



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA

**EFFECTO DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN SOBRE
LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LA
CÁSCARA DE TAMARINDO (*Tamarindus indica* L.)**

TESIS

Que como requisito para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA

Q.F.B. Dalia Samanta Aguilar Ávila

DIRECTOR DE TESIS

D.C. Héctor Eduardo Martínez Flores

Morelia Michoacán, Agosto 2012

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alimentos de la Facultad de Químico Farmacobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH); en el Laboratorio de Mecatrónica del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional (CICATA-IPN) unidad Querétaro y en el Laboratorio de Bioquímica Molecular de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Querétaro. El proyecto fue apoyado por el Programa Nacional de Becas de CONACyT (CVU 239231).

Agradecimientos

Al Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alimentos de la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH, dónde realicé mis estudios de maestría y a la Q.F.B. Mireya Ramos Rendón por su apoyo en la gestión del material y reactivos.

Al Laboratorio de Mecatrónica del CICATA-IPN, en particular al Dr. Eduardo Morales Sánchez por el apoyo otorgado.

Al Laboratorio de Bioquímica Molecular de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Querétaro, por haberme permitido realizar parte del desarrollo experimental del proyecto, en especial a la Dra. Rosalía Reynoso Camacho.

Al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñonez, a la M.C. Fabiola Eugenia Pedraza Bucio y al Ing. Ramiro Morelos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la UMSNH por su disposición y apoyo incondicional.

Al Dr. Rosalio Mercado Camargo y al Q.F.B. Roberto del Laboratorio de Neurobiología de la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH, por su apoyo en el préstamo del equipo necesario para el desarrollo del trabajo.

A la M.C. Rosa María García Martínez y a la M.C. Diana Cecilia Maya Cortés del Laboratorio de Análisis de Alimentos de la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH.

Agradecimientos

A Dios, por permitirme alcanzar una vez más una meta establecida.

A mi mamá, por su apoyo incondicional, por sus consejos y por ser un gran ejemplo de lucha, dedicación y esfuerzo. A mis hermanos y mi tío, por ser una motivación constante y por todo su cariño, los quiero.

A mi esposo, por apoyarme en todo momento y por compartir conmigo la alegría de un triunfo más en nuestras vidas, por su comprensión y por demostrarme su amor día a día. A mis suegros, la Mtra. Yolanda Medrano S. y al Ing. Román Serrano G. por su cariño y por hacerme sentir como a una hija, los quiero.

A mi Asesor de Tesis, al Dr. Héctor E. Martínez Flores, por ser un pilar importante en mi formación académica, por su tiempo, dedicación y consejos.

A mis sinodales, a la Dra. Carla Karina Chávez Moreno, al Dr. Javier Ponce Saavedra, a la Dra. Rosalía Camacho Reynoso y al Dr. Eduardo Morales Sánchez por incentivar-me a dar lo mejor de mí cada día.

A las personas que caminaron junto a mí en esta etapa tan importante; a mis compañeros de maestría y en especial a la Dra. Susana García Méndez por convertirse en más que una compañera de posgrado, por ser una gran persona, amiga y un ejemplo de vida.

Dedicatoria

A mi mamá, esposo y hermanos.

Índice

Resumen	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
1. Antecedentes.....	5
1.1. Tamarindo	5
1.1.1. Origen y distribución natural.....	5
1.1.2. Clasificación y descripción botánica	5
1.1.3. Composición química.....	7
1.1.4. Producción	7
1.1.5. Usos	8
1.2.Fibra dietética	11
1.2.1. Propiedades físico-químicas.....	13
1.2.2. Propiedades fisiológicas	15
1.2.3. Fuentes de fibra dietética	16
1.3 Compuestos fenólicos	17
1.3.1. Estrés oxidativo.....	20
1.3.2. Antioxidantes	21
1.3.3. Métodos para medir la capacidad antioxidante	22
1.3.4. Fuentes de antioxidantes	23
1.4.Extrusión.....	24
1.4.1. Efecto del proceso de extrusión sobre los compuestos presentes en un alimento	24
1.5.Alimento funcional	27
1.5.1. Análisis sensorial.....	28
4. Objetivos.....	32
4.1. General.....	32
4.2. Específicos	32
5. Materiales y Métodos	33

5.1. Material y Equipo	33
5.2. Materia prima.....	33
5.3. Extrusión.....	34
5.4. Composición Química	36
5.4.1. Determinación de humedad (Método 934.01, AACC 2000)	36
5.4.2. Determinación de cenizas o minerales (Método 44.19 AACC, 2000).....	36
5.4.3. Determinación de extracto etéreo (grasa) (AACC, 2000).....	36
5.4.4. Determinación de proteína (AACC, 2000)	36
5.4.5. Determinación de fibra dietética (Prosky <i>et al.</i> , 1998)	37
5.4.6. Determinación de pectina (Carré y Haynes, 2005)	37
5.4.7. Determinación de holocelulosa (Hemicelulosa y celulosa) (Wise, 1946)	37
5.4.8. Determinación de lignina (Runkel y Wilke, 1951)	38
5.4.9. Determinación de celulosa	39
5.4.10. Compuestos fenólicos totales (Singleton y Rossi, 1965)	39
5.4.11. Taninos condensados (Deshpande y Cheyran, 1987).....	40
5.4.12. Flavonoides totales (Oomah <i>et al.</i> , 2005)	40
5.5. Propiedades físico-químicas	41
5.5.1. Tamaño y diámetro medio de partícula (Rosell <i>et al.</i> , 2009).....	41
5.5.2. Viscosidad	41
5.5.3. Capacidad de absorción de agua (CAA) y capacidad de absorción aceite (CAAc) (Anderson y Conway, 1969)	41
5.5.4. Índice de retardo de diálisis de glucosa (IRDG) (Ou <i>et al.</i> , 2001).....	42
5.5.5. Capacidad antioxidante: Método de captura de radicales libres por DPPH [•] (1,1-difenil-2-picril-hidrazilo) (Brand-Williams <i>et al.</i> , 1995).....	43
5.5.6. Capacidad antioxidante: ABTS ^{•+} (2,2'azinobis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico) (Re <i>et al.</i> , 1999).....	43
5.5.7. Características de color	43
5.6. Propiedades estructurales.....	44
5.6.1. Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	44
5.6.2. Infrarrojo (IR).....	44
5.7. Elaboración del atole de tamarindo adicionado con el producto extruido.....	45
5.8. Análisis sensorial del atole de tamarindo adicionado con el producto extruido.....	45

