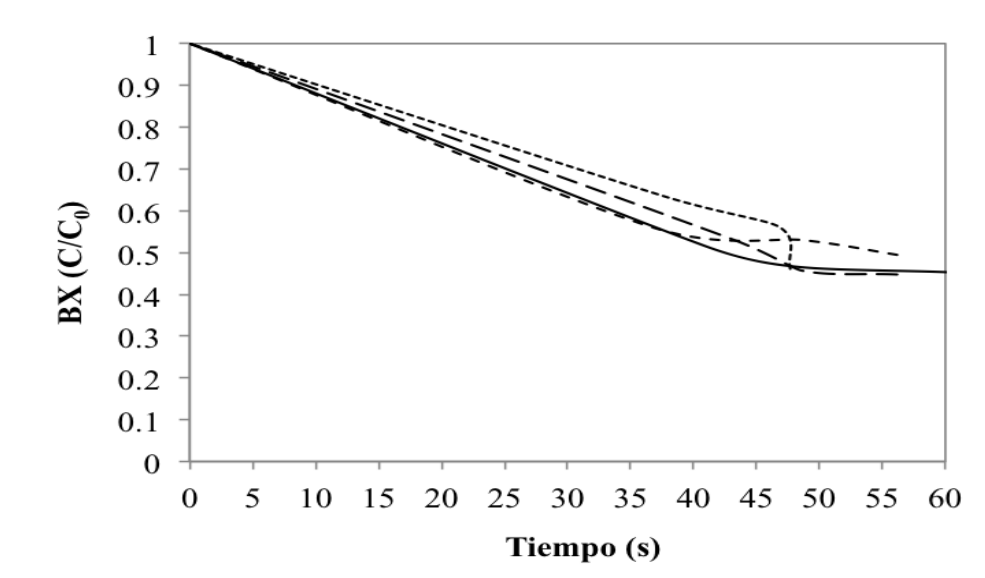


Figura 29. Degradación de betaxantinas BX (Contenido en el tiempo /Contenido inicial) en el proceso de extrusión-cocción a —80, —100, - - -120 y140 °C.

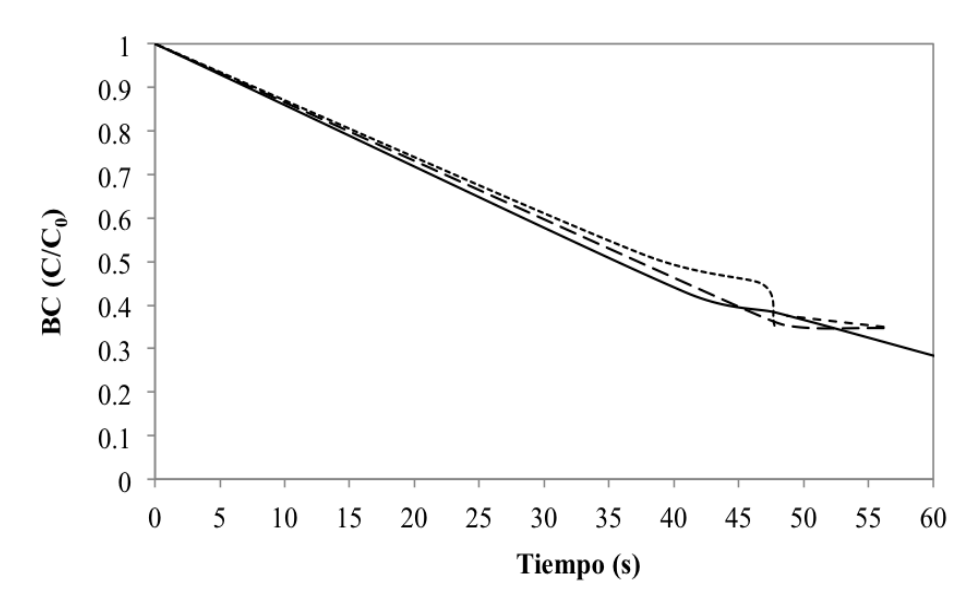


Figura 30. Degradación de betacianinas BC (Contenido en el tiempo /Contenido inicial) en el proceso de extrusión-cocción a —80, —100, - - -120 y140 °C.

TABLA 10
EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE VELOCIDAD DE
DEGRADACIÓN Y ENERGÍA DE ACTIVACIÓN DE BETALAINAS EN EL
PROCESO DE EXTRUSIÓN-COCCIÓN

Temperatura (°C)	Betalaina	k (s^{-1})	R^2	E_a (KJ/mol)	R^2
80	BC	-0.0206 ± 0.0005^a	0.9855	6.1815 ^a	0.9898
100		-0.0200 ± 0.0013^a	0.9825		
120		-0.0194 ± 0.0010^a	0.9540		
140		-0.0188 ± 0.0023^a	0.9858		
80	BX	-0.0160 ± 0.0002^b	0.9491	1.5888 ^b	0.9897
100		-0.0145 ± 0.0003^c	0.9869		
120		-0.0128 ± 0.0004^d	0.9375		
140		-0.0122 ± 0.0002^d	0.9719		

* Media \pm desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey. BC = Betacianinas; BX = Betaxantinas; k = Constante de velocidad; R^2 = Coeficiente de determinación; E_a = Energía de activación.

Sin embargo se observa una tendencia a disminuir con el incremento en la temperatura, esto debido a que al aumentar la temperatura fueron encontrados menores tiempos de residencia medio del material durante el proceso, lo que conduce a menores tiempos de exposición de las betacianinas y betaxantinas a las condiciones de temperatura, esfuerzo cortante, etc. Además se puede observar que las betacianinas presentaron una mayor velocidad de degradación con respecto a las betaxantinas, con los datos de k se obtuvo la gráfica de Arrhenius para la degradación de ambos grupos de betalainas, el comportamiento se muestra en la Figura 31, a partir de está se calcularon las energías de activación para la reacción de degradación, datos mostrados en la Tabla 10. Se observa que la energía de activación de la degradación de las betacianinas es mayor que la presentada por las betaxantinas, esto indica que las primeras son más susceptibles a los incrementos de temperatura (Wei-Dong *et al.*, 2007), en este caso durante el proceso de extrusión-cocción.

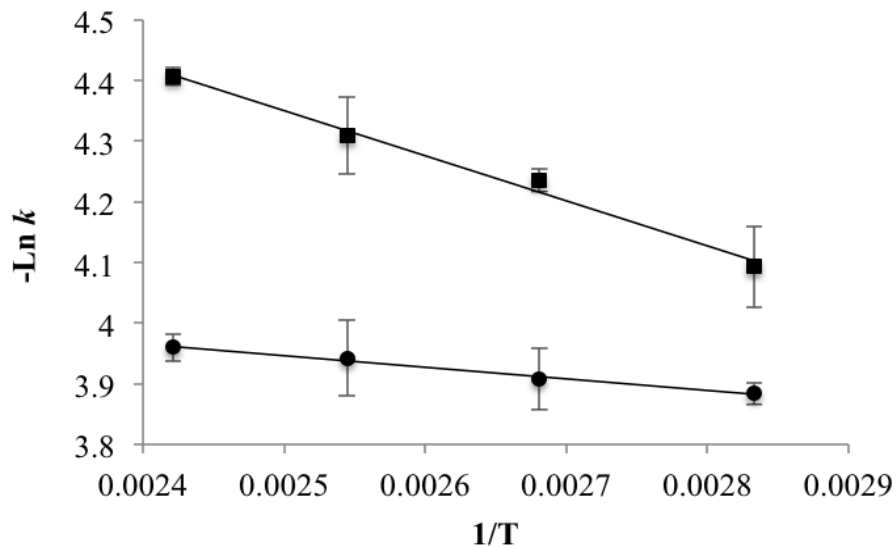


Figura 31. Gráfico de Arrhenius para la degradación de ■betacianinas y ● betaxantinas durante extrusión-cocción

Como se ha mencionado anteriormente, el grupo de pigmentos con mayor contenido en la tuna roja y en el encapsulado obtenido a partir de dicho fruto son la betanina e isobetanina ambos pertenecientes al grupo de las betacianinas. Por lo que ambos pigmentos fueron monitoreados durante el proceso de extrusión-cocción. En la

Tabla 11 se presentan los porcentajes de retención de la betanina a diferentes condiciones de extrusión, en ésta se observa la disminución del contenido de betanina y se muestran porcentajes de retención entre 10.92 y 43.54%, el contenido de betanina es afectada significativamente ($p < 0.05$) por efecto de la temperatura, la velocidad de tornillo y la interacción de ambos factores, observándose que el incremento en la temperatura de extrusión causa una disminución en el contenido y que los valores de retención más altos fueron obtenidos baja velocidad de tornillo (225 rpm). Con relación al contenido de isobetanina, éste pigmento también fue afectado significativamente ($p < 0.05$) por los factores de temperatura y el termino de interacción temperatura-velocidad, sin embargo el contenido de isobetanina tuvo una tendencia contraria a la betanina, observándose un incremento en el contenido para todas las condiciones de extrusión, esto se debe a que durante el procesamiento se producen cambios estructurales en las betacianinas causadas por la exposición térmica, lo que conduce a la isomerización y descarboxilación de betanina produciéndose su estereoisómero-C15, que corresponde a isobetanina (Stintzing *et al.*, 2006).

TABLA 11
RETENCIÓN DEL CONTENIDO DE BETACIANINAS* EN
EXTRUDIDOS OBTENIDOS UTILIZANDO ENCAPSULADO DE
TUNA ROJA

Velocidad del tornillo (rpm)	Temperatura (°C)	Betanina (%)	Isobetanina (%)
225	80	39.12 ± 1.21 ^{ab}	107.36 ± 14.41 ^{de}
	100	42.39 ± 2.26 ^a	129.83 ± 6.85 ^{cde}
	120	26.59 ± 1.84 ^c	150.86 ± 26.04 ^{bc}
	140	13.58 ± 1.35 ^e	152.82 ± 16.62 ^{bc}
275	80	41.70 ± 0.14 ^a	98.35 ± 26.04 ^e
	100	30.96 ± 3.84 ^c	135.18 ± 18.29 ^{bcde}
	120	24.14 ± 5.58 ^{cd}	200.23 ± 20.50 ^a
	140	10.92 ± 1.55 ^e	132.18 ± 0.90 ^{cde}
325	80	43.54 ± 1.62 ^a	120.42 ± 2.52 ^{cde}
	100	31.83 ± 2.34 ^{bc}	142.63 ± 5.54 ^{bcd}
	120	17.03 ± 3.43 ^{de}	150.47 ± 14.41 ^{bcd}
	140	15.55 ± 2.07 ^e	166.53 ± 11.64 ^{ab}

*Media ± desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey.

Los contenidos de los flavonoides quercetina, kaempferol e isoharmetina, no pudieron ser cuantificados ya que estos componentes se encuentran en los encapsulados en pequeñas cantidades, esto aunado a que el proceso de extrusión causa degradación de estos, por lo que no son cuantificables por el método utilizado en este estudio. En la Figura 32, se muestra un cromatograma para ejemplificar lo anterior en comparación con un estándar.

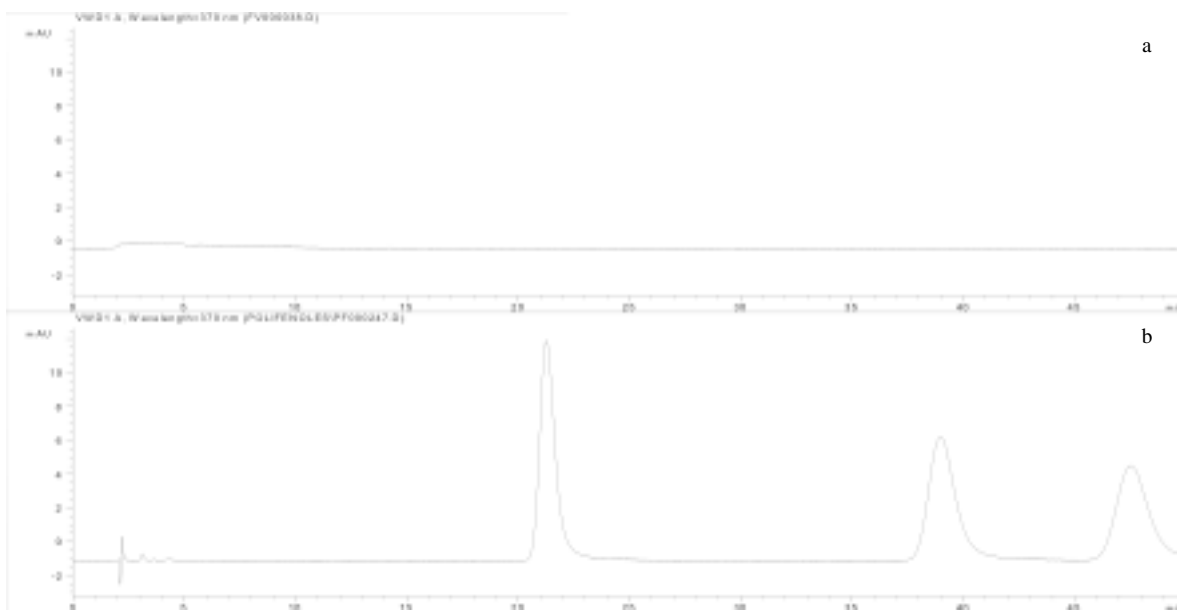


Figura 32. Cromatogramas obtenidos por HPLC, cuantificación de flavonoides, a. Extracto a partir de extrudido; b. Mezcla de estándares de quercetina, kaempferol e isoharmetina (25 ppm)

Las condiciones de extrusión-cocción en las cuales se observan menos cambios en la degradación de polifenoles totales, actividad antioxidante y contenido de betaxantinas es al utilizar 325 rpm al extrudir a cualquier temperatura (80, 100, 120 y 140°C). Mientras que el contenido de betacianinas sufre una menor reducción a dicha velocidad de tornillo (325 rpm) solo a una temperatura de 140°C, lo anterior debido a que es la velocidad de tornillo a la cual el material a extrudir está en el extrusor menor tiempo y por lo tanto los componentes de interés tienen una menor tiempo de exposición a las condiciones del proceso. Sin embargo aunque la mejor condición de temperatura

fue de 140 °C, está no se utilizó ya que los extrudidos presentaron una mayor tendencia al color amarillo, y los colores deseados son los extrudidos que tienen al color magenta o rojo de acuerdo a la escala de colores, encontrando significativamente ($p < 0.05$) los menores valores de amarillo a 80 y 100 °C, además aunque las propiedades físicas de los extrudidos no fueron determinadas en esta etapa de la investigación, se observó que al extrudir a 100 °C se obtuvo una mayor expansión en los productos que al extrudir a 80 °C, por lo que las condiciones de extrusión seleccionadas son a temperatura del barril de 100 °C y velocidad de tornillo de 325 rpm, que permiten un tiempo de retención del material a extrudir de 43.12 s (Tabla 8).

TABLA 12
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARA LAS VARIABLES
DETERMINADAS EN EXTRUDIDOS A DIFERENTES CONDICIONES DE
PROCESO PIGMENTADOS CON ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA

	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	BX	BC	PT
<i>a</i> *	-0.693** 0	← Coeficiente de Pearson ← Probabilidad				
<i>b</i> *	-0.749** 0	0.374* 0.072				
BX	-0.256 ^{ns} 0.228	0.144 ^{ns} 0.501	0.442** 0.031			
BC	-0.26 ^{ns} 0.22	0.162 ^{ns} 0.449	0.312 ^{ns} 0.138	0.887** 0		
PT	-0.28 ^{ns} 0.185	0.072* 0.739	0.181 ^{ns} 0.398	0.173 ^{ns} 0.419	0.405** 0.05	
AA	-0.309 ^{ns} 0.141	-0.13 ^{ns} 0.546	0.365* 0.08	0.54** 0.007	0.571** 0.004	0.104 ^{ns} 0.63

BX = Betaxantinas; BC = Betacianinas; PT = Polifenoles totales; AA = Actividad antioxidante; ns = no significativo; *Significativo a $p < 0.1$; **Significativo a $p < 0.05$, mediante correlación de Pearson.

7.4. Efecto de la adición de encapsulado en las propiedades físico-químicas de cereales para desayuno mediante extrusión-cocción

Se obtuvieron cuatro tipos de cereales para desayuno obtenidos a condiciones fijas de extrusión: velocidad del tornillo de 325 rpm y temperatura del barril de 100 °C, utilizando diferentes porcentajes de encapsulados de tuna roja, para evaluar el efecto de la adición de encapsulado sobre las propiedades de los cereales obtenidos.