5.9. Análisis estadístico	46
6. Resultados y Discusión.....	47
6.1. Análisis de la cáscara de tamarindo	47
6.1.1. Análisis Bromatológico.....	47
6.1.2. Tamaño de partícula	48
6.1.3. Viscosidad	50
6.2. Efecto del proceso de extrusión en las propiedades químicas de la cáscara de tamarindo	50
6.2.1. Fibra dietética total (FT), fibra insoluble (FI) y fibra soluble (FS).....	50
6.2.2. Compuestos bioactivos.....	55
6.2.2.1. Polifenoles totales.....	55
6.2.2.2. Taninos Condensados	57
6.2.2.3. Flavonoides.....	58
6.2.2.4. Actividad antioxidante.....	61
6.3. Efecto del proceso de extrusión en las propiedades físico-químicas de la cáscara de tamarindo	64
6.3.1. Capacidad de absorción de agua (CAA) y capacidad de absorción de aceite (CAAc)	64
6.3.2. Índice de Retardo de Diálisis de Glucosa (IRDG)	67
6.4. Efecto del proceso de extrusión en las características de color en la cáscara de tamarindo	72
6.5. Efecto del proceso de extrusión en las propiedades estructurales de la cáscara de tamarindo	77
6.5.1. Microscopia electrónica de barrido	77
6.5.2. Infrarrojo	77
6.6. Análisis Estadístico.....	82
6.6.1. Análisis de correlación de Pearson.....	82
6.7. Elaboración del atole de tamarindo.....	80
6.7.1. Estandarización	80
6.7.2. Análisis sensorial.....	85
7. Conclusiones.....	94
8. Perspectivas	96

9. Bibliografía.....	97
10. Apéndice.....	111

Figuras

Figura 1. Distribución mundial del árbol de tamarindo..	6
Figura 2. Hoja, flor y vaina del tamarindo.	6
Figura 3 .Viscosidad de un fluido dependiente de la velocidad de corte.	14
Figura 4 .Viscosidad de un fluido dependiente del tiempo.	14
Figura 5. Clasificación de la FD de acuerdo a su fermentabilidad.	15
Figura 6. Estructura del fenol.	18
Figura 7. Estructura básica de los flavonoides.	18
Figura 8. Estructura de la catequina.	19
Figura 9. Estructura de los taninos.	19
Figura 10. Esquema de un extrusor de tornillo simple.	25
Figura 11. Sensograma. Representación esquemática de las impresiones que se perciben a través del análisis sensorial.	28
Figura 12. Molino Pulvex	34
Figura 13. Equipo de extrusión	35
Figura 14. Tornillo del extrusor.	35
Figura 15. Boquilla del extrusor.	36
Figura 16. Curva de distribución de tamaño de partícula.	49
Figura 17. Gráficos del modelo general del Análisis Factorial Completo para FT, FI y FS.	53
Figura 18. Contenido total de polifenoles en la muestra control y en las muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.	56
Figura 19. Reacción de descarboxilación del ácido gálico (compuesto fenólico).	56
Figura 20. Contenido de taninos condensados en la muestra control y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.	58
Figura 21. Contenido de flavonoides totales en la muestra control y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.	59
Figura 22. Gráficos del modelo general del Análisis Factorial Completo para Polifenoles, Taninos y Flavonoides.	60
Figura 23. Porcentaje de inhibición de los radicales ABTS•+ y DPPH• en la muestra control y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.	62

Figura 24. Gráficos del modelo general del Análisis Factorial Completo para ABTS•+ y DPPH•.....	63
Figura 25. Gráficos del modelo general del Análisis Factorial Completo para CAA y CAAC.....	66
Figura 26. Índice de retardo de diálisis de glucosa de la muestra sin extruir y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.....	69
Figura 27. Gráficos del efecto de los factores sobre el Índice de Retardo de Diálisis de Glucosa (IRDG).....	70
Figura 28 a) Espacio de color Hunter <i>L</i> , <i>a</i> y <i>b</i> ; b) ángulo Hue del círculo cromático; c) propiedad de cromaticidad (0 = grises (izquierda), 60 = saturación (derecha).	73
Figura 29. Gráfico de ANOVA y comparación de medias por la prueba Tukey, entre las muestras extruidas (2-7) y el control (1) para el cambio de color ΔE	75
Figura 30. Gráfico de ANOVA y comparación de medias por la prueba Tukey, entre las muestras extruidas (2-7) y el control (1) para la cromaticidad.	75
Figura 31. Gráficos del modelo general del Análisis Factorial Completo para los parámetros de color: <i>L</i> , <i>a</i> y <i>b</i>	76
Figura 32. Micrografías electrónicas de barrido de la cáscara de tamarindo..	78
Figura 33. Espectro infrarrojo de la muestra sin tratamiento de extrusión y las muestras tratadas a 32 % y 39 % de humedad con 90 °C, 100 °C y 110 °C de temperatura.	79
Figura 34. Estructura de la pectina	80
Figura 35. Estructura química de la lignina:.....	81
Figura 36. Medición de la viscosidad en la muestra comercial en 500 ml de agua.	81
Figura 37. Medición de la viscosidad en la muestra con fécula de maíz natural en 500 ml de agua.....	81
Figura 38. Comportamiento de la viscosidad del atole (sin cáscara, cáscara extruida al 1 % y cáscara extruida al 2 %) con respecto al tiempo. Adición de la FD a 60 °C.	84
Figura 39. Comportamiento de la viscosidad del atole (sin cáscara, cáscara extruida al 1 % y cáscara extruida al 2 %) con respecto a la temperatura.	85
Figura 40. Gráfico radial de la apariencia del atole de tamarindo sin cáscara.	87
Figura 41. Evaluación sensorial de la apariencia del atole de tamarindo con cáscara al 1 %.	87
Figura 42. Evaluación sensorial de la apariencia del atole de tamarindo con cáscara al 2 %.	88
Figura 43. Gráfico radial de comparación entre los sabores generados por los ingredientes.	89

Figura 44. Gráfico radial de comparación entre los sabores fundamentales.	89
Figura 45. Gráfico radial de comparación del resabio.....	90
Figura 46. Gráfico radial de comparación del aroma.	90
Figura 47. Gráfico radial de comparación de la granulosis entre las tres muestras.	91
Figura 48. Gráfico radial de comparación de la viscosidad entre las tres muestras.	92
Figura 49. Gráfico radial que muestra la preferencia de los panelistas por las muestra con cáscara extruida al 1 %.	93

Tablas

Tabla 1. Componentes químicos presentes en algunas porciones del árbol de tamarindo.....	8
Tabla 2. Aplicación tecnológica de cada una de las porciones del árbol de tamarindo.	10
Tabla 3. Acción de los componentes de la FD en el organismo.....	16
Tabla 4. Fuentes de FD a partir de residuos agroindustriales.....	17
Tabla 5. Contenido de taninos de la cáscara de la semilla de tamarindo, analizado por diferentes métodos.....	20
Tabla 6. Contenido de polifenoles provenientes de distintas fuentes.....	23
Tabla 7. Cambios generados por la extrusión en las propiedades químicas y físico-químicas de diferentes materias primas.	26
Tabla 8. Diseño Factorial completo 2^3 (a x b).	35
Tabla 9. Composición química de la cáscara de tamarindo	48
Tabla 10. Distribución de partícula del polvo de la cáscara de tamarindo.	49
Tabla 11. Valores en porcentaje de FT, FI y FS después del proceso de extrusión (32 % y 39 % de humedad, 90 °C, 100 °C y 110 °C de temperatura y una velocidad de extrusión de 15 rpm.....	51
Tabla.12. Cuantificación de la lignina, celulosa y hemicelulosa presente en la cáscara de tamarindo sin extruir y extruida a 32 % y 39 % de humedad y 90 °C, 100 °C y 110 °C de temperatura.	52
Tabla 13. Incremento de FS (%) después del proceso de extrusión en residuos agroindustriales.....	52
Tabla 14. Niveles de significancia del Análisis Factorial Completo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta de FT, FI y FS.	54
Tabla 15. Niveles de significancia del Análisis Factorial Completo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta de polifenoles, taninos y flavonoides.	60
Tabla 16. Niveles de significancia del Análisis Factorial Completo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta: a) DPPD [•] : 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo; b) ABTS ^{•+} : 2,2'azinobis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico.	63
Tabla 17. Valores asociados a la CAA y CAAC después del proceso de extrusión a 15 rpm.	65

Tabla 18. Niveles de significancia del Análisis Factorial Completo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta: a) CAA: Capacidad de absorción de agua; b) CAAC: Capacidad de absorción de aceite.....	66
Tabla 19. Glucosa difundida (mg/dL) y glucosa retenida (%) de la muestra sin extruir y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.	68
Tabla 20. Glucosa difundida (mg/dL) y glucosa retenida (%) de la muestra sin extruir y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.	68
Tabla 21. Velocidad máxima de difusión de glucosa en la muestra sin extruir y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.....	69
Tabla 22. Efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta: a) IRDG 30: Índice de retardo de diálisis de glucosa a los 30 minutos; b) IRDG 60: Índice de retardo de diálisis de glucosa a los 60 minutos; c) IRDG 240: Índice de retardo de diálisis de glucosa a los 240 minutos.....	71
Tabla 23. Comparación de la glucosa difundida a 30 min, 60 min y 120 min entre varias fuentes dietéticas con respecto a la cáscara de tamarindo, a 30 min, 60 min y 120 min.....	71
Tabla 24. Escalas de color (<i>L</i> , <i>a</i> , <i>b</i>) después de los tratamientos de extrusión.....	72
Tabla 25. Propiedades de color (ΔE , Hue y Cromo) después de los tratamientos de extrusión.	74
Tabla 26. Niveles de significancia del Análisis Factorial Completo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta: a) Parámetro de color <i>L</i> ; b) Parámetro de color <i>a</i> ; c) Parámetro de color <i>b</i>	76
Tabla 27. Bandas de absorción de espectroscopia IR de los grupos funcionales presentes en la cáscara de tamarindo.....	79
Tabla 28. Análisis de correlación de Pearson.....	79
Tabla 29. Estandarización de la formulación del atole de tamarindo en 100 ml de volumen.	82
Tabla 30. Composición química de la muestra extruida a 32 % de humedad y 100 °C utilizada en la incorporación del producto.	83

Contenido del Apéndice

Apéndice 1. Polifenoles totales: Curva de calibración de ácido gálico.....	111
Apéndice 2. Taninos condensados: Curva de calibración de (+) - catequina.....	111
Apéndice 3. Reacción entre la vainillina y los taninos condensados.	112
Apéndice 4. Reacción del compuesto 2-aminoetil difenilborato con los flavonoides.....	112
Apéndice 5. Flavonoides totales: Curva de calibración de rutina	113
Apéndice 6. DPPH: Antioxidantes como secuestradores de radicales libre.....	113
Apéndice 7. DPPH: Curva de porcentaje de inhibición con ácido gálico	114
Apéndice 8. ABTS ^{•+} : Curva de porcentaje de inhibición con ácido gálico.....	114
Apéndice 9. Evaluación sensorial de una bebida caliente tipo atole	115
Apéndice 10. Análisis Factorial Completo para las variables respuesta de FT, FI y FS. Efecto individual de la temperatura y humedad, e interacción entre ambos factores (temperatura y humedad).....	115
Apéndice 10.1. Análisis Factorial Completo para las variables respuesta de Polifenoles, Taninos, Flavonoides y DPPD•: 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo. Efecto individual de la temperatura y humedad, e interacción entre ambos factores (temperatura y humedad). ...	116
Apéndice 10.2. Análisis Factorial Completo para las variables respuesta: CAA: Capacidad de Absorción de Agua y CAAC: Capacidad de absorción de Aceite. Efecto individual de la temperatura y humedad, e interacción entre ambos factores (temperatura y humedad). ...	117
Apéndice 10.3. Análisis Factorial Completo para las variables respuesta: Parámetros de color, L, a y b. Efecto individual de la temperatura y humedad, e interacción entre ambos factores (temperatura y humedad).	118
Apéndice 11. Gráficos ajustados a una ecuación polinomial de tercer grado para calcular la velocidad máxima de difusión de glucosa.	119