En la Figura 33 se muestran los cereales obtenidos, se observa como al aumentar el porcentaje de encapsulado utilizado se presentaron cambios en color y tamaño o expansión. Estos cereales fueron analizados tanto física como químicamente, en la Tabla 13 se muestran algunas de las propiedades físicas analizadas en los cereales.



Figura 33. Cereales para desayuno obtenidos con diferentes contenidos de encapsulados de tuna roja; a. 7.5%, b. 5.0%, c. 2.5% y d. 0%.

El contenido de humedad de los cereales no fue significativamente afectado ($p > 0.05$) por la concentración de encapsulado adicionado a la mezcla de extrusión (Apéndice 10.3.4), esto era de esperarse ya que todos los extrudidos fueron secados bajo las mismas condiciones, el contenido de humedad para los cereales fue de alrededor de

9.3%. Esta misma tendencia fue observada por El-Samahy *et al.* (2007), donde fueron probados diferentes porcentajes de concentrados de tuna.

TABLA 13
PROPIEDADES FÍSICAS* DE EXTRUDIDOS OBTENIDOS A DIFERENTES
CONCENTRACIONES DE ENCAPSULADO DE TUNA ROJA UTILIZADO

Encapsulado (%)	Humedad (%)	Densidad (g/cm ³)	IE	ISA	IAA
0	9.4 ± 0.02 ^a	0.080 ± 0.001 ^d	11.6 ± 0.74 ^a	0.24 ± 0.004 ^a	6.04 ± 0.04 ^a
2.5	9.3 ± 0.03 ^a	0.106 ± 0.001 ^c	9.43 ± 0.77 ^b	0.24 ± 0.002 ^a	5.87 ± 0.11 ^a
5	9.3 ± 0.06 ^a	0.210 ± 0.001 ^b	6.18 ± 0.56 ^c	0.23 ± 0.010 ^a	5.23 ± 0.07 ^b
7.5	9.3 ± 0.01 ^a	0.309 ± 0.002 ^a	4.66 ± 0.21 ^d	0.23 ± 0.009 ^a	4.81 ± 0.13 ^c

* Media ± desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa (p<0.05), mediante prueba de Tukey. IE = Índice de expansión; ISA = Índice de solubilidad en agua; IAA = Índice de absorción de agua.

Otra propiedad que no presentó dependencia significativa (p>0.05) al contenido de encapsulado adicionado fue el índice de solubilidad en agua (Apéndice 10.3.4) observándose valores aproximados a 0.24, siendo este valor menor al índice reportado en otros extrudidos (Hashimoto *et al.*, 2003), pero mayor a los reportados en procesos de extrusión con alto contenido de humedad en la mezcla alimentada (Govindasamy *et al.*, 1996) y en la obtención de botanas extrudidas (Altan *et al.*, 2008; Sacchetti *et al.*, 2004). Éste parámetro no fue afectado debido a que la solubilidad en los cereales extrudidos es causada por la cantidad de moléculas solubles presentes en el extrudido obtenido y estas moléculas solubles son producto de la degradación del almidón en el proceso de extrusión. Sin embargo en esta etapa experimental las condiciones de extrusión que causan degradación del almidón tales como la velocidad del tornillo (Wen *et al.* 1990) y la temperatura (Jin *et al.*, 1994) se mantuvieron fijas. El índice de solubilidad presentó una correlación positiva con el índice de absorción de agua, índice de expansión y parámetros de color L^* y b^* . Mientras que negativamente se correlacionó con los contenidos de polifenoles totales, betacianinas, betaxantinas, actividad antioxidante y

fibra soluble así como otras propiedades físicas como a^* , densidad, dureza y crujibilidad de los cereales (Tabla 20).

Por otra parte, la densidad de los cereales fue afectada significativamente ($p < 0.05$) por la contenido de encapsulado (Apéndice 10.3.4) adicionado a la mezcla base, los valores de densidad obtenidos se encuentran entre 0.08 y 0.31 g/cm³ y se observa que el incremento en el porcentaje de encapsulado en el material de extrusión provoca un aumento en la densidad de los cereales, esto es debido a que al incrementar el porcentaje de encapsulado a la mezcla hay un incremento en la presencia de azúcares y fibra los cuales reemplazan el contenido de almidón (Anderson *et al.*, 1981). Resultados similares fueron obtenidos por Altan *et al.*, (2008) reportando que incrementos en nivel de pulpa de tomate causa un incremento en la densidad aparente de extrudidos, al igual que en lo reportando por El-Samahy *et al.*, 2007 donde fue encontrando que incremento en la adición de concentrados de tuna incrementa la densidad aparente de los productos obtenidos. La densidad de los cereales presentó una correlación positiva con los contenidos de betacianinas, betaxantinas, polifenoles totales, actividad antioxidante, fibra soluble así como con las propiedades físicas a^* , dureza y crujibilidad. Además, mostró una correlación negativa con el índice de expansión, L^* , b^* , $croma^*$, h^* , índices de solubilidad y absorción de agua (Tabla 20).

Otras características de los cereales que fueron significativamente ($p < 0.05$) afectadas por el porcentaje de encapsulado adicionado a la mezcla de extrusión fueron los índices de expansión y de absorción de agua (Apéndice 10.3.4). El índice de expansión está relacionado con el tamaño, número y distribución de las cámaras de aire rodeadas por la matriz cocida (Lue *et al.*, 1990). Este índice mostró valores de 4.66 a 11.6 (Tabla 13), observándose que un aumento en la concentración de encapsulado causa una disminución en la expansión del cereal. Valores similares de índice de expansión a los encontrados en este estudio fueron reportados por Yanniotis *et al.*, (2007), quienes reportan índices entre 6 y 10.5 en extrudidos elaborados utilizando almidón/pectina/fibra y por Ali *et al.* (1996) en sémola de maíz. Se puede observar que el aumento en la concentración de encapsulado causa una disminución en la expansión del cereal. Esta tendencia puede ser debido al efecto de dilución que causa el

encapsulado en el almidón (Altan *et al.*, 2008; El-Samahy *et al.*, 2007), es decir el contenido de almidón es menor a medida que el contenido de encapsulado se incrementa en la mezcla; otra probable explicación es que en la mezcla se tienen polisacáridos que no son almidón, estos tienen la capacidad de hidratarse y competir con el almidón por el agua en la salida del extrusor restringiendo con ello el proceso de gelatinización del almidón (Yanniotis *et al.*, 2007; El-Samahy *et al.*, 2007). Este mismo comportamiento fue reportado por otros autores (Altan *et al.*, 2008; El-Samahy *et al.*, 2007; Yanniotis *et al.*, 2007). El índice de expansión se correlacionó positivamente con las propiedades L^* , b^* , $croma^*$, h^* e índices de solubilidad y absorción de agua, y presentó una correlación negativa con los contenidos de betacianinas, betaxantinas, polifenoles totales, actividad antioxidante y fibra soluble, así como con las propiedades físicas a^* , dureza y crujibilidad de los cereales (Tabla 20).

El índice de absorción de agua (IAA), presentó el mismo comportamiento que el índice de expansión, es decir, fue afectado significativamente ($p < 0.05$) por el porcentaje de encapsulado en la mezcla de extrusión (Apéndice 10.3.4). Los valores determinados para este parámetro se encuentran en un rango de 4.81 a 6.04 (Tabla 13), encontrando que el incremento del encapsulado causa una disminución en dicho índice. Este efecto ha sido reportado por otros autores en diferentes tipos de extrudidos (Jin *et al.*, 1995; Altan *et al.*, 2008) y ha sido atribuido a un efecto de dilución del contenido de almidón en el cereal. Adicionalmente el contenido de fibra soluble presente en el encapsulado puede haber competido con el almidón por el agua al momento de la expansión a la salida del extrusor, afectando de manera negativa el proceso de gelatinización del almidón y la dextrinización del mismo, lo que lleva a la obtención de productos extrudidos con una menor capacidad para absorber agua (Altan *et al.*, 2008). El índice de absorción de agua presentó solo correlaciones positivas con el índice expansión, L^* , b^* , h^* e índice de solubilidad en agua, y correlaciones negativas con los contenidos de betacianinas, betaxantinas, polifenoles totales, fibra soluble y actividad antioxidante, además con las propiedades físicas de densidad, a^* , dureza y crujibilidad de los cereales (Tabla 20).

El IAA presentado es una referencia de la cantidad agua que pueden absorber los productos extrudidos, sin embargo esta prueba se hace en el producto molido y no podemos observar como se comporta dicha absorción cuyo el cereal entero es inmerso en un medio líquido, lo cual representa la manera general de consumir el cereal para desayuno, por lo que también fue realizada una cinética de absorción de agua y de leche utilizando los cereales enteros. La prueba de absorción de leche se realizó en cereales que fueron recubiertos con una capa de dulce, que es como se presentan muchos de los cereales listos para consumo. En la Figura 34 se muestran las cinéticas de absorción de agua y leche, respectivamente, a 4 °C, ya que es la temperatura de refrigeración a la cual se debe conservar la leche.

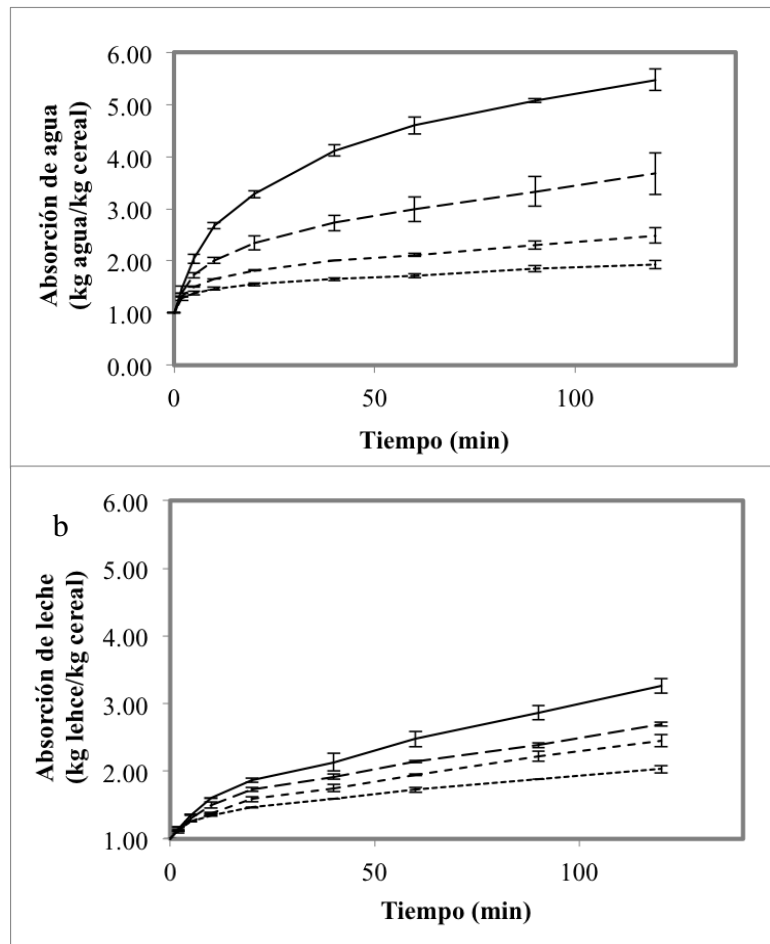


Figura 34. Cinéticas de absorción de: a. Agua y b. Leche de cereales elaborados con —0%, —2.5%, - -5.0% y7.5% de encapsulado de tuna roja

En la cinética de absorción de agua se muestra como el incremento en el contenido de encapsulado de tuna roja adicionado a la mezcla de extrusión disminuye la capacidad de absorber el agua, este mismo comportamiento fue observado en el IAA. Dicha tendencia se puede explicar por efecto de la dilución del contenido de almidón en el cereal cuyo se adiciona un mayor contenido de otro componente, en este caso de polvo de tuna roja; además de que la fibra soluble presente en el encapsulado puede competir con el almidón por el agua al momento de la expansión a la salida del extrusor, afectando de manera negativa el proceso de gelatinización del almidón y la dextrinización del mismo, lo que lleva a la obtención de productos extrudidos con una menor capacidad para absorber agua (Altan *et al.*, 2008).

Una tendencia similar fue observada en la cinética de absorción de leche obtenida, sin embargo la cantidad de agua absorbida es aproximadamente el doble que la cantidad de leche absorbida, esto es causado por la capa dulce con la que fue recubierto el cereal protegiéndolo del ablandamiento. En ambas cinéticas se puede observar que hasta los 120 min de inmersión los cereales no habían llegado al máximo de líquido absorbido, esto es un indicativo de que los cereales mantienen su firmeza o dureza por largo tiempo, característica probablemente deseable en consumidores que gustan de cereales crujientes.

El color es un parámetro de calidad muy importante en los cereales para desayuno, esta propiedad se relaciona con la aceptabilidad de los productos ya que es una de las características que se encuentra en contacto directo con el consumidor, en este caso la coloración de los cereales es mediante pigmentos naturales. En la Tabla 14 se muestran los parámetros de color determinados en los cereales obtenidos, todas las características de color fueron afectadas significativamente ($p < 0.05$) por el porcentaje de encapsulado adicionado a la mezcla de extrusión. El incremento en el encapsulado causó disminución de los parámetros luminosidad (L^*), la tendencia al amarillo (b^*), la intensidad o saturación del color ($croma^*$) así como la pureza del color (h^*).

TABLA 14
CARACTERÍSTICAS DE COLOR* DE LOS CEREALES OBTENIDOS A
DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ENCAPSULADO DE TUNA ROJA

Encapsulado (%)	L^*	a^*	b^*	$Croma^*$	h^*
0	89.5 ± 0.42 ^a	-3.7 ± 0.04 ^d	52.8 ± 0.26 ^a	52.9 ± 0.26 ^a	85.9 ± 0.03 ^a
2.5	76.6 ± 2.25 ^b	15.3 ± 2.30 ^c	36.5 ± 1.17 ^b	39.6 ± 0.38 ^b	67.1 ± 3.69 ^b
5.0	67.6 ± 0.88 ^c	27.2 ± 0.46 ^b	25.7 ± 0.34 ^c	37.5 ± 0.55 ^c	43.3 ± 0.25 ^c
7.5	61.3 ± 1.03 ^d	32.3 ± 0.69 ^a	21.9 ± 0.82 ^d	39.0 ± 1.01 ^b	34.1 ± 0.53 ^d

* Media ± desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey.

Los valores de L^* se encuentran en un rango de 61.32 a 89.57, este parámetro tendió a disminuir con el incremento en el encapsulado en la mezcla, lo cual se esperaba debido al color que presentó en polvo encapsulado (Tabla 4). El parámetro b^* mostró valores de 21.92 a 52.85, este parámetro fue disminuyendo con la adición de encapsulado debido en parte probablemente a la dilución del color amarillo que presentó la sémola de maíz utilizada por acción del color con alta tendencia al rojo del encapsulado y a la reducción de componentes que presentan coloraciones en la gama de color amarillo-naranja como las betaxantinas y los polifenoles, los cuales fueron afectados significativamente ($p < 0.05$) por el proceso de extrusión-cocción (Figura 25 y 27). Este mismo efecto fue observado en extrudidos obtenidos con harina de maíz y polvos de frutas (Camire *et al.*, 2007). Mientras que el $croma^*$ y h^* presentaron valores de 39.04 a 52.99 y de 34.15 a 81.91, respectivamente, estos también disminuyeron con el incremento en el porcentaje de encapsulado de la mezcla, esto se relaciona con el comportamiento de la tendencia al amarillo, ya que dichos parámetros dependen de b^* y a^* . En h^* , se observa que en el cereal al que no le fue adicionado encapsulado presenta valores cercanos la color amarillo puro (Figura 14), mientras que con la adición del encapsulado h^* presentó una tendencia al rojo puro y magenta puro (Figura 14). Los parámetros de color L^* , b^* , $croma^*$ y h^* mostraron el mismo tipo de correlaciones, de tipo positivo con las propiedades físicas de índice de expansión, L^* , b^* , $croma^*$, h^* e índices de solubilidad y absorción de agua y de tipo negativo con los contenidos de

betacianinas, betaxantinas, polifenoles totales, fibra soluble y actividad antioxidante, además con las propiedades físicas de densidad, dureza y crujibilidad de los cereales (Tabla 20).

Por otra parte, a^* fue incrementada con el aumento en el porcentaje de encapsulado en la mezcla, lo que era de esperarse ya que el polvo encapsulado adicionado presenta un alto contenido de betalainas, las cuales presentan colores con mayor tendencia al rojo-púrpura.

El mismo comportamiento en los parámetros de color fue reportado en botanas extrudidas obtenidas con pulpa de tomate (Altan *et al.*, 2008), castaña (Sacchetti *et al.*, 2004) y extrudidos adicionados con concentrados tuna (El-Samahy *et al.*, 2008). a^* mostró la tendencia contraria a los demás parámetros de color por lo que se correlacionó positivamente con los contenidos de betacianinas, betaxantinas, polifenoles totales, fibra soluble y actividad antioxidante, además con las propiedades físicas de densidad, dureza y crujibilidad de los cereales. Mientras que presentó correlaciones negativas con las propiedades físicas de índice de expansión, b^* , $croma^*$, h^* e índices de solubilidad y absorción de agua (Tabla 20).

Otra característica de calidad importante en los cereales para desayuno es la textura, en la Figura 35 se muestra una gráfica de fuerza (N) contra el tiempo (s). Mientras que Tabla 15 muestra los valores de dureza y crujibilidad obtenidos con los diferentes porcentajes de encapsulado adicionado.

La dureza de los cereales para desayuno presentó valores de 9.81 a 59.47 N, mientras que la crujibilidad mostró valores de 30.97 a 213.44 N·mm, estos se encuentran en el rango de valores reportados para botanas expandidas a base de arroz (Ding *et al.*, 2005). En la Tabla 15 se observa como la adición del encapsulado en la sémola provocó aumento tanto en la dureza como en la crujibilidad de los cereales, esto puede ser debido a que al incrementar el porcentaje de encapsulado el porcentaje de fibra también fue aumentado, lo cual tuvo impacto en los productos obteniéndose cereales más densos y menos expandidos (Tabla 13). Esto es atribuido a que el contenido de fibra en la mezcla compite con el almidón por el agua en la salida del extrusor restringiendo con ello el proceso de gelatinización del almidón y dextrinización permitiendo cereales más

compactos (Yanniotis *et al.*, 2007; El-Samahy *et al.*, 2007), derivando en matrices menos porosas causando extrudidos más duros y crujientes. Este mismo comportamiento fue reportado para extrudidos a base de maíz con adición de fibra de trigo (Yanniotis *et al.*, 2007) y botanas extrudidas obtenidas usando pulpa de tomate (Altan *et al.*, 2008).

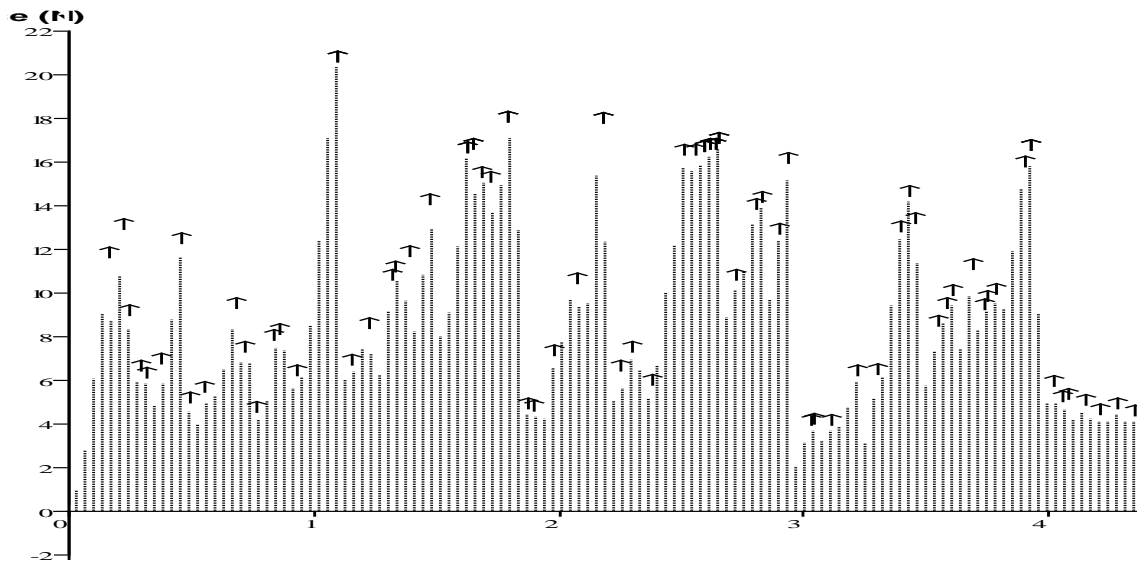


Figura 35. Gráfico de textura obtenido de cereal para desayuno pigmentado con encapsulado de tuna roja

TABLA 15
TEXTURA* DE CEREALES PARA DESAYUNO
OBTENIDOS CON DIFERENTES CONTENIDOS DE
ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA

Encapsulado (%)	Dureza (N)	Crujibilidad (N·mm)
0	9.81 ± 2.13 ^d	30.97 ± 5.75 ^d
2.5	17.10 ± 3.46 ^c	59.85 ± 7.58 ^c
5	37.51 ± 5.26 ^b	151.27 ± 5.87 ^b
7.5	59.47 ± 8.64 ^a	213.44 ± 19.89 ^a

*Media ± desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey.

La textura, tanto dureza como crujibilidad, presentaron correlaciones positivas con las propiedades de densidad, a^* y fibra soluble, y correlaciones negativas con las propiedades de índice de expansión, L^* , b^* , $croma^*$, h^* e índices de solubilidad y de absorción de agua, además con los contenidos de betacianinas, betaxantinas, polifenoles totales y actividad antioxidante (Tabla 20).

Por otra parte los contenidos de polifenoles totales, betacianinas y betaxantinas así como la actividad antioxidante de las mezclas y de los cereales para desayuno obtenidos se muestra en la Tabla 16. Como era de esperarse, el incremento en el porcentaje de encapsulado de tuna roja adicionado a la mezcla a extrudir, condujo a un incremento en las propiedades químicas mencionadas tanto en las mezclas como en los cereales para desayuno obtenidos. Sin embargo, en los cereales se observaron reducciones en los contenidos de los polifenoles totales, betacianinas y betaxantinas debido al proceso de extrusión. Estas reducciones concuerdan con los resultados presentados en las Figuras 25, 26, 27 y 28 para polifenoles totales, actividad antioxidante, betaxantinas y betacianinas, respectivamente. Todos estos componentes presentes en los cereales mostraron correlaciones positivas entre ellas además de con las propiedades de densidad, a^* , dureza, crujibilidad y contenido de fibra soluble, y se correlacionaron negativamente con las características de índice de expansión, L^* , b^* , $croma^*$, h^* e índices de solubilidad y absorción de agua (Tabla 20).

Otros de los componentes en el polvo encapsulado de tuna roja utilizado para pigmentar los cereales para desayuno fueron los flavonoides quercetina, kaempferol e isoharmetina, sin embargo estos no fueron cuantificables ya que no fueron detectados en ninguno de los cereales obtenidos durante el análisis, debido a que estos componentes se encuentran en contenido muy bajo.

TABLA 16
ANÁLISIS QUÍMICO* DE CEREALES OBTENIDOS UTILIZANDO
DIFERENTES PORCENTAJES DE ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA

Encapsulado (%)	PT (EAG/100 g)	AA ($\mu\text{mol/g}$)	BC (mg/100g)	BX (mg/100g)
0	0.7515 \pm 0.01 ^d	2.638 \pm 0.17 ^d	nd	nd
2.5	1.0381 \pm 0.02 ^c	3.962 \pm 0.02 ^c	0.8430 \pm 0.01 ^c	0.4993 \pm 0.07 ^c
5.0	1.6119 \pm 0.02 ^b	6.084 \pm 0.09 ^b	2.5364 \pm 0.86 ^b	1.3521 \pm 0.04 ^b
7.5	2.3091 \pm 0.08 ^a	7.398 \pm 0.46 ^a	4.1845 \pm 0.12 ^a	2.1287 \pm 0.06 ^a
Mezcla (%)				
0	0.9096 \pm 0.07 ^d	1.5887 \pm 0.52 ^d	nd	nd
2.5	1.7510 \pm 0.03 ^c	2.7540 \pm 0.12 ^c	1.6401 \pm 0.04 ^c	0.7392 \pm 0.02 ^c
5.0	2.5925 \pm 0.07 ^b	3.9196 \pm 0.25 ^b	3.2803 \pm 0.08 ^b	1.4784 \pm 0.03 ^b
7.5	3.4339 \pm 0.09 ^a	5.0846 \pm 0.37 ^a	4.9204 \pm 0.12 ^a	2.2176 \pm 0.05 ^a

* Media \pm desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey.

En análisis proximal de los cereales se muestra en la Tabla 17 se observa que los contenidos de fibra insoluble, fibra soluble y canizas presentan dependencia significativa ($p < 0.05$) al porcentaje de polvo encapsulado de tuna roja adicionado. Se observa que al incrementar el contenido de encapsulado en el extrudido se produce una disminución en el contenido de fibra insoluble, presentándose el mayor contenido de este tipo de fibra en el cereal que no fue extrudido utilizando polvo encapsulado (0%) con un contenido promedio de 3.77%, esto se debe a que en los encapsulados el contenido de fibra no es una cantidad importante (Tabla 2), comparado con el contenido de fibra soluble presente en el polvo encapsulado, ya que el encapsulado de tuna roja fue secado utilizando como acarreador fibra soluble (con 2.5, 5.0 y 7.5%) y debido a ello ésta última fue incrementada al aumentar el porcentaje de encapsulado adicionado a la mezcla para la elaboración de los cereales.

El contenido de fibra soluble presentó correlaciones positivas con los contenidos de betacianinas, betaxantinas, polifenoles totales y actividad antioxidante, además de con las propiedades físicas de densidad a^* , dureza y crujibilidad. Mientras que mostró

correlaciones negativas con las propiedades de índice de expansión, L^* , b^* , $croma^*$, h^* e índices de solubilidad y de absorción de agua de los cereales (Tabla 20).

TABLA 17
ANÁLISIS PROXIMAL* DE CEREALES PIGMENTADOS CON ENCAPSULADO DE TUNA ROJA

Encapsulado (%)	Proteína (%)	Grasa (%)	Fibra (%)		Cenizas (%)	CHO's (%)
			Insoluble	Soluble		
0	6.19 ± 0.05 ^a	0.20 ± 0.03 ^b	3.77 ± 0.19 ^a	~ 0.0 ^d	0.35 ± 0.01 ^d	80.17 ^a
2.5	6.24 ± 0.17 ^a	0.18 ± 0.04 ^b	3.67 ± 0.15 ^a	0.36 ± 0.09 ^c	0.45 ± 0.06 ^c	79.79 ^a
5.0	5.92 ± 0.16 ^a	0.42 ± 0.01 ^a	3.39 ± 0.20 ^{ab}	0.87 ± 0.18 ^b	0.58 ± 0.02 ^b	78.51 ^a
7.5	6.76 ± 0.06 ^a	0.44 ± 0.06 ^a	2.91 ± 0.12 ^b	1.66 ± 0.15 ^a	0.84 ± 0.01 ^a	78.06 ^a

* Media ± desviación estándar; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Tukey, CHO's = Carbohidratos (por diferencia)

El consumo de fibra soluble recomendado por la FAO para que este sea capaz de producir efectos fisiológicos benéficos en la salud es de 3 g/día, por lo que con el cereal elaborado con 7.5% de fibra soluble se puede llegar a consumir casi la tercera parte de la recomendación diaria solo en el desayuno, por una porción de cereal para un adulto, además de que conserva la relación de recomendada para las proporciones de fibra insoluble:soluble (3:1).

El uso de polvos encapsulados de tuna roja para la pigmentación de cereales para desayuno tiene muchos beneficios ya que contiene fibra soluble, pigmentos naturales y polifenoles que presentan actividad antioxidante, sin embargo a pesar de las propiedades funcionales o beneficios que pueda presentar el cereal el consumo de este tipo de productos depende en gran manera de la aceptación del consumidor. Entonces, debido a la importancia que tiene la aceptación del consumidor, los cereales obtenidos fueron evaluados sensorialmente para las características de textura, color, sabor y olor, mediante un panel de jueces consumidores. En la Tabla 18 se presentan los resultados obtenidos de dicho análisis.

TABLA 18
ANÁLISIS SENSORIAL* DE CEREALES PARA DESAYUNO
PIGMENTADOS CON ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA

Encapsulado (%)	Característica			
	Textura	Color	Sabor	Olor
0	4.0 ^a	3.5 ^a	3.7 ^a	3.4 ^a
2.5	4.0 ^a	3.4 ^a	3.5 ^a	3.5 ^a
5.0	3.0 ^b	3.4 ^a	3.3 ^a	3.4 ^a
7.5	3.0 ^b	3.8 ^a	2.7 ^a	3.5 ^a

*Mediana; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Friedman

La evaluación de textura mostró diferencia significativa ($p < 0.05$) (Apéndice 10.3.4), dividiendo los cereales en dos grupos: con bajo porcentaje (0 y 2.5%) y con alto porcentaje (5.0 y 7.5%) de encapsulado, presentándose diferencia entre estos dos grupos. Siendo los cereales más duros los que se elaboraron con mayor contenido de encapsulado, lo anterior de acuerdo a los comentarios de los consumidores. Un comportamiento similar fue observado en el análisis objetivo de textura (Tabla 15), el cual mostró que al aumentar el contenido de fibra la dureza de los cereales fue incrementada, sin embargo mediante la determinación instrumental de la textura se encontraron diferencias entre los cuatro cereales obtenidos (0, 2.5 , 5.0 y 7.5% de encapsulado).

Mientras que en las características de color, sabor y olor no se encontraron diferencia significativas ($p > 0.05$) de acuerdo a la evaluación realizada por los consumidores. En el caso del color se encontró que a muchos de los consumidores les gustó más el color rojo-rosado que presentaron los cereales con mayor contenido de encapsulado, mientras que otra parte de consumidores manifestó un mayor gusto por los cereales con color rosado que presentaron los cereales con menor contenido de encapsulado (2.5%) o hasta preferencia sobre los cereales de color amarillo (color de la sémola) obtenidos sin adicionar el encapsulado. Esto hace que el color no sea una característica que cause diferencia significativa aunque los parámetros de color determinados sean distintos significativamente ($p < 0.05$) (Tabla 14). Esta misma

tendencia se observó en el sabor. Sin embargo, en el caso de la característica del olor, ésta no presentó diferencias debido a que en los cereales no se percibió ningún olor diferente por adición del encapsulado, siendo la mayoría de los comentarios de los jueces consumidores que no se lograba percibir algún olor especial, simplemente detectaron un olor a cereal de maíz para todos los productos presentados.

Posteriormente, se pidió a los jueces consumidores eligieran el cereal de su preferencia, tanto al probar el cereal solo como acompañado con leche, ya que los cereales para desayuno se consumen generalmente junto con leche. En la Tabla 19 se muestra como la preferencia en el cereal fue afectada por el tipo de consumo (solo o acompañado), cuyo el cereal se consumió solo se encontraron diferencias entre los diferentes tipos de cereales, siendo el producto más aceptado el elaborado con 2.5% de encapsulado, este fue elegido por presentar una textura menos dura que los que los obtenidos con 5.0 y 7.5% y un color más apetecible que el que fue elaborado sin pigmento (0% de encapsulado).