Abreviaturas

AACC	American Association of Cereal Chemists	mm	Milímetros
ABTS ^{•+}	Radical 2,2'azino-bis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico	mg	Miligramos
AGCC	Ácidos grasos de cadena corta	Mg	Magnesio
°C	Grados centígrados	µg	Microgramos
CAA	Capacidad de absorción de agua	µm	Micrómetros
CAAc	Capacidad de absorción de aceite	µl	Microlitros
CaCl ₂	Cloruro de calcio	MEB	Microscopía electrónica de barrido
Ca	Calcio	min	Minutos
Cd	Cadmio	ml	Mililitros
Cps	Centipoise	mmol	Milimoles
Cu	Cobre	nmol	Nanomoles
COOH	Carboxilo	N	Normal
DPPH [•]	Radical 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo	Na ₂ CO ₃	Carbonato de sodio
DMP	Diámetro medio de partícula	NaOH	Hidróxido de sodio
EAG	Equivalente de ácido gálico	OH [•]	Radical hidroxilo
Fe	Hierro	O ₂ ^{•-}	Radical superóxido
FD	Fibra dietética	¹ O ₂	Singlete de oxígeno
FI	Fibra insoluble	O ₃	Ozono
FS	Fibra soluble	ONOO ⁻	Radical de óxido nítrico
FTIR	Infrarrojo por transformada de Fourier	P	Fósforo
g	Gramo	Pc	Peso constante del crisol
h	Hora	Pf	Peso final (crisol + mtra. seca)
Ha	Hectárea	Rpm	Revoluciones por minuto
HBr	Ácido bromhídrico	Rsq	Coficiente de determinación
HCl	Ácido clorhídrico	RMSE	Error cuadrático medio
HClO	Ácido hipocloroso	ROO	Radical peroxilo
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno	Ton	Tonelada
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico	w	Peso de la muestra (w) en gramos
IRDG	Índice de retardo de diálisis de glucosa	w ₁	Peso del papel con el residuo gramos
Kg	Kilogramo	w ₂	Peso del papel en gramos
L	Longitud	Zn	Zinc
M	Peso de la muestra húmeda	ZnCl ₂	Cloruro de zinc
m	Metros		

Resumen

En este trabajo se evaluó el efecto de la humedad y de la temperatura en el proceso de extrusión sobre las propiedades funcionales de la cáscara de tamarindo (*Tamarindus indica* L.), relacionadas al contenido de fibra dietaria, polifenoles, taninos, flavonoides y la capacidad que tienen estos compuestos de inhibir las reacciones de oxidación. Las muestras extruidas presentaron un incremento del 138.33 % en la porción soluble de la fibra dietaria, viéndose afectada principalmente por la variable de la humedad; mientras que el contenido de polifenoles y flavonoides se redujo en un 40.28 % y un 18.38 % respectivamente. Sin embargo, el porcentaje de taninos aumentó en un 142.48%. La actividad antioxidante relacionada a los compuestos fenólicos disminuyó ligeramente, teniendo mayor efecto la temperatura y el sinergismo generado de temperatura con la humedad. En consecuencia, los cambios generados durante el proceso de extrusión en la cáscara de tamarindo mejoró el contenido en fibra soluble, lo que permite obtener un material con buenas características antioxidantes. Las mejores condiciones para extruir la cáscara de tamarindo fueron a humedades bajas (32 %) y temperatura intermedia (100 °C), ya que con estas condiciones se observó un mantenimiento o incremento de los componentes como la fibra insoluble (FI), la fibra soluble (FS), polifenoles, flavonoides y capacidad de inhibir a los radicales ABTS^{•+} (2,2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico) y DPPH[•] (1,1-difenil-2-picril-hidrazilo). El contenido en FD y sus características antioxidantes, permitieron proponer su posible utilización como ingrediente en un alimento funcional, por lo que se planteó la formulación y estandarización de un atole de tamarindo elaborado con cáscara de tamarindo extruida al 1 % conteniendo fibra alimentaria y antioxidante, presentando buena aceptación por parte de los panelistas que participaron en la evaluación sensorial.

Abstract

In this document was evaluated the moisture and temperature effect in the extrusion process regarding the functional properties of tamarind shell (*Tamarindus indica* L.), which are related with the dietary fiber content, polyphenols, tannins and flavonoids and the capacity that these compounds have to inhibit oxidation reactions. The extruded samples showed an increase of 138.33 % in the soluble portion of the dietary fiber, which it was affected principally by the moisture variable, while the polyphenols and flavonoids content decrease in 40.28% and 18.38% respectively. However the tannins percentage increases 142.48%. The antioxidant activity related with the phenolic compounds showed a slightly decrease with greater temperature and moisture effect in the antioxidant activity. Therefore the changes generated during the extrusion process in the tamarind shell improve the soluble fiber content, and this allows having a material with good antioxidant characteristics. The best conditions to extruded tamarind shell were with low humidity (32%) and temperature of 100°C, with these conditions were increased the soluble fiber compounds (FI), the insoluble fiber (FS), polyphenols, flavonoids and the ability of inhibit the ABTS^{•+} (2,2'-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid) y DPPH[•] (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) radicals. The dietary fiber content and its antioxidant characteristics, allow tamarind as a functional food ingredient. Hence it was proposed the formulation and standardization of tamarind atole, using tamarind shell extruded at 1%, containing dietary fiber and antioxidant fiber. The atole was well accepted by the panelists who participated in the sensory evaluation.

Introducción

Existen diversas fuentes de fibra dietética (FD) procedentes de cereales, frutas y vegetales; sin embargo, se ha mostrado una clara tendencia en aprovechar residuos obtenidos de la industria alimentaria con el fin de minimizar la problemática ambiental generada, además de su aprovechamiento como fuente potencial en compuestos bioactivos como la FD y fitoquímicos (como por ejemplo los compuestos fenólicos) que ayudan a prevenir enfermedades crónico-degenerativas (AZTI-Tecnalia, 2007).

Actualmente, México presenta los primeros lugares en enfermedades como la obesidad, diabetes, problemas cardio-vasculares y cáncer, de acuerdo con datos obtenidos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2006 indican que siete de cada diez personas adultas en nuestro país presentan sobrepeso y obesidad (Secretaría de Salud, 2007). Lo anterior se deriva principalmente por malos hábitos alimentarios y a un estilo de vida sedentario, al consumo de alimentos refinados, que contienen carbohidratos y grasas; por lo que cada vez se hace más necesario el llevar una alimentación más sana, incluyendo alimentos ricos en nutrientes y que además contengan sustancias capaces de producir efectos benéficos en el organismo, previniendo dichas enfermedades (Martínez-Flores y Figueroa, 2008).

La industria alimentaria ha visto la necesidad de desarrollar alimentos formulados enriquecidos con FD contribuyendo a una dieta más equilibrada y saludable (Ning *et al.*, 1991), aprovechando la generación de residuos sólidos agroindustriales como los tallos, raíces, hojas, semillas, cáscaras u otras partes del fruto o la planta que no son utilizadas en diversos procesos para la elaboración de productos (Canché-Escamilla *et al.*, 2005).

Se han realizado estudios previos del contenido de FD en residuos generados en la Industria Agroalimentaria como la cáscara de manzana y guayaba (Bautista *et al.*, 2004; Matos-Chamorro y Chambilla-Mamani, 2010), bagazo de caña de azúcar y cascarilla del frijol lima (*Phaseolus lunatus*) (Sánchez, 2005). La cáscara de tamarindo (*Tamarindus indica* L.) generada como subproducto de la industria contiene un 58 ± 0.69 % de FD (Aguilar-Ávila, 2009). Debido a esto, se puede utilizar como materia prima para la obtención de FD con lo que se le proporcionaría un valor agregado a dicho residuo.

Diversas investigaciones se han centrado en los cambios funcionales, físico-químicos y nutricionales del alimento generados después de procesos termomecánicos como el de extrusión (Fellows, 2007; Ning *et al.*, 1991; Gualberto *et al.*, 1997; Jae-Kwan *et al.*, 1998), el cual somete a la materia prima a un corte mecánico intenso produciendo rompimientos de enlaces covalentes de los biopolímeros generando desnaturalización de enzimas indeseables, inactivación de algunos factores antinutricionales (inhibidores de

tripsina, hemaglutininas, taninos y fitatos) (Abd El-Hady y Habiba, 2003), gelatinización del almidón, incremento en la fibra soluble y reducción en la oxidación de los lípidos (Singh *et al.*, 2007). Por lo que estos cambios promueven el mejoramiento de las propiedades texturales, de color, apariencia y nutritivas del alimento (AZTI-Tecnalia, 2007).

En este trabajo se plantea la evaluación de los cambios efectuados en las propiedades químicas, físico-químicas, estructurales y de compuestos bioactivos de la cáscara de tamarindo por medio del proceso de extrusión, para la obtención de un ingrediente con alto contenido en FD para su posterior aplicación en el desarrollo de alimentos funcionales.

En los siguientes capítulos, se muestran los antecedentes que fundamentan al proyecto de investigación, así como la descripción de la metodología utilizada y la presentación e interpretación de los resultados obtenidos.

1. Antecedentes

1.1. Tamarindo

El árbol de tamarindo se produce en todas las regiones del mundo considerándose como una planta multipropósito debido a los diversos usos que tienen sus raíces, madera, hojas, frutos, semillas y cáscara de la vaina en la elaboración de alimentos, fármacos y medicina herbolaria (Parrotta, 1990; Suksomtip y Pongsamart, 2008; El-Siddig *et al.*, 2006; De Caluwé *et al.*, 2010).

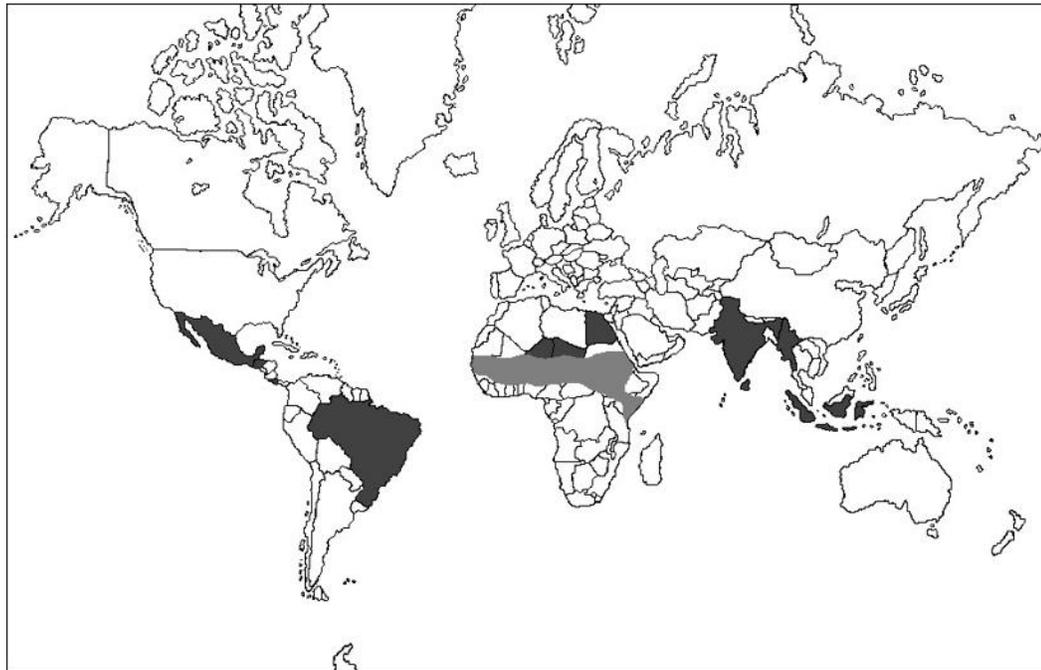
1.1.1. Origen y distribución natural

El árbol de tamarindo es originario de las sabanas secas del África desarrollándose principalmente en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Figura 1) (Parrotta, 1990). En tiempos antiguos el árbol fue introducido a Egipto, el Medio Oriente y Asia por comerciantes árabes, y en tiempos más recientes se introdujo al Trópico del Nuevo Mundo probablemente durante los primeros años del comercio de esclavos procedentes del oeste de África (Parrotta, 1990).