TABLA 19
PRUEBA DE ACEPTACIÓN* SENSORIAL DE
CEREALES PARA DESAYUNO PIGMENTADOS CON
ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA

Encapsulado (%)	Tipo de consumo	
	Cereal solo	Cereal con leche
0	2.1 ^a	2.0 ^b
2.5	1.6 ^b	2.0 ^b
5.0	2.9 ^a	3.0 ^a
7.5	3.9 ^a	4.0 ^a

*Mediana; Valores con letra diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), mediante prueba de Friedman

Cuyo el cereal fue degustado acompañado con leche los cereales elaborados sin pigmento y con 2.5% de polvo encapsulado de tuna roja fueron los más aceptados, ésto por la textura que se logra al combinar el cereal con la leche, ya que de acuerdo a los comentarios de los evaluadores la textura de ambos fue más suave cuyo se sumerge en la

leche, mientras que los cereales obtenidos con mayores porcentajes de encapsulado de tuna roja no se reblyecen tan fácilmente. Esto está relacionado con los datos obtenidos en las cinéticas de absorción de leche mostradas en la Figura 34, presentándose una mayor capacidad de absorción de leche en los cereales con bajo contenido de encapsulados (0 y 2.5%) en comparación con los cereales con mayor contenido del mismo. Desafortunadamente, la elección de los consumidores favoreció al cereal con menor contenido de fibra soluble, y al consumir dicho cereal en el desayuno solo se estaría consumiendo alrededor del 6% de la recomendación de fibra soluble diaria, sin embargo como en la elaboración del cereal se utilizó sémola de maíz, la cual presentó un buen contenido de fibra insoluble, el consumo de fibra dietaría total es de aproximadamente 2 g (Tabla 17), lo que hace más atractivo el cereal, ya que aporta 10% de la recomendación diaria de fibra dietaría solo aportada por el cereal.

Finalmente, se realizó una prueba biológica con los cereales obtenidos, para evaluar el efecto del consumo frecuente de dichos cereales sobre propiedades específicas como glucosa, colesterol y triglicéridos en sangre, utilizando como modelo animal ratas.

El efecto del consumo de los diferentes cereales para desayuno sobre la glucosa se muestra en la Figura 36, se observa que al inicio del consumo aparentemente hay una diferencia en el cereal elaborado con 2.5% de encapsulado mostrando una mayor concentración al inicio. sin embargo, todos los cereales y los tiempos presentaron concentraciones de glucosa mucho más bajas que los determinados en las ratas alimentadas con dicho cereal, por lo que el individuo pudo ser un factor para presentar valores tan altos de glucosa.

Durante el tiempo de consumo no se encontraron diferencias, aunque el menor contenido de glucosa fue determinado en las ratas alimentadas con el cereal elaborado con 7.5% de encapsulado de tuna roja, lo que puede indicar efecto del consumo de éste sobre el nivel de glucosa. Ésto puede ser debido a que este cereal presentó un mayor contenido de fibra soluble (Tabla 17), lo cual ha relacionado con la generación de productos de alta viscosidad en la ingesta modulando la absorción de glucosa (Wolever,

1994). Sin embargo la disminución en la glucosa es ligero ya que el contenido de fibra soluble es poco en comparación con fibra soluble administrada en otros estudios.

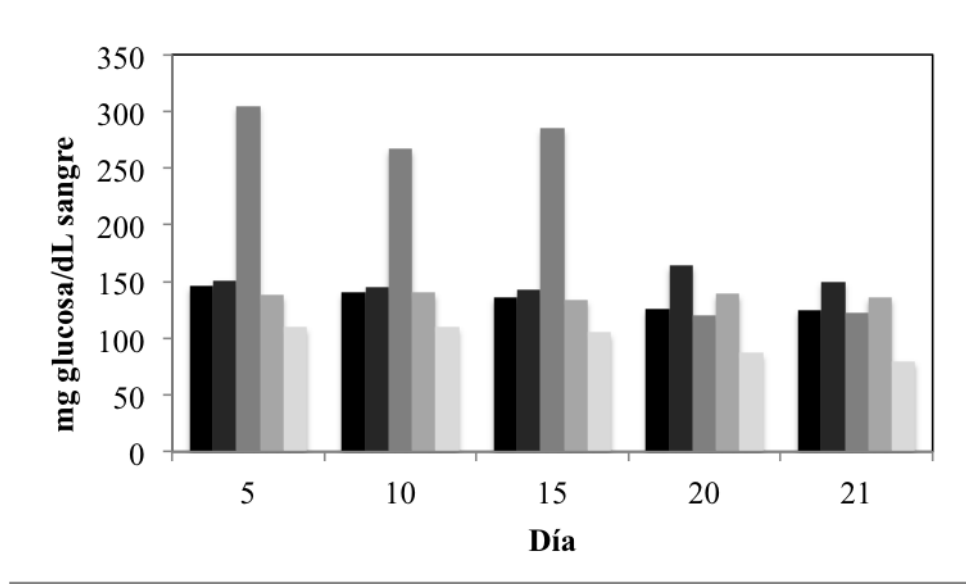


Figura 36. Concentración de glucosa en sangre de ratas alimentadas con cereales elaborados con ■ control, ■ 0%, ■ 2.5%, ■ 5.0% y ■ 7.5%

Es importante resaltar que las ratas que fueron alimentadas con el cereal elaborado con menor porcentaje de encapsulado, es decir el que tenía menor contenido de fibra soluble, comieron más cantidad de cereal que las alimentadas con los cereales con mayor contenido de fibra. Éste comportamiento puede estar relacionado con la sensación de saciedad que causa la fibra en el organismo. Por lo que al consumir una mayor cantidad de cereal, también aumento la cantidad total de fibra ingerida a niveles semejantes a los consumidos por los demás sujetos, es por ello que se obtuvieron resultados similares en concentración de glucosa en sangre.

En botanas extrudidas elaboradas con cebada y champiñones, se obtuvieron productos altos en fibra soluble y se demostró que causa disminución en la tasa de liberación de glucosa durante el consumo, sin embargo en dicho estudio, fueron adicionadas mayores porcentajes de fibra soluble (Brennan *et al.*, 2013). Mientras que en cereales para desayuno se han adicionado 4 a 8 g de fibra soluble (β -glucanos) mediante

salvado de avena encontrando reducciones significativas de la respuesta a la glucosa durante el consumo (Tappy *et al.*, 1993), sin embargo en otros cereales para desayuno probados con un menor contenido de fibra (3.7 g) han mostrado un menor efecto en la respuesta a la glucosa (Jenkis *et al.*, 2002).

Además de que ha sido reportado que el efecto fisiológico del consumo de productos con fibra soluble no solo depende de la dosis consumida si no también de forma en la que se presenta el alimento (Holm *et al.*, 1992).

Por otra parte, el efecto del consumo de los cereales sobre el colesterol en sangre mostró diferencias respecto a los cereales probados y se observa una reducción respecto al tiempo (Figura 37). Sin embargo, parte de la reducción del colesterol sérico no es debida a la formulación de los cereales ya que el consumo del control de caseína presentó el mismo comportamiento. A pesar de esto, en las ratas en las que se consumió cereal con los diferentes contenidos de encapsulados se determinaron valores de colesterol por debajo de 50 mg de colesterol/ dL de sangre.

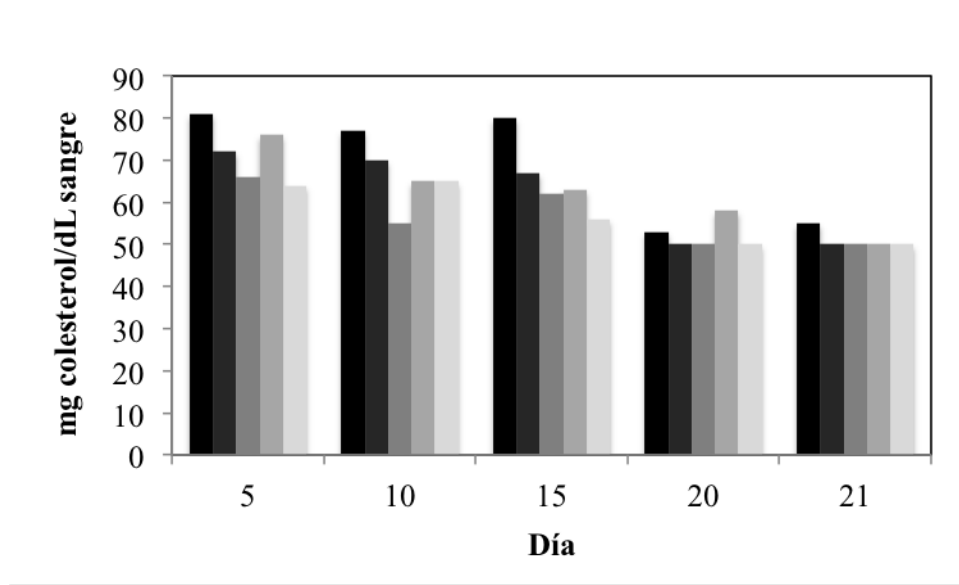


Figura 37. Concentración de colesterol en sangre de ratas alimentadas con cereales elaborados con ■ control, ■ 0%, ■ 2.5%, ■ 5.0% y ■ 7.5%

Esto puede ser un indicativo del efecto del consumo de cereales que contienen fibra dietaria y en específico fibra soluble, ya que esta última ha sido relacionada con la reducción de los niveles de colesterol ya que la fibra es degradada por las bacterias presentes en el intestino grueso produciendo ácidos grasos de cadena corta que llegan al hígado inhibiendo la síntesis de colesterol, además de que la excreción aumentada de bilis eventualmente reduce drásticamente los almacenes corporales de colesterol los cuales son vaciados para sintetizar ácidos biliares (Riaz, 2000). La falta de efecto evidente en algunos estudios sobre la reducción de colesterol puede ser porque el nivel de colesterol en la sangre está regulada por varios mecanismos que incluyen: la absorción, síntesis, limpieza de hígado, el catabolismo, la secreción y excreción fecal (Ji *et al.*, 2012). Por lo que en algunos estudios se ha atribuido a la falta de suficiente fibra soluble (β -glucano) en la dieta (Leadbetter *et al.*, 1991), a problemas con la solubilidad y peso molecular del producto utilizado en el estudio (Törrönen *et al.*, 1992), así como con la naturaleza de los sujetos utilizados (Swain *et al.*, 1990). Sin embargo, la habilidad de los polisacáridos de alta viscosidad de reducir los niveles de colesterol es bien conocida (Anderson *et al.*, 1990) pero se ha reportado una disminución de niveles de colesterol y triglicéridos con dietas ricas en amilosa retrogradada (Mikulíková *et al.*, 2008), así como la disminución en el riesgo de enfermedades del corazón por el consumo de avena, grano en el cual es contenido de fibra soluble es alto, declarado por la FDA (1997).

El efecto del consumo de los cereales sobre los triglicéridos se muestra en la Figura 38, se observa una disminución en la concentración de triglicéridos en sangre, sin embargo esta no puede ser debida por la presencia de fibra de los cereales, ya que el mismo efecto es observado cuyo se suministro el control (caseína), además de que el cereal que mostró la mayor reducción en la concentración de triglicéridos fue el elaborado sin pigmento (encapsulado de tuna roja). Aunque se ha reportado que la disminución en el colesterol causa aumento en la concentración de triglicéridos (Hicks *et al.*, 1995) durante el presente estudio no se precisó la disminución de colesterol, por lo que no se puede establecer una relación con los triglicéridos en sangre determinados.

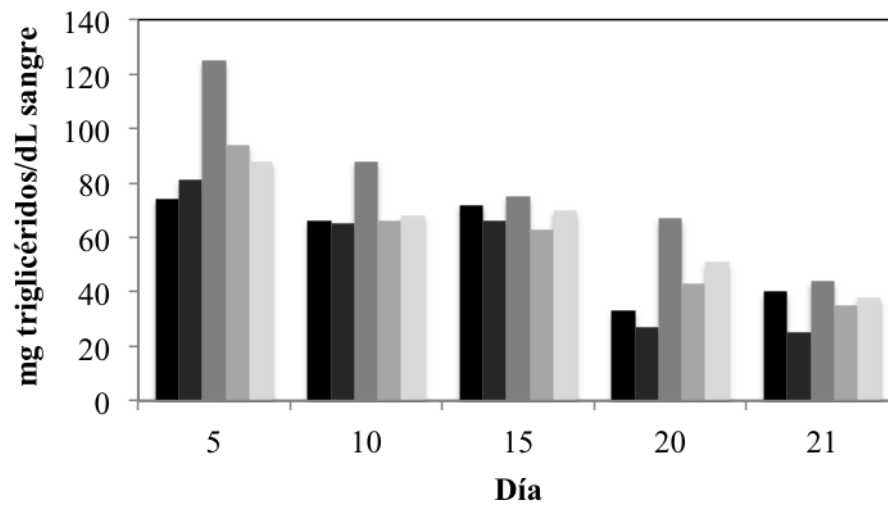


Figura 38. Concentración de triglicéridos en sangre de ratas alimentadas con cereales elaborados con ■ control, ■ 0%, ■ 2.5%, ■ 5.0% y ■ 7.5%

TABLA 20
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARA LAS VARIABLES DETERMINADAS EN CEREALES PARA DESAYUNO PIGMENTADOS CON
ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA

	DA	IE	BC	BX	L*	a*	b*	Croma*	H*	ISA	IAA	PT	AA	D	Cr	FI
IE	-0.964**	← Coeficiente de Pearson														
	0	← Probabilidad														
BC	0.995**	-0.98**														
	0	0														
BX	0.99**	-0.986**	0.999**													
	0	0	0													
L*	-0.928**	0.978**	-0.954**	-0.964**												
	0.001	0	0	0												
a*	0.888**	-0.962**	0.92**	0.934**	-0.993**											
	0.003	0	0.001	0.001	0											
b*	-0.887**	0.966**	-0.921**	-0.936**	0.991**	-0.998**										
	0.003	0	0.001	0.001	0	0										
Croma*	-0.633*	0.794**	-0.698*	-0.726**	0.865**	-0.911**	0.916**									
	0.092	0.019	0.054	0.041	0.006	0.002	0.001									
H*	-0.945**	0.987**	-0.964**	-0.972**	0.993**	-0.984**	0.984**	0.833**								
	0	0	0	0	0	0	0	0.01								
ISA	-0.845**	0.758**	-0.832**	-0.823**	0.747**	-0.699*	0.707*	0.45 ^{ns}	0.785**							
	0.008	0.029	0.01	0.012	0.033	0.054	0.05	0.263	0.021							
IAA	-0.977**	0.974**	-0.976**	-0.977**	0.936**	-0.915**	0.918**	0.697 ^{ns}	0.967**	0.841**						
	0	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.055	0	0.009						
PT	0.989**	-0.973**	0.994**	0.994**	-0.961**	0.931**	-0.928**	-0.714**	-0.965**	-0.814**	-0.97**					
	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.047	0	0.014	0					
AA	0.973**	-0.988**	0.982**	0.986**	-0.975**	0.959**	-0.955**	-0.766**	-0.985**	-0.779**	-0.98**	0.988**				
	0	0	0	0	0	0	0	0.027	0	0.023	0	0				
D	1**	-0.964**	0.995**	0.991**	-0.932**	0.893**	-0.892**	-0.641*	-0.948**	-0.843**	-0.977**	0.992**	0.976**			
	0	0	0	0	0.001	0.003	0.003	0.087	0	0.009	0	0	0			
Cr	0.994**	-0.981**	0.996**	0.995**	-0.95**	0.918**	-0.921**	-0.692*	-0.969**	-0.853**	-0.99**	0.987**	0.983**	0.993**		
	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.057	0	0.007	0	0	0	0		
FI	0.065 ^{ns}	0.161 ^{ns}	0.019 ^{ns}	-0.014 ^{ns}	0.18 ^{ns}	-0.269 ^{ns}	0.283 ^{ns}	0.484 ^{ns}	0.211 ^{ns}	-0.093 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.034 ^{ns}	-0.111 ^{ns}	0.065 ^{ns}	-0.035 ^{ns}	
	0.879	0.704	0.964	0.974	0.67	0.519	0.497	0.224	0.616	0.826	0.777	0.936	0.794	0.878	0.935	
FS	0.992**	-0.961**	0.994**	0.992**	-0.943**	0.905**	-0.904**	-0.676*	-0.946**	-0.826**	-0.957**	0.996**	0.971**	0.993**	0.984**	0.105 ^{ns}
	0	0	0	0	0	0.002	0.002	0.066	0	0.012	0	0	0	0	0	0.805

DA = Densidad; IE = Índice de expansión; BC = Betacianinas; BX = Betaxantinas; ISA = Índice de solubilidad en agua; IAA = Índice de absorción de agua PT = Polifenoles totales; AA = Actividad antioxidante; D = Dureza; Cr = Crujibilidad; FI = Fibra insoluble; FS = Fibra soluble; *Significativo a $p < 0.1$; **Significativo a $p < 0.05$, mediante correlación de Pearson.