1.1.2. Clasificación y descripción botánica

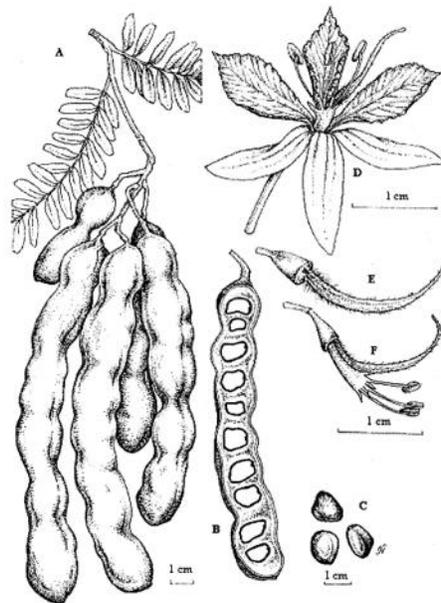
De acuerdo con su taxonomía el tamarindo pertenece a la familia Fabaceae o Leguminosae y a la subfamilia Caesalpinioideae. El género *Tamarindus* es monotípico, es decir, tiene una sola especie. Se considera un árbol que se mantiene siempre verde con un tiempo de vida entre los 150 a los 200 años, alcanzando alturas de hasta 30 m, con diámetros en su tronco de 1.5 a 2 m (Sadik, 2010; Buyinza *et al.*, 2010).

El tamarindo está constituido por diversas partes aprovechables, produciendo frutos entre los primeros 7 a 10 años de vida. Tiene dos periodos de florescencia, uno en marzo y abril y el otro durante octubre, generando flores de color amarillo con rayas naranjas o rojo de cinco pétalos; sus hojas son de un color verde brillante con apariencia de plumas mientras que su fruto está formado por una vaina indehisciente, oblonga o linear, algo comprimida lateralmente y comúnmente curvada, con una capa externa (epicarpio) pardo delgada crustácea y seca con una capa mediana (mesocarpio) pulposa combinada con fibras y una capa coriácea interna (endocarpio) septada entre las semillas, conteniendo de 1 a 12 semillas (Figura 2) (Parrotta, 1990; Gunasena y Pushpakumara, 2006; Aceves-Navarro *et al.*, 2008; Sadik, 2010; De Caluwé *et al.*, 2010).



Fuente: Nyadoi *et al.* (2010).

Figura 1. Distribución mundial del árbol de tamarindo. Gris claro= Área natural en África (Parrotta, 1990). Gris oscuro = Área de distribución mundial.



Fuente: Gunasena y Pushpakumara, 2006.

Figura 2. Hoja, flor y vaina del tamarindo.

1.1.3. Composición química

Las diversas partes del árbol de tamarindo cuentan con compuestos químicos que brindan la posibilidad de tratar diversos padecimientos.

Corteza del tronco. Es fuente de alcaloides, saponinas, glicósidos, lípidos, sesquiterpenos, taninos y flobataminas (Doughari, 2006; Dhasade *et al.*, 2009; Nwodo *et al.*, 2010).

Flores. Contienen gran humedad (80%), proteína (2.8%), son ricas en fósforo (P) y Ca (45 y 35 mg, respectivamente), fibra (1.5%) y aceites (Lewis y Neelakantan, 1964; The Wealth of India, 1976; Duke, 1981).

Fruto. De acuerdo con Dhasade *et al.* (2009), la fruta contiene derivados de furano (44.4%) y ácido carboxílico (33.3%), flobatanina, pectina, azúcar invertido y algunos ácidos como el tartárico, succínico y cítrico, así como campesterol, β -amirina, β -sitosterol, ácidos palmítico, oleico, linoleico y eicosanoico; mientras que para el mucílago reportaron pectina, arabinosa, xilosa, galactosa, glucosa y ácido urónico. El extracto de semillas contiene bufadienolida (scillifrasida 3-O- β -D glucopiranosil - (1-2)-L-ramnopiranosido) y cardenólicos (uzarigenina-3-O- β -D xilopiranosil (1-2) - α -L ramnopiranosido), celulosa, fitohemaglutininas y quitinasa (Jadhav *et al.*, 2010).

Semilla. Los polisacáridos reportados en la semilla incluyen mucílago o xiloglucano (Mishra y Bajpai, 2006) y galactoxiloglucano (Menon *et al.*, 2010; Sahoo *et al.*, 2010). La testa de la semilla contiene 2-hidroxi-3',4'-dihidroxiacetofenona, metil 3,4-dihidroxibenzoato, 3,4-dihidroxiénil acetato epicatequinas (Soong y Barlow, 2004), taninos poliméricos y procianidinas (Sudjaroen *et al.*, 2005). Aengwanich *et al.* (2009), mencionan que la semilla está compuesta por un 2.93% de antocianidinas y un 10.18% de taninos.

En la Tabla 1 se muestran los componentes químicos principales de algunas de las porciones de esta planta, reportados por diferentes autores.

1.1.4. Producción

Parrota (1990), menciona que los rendimientos de la fruta anuales en promedio de un árbol maduro son aproximadamente de 150 a 200 kg e incluso existen reportes de 500 kg por árbol en la India y de 12 a 16 ton/ha.

En México, el tamarindo es un cultivo de importancia económica principalmente en la región del trópico seco (Orozco-Santos, 2006). En el año 2004, se cultivaron más de 8,000 ha en nuestro país, principalmente en los estados de Colima, Jalisco, Guerrero,

Michoacán, Oaxaca, Veracruz y Chiapas obteniendo producciones anuales del fruto de 38,000 ton con un valor de la producción de 134 millones de pesos (Orozco-Santos, 2006).

En la región Pacífico Centro de México (Colima, Jalisco, Michoacán y Nayarit) se explotan alrededor de 5,200 ha (Orozco-Santos, 2006). En el año 2007 a nivel nacional se sembraron 59,046.79 ha, de las cuales cinco estados concentran el 91.77% que se jerarquizan a continuación: Veracruz (27,373.50 ha), Oaxaca (13,215.00 ha), Guerrero (6,278.50 ha), Puebla (3,395.00 ha) y Tabasco (3,927.52 ha) (Aceves-Navarro *et al.*, 2008). De acuerdo con Segura-Ledesma *et al.* (2009), el tamarindo es uno de los frutos de mayor consumo en Michoacán.