VIII. CONCLUSIONES

La fibra soluble (β -glucanos) es un material que se puede utilizar como agente acarreador para la obtención de polvo encapsulado de tuna roja. La obtención del polvo encapsulado con un mayor contenido de compuestos bioactivos de tuna roja y buenas propiedades físicas fue logrado a una temperatura de entrada del secador de 160 °C y una adición de 22.5 % de fibra soluble.

El proceso de extrusión-cocción tuvo un tiempo de residencia medio de proceso 36.62 a 60.13 s a las diferentes condiciones y afectó de manera importante la retención del contenido de polifenoles totales (36-47%), betacianinas (33-51%), betaxantinas (46-63.5%) y de la actividad antioxidante (55-77%) presentes en el polvo encapsulado de tuna roja. Las mejores condiciones de extrusión fueron a 325 rpm y 100 °C. Los valores de retención de componentes antioxidantes y su actividad fueron superiores a los reportados en otros estudios de extrusión.

El análisis de la degradación de los pigmentos mostró que las constantes de decaimiento de las betacianinas son mayores que las de betaxantinas y que la energía de activación para la degradación de betaxantinas es mayor que la energía de activación de degradación de betacianinas; por lo que las betaxantinas son más susceptibles al aumento de la temperatura durante el proceso de extrusión-cocción.

El cereal desarrollado presentó buenas características de calidad tales como expansión, solubilidad y absorción de agua, densidad y color en comparación a los valores de referencia. Sin embargo, sensorialmente el cereal más aceptado por los consumidores el de menor contenido de polvo de tuna roja (2.5%), por su color rosado y porque presentó una mejor textura, con menos dureza que los cereales con mayor contenido de polvo de tuna roja.

El ensayo biológico del consumo de cereal no mostró efecto sobre el contenido de glucosa, colesterol y triglicéridos en ratas Wistar a los 21 días de consumo. Sin embargo, el cereal obtenido está pigmentado naturalmente y es un cereal funcional ya que contribuye al consumo de fibra diario tanto soluble como insoluble, además de que a través del consumo de éste cereal también se consumen compuestos con actividad biológica como polifenoles y pigmentos que contribuyen a disminuir la presencia de

radicales libres, lo cual contribuye a disminuir el riesgo del padecimiento de ciertas enfermedades

IX. REFERENCIAS

- Abadio FDB, Domingues AM, Borges SV, Oliveira VM. 2002. Physical properties of powdered pineapple (*Ananas comosus*) juice-effect of maltodextrin concentration and atomization speed. *Journal of Food Engineering* 64 3: 285-287.
- Ahmed M, Akter MS, Eun JB. 2010. Impact of amylase and maltodextrine on physicochemical functional and antioxidant capacity of spray-dried sweet potato flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 90: 494-502.
- Alamilla-Beltrán L, Chanona-Pérez JJ, Jiménez-Aparicio AR, Gutiérrez-López GF. 2005. Description of morphological changes of particles along spray drying. *Journal of Food Engineering* 67: 179–184.
- Ali Y, Hanna MA, Chinnaswamy R. 1996. Expansion Characteristics of Extruded Corn Grits. *LWT - Food Science and Technology* 29, 8: 702-707.
- Altan A, McCarthy KL, Maskan M. 2008. Twin-screw extrusion of barley–grape pomace blends: Extrudate characteristics and determination of optimum processing conditions. *Journal of Food Engineering* 89: 24–32.
- Ames BN, Shigenaga MK, Hagen TM. 1993. Oxidants, antioxidants and the degenerative diseases of aging. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 90, 17: 7915-7922.
- Anderson JS and Sunderland R. 2002. Effect of extruder moisture and dryer processing temperature on vitamin C and E and astaxanthin stability. *Aquaculture* 207: 137–149.
- Anderson, JW. 1990. Dietary fibre and human health. *Horticultural Science* 25: 1488–1495
- A.O.A.C. 1998. Official Methods of Analysis of AOAC International. Cunniff, P. (Ed). A.O.A.C International. U. S.A Maryland. 1: 2, 7, 23, 25, 26 y 32.
- Andersson Y, Hedlund L, Svensson S. 1981. Extrusion of a highfiber cereal product with crispbread character. *Cereal Chemistry* 58, 5: 370-374.
- Apruzzese F, Balke ST, Diosady LL. 2000. In-line colour and composition monitoring in the extrusion cooking process. *Food Research International* 33: 621-628.

- Azeredo HMC, Santos AN, Souza ACR, Mendes KCB, Andrade MIR. 2007. Betacyanin stability during processing and storage of a microencapsulated red beetroot extract. *Am. Journal of Food Technology* 2, 4: 307-312.
- Beecher GR. 1999. Phytonutrients role in metabolism: effects on resistance to degenerative processes. *Nutr Rev* 57: 3–6.
- Braun A, Dressler M, Windhab EJ. 2007. Extrusion flow of complex viscoelastic polymer blend model. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanic* doi:10.1016/j.jnnfm.2007.02.01.
- Björck I, and Asp NG. 1983. The effects of extrusion cooking on nutritional value-a literature review. *Journal of Food Engineering* 2, 281–308.
- Brennan C, Brennan M, Derbyshire E, and Tiwari BK. 2011. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. *Trends in Food Science and Technology* 22, 570–575.
- Bucić-Kojić A, Planinić M, Tomas S, Bilić M, Velić D. 2007. Study of solid-liquid extraction kinetics of total polyphenols from grape seeds. *J. Food Eng.* 81: 236-242.
- Buchner N, Krumbein A, Rohn S, Kroh LW. 2006. Effect of thermal processing on the flavonols rutin and quercetin. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 20: 3229-3235.
- Busso CC, Schebor C, Zamora MC, Chirife J. 2007. Glass transition temperatures and some physical and sensory changes in stored spray-dried encapsulated flavors. *Lebensmittel Wissenschaft & Technology* 40: 1792–1797.
- Butera D, Tesoriere L, Di Gaudio F, Bongiorno A, Allegra M, Pintaudi AM, Kohen R, Livrea MA. 2002. Antioxidant activities of sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit extract and reducing properties of its betalains: betanins and indicaxantin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 6895-6901.
- Cai YZ and Corke H. 2000. Production and Properties of Spray-dried Amaranthus Betacyanin Pigments. *Journal of Food Science* 65, 6: 1248-1252.
- Cai YZ, Sun M, Wu H, Huang R, Corke H. 1998. Characterization and quantification of betacyanin pigments from diverse Amaranthus species. *J. Agr. Food Chem.* 46: 2063-2070.

- Candelas-Cadillo MG, Alanís-Guzmán MGJ, Bautista-Justo M, Del Río-Olague F, García-Díaz C. 2005. Contenido de licopeno en jugo de tomate secado por aspersión. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 4: 299-307.
- Cano-Chauca M, Stringheta PC, Ramos AM, Cal-Vidal J. 2005. Effect of carries on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innovative Food Science and Emerging Technology* 5, 4: 420-428.
- Camire ME, Chaovanalikit A, Dougherty MP, and Briggs JL. 2002. Blueberry and grape anthocyanins as breakfast cereal colorants. *Journal of Food Science* 67, 1: 438–441.
- Camire M, Dougherty M, Briggs J. 2007. Functionality of fruit powders in extruded corn breakfast cereals. *Food Chemistry* 101: 765-770.
- Castellanos-Santiago E and Yahia EM. 2008. Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 Mexican prickly pear cultivars by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 56: 5758–5764.
- Casterllar R, Obón, JM, Alacid M, Fernández-Lopéz J. 2003. Color properties and stability of betacyanins from *Opuntia* fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 2772-2776.
- Chandran J, Nisha P, Singhal RS, and Pandit AB. 2012. Degradation of colour in beetroot (*Beta vulgaris* L.): a kinetics study. *Journal of Food Science and Technology*, DOI 10.1007/s13197-012-0741-9.
- Chantaro P, Devahastin S, Chiewchan N. 2008. Production of antioxidant high dietary fiber powder from carrot peels. *LWT-Food Science and Technology* 41: 1987-1994.
- Chavez-Santoscoy RA, Gutierrez-Uribe JA, Serna-Saldívar SO. 2009. Phenolic composition, antioxidant capacity and in vitro cancer cell cytotoxicity of nine prickly pear (*Opuntia spp.*) juices. *Plant Foods Human Nutrition* 64, 146–152.
- Chen XD, Mujumdar AS. 2008. *Drying Technologies in Food Processing*. Blackwell Publishing pp. 137-147.

- Chillo S, Ranawana DV, Pratt M, Henry CJK. 2011. Glycemic response and glycemic index of semolina spaghetti enriched with barley β -glucan. *Nutrition* 27: 653-658.
- Cleysdale F. 2004. Functional foods: Opportunities and Challenges. *Food Technology* 58, 12: 35-40.
- Cohen E, Saguy I. 1983. Effect on water activity and moisture content on stability in beet powder pigments. *Journal of Food Science* 48: 703-707.
- Crozier A, Lean MEJ, McDonald MS, Black C. 1997. Quantitative analysis of the flavonol content of commercial tomatoes, onions, lettuce and celery. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 43: 590-595.
- Desai KGH and Park HJ. 2005. Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Dry Technology* 23: 1361-1394.
- Dewanto V, Wu X, Adom FK, Liu RH. 2002. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural of Food Chemistry* 50: 3010-3014.
- Dhingra D, Michael M, Rajput H, Patil RT. 2012. Dietary fibre in foods: a review. *Journal of Food Science and Technology* 49, 3: 255–266.
- Ding QB, Ainsworth P, Tucker G, Marson H. 2005. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering* 66: 283–289.
- Dlamini NR, Taylor JRN, and Rooney LW. 2007. The effect of sorghumtype and processing on the antioxidant properties of African sorghum-based foods. *Food Chemistry* 105, 4: 1412–1419.
- Durge AV, Sarkar S, Survase SA, and Singhal RS. 2013. Impact of Extrusion on Red Beetroot Colour Used as Pre-extrusion Colouring of Rice Flour. *Food Bioprocess Technology* 6: 570–575 DOI 10.1007/s11947-011-0723-3.
- Duss R, and Nyberg L. 2004. Oat soluble fibers (β -glucans) as a source for healthy snack and breakfast foods. *Cereal Foods World* 49: 320–325.
- El-Samahy SK, El-Hady, EA, Habiba RA, Moussa-Ayoub TE. 2007. Some functional, chemical, and sensory characteristics of cactus pear rice-based extrudates. *Journal Proffesional Association Cactus Development* 9: 136-147.

- Erlund I. 2004. Review of the flavonoids quercetin, hesperetin, and naringenin. Dietary sources, bioactivities, bioavailability, and epidemiology. *Nutrition Research* 24: 851–874.
- FAO/WHO. 2003. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases, report of the Joint FAO/WHO Expert Consultation. WHO Technical Reports Series 916, Rome: FAO.
<http://www.fao.org/waicent/faoinfo/economic/esn/carboweb/carbo.htm>
- FDA, 1997. 21 CFR Part 101. Food labeling, health claims: soluble dietary fiber from certain foods and coronary heart disease. *Federal Register* 62, 15: 3584–3601.
- Fernández-López J. A., Almela L. 2001. Application of high-performance liquid chromatography to the characterization of the betalain pigments in prickly pear fruits. *Journal of Chromatography A*, 913: 415-420.
- Fincher GB, Stone BA. 1986. Cell walls and their components in cereal grain technology. Vol. 8. In *Advances in Cereal Science and Technology*. American Association of Cereal Chemists Inc., Saint Paul, MN, USA. pp. 207-295.
- Foschia M, Peressini D, Sensidoni A, Brennan CS. 2013. The effects of dietary fibre addition on the quality of common cereal products. *Journal of Cereal Science* 1-12
- Galati EM, Mondello MR, Giuffrida D, Dugo G, Miceli M, Pergolizzi S. Taviano MF. 2003. Chemical characterization and biological effects of Sicilian *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. Fruit Juice: Antioxidant and Antiulcerogenic Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 4903-4908.
- Galati EM, Monforte MT, Miceli N, Mondello MR, Taviano MF, Galluzzo M, Tripodo MM. 2007. *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. mucilages show cytoprotective effect on gastric mucosa in rat. *Phytotherapy Research* 21, 344–346.
- Gallegos M and García H. 2006. La Tuna: Producción y diversidad. CONABIO. *Biodiversistas*. ISSN 1870-1760. 68: 1-5.
- Gandía-Herrero F, Cabanes J, Escribano J, García-Carmona F, Jiménez-Atiénzar M. 2013. Encapsulation of the Most Potent Antioxidant Betalains in Edible Matrixes as Powders of Different Colors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* dx.doi.org/10.1021/jf400337g.

- Gandía-Herrero F, Jiménez-Atiénzar M, Cabanes J, García-Carmona F, Escribano J. 2010. Stabilization of the bioactive pigment of *Opuntia* fruits through maltodextrin encapsulation. *Journal Agricultural Food Chemistry* 58: 10646-10652.
- García-Alonso M, de Pascual-Teresa S, Santos-Buelga C, Rivas-Gonzalo, JC. 2004. Evaluation of the antioxidant properties of fruits. *Food Chemistry* 84: 13–18.
- Gharras HE, Hasib A, Jaouad A, El-bouadili A, Schoefs B. 2008. Stability of vacuolar betaxanthin pigments in juices from Moroccan yellow *Opuntia ficus indica* fruits. *International Journal of Food Science and Technology* 43: 351-356.
- Gharsallaoui A, Roudaut G, Chambin O, Voilley A, Saurel R. 2007. Applications of spray drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International* 40: 1107-1121.
- González R, Morales T, Olivares E, Gallegos C. 2001. Conservación de una variedad de tuna (Burrón) bajo diferentes manejos poscosecha. *Ciencia UANL. Universidad Autónoma de Nuevo León. ISSN 1405-9177. IV: 003, 322-329.*
- Govindasamy S, Campanella OH, Oates CG. 1996. High moisture twin-screw extrusion of sago starch: 1. Influence on granule morphology and structure. *Carbohydrate Polymers* 30, 4: 215-286.
- Gurrieri S, Miceli L, Lanza CM, Tomaselli F, Bonomo RP, Rizzarelli E. 2000. Chemical characterization of sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) and perspectives for storage of its juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48: 5424-5431.
- Harborne JB, and Williams CA. 2000. Advances in flavonoid research since 1992. *Phytochemistry* 55, 481–504.
- Harper JM. 1989. Food extruders and their applications. In C. Mercier P, Linko, Harper JM (Eds.), *Extrusion cooking* St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists pp. 1–15.
- Hashimoto JM and Grossmann MVE. 2003. Effects of extrusion conditions on quality of cassava bran/cassava starch extrudates. *International Journal of Food Science and Technology* 38: 511–517.

- Heras-Ramírez ME, Quintero-Ramos A, Camacho-Dávila A, Barnard J, Talamás-Abbud R, Torres-Muñoz JV, Salas-Muñoz E. 2012. Effect of blanching and drying temperature on polyphenolic compound stability and antioxidant capacity of apple pomace. *Food Bioprocess Technology* 5: 2201–2210.
- Herbach KM, Stintzing FC, Carle R. 2004. Impact of thermal treatment on colour and pigment pattern of red beet (*Beta vulgaris L.*) preparations. *Journal of Food Science* 69: 491–498.
- Heredia A, Jimenez A, Fernandez-Bolanos J, Guillen R, Rodriguez R. 2002. *Fibra Alimentaria*. Biblioteca de Ciencias, Madrid, pp 1–117.
- Hertog MGL, Hollman PCH, Katan MB, Kromhout D. 1993. Intake of potentially anticarcinogenic flavonoids and their determinants in adults in The Netherlands. *Nutr. Cancer* 20: 21-29.
- Hicks V, Chen SC, Tepper SA, Kritchevsky D. 1995. The cholesterol-lowering effect of oat bran cereals in rats: Influence of processing. *Research Communications. Journal of Nutrition Biochemistry* 6, 246-249.
- Hirth M, Leiter A, Beck SM, Schuchmann HP. 2014. Effect of extrusion cooking process parameters on the retention of bilberry anthocyanins in starch based food. *Journal of Food Engineering*, 125, 139–146.
- Ho CT, Chen Q, Shi H, Zhang KQ, Rosen RT. 1992. Antioxidative effect of polyphenol extract prepared from various Chinese teas. *Prev. Med.* 66: 520-525.
- Holm J, Koellreutter B, Würsch P. 1992. Influence of sterilization, drying and oat bran enrichment of pasta on glucose and insulin responses in healthy subjects and on the rate and extent of in vitro starch digestion. *European Journal of Clinical Nutrition* 46: 629–640.
- Hong-Kwong L, Chin-Ping T, Jamilah B, Siou-Pei N. 2012. Effects of Different Wall Materials on the Physicochemical Properties and Oxidative Stability of Spray-Dried Microencapsulated Red-Fleshed Pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) Seed Oil. *Food Bioprocess and Technology* 5 (4): 1220-1227.
- Hsu CL, and Yen GC. 2008. Phenolic compounds: Evidence for inhibitory effects against obesity and their underlying molecular signalling mechanisms. *Molecular Nutrition and Food Research* 52: 53–61.

- Huang AS, von Elbe JH. 1985. Kinetics of the degradation and regeneration of betanine. *Journal of Food Science* 50: 1115–1120.
- Ilo S, Berghofer E. 1999. Kinetics of colour changes during extrusion cooking of maize grits. *Journal of Food Engineering* 39: 73-80.
- Izydorczyk MS, Dexter JE. 2008. Barley β -glucans and arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products. *Food Research International*. 41: 850–868.
- Jenkins AL, Jenkins DJA, Zdravkovic U, Würsch P, Vuksan V. 2002. Depression of the glycemic index by high levels of β -glucan fiber in two functional foods tested in type 2 diabetes. *European Journal of Clinical Nutrition* 56: 622–628.
- Ji X, Rivers L, Zielinski Z, Xu M, MacDougall E, Stephen J, Zhang S, Wang Y, Chapman RG, Keddy P, Robertson GS, Kirby CW, Embleton J, Worrall K, Murphy A, De Koeyer D, Tai H, Yu L, Charter E, Zhang J. 2012. Quantitative analysis of phenolic components and glycoalkaloids from 20 potato clones and in vitro evaluation of antioxidant, cholesterol uptake, and neuroprotective activities. *Food Chemistry* 133: 1177–1187.
- Jin Z, Hsieh F, Huff HE. 1994. Extrusion cooking of corn meal with soy fiber, salt and sugar. *Cereal Chemistry* 71: 227–234.
- Johansson L. 2006. Structural analyses of (1-3), (1-4)- β -D-glucan of oats and barley. Academic Dissertation. University of Helsinki. Faculty of Agriculture and Forestry. Finland. Pp. 11, 13-15.
- Kaushik V and Roos YH. 2007. Limonene encapsulation in freeze-drying of gum arabic–sucrose–gelatin systems. *Lebensmittel Wissenschaft & Technology* 40: 1381–1391.
- Kha TC, Nguyen MH, Roach PD. 2010. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. *Journal of Food Engineering* 98: 385-392.
- Khanal RC, Howard LR, Brownmiller CR, Prior RL. 2009. Influence of Extrusion Processing on Procyanidin Composition and Total Anthocyanin Contents of Blueberry Pomace. *Journal of Food Science* 74, 2: 52–58.

- Krokida MK, Tsami E, Maroulis ZB. 1998. Kinetics of color changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology* 16: 667-685.
- Kumar A, Girish GM, Jones DD, Hanna MA. 2008. Modeling residence time distribution in a twin-screw extruder as a series of ideal steady-state flow reactors. *Journal of Food Engineering* 84: 441-448.
- Kumar A, Ganjyal GM, Jones DD, Hanna MA. 2006. Digital image processing for measurement of residence time distribution in a laboratory extruder. *Journal of Food Engineering* 75(2): 237-244.
- Kuskoski EM, Asuero AG, Troncoso AM, Mancini-Filho J, Fett R. 2005. Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Ciencia y Tecnología de Alimentos* 25 (4): 726-732.
- Kuti J. 2004. Antioxidant compounds from four *Opuntia cactus* pear fruit varieties. *Food Chemistry* 85: 527-533.
- Lahsasni S, Kouhila M, Mahrouz M, Mohamed LA, Agorram B. 2004. Characteristics drying curve and mathematical modeling of thin-layer solar drying of prickly pear cladone (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Process Engineering* 27: 103-117.
- Larrea MA, Chang YK, Martínez-Bustos F. 2005. Some functional properties of extruded orange pulp and its effect on the quality of cookies. *Lebensmittel, Wiss. Technology* 38: 215-220.
- Lazaridou A, Biliaderis CG. 2009 Concurrent phase separation and gelation in mixed oat β -glucans/sodium caseinate and oat β -glucans/pullulan aqueous dispersions. *Food Hydrocolloids* 23: 886-895.
- Leadbetter J, Ball MJ, Mann JI. 1991. Effects of increasing quantities of oat bran in hypercholesterolemic people. *American Journal of Clinical Nutrition* 54: 841-845.
- León-Martínez FM, Méndez-Lagunas LL, Rodríguez-Ramírez J. 2010. Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus indica*): Effects on powder properties characterization. *Carbohydrate Polymers* 81: 864-870.
- Levenspiel, O. 1972. Non ideal flow. In O. Levenspiel (Ed.), *Chemical reaction engineering*. New York: Wiley. Pp. 252-325.

- Lue S, Hsieh F, Peng IC, Huff HE. 1990. Expansion of corn extrudates containing dietary fiber: A microstructure study. *Lebensmittel Wissenschaft & Technology* 23: 65–173.
- MacDougall DB, and Granov M. 1998. Relationship of ultraviolet and visible spectra in Maillard reactions to CIELAB color space and visual appearance. In J. O'Brien, H. E. Nursten, M. J. C. Crabbe, & J. M. Ames (Eds.), *The Maillard reaction in food and medicine* Cambridge: Royal Society of Chemistry., pp. 160–165.
- Machado MF, Oliveira FAR, Gekas V, Singh RP. 1998. Kinetics of moisture uptake and soluble-solids loss by puffed breakfast cereals immersed in water. *International Journal of Food Science and Technology*, 33: 225–237
- Mantovani MS, Bellini MF, Angeli JPF, Oliviera RJ, Silva AF, Ribeiro LR. 2008. β -Glucans in promoting health: Prevention against mutation and cancer. Mini-review *Mutation Research* 658: 154-161.
- Masters K. 1979. *Spray drying handbook*. New York. Halsted Press.
- Medina-Torres L, Gallegos-Infante JA, González-Laredo RF, Rocha-Guzman NE. 2008. Drying kinetics of nopal (*Opuntia ficus-indica*) using three different methods and their effect on their mechanical properties. *Lebensmittel Wissenschaft & Technology* 41: 1183-1188.
- Mikulíková D, Masár S, Kraic J. 2008. Biodiversity of legume health-promoting starch. *Starch*, 60: 426–432.
- Minitab 16. 2010. *Statistical Software*, Minitab, Inc., State College, PA.
- Moßhammer MR, Stintzing FC, Carle R. 2006. Cactus Pear Fruits (*Opuntia* spp.): A Review of Processing Technologies and Current Uses. *J. PACD*
- Moure A, Cruz JM, Franco D, Domínguez JM, Sineiro J, Domínguez H, Nunez M, Parajo JC. 2001. Natural antioxidants from residual sources. *Food Chemistry* 72(2): 145-171.
- Morin LA, Temelli F, McMullen L. 2004. Interactions between meat proteins and barley (*Hordeum* spp.) β -glucan within a reduced-fat breakfast sausage system. *Meat Science* 68: 419-430.
- Naczek M, and Shahidib F. 2004. Extraction and analysis of phenolics in food. *Journal of Chromatography A* 1054: 95–111.

- Obón JM, Castellar MR, Alacid M, Fernández-López JA. 2009. Production of a red–purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. *Journal of Food Engineering* 90: 471–479
- Pansawat NK, Jangchud KA, Jangchud A, Wuttijumnong P, Saalia FK, Eitenmiller RR, Phillips RD. 2008. Effects of extrusion conditions on secondary extrusion variables and physical properties of fish, rice-based snacks. *Lebensmittel. Wiss. Technology* 41: 632–641.
- Papadakis SE, Gardeli C, Tzia C. 2006. Spray drying of raisin juice concentrate. *Drying Technology* 24 (2): 173-180.
- Parrish FW, Perlin AS, Reese ET. 1960. Selective enzymolysis of poly-b-D-glucans, and structure of the polymers. *Canadian Journal of Chemistry* 38: 2094–2104.
- Peterson J, and Dwyer J. 1998. Flavonoids: Dietary occurrence and biochemical activity. *Nutrition Research* 18: 1995–2018.
- Piga A. 2004. Cactus Pear: A Fruit of nutraceutical and functional importance. Dipartimento di Scienze Ambientali Agrarie e Biotecnologie Agro-Alimentari Viale Italia 39, 07100 Sassari, Italy. J. PACD.
- Pitalua E, Jimenez M, Vernon-Carter EJ, Beristain CI. 2010. Antioxidative activity of microcapsules with beetroot juice using gum Arabic as wall material. *Food Bioproducts and Process* DOI: 10.1016/j.fbp.2010.01.002.
- Plunkett A and Ainsworth P. 2007. The influence of barrel temperature and screw speed on the retention of L-ascorbic acid in an extruded rice based snack product. *Journal of Food Engineering* 78: 1127–1133.
- Pokorny J and Schmidt S. 2006. Natural antioxidant functionality during food processing. In J. Pokorny, N. Yanishlieva, & M. Gordon (Eds.). *Antioxidants in food*. Vol. 380, pp. 331–351. Washington, DC: CRC Press.
- Quek SY, Chok NK, Swedlund P. 2007. The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chemistry and Engineering of Process* 46 (5): 386-392.
- Repo-Carrasco-Valencia R, Pena J, Kallio H, Salminen S. 2009. Dietary fiber and other functional components in two varieties of crude and extruded kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Cereal Science* 49, 2: 219–224.

- Riaz MN. 2000. Extruders in Food Applications. Technomic Publishing, Lancaster, PA. P.p. 223.
- Ríos R and Quintana M. 2004. Manejo general del cultivo de nopal. Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas México-Puebla-San Luis Potosí-Tabasco-Veracruz-Córdoba. Colegio de Postgraduados.
- Sacchetti G, Pinnavaia GG, Guidolin E, Dalla Rosa M. 2004. Effects of extrusion temperature and feed composition on the functional, physical and sensory properties of chestnut and rice flour-based snack-like products. *Food Research International* 37: 527–534.
- Sáenz C, Tapia S, Chávez J, Robert P. 2009. Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry* 114: 616-622.
- Sahan N, Yasar K, Hayaloglu AA. 2007. Physical, chemical and flavour quality of non-fat yogurt as affected by a β -glucan hydrocolloidal composite during storage. *Food Hydrocolloid*. doi:10.1016/j.foodhyd.2007.06.010
- Sapers, GM and Hornstein, JS. 1979. Varietal differences in colorant properties and stability of red beet pigments. *Journal of Food Science* 44, 1245-1248.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2011. <http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/boletines2/paginas/2011B371.aspx>
- Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Puebla, 2007. <http://www.sdr.gob.mx/Contenido/Cadenas%20Productivas/DOCUMENTOS%20CADENAS%20AGROPECUARIAS/agricolas/NOPAL%20TUNA/Monografia%20del%20Nopal-TUNA.htm>
- Shahidi F, Han X. 1993. Encapsulation of food ingredients. *Critical Revision of Food Science Nutrition* 33(6): 501-547.
- Shu B, Yu W, Zhao Y, Liu X. 2006. Study on microencapsulation of lycopene by spray-drying. *Journal of Food Engineering* 76: 664-669.
- Singer JW., and von Elbe JH. 1980. Degradation rates of vulgaxanthin-I. *Journal of Food Science* 45: 489.

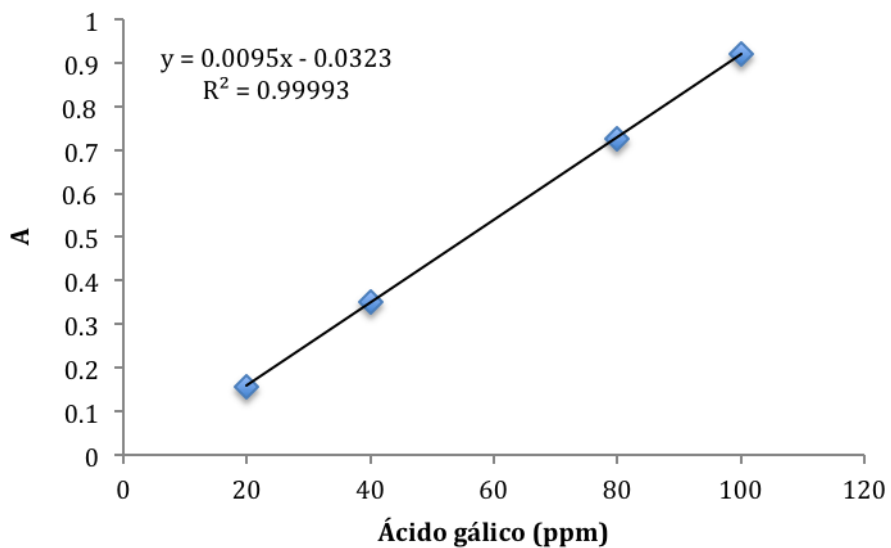
- Strack D, Vogt T, Schlieman W. 2003. Recent advances in betalains research. *Photochemistry* 62: 247-269.
- Stintzing FC, Schieber A, Carle R. 2001. Phytochemical and nutrition significance of cactus pear. *Food Research Technology International* 212:396-407.
- Stintzing FC, Schieber A, Carle R. 2002. Identification of betalains from yellow beet (*Beta vulgaris* L.) and cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) by high-performance liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 230-237.
- Stintzing FC, Carle R. 2005. Cactus steams (*Opuntia* spp.) a review on their chemistry, technology and uses. *Molecular, Nutrition Food Research* 49: 175-194.
- Stintzing FC, Kugler F, Carle R, Conrad J. 2006. First ¹³C-NMR assignments of betaxanthins. *Helvetica Chimica Acta*, 89: 1008–101.
- Stintzing FC, Carle R. 2007. Betalains—emerging prospects for food scientists. *Trends Food Science and Technology* 18: 514-525.
- Stojceska V, Ainsworth P, Plunkett A, Ibanoglu Ş. 2009. The effect of extrusion cooking using different water feed rates on the quality of ready-to-eat snacks made from food by-products. *Food Chemistry* 114: 226–232.
- Sun-Waterhouse D, Wadhwa SS, Waterhouse GIN. 2012. Spray-Drying Microencapsulation of Polyphenol Bioactives: A Comparative Study Using Different Natural Fibre Polymers as Encapsulants. *Food Bioprocess and Technology* DOI: 10.1007/s11947-012-0946-y.
- Sutter SC, Buera MP, Elizalde BE. 2007. β-Carotene encapsulation in a mannitol matrix as affected by divalent cations and phosphate anion. *International Journal of Pharmaceutics* 332: 45–54.
- Swain JF, Rouse IL, Curley CB, Sacks FM. 1990. Comparison of the effects of oat bran and low-fiber wheat on serum lipoprotein levels and blood pressure. *New England Journal of Medicine* 322: 147–152.
- Tang J, Yang T. 2004. Dehydrated vegetables: principles and systems. In: Hui, Y. H., Ghazala, S., Graham, D.M., Murrell, K.D., & Nip, W. K. (Eds.), *Handbook of Vegetable Preservation and Processing*. Marcel Dekker, New York.

- Tonon RV, Brabet C, Hubinger MD. 2010. Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried acai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents. *Food Research International* 43: 907-914.
- Tonon RV, Brabet C, Hubinger MD. 2008. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleracea* Mart) powder produced by spray drying. *Journal of Food Engineering* 88: 411-418.
- Törroönen R, Kansanen L, Uusitupa M. 1992. Effects of an oat bran concentrate on serum lipids in free-living men with mild to moderate hypercholesterolaemia. *European Journal of Clinical Nutrition* 46: 621–627.
- Turkmen N, Sari F, Velioglu YS. 2005. The effect of cooking methods on total phenolics and antioxidant activity of selected green vegetables. *Food Chemistry* 93: 713–718.
- Tze NL, Han CP, Yusof YA, Ling CN, Talib RA, Taip FS, Aziz MG. 2012. Physicochemical and Nutritional Properties of Spray-dried Pitaya Fruit Powder as Natural Colorant. *Food Science Biotechnology* 21(3): 675-682.
- Unlu E, & Faller JF. 2002. RTD in twin-screw food extrusion. *Journal of Food Engineering* 53: 115–131.
- Wang J, Chen Q, Hu K, Zeng L, Pan Y, Huang H. 2011. Change in aromatic components of banana during the preparation process of juice and microcapsule powder. *International Journal of Food Science and Technology* 46: 1398-1405.
- Wei-Dong W, & Shi-Ying X. 2007. Degradation kinetics of anthocyanins in blackberry juice and concentrate. *Journal of Food Engineering* 82: 271–275.
- Wen LF, Rodis P, Wasserman BP. 1990. Starch fragmentation and protein insolubation during twin-screw extrusion of corn meal. *Cereal Chemistry* 67: 228–275.
- White BL, Howard LR, Prior RL. 2009. Polyphenolic composition and antioxidant capacity of extruded cranberry pomace. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* doi:10.1021/jf902838b.
- Xu B and Chang SKC. 2009. Total phenolic, phenolic acid, anthocyanin, flavan-3-ol, and flavonol profiles and antioxidant properties of pinto and black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57: 4754–4764.