Tabla 1. Componentes químicos presentes en algunas porciones del árbol de tamarindo.

	Pulpa		Hojas		Semilla		Endospermo		Testa
Componente/ Referencia	Martinello <i>et al.</i> (2006) (m/v)	De Caluwé <i>et al.</i> (2010) (%)	Saideswara- Rao y Mathew (2001) (%)	Panigrahi <i>et al.</i> (1989) (%)	Kumar y Bhattacharya (2008) (%)	Kumar y Bhattacharya (2008) (%)	Kumar y Bhattacharya (2008) (%)		
Carbohidratos	70.25 ± 8.56 mg/ml	71.8-62.5	18.2	-	50.0-57.0	65.1-72.2	-		
Humedad	-	31-20.6	70.5	9.04	9.4-11.3	11.4-22.7	11		
Fibra	-	5.1-3	1.9	-	7.4-8.8	2.5-8.2	21.6		
Lípidos	-	0.4-0.5	2.1	4.82	4.5-16.2	3.9-16.2	-		
Proteína	-	9.2-3.1	5.8	13.13	13.3-26.9	15.0-20.9	-		
Cenizas	-	2.85-2.1	1.5	1.97	1.60-4.2	2.4-4.2	7.4		
Polifenoles	34.02 ± 2.11 nmol/ml	-	-	-	-	-	-		
Flavonoides	35.51 ± 5.61 µg/ml	-	-	-	-	-	-		
Taninos	-	-	-	5.62	-	-	20.2		

1.1.5. Usos

El árbol de tamarindo se considera multipropósito ya que cada una de sus partes es utilizable para manufacturar diferentes productos (Tabla 2), además de que la presencia de diversos componentes químicos le brinda características para tratar diversos padecimientos; a continuación se presentan dichos usos genéricos y terapéuticos (Maheswari *et al.*, 2008).

La *corteza de la raíz*, ya sea pulverizada o cocida es tomada como remedio para la diarrea y la disentería en la India. En África se bebe el extracto de raíces y hojas como tratamiento contra la lepra, dolor de pecho, dolores cardiacos, infecciones helmínticas, dolores abdominales, disentería, epilepsia, fiebre, enfermedades respiratorias, enfermedad del sueño, y sífilis. La madera es utilizada en la elaboración de muebles y carbón de leña (Parrota, 1990; Havinga *et al.*, 2010).

Los extractos de las *hojas* son usadas para el tratamiento de gripa, desórdenes estomacales, fiebre, diarrea, ictericia y como antiséptico para la piel por su capacidad antimicrobiana (Doughari, 2006; Havinga *et al.*, 2010; Nwodo *et al.*, 2010). Las *flores* se consumen como vegetales en la elaboración de ensaladas al igual que las hojas y también se utilizan en la producción de miel (Sudjaroen *et al.*, 2005; El Siddig *et al.*, 2006; Sadik, 2010).

La *pulpa* del tamarindo se consume principalmente fresca o se utiliza en jarabes, concentrado de jugos (Bhattacharya *et al.*, 1994), curries, encurtidos, salsas de carne, mermeladas y dulces (Singh *et al.*, 2007). En algunos países africanos, el jugo obtenido de la pulpa es mezclado con cenizas de madera para neutralizar el sabor ácido generado por la presencia del ácido tartárico. En México y otros países solamente se le adiciona azúcar para hacer una bebida ácida agradable (De Caluwé *et al.*, 2010) mientras que en Ghana se le adiciona azúcar y miel. Algunas veces la pulpa es fermentada para producir una bebida alcohólica (De Caluwé *et al.*, 2010). El extracto de pulpa ha sido probado como antibacteriano contra *Salmonella typhimoruum*, *Staphylococcus aureus* y el hongo *Aspergillus niger*; su eficiencia se debe a la presencia de 2, 3-butanediol, 2-furancarboxaldehído, 5-metil, 2-furancarboxaldehído, que sugiere su posible uso o aplicación en productos alimenticios frescos o procesados (Jadhav *et al.*, 2010). La pulpa posee capacidad antioxidante (Martinello *et al.*, 2006; Stangeland *et al.*, 2009), por tener un alto contenido de compuestos fenólicos (De Caluwé *et al.*, 2010), y también se ha probado *in vivo* en roedores su capacidad analgésica (Khalid *et al.*, 2010).

El polvo de la *semilla* representa el mayor número de aplicaciones reales y potenciales como producto industrial (El-Siddig *et al.*, 2006; Poommarinvarakul *et al.*, 2010). Su capacidad de hidratación (Bhattacharya *et al.*, 1997) le confiere propiedades reológicas que han sido aprovechadas en la preparación de jaleas y mermeladas (Bhattacharya *et al.*, 1994) y también es utilizado en la industria textil, papelera y del yute (Kumar y Bhattacharya, 2008). La semilla también es utilizada en la manufactura de polisacáridos (gelatina), adhesivos y taninos (El-Siddig *et al.*, 2006). El endospermo contiene un 46-48% de pectina, que se utiliza como estabilizador de nieves, mayonesas y quesos. Debido al contenido de aceites es capaz de reducir el colesterol sanguíneo en humanos (Iftekhar *et al.*, 2006), mientras que los compuestos fenólicos le brindan

capacidad antioxidante (Komutarina *et al.*, 2004), al reducir la peroxidación lipídica *in vitro*, además de poseer actividad antimicrobiana (Sudjaroen *et al.*, 2005; Dhasade *et al.*, 2009).

Tabla 2. Aplicación tecnológica de cada una de las porciones del árbol de tamarindo.