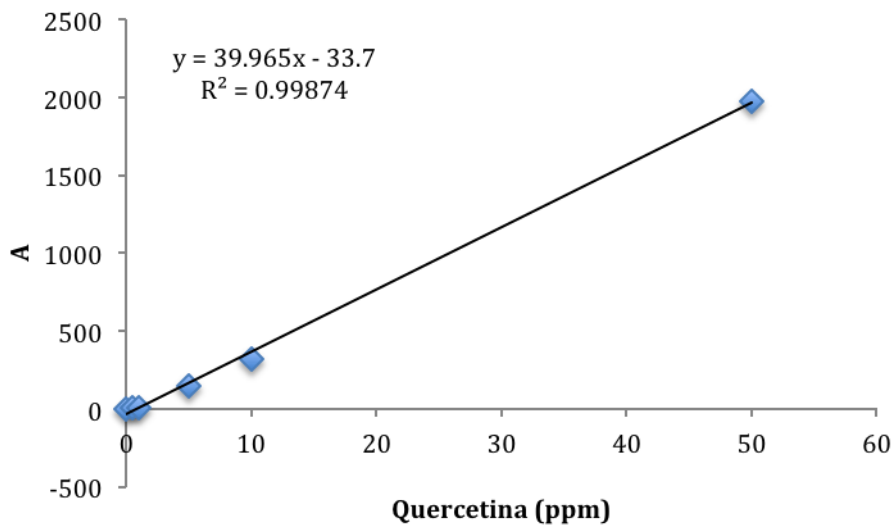
- Yağci S and Göğus F. 2008. Response surface methodology for evaluation of physical and functional properties of extruded snack foods developed from food-by-products. *Journal of Food Engineering* 86: 122–132.
- Yanniotis S, Petraki A, Soumpasi E. 2007. Effect of pectin and wheat fibers on quality attributes of extruded cornstarch. *Journal of Food Engineering* 80, 2: 594–599.
- Yuliani S, Torley PJ, D’Arcy B, Nicholson T, Bhandari B. 2006. Extrusion of mixtures of starch and D-limonene encapsulated with β -cyclodextrin: Flavour retention and physical properties. *Food Research International* 39: 318–331.
- Zhang J, Shen Q, Lu JC, Li JY, Liu WY, Yang JJ. 2010. Phenolic compounds from the leaves of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Ijinskaja and their inhibitory activity against PTP1B. *Food Chemistry* 119: 1491–1496.
- Zieliński H, Kozłowska H, Lewczuk B. 2001. Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 2, 3: 159-169.
- Zuidam NJ, Nedovic´ VA. 2010. *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*. Springer New York, USA.

X. APÉNDICES

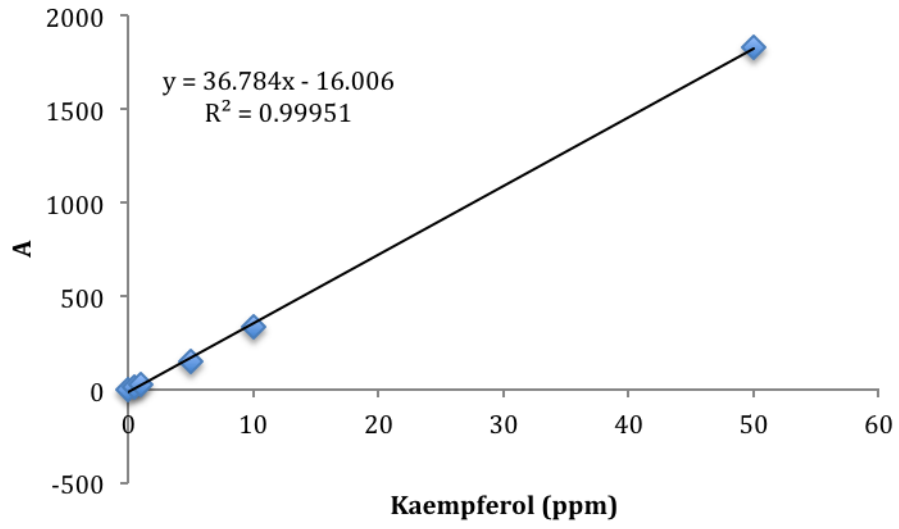
10.1 Curvas de calibración de métodos analíticos



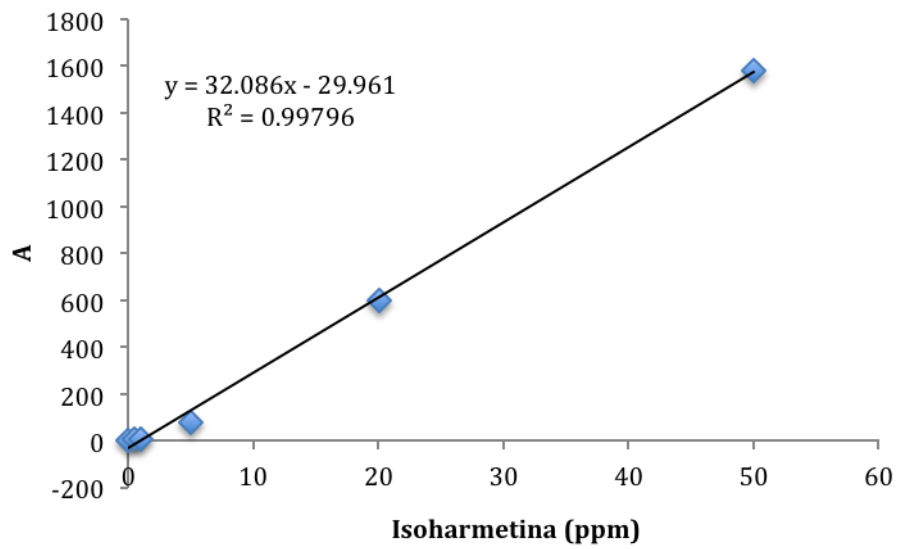
a. Determinación de polifenoles torales, fotometría



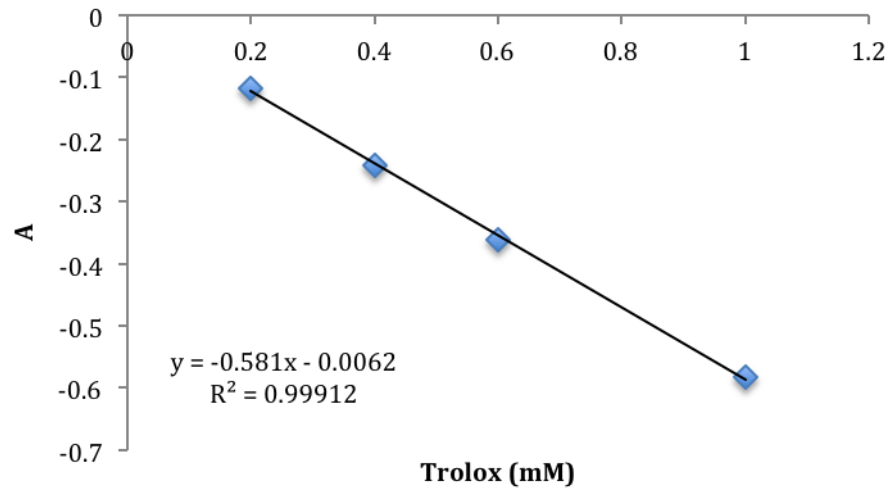
b. Determinación de flavonoides (quercetina), HPLC



c. Determinación de flavonoides (kaempferol), HPLC



d. Determinación de flavonoides (Isoharmetina), HPLC



e. Determinación de actividad antioxidante, fotometría

10.2 Evaluación sensorial

10.2.1. Prueba afectiva

PRUEBA DE PREFERENCIA/ORDENAMIENTO


Nombre: _____ Edad: _____ Fecha: _____

Indicaciones: Por favor enjuague la boca antes de iniciar la prueba, antes de probar cada muestra y cada vez que lo necesite.
Enfrente de usted hay cuatro muestras. Deguste cada una de las cuatro de izquierda a derecha. Después de probar todas las muestras, puede degustar sumergiéndolas en la leche.
Enseguida ordene las muestras, de las más preferida (1), a la menos preferida (4), tanto sola como con leche.

MUESTRA	CON LECHE
1. _____	1. _____
2. _____	2. _____
3. _____	3. _____
4. _____	4. _____

Comentarios: _____

¡GRACIAS POR SU COLABORACIÓN!






 **AGRA**

10.2.2. Prueba descriptiva

GRADO DE SATISFACCIÓN/ESCALA HEDÓNICA
TEXTURA

Nombre: _____ Edad: _____ Fecha: _____

Indicaciones: Por favor enjuague la boca con agua antes de empezar, antes de cada muestra y cada vez que lo necesite.
Indique que tanto le gustan o disgustan las cuatro diferentes muestras en cuanto a su textura, asignando el número correspondiente a cada muestra, según la siguiente escala:

1. Muy malo 2. Malo 3. Regular 4. Bueno 5. Muy bueno

MUESTRA 247 _____ MUESTRA 438 _____ MUESTRA 564 _____ MUESTRA 126 _____






Comentarios:

¡GRACIAS POR SU COLABORACIÓN! MORO

GRADO DE SATISFACCIÓN/ESCALA HEDÓNICA
COLOR

Nombre: _____ Edad: _____ Fecha: _____

Indicaciones: Por favor enjuague la boca con agua antes de empezar, antes de cada muestra y cada vez que lo necesite.
Indique que tanto le gustan o disgustan las cuatro diferentes muestras en cuanto a su textura, asignando el número correspondiente a cada muestra, según la siguiente escala:

1. Muy malo 2. Malo 3. Regular 4. Bueno 5. Muy bueno

MUESTRA 247 _____ MUESTRA 438 _____ MUESTRA 564 _____ MUESTRA 126 _____

Comentarios:

¡GRACIAS POR SU COLABORACIÓN! MORO

GRADO DE SATISFACCIÓN/ESCALA HEDÓNICA
SABOR

Nombre: _____ Edad: _____ Fecha: _____

Indicaciones: Por favor enjuague la boca con agua antes de empezar, antes de cada muestra y cada vez que lo necesite.

Indique que tanto le gustan o disgustan las cuatro diferentes muestras en cuanto a su textura, asignando el número correspondiente a cada muestra, según la siguiente escala:



1. Muy malo



2. Malo



3. Regular



4. Bueno



5. Muy bueno

MUESTRA 247 _____ MUESTRA 438 _____ MUESTRA 564 _____ MUESTRA 126 _____

Comentarios:

¡GRACIAS POR SU COLABORACIÓN!

MORO

GRADO DE SATISFACCIÓN/ESCALA HEDÓNICA
OLOR

Nombre: _____ Edad: _____ Fecha: _____

Indicaciones: Por favor enjuague la boca con agua antes de empezar, antes de cada muestra y cada vez que lo necesite.

Indique que tanto le gustan o disgustan las cuatro diferentes muestras en cuanto a su textura, asignando el número correspondiente a cada muestra, según la siguiente escala:



1. Muy malo



2. Malo



3. Regular



4. Bueno



5. Muy bueno

MUESTRA 247 _____ MUESTRA 438 _____ MUESTRA 564 _____ MUESTRA 126 _____

Comentarios:

¡GRACIAS POR SU COLABORACIÓN!

MORO

10.3 Análisis estadístico

10.3.1 ENCAPSULACIÓN DE COMPONENTES BIOACTIVOS DE TUNA ROJA

➤ ANÁLISIS DE VARIANZA PARA BETACIANINAS DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA

Cuadrado de

Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	3	0.42276347	0.14092116	12.65	<.0001
GLU	2	0.04266211	0.02133105	1.91	0.1702
TEMP*GLU	4	0.02478959	0.00619740	0.56	0.6966

Cuadrado de

Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	2	0.18902146	0.09451073	8.48	0.0017
GLU	2	0.03733519	0.01866759	1.68	0.2093
TEMP*GLU	4	0.02478959	0.00619740	0.56	0.6966

➤ ANÁLISIS DE VARIANZA PARA BETAXANTINAS DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA

Cuadrado de

Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	3	0.02020852	0.00673617	4.49	0.0139
GLU	2	0.00027079	0.00013539	0.09	0.9141
TEMP*GLU	4	0.00134004	0.00033501	0.22	0.9225

Cuadrado de

Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	2	0.00566409	0.00283204	1.89	0.1765
GLU	2	0.00033603	0.00016801	0.11	0.8947
TEMP*GLU	4	0.00134004	0.00033501	0.22	0.9225

➤ ANÁLISIS DE VARIANZA PARA QUERCETINA DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA

Cuadrado de

Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	3	0.00003074	0.00001025	2.82	0.0570
GLU	2	0.00000778	0.00000389	1.07	0.3564
TEMP*GLU	4	0.00003845	0.00000961	2.65	0.0544

Cuadrado de

Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	2	0.00001643	0.00000822	2.26	0.1228
GLU	2	0.00000778	0.00000389	1.07	0.3564
TEMP*GLU	4	0.00003845	0.00000961	2.65	0.0544

➤ ANÁLISIS DE VARIANZA PARA POLIFENOLES TOTALES DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA

Cuadrado de

Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	3	0.8560100	0.2853367	0.63	0.5970
GLU	2	106.7317787	53.3658894	118.02	<.0001
TEMP*GLU	4	8.0880485	2.0220121	4.47	0.0025

Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	2	1.0663156	0.5331578	1.18	0.3125
GLU	2	100.9760648	50.4880324	111.66	<.0001
TEMP*GLU	4	8.0880485	2.0220121	4.47	0.0025

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA KAEMPFEROL DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	3	0.00000685	0.00000228	2.12	0.1201
GLU	2	0.00001956	0.00000978	9.08	0.0009
TEMP*GLU	4	0.00000402	0.00000100	0.93	0.4599

Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	2	0.00000211	0.00000106	0.98	0.3881
GLU	2	0.00001956	0.00000978	9.08	0.0009
TEMP*GLU	4	0.00000402	0.00000100	0.93	0.4599

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ISOHARMETINA DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	3	0.00049328	0.00016443	5.03	0.0121
GLU	2	0.00011027	0.00005514	1.69	0.2164
TEMP*GLU	4	0.00024598	0.00006149	1.88	0.1629

Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	2	0.00039035	0.00019518	5.97	0.0115
GLU	2	0.00016708	0.00008354	2.56	0.1088
TEMP*GLU	4	0.00024598	0.00006149	1.88	0.1629

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	2	0.27449459	0.13724730	1.80	0.1729
GLU	2	1.00017463	0.50008732	6.55	0.0024
TEMP*GLU	4	1.49285719	0.37321430	4.89	0.0015

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA HUMEDAD DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	0.21379471	0.10689735	2.60	0.0927
GLU	2	0.09312894	0.04656447	1.13	0.3370
Temp*GLU	4	0.09475344	0.02368836	0.58	0.6823

Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	0.21379471	0.10689735	2.60	0.0927
GLU	2	0.09312894	0.04656447	1.13	0.3370
Temp*GLU	4	0.09475344	0.02368836	0.58	0.6823

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA HUMEDAD DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	0.00045589	0.00022795	0.58	0.5643
GLU	2	0.00468891	0.00234445	5.98	0.0058
Temp*GLU	4	0.00146553	0.00036638	0.93	0.4552

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	0.00030727	0.00015364	0.39	0.6786
GLU	2	0.00472158	0.00236079	6.02	0.0056
Temp*GLU	4	0.00146553	0.00036638	0.93	0.4552

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA DENSIDAD DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	19.48613337	9.74306668	3.13	0.0600
GLU	2	18.71337937	9.35668968	3.00	0.0664
Temp*GLU	4	16.31004193	4.07751048	1.31	0.2917

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	19.48613337	9.74306668	3.13	0.0600
GLU	2	18.71337937	9.35668968	3.00	0.0664
Temp*GLU	4	16.31004193	4.07751048	1.31	0.2917

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA INDICE DE SOLUBILIDAD DE AGUA DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	0.00173855	0.00086927	0.37	0.6945
GLU	2	0.06671224	0.03335612	14.18	<.0001
Temp*GLU	4	0.00255475	0.00063869	0.27	0.8937

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	0.00173855	0.00086927	0.37	0.6945
GLU	2	0.06671224	0.03335612	14.18	<.0001
Temp*GLU	4	0.00255475	0.00063869	0.27	0.8937

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA pH DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	0.02106667	0.01053333	2.18	0.1327
GLU	2	0.10401667	0.05200833	10.76	0.0004
Temp*GLU	4	0.03286667	0.00821667	1.70	0.1793

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	0.02106667	0.01053333	2.18	0.1327
GLU	2	0.10401667	0.05200833	10.76	0.0004
Temp*GLU	4	0.03286667	0.00821667	1.70	0.1793

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	3	44.456007	14.818669	0.27	0.8472
GLU	3	2847.146489	949.048830	17.23	<.0001
TEMP*GLU	4	14.906444	3.726611	0.07	0.9912

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
TEMP	2	42.575339	21.287669	0.39	0.6829
GLU	3	2847.146489	949.048830	17.23	<.0001
TEMP*GLU	4	14.906444	3.726611	0.07	0.9912

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA L* DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	13.1595148	6.5797574	2.30	0.1123
GLU	2	183.1600037	91.5800019	31.97	<.0001
Temp*GLU	4	17.0641407	4.2660352	1.49	0.2214

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	13.1595148	6.5797574	2.30	0.1123
GLU	2	183.1600037	91.5800019	31.97	<.0001
Temp*GLU	4	17.0641407	4.2660352	1.49	0.2214

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA a* DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	16.35005926	8.17502963	2.48	0.0949
GLU	2	35.62751481	17.81375741	5.41	0.0079
Temp*GLU	4	17.56518519	4.39129630	1.33	0.2723

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	16.35005926	8.17502963	2.48	0.0949
GLU	2	35.62751481	17.81375741	5.41	0.0079
Temp*GLU	4	17.56518519	4.39129630	1.33	0.2723

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA b* DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	0.00186374	0.00093187	16.28	<.0001
GLU	2	0.00502673	0.00251337	43.90	<.0001
Temp*GLU	4	0.00495972	0.00123993	21.66	<.0001

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	0.00186374	0.00093187	16.28	<.0001
GLU	2	0.00502673	0.00251337	43.90	<.0001
Temp*GLU	4	0.00495972	0.00123993	21.66	<.0001

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA CROMA* DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	18.40880585	9.20440293	2.79	0.0719
GLU	2	33.07272523	16.53636262	5.02	0.0108
Temp*GLU	4	16.63672263	4.15918066	1.26	0.2989

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	18.40880585	9.20440293	2.79	0.0719
GLU	2	33.07272523	16.53636262	5.02	0.0108
Temp*GLU	4	16.63672263	4.15918066	1.26	0.2989

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA REDUCCIÓN DE BETANINA DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	66.3651238	33.1825619	0.54	0.5864
Glu	2	993.3163191	496.6581595	8.15	0.0017
Temp*Glu	4	196.6861026	49.1715257	0.81	0.5317

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	66.3651238	33.1825619	0.54	0.5864
Glu	2	993.3163191	496.6581595	8.15	0.0017
Temp*Glu	4	196.6861026	49.1715257	0.81	0.5317

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA REDUCCIÓN DE INDICAXANTINA DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	2327.49192	1163.74596	0.69	0.5098
Glu	2	13475.95342	6737.97671	4.00	0.0301
Temp*Glu	4	5748.79461	1437.19865	0.85	0.5042

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
Temp	2	2327.49192	1163.74596	0.69	0.5098
Glu	2	13475.95342	6737.97671	4.00	0.0301
Temp*Glu	4	5748.79461	1437.19865	0.85	0.5042

10.3.2 DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA DURANTE EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

➤ ANÁLISIS DE VARIANZA PARA TIEMPO DE RESIDENCIA MEDIO DE POLVO ENCAPSULADO DE TUNA ROJA

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
temp	3	120.0291084	40.0097028	15.03	0.0002
rpm	2	967.2333539	483.6166769	181.64	<.0001
temp*rpm	6	103.2768343	17.2128057	6.46	0.0031

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
temp	3	120.0291084	40.0097028	15.03	0.0002
rpm	2	967.2333539	483.6166769	181.64	<.0001
temp*rpm	6	103.2768343	17.2128057	6.46	0.0031

10.3.3 EFECTO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN-COCCIÓN SOBRE LA ESTABILIDAD DE COMPONENTES BIOACTIVOS DE ENCAPSULADOS DE TUNA ROJA

➤ ANÁLISIS DE VARIANZA PARA a* DE EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
VEL	2	138.9709028	69.4854514	70.96	<.0001
TEMP	3	56.5731167	18.8577056	19.26	<.0001
VEL*TEMP	6	110.0767417	18.3461236	18.73	<.0001

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
VEL	2	138.9709028	69.4854514	70.96	<.0001
TEMP	3	56.5731167	18.8577056	19.26	<.0001
VEL*TEMP	6	110.0767417	18.3461236	18.73	<.0001

➤ ANÁLISIS DE VARIANZA PARA b* DE EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
VEL	2	10.5334194	5.2667097	32.05	<.0001
TEMP	3	211.3316153	70.4438718	428.70	<.0001
VEL*TEMP	6	12.0343472	2.0057245	12.21	<.0001

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
VEL	2	10.5334194	5.2667097	32.05	<.0001
TEMP	3	211.3316153	70.4438718	428.70	<.0001
VEL*TEMP	6	12.0343472	2.0057245	12.21	<.0001

➤ ANÁLISIS DE VARIANZA PARA L* DE EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
VEL	2	111.4796361	55.7398181	6.36	0.0031

TEMP	3	544.9455486	181.6485162	20.72	<.0001
VEL*TEMP	6	343.6136639	57.2689440	6.53	<.0001
Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
VEL	2	111.4796361	55.7398181	6.36	0.0031
TEMP	3	544.9455486	181.6485162	20.72	<.0001
VEL*TEMP	6	343.6136639	57.2689440	6.53	<.0001

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA POLIFENOLES TOTALES DE EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
VEL	2	207.405690	103.702845	3.52	0.0342
TEMP	3	8569.539890	2856.513297	96.84	<.0001
VEL*TEMP	6	772.821082	128.803514	4.37	0.0007
Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
VEL	2	207.405690	103.702845	3.52	0.0342
TEMP	3	8569.539890	2856.513297	96.84	<.0001
VEL*TEMP	6	772.821082	128.803514	4.37	0.0007

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
vel	2	0.00265368	0.00132684	9.88	0.0002
temp	3	0.00140676	0.00046892	3.49	0.0199
vel*temp	6	0.00126380	0.00021063	1.57	0.1686
Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
vel	2	0.00257171	0.00128586	9.58	0.0002
temp	3	0.00113744	0.00037915	2.82	0.0447
vel*temp	6	0.00126380	0.00021063	1.57	0.1686

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA BETACIANINAS DE EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
vel	2	0.28700308	0.14350154	5.83	0.0048
temp	3	0.12845643	0.04281881	1.74	0.1682
vel*temp	6	0.88034213	0.14672369	5.96	<.0001
Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
vel	2	0.47016614	0.23508307	9.55	0.0002
temp	3	0.20745360	0.06915120	2.81	0.0468
vel*temp	6	0.88034213	0.14672369	5.96	<.0001

➤ **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA BETAXANTINAS DE EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

Cuadrado de					
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
vel	2	0.53163193	0.26581597	3.71	0.0304

temp	3	1.12327746	0.37442582	5.23	0.0029
vel*temp	6	1.54518432	0.25753072	3.59	0.0042
			Cuadrado de		
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
vel	2	0.91686579	0.45843290	6.40	0.0031
temp	3	1.33612468	0.44537489	6.22	0.0010
vel*temp	6	1.54518432	0.25753072	3.59	0.0042

10.3.4 EFECTO DE LA ADICIÓN DE ENCAPSULADO EN LAS PROPIEDADES DE CEREALES EXTRUIDO

➤ **ANÁLISIS DE DENSIDAD DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: DENSIDAD vs. trat

Fuente	GL	SC	CM	F	P
trat_1	5	0.0870070	0.0174014	2268.24	0.000
Error	6	0.0000460	0.0000077		
Total	11	0.0870530			

➤ **ANÁLISIS DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: INDICE vs. TRAT_2

Fuente	GL	SC	CM	F	P
TRAT_2	5	24.0813	4.8163	217.58	0.000
Error	24	0.5313	0.0221		
Total	29	24.6125			

➤ **ANÁLISIS DE HUMEDAD DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: HUMEDAD vs. TRAT_3

Fuente	GL	SC	CM	F	P
TRAT_3	7	0.02099	0.00300	2.72	0.121
Error	6	0.00660	0.00110		
Total	13	0.02759			

➤ **ANÁLISIS DE L* DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: L vs. TRAT_4

Fuente	GL	SC	CM	F	P
TRAT_4	5	2202.19	440.44	235.14	0.000
Error	16	29.97	1.87		
Total	21	2232.16			

➤ **ANÁLISIS DE a* DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: a vs. TRAT_4

Fuente	GL	SC	CM	F	P
TRAT_4	5	3947.02	789.40	690.86	0.000

Error 16 18.28 1.14
Total 21 3965.31

➤ **ANÁLISIS DE b* DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: b vs. TRAT_4
Fuente GL SC CM F P
TRAT_4 5 2744.59 548.92 507.97 0.000
Error 16 17.29 1.08
Total 21 2761.87

➤ **ANÁLISIS DE croma* DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: croma vs. TRAT_4
Fuente GL SC CM F P
TRAT_4 5 778.550 155.710 200.63 0.000
Error 16 12.418 0.776
Total 21 790.968

➤ **ANÁLISIS DE h* DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: hue grados vs. TRAT_4
Fuente GL SC CM F P
TRAT_4 5 7989.92 1597.98 527.35 0.000
Error 16 48.48 3.03
Total 21 8038.40

➤ **ANÁLISIS DE ÍNDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: ISA vs. TRAT_5
Fuente GL SC CM F P
TRAT_5 7 0.0006667 0.0000952 1.52 0.238
Error 14 0.0008764 0.0000626
Total 21 0.0015431

➤ **ANÁLISIS DE ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: IAA vs. TRAT_5
Fuente GL SC CM F P
TRAT_5 7 4.27387 0.61055 66.97 0.000
Error 14 0.12763 0.00912
Total 21 4.40150

➤ **ANÁLISIS DE BETAXANTINAS DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: BX (mg/100g)_1 vs. TRAT_6_1
Fuente GL SC CM F P
TRAT_6_1 3 3.36948 1.12316 465.58 0.000
Error 4 0.00965 0.00241

Total 7 3.37913

➤ **ANÁLISIS DE BETACIANINAS DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

ANOVA unidireccional: BC (mg/100g)_1 vs. TRAT_6_1

Fuente	GL	SC	CM	F	P
TRAT_6_1	3	14.19591	4.73197	499.15	0.000
Error	4	0.03792	0.00948		
Total	7	14.23383			

➤ **ANÁLISIS DE CRUJIBILIDAD DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

One-way ANOVA: CRISP versus TRAT

Source	DF	SS	MS	F	P
TRAT	6	207583	34597	163.24	0.000
Error	42	8901	212		
Total	48	216484			

➤ **ANÁLISIS DE SENSORIAL TEXTURA DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

Friedman Test: TEXTURA versus CEREAL blocked by CONSUMIDOR

S = 20.79 DF = 3 P = 0.000

S = 24.46 DF = 3 P = 0.000 (adjusted for ties)

CEREAL	N	Est	Median	Ranks
0.0	30	4.0000	83.0	
2.5	30	4.0000	96.5	
5.0	30	3.0000	66.5	
7.5	30	3.0000	54.0	

Gry median = 3.5000

TEXTURA versus CEREAL, CONSUMIDOR

Source	DF	SS	MS	F	P
CEREAL	3	21.967	7.32222	10.19	0.000
CONSUMIDOR	29	42.667	1.47126	2.05	0.006
Error	87	62.533	0.71877		
Total	119	127.167			

➤ **ANÁLISIS DE SENSORIAL COLOR DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

Friedman Test: COLOR versus CEREAL blocked by CONSUMIDOR

S = 5.25 DF = 3 P = 0.154

S = 6.67 DF = 3 P = 0.083 (adjusted for ties)

CEREAL	N	Est	Median	Ranks
0.0	30	3.5625	83.5	
2.5	30	3.4375	70.5	
5.0	30	3.4375	64.0	
7.5	30	3.8125	82.0	

Gry median = 3.5625

COLOR versus CEREAL, CONSUMIDOR

Source	DF	SS	MS	F	P
CEREAL	3	3.500	1.16667	1.56	0.205
CONSUMIDOR	29	40.667	1.40230	1.88	0.013
Error	87	65.000	0.74713		
Total	119	109.167			

➤ **ANÁLISIS DE SENSORIAL SABOR DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

Friedman Test: SABOR versus CEREAL blocked by CONSUMIDOR

S = 7.19 DF = 3 P = 0.066

S = 8.53 DF = 3 P = 0.036 (adjusted for ties)

		Sum of	
CEREAL	N	Est Median	Ranks
0.0	30	3.7188	86.5
2.5	30	3.5938	79.0
5.0	30	3.3438	74.0
7.5	30	2.7188	60.5

Gry median = 3.3438

SABOR versus CEREAL, CONSUMIDOR

Source	DF	SS	MS	F	P
CEREAL	3	8.967	2.98889	2.87	0.041
CONSUMIDOR	29	43.667	1.50575	1.45	0.097
Error	87	90.533	1.04061		
Total	119	143.167			

➤ **ANÁLISIS DE SENSORIAL OLOR DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

Friedman Test: OLOR versus CEREAL blocked by CONSUMIDOR

S = 2.01 DF = 3 P = 0.570

S = 5.80 DF = 3 P = 0.122 (adjusted for ties)

		Sum of	
CEREAL	N	Est Median	Ranks
0.0	30	3.0000	67.0
2.5	30	3.0000	79.0
5.0	30	3.0000	74.5
7.5	30	3.0000	79.5

Gry median = 3.0000

OLOR versus CEREAL, CONSUMIDOR

Source	DF	SS	MS	F	P
CEREAL	3	9.292	3.09722	3.97	0.011
CONSUMIDOR	29	264.742	9.12902	11.69	0.000
Error	87	67.958	0.78113		
Total	119	341.992			

➤ **ANÁLISIS DE SENSORIAL PRESENTADO SOLO DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

Friedman Test: SOLA versus CEREAL_1 blocked by CONSUMIDOR_1

S = 12.55 DF = 3 P = 0.006

	Est	Sum of		
CEREAL_1	N	Median	Ranks	
0.0	25	2.125	63.0	
2.5	25	1.625	45.0	
5.0	25	2.875	65.0	
7.5	25	3.875	77.0	
Gry median = 2.625				

SOLA versus CEREAL_1, CONSUMIDOR_1					
Source	DF	SS	MS	F	P
CEREAL_1	3	20.92	6.97333	4.82	0.004
CONSUMIDOR_1	24	0.00	0.00000	0.00	1.000
Error	72	104.08	1.44556		
Total	99	125.00			

➤ **ANÁLISIS DE SENSORIAL PRESENTADO CON LECHE DE CEREAL EXTRUIDO CON POLVO DE TUNA ROJA**

Friedman Test: LECHE versus CRALES blocked by JUEZ
 $S = 16.09$ $DF = 3$ $P = 0.001$

	Est	Sum of		
CRALES	N	Median	Ranks	
0.0	22	2.000	46.0	
2.5	22	2.000	43.0	
5.0	22	3.000	57.0	
7.5	22	4.000	74.0	
Gry median = 2.750				

LECHE versus CRALES, JUEZ					
Source	DF	SS	MS	F	P
CRALES	3	26.818	8.93939	6.77	0.000
JUEZ	21	0.000	0.00000	0.00	1.000
Error	63	83.182	1.32035		
Total	87	110.000			