Porción	Tecnología	Metodología	Aplicación	Referencia
Testa-semilla	Extracción de antioxidantes.	Optimización mediante diferentes disolventes, (etanol y acetato de etilo) con dióxido de carbono a diferentes concentraciones.	Antioxidante	Luengthanaphol <i>et al.</i> (2004)
Endospermo-semilla	Producción de una hoja de xiloglucano del endospermo partir de la celulosa de la fibra de sisal.	Secado de las semillas al sol y posterior molienda. Aumento de su fuerza de tensión por humidificación y compresión.	Techos falsos en casas y departamentos.	Veluraja <i>et al.</i> (1997)
Mucílago-semilla	Obtención de mucílago.	Extracción mediante remojo con agua destilada. Precipitación del mucílago con isopropanol.	Remoción de colorantes textiles (amarillo oro y rápido directo escarlata).	Mishra y Bajpai (2006)
Cáscara	Producción de floculantes poliméricos.	Reacciones redox de iniciación con microondas y microondas asistida con reacción de acrilamida.	Tratamientos de aguas residuales.	Ghosh <i>et al.</i> (2010)
Madera	Producción de carbón activado.	Activación química con cloruro de zinc (ZnCl ₂) y carbonización a 439°C por 40 min.	Adsorción de Pb en aguas residuales.	Acharya <i>et al.</i> (2009)

1.2. Fibra dietética

Antiguamente se tenía la inquietud de describir a los componentes de la pared celular de los vegetales que no eran digeridos por las enzimas gastrointestinales del ser humano. Hipsley en 1953 acuñó el término de “fibra dietética” con la finalidad de poder describir a dichos componentes.

Sin embargo no fue hasta en el periodo de 1972-1976 que Trowell, Burkitt, Walker y Painter retomaron este término y basándose en estudios epidemiológicos hipotizaron que la deficiencia de la FD se relacionaba con la existencia de una serie de enfermedades presentes en los países occidentales como constipación, hemorroides, diverticulosis, cáncer de colon, diabetes, obesidad y enfermedades cardiovasculares (AACC, 2001; Mora-Bedolla *et al.*, 2010).

Para asegurarse que las características y las principales funciones del término de “fibra dietética” fuera bien descrito, la American Association of Cereal Chemists (AACC) desarrollo la siguiente definición:

“La FD es la parte comestible de las plantas o hidratos de carbono análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado, con fermentación completa o parcial en el intestino grueso. La FD incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias asociadas de la planta. Las FD promueven efectos benéficos fisiológicos como laxante y disminuye los niveles de colesterol y/o glucosa en sangre (AACC, 2001)”.

Una de las clasificaciones más importantes de la FD, es la que se relaciona con la capacidad de ésta de dispersarse en el agua: y se le conoce como fibra soluble (FS) y fibra insoluble (FI).

La **fibra soluble** está formada por pectina, gomas, β -glucano, fructooligosacáridos (inulina), algunas hemicelulosas, mucílagos y otras sustancias que se encuentran en pequeña cantidad en leguminosas, cereales y algunas frutas y verduras. Tiene la capacidad de dispersarse en agua y de formar geles viscosos en el tracto intestinal confiriendo volumen a las heces y regulando la velocidad de absorción intestinal de los azúcares (glucosa) procedentes de los alimentos y el colesterol sanguíneo. Las FS es fermentada por microorganismos intestinales como de los géneros *Bacteroides*, *Eubacterium*, *Bifidobacterium* y *Peptostreptococcus* (García-Obregón, 2002; Martínez-Flores y Figueroa, 2008).

Pectina. Sustancia coloidal presente en las paredes celulares de plantas, asociadas con otros hidratos de carbono, principalmente hemicelulosas, su estructura está integrada por moléculas de ácido D-galacturónico, unidas por enlaces glucosídicos α -D- (1,4). Su clasificación se basa en la cantidad de grupos carboxilos esterificados con metilos o en

forma de sal, como es el caso de las pectinas de alto índice de metoxilo (más del 50% de grupos carboxílicos esterificados), y de bajo índice de metoxilo (menos del 50% de grupos carboxílicos esterificados) (Boatella *et al.*, 2004; Badui, 2006).

Gomas y mucílagos. Las gomas son β -glucanos y pentosanos o arabinosilanos que son solubles en agua caliente (López-Perea, 2007); se derivan de plantas exudativas (goma arábiga y tragacanto), semillas (goma guar) y extractos de algas marinas (agar, carragenina y alginatos). Los mucílagos son polímeros compuestos por polisacáridos semejantes a las pectinas y están presentes en semillas como la ispaghula (*Plantago psyllium*), flores de malva y semillas de lino. Estos hidrocoloides son utilizados en pequeñas cantidades como gelificantes, espesantes, estabilizadores agentes emulsificantes en determinados alimentos. Algunos como la goma guar y la ispaghula son utilizados como alimentos funcionales (Gray, 2006; Aquino *et al.*, 2009; Escudero-Álvarez y González-Sánchez, 2006).

Inulina. Es un carbohidrato de almacenamiento presente en muchas plantas, vegetales, frutas y cereales, como el ajo, la cebolla, el esparrago, la achicoria, y algunos tubérculos como la papa o papaya (*Helianthus tuberosus* L.) y el yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl.) además de la flor dalia (*Dahlia pinnata* Cav.) y las raíces de dientes de león (*Taraxacum officinale* Weber). Es una mezcla de cadenas de oligómeros y polímeros de 25 a 35 residuos de moléculas de fructosa, unidas por enlaces β - (2,1) que suele incluir en su extremo, una molécula de glucosa. Precisamente, la configuración β de este enlace es la que le confiere su carácter de fibra dietética (Madrigal y Sangronis, 2007; Villegas, 2008; González-González *et al.*, 2007).

La **fibra insoluble** está integrada principalmente por celulosa, algunos tipos de hemicelulosas, lignina y almidón resistente. Tiene la característica de resistir la acción de los microorganismos intestinales y de no disolverse en agua, sin embargo presenta una parcial hidratación que aumenta la masa fecal y facilita las deposiciones previniendo el estreñimiento y evitando el desarrollo de algunos tipos de cáncer como el de colon (García-Obregón, 2002).

Hemicelulosa. Son polisacáridos formados por la unión de distintos azúcares como la glucosa, la xilosa, la sacarosa, la manosa o la arabinosa, unidos mediante enlaces glucosídicos β (1,4). Se clasifica de acuerdo a su abundancia en ácidos urónicos, si contiene muchos de éstos se le conoce como hemicelulosa ácida y si no es así se le llama hemicelulosa neutra (Nelson, 2001).

Celulosa. Es un polisacárido estructural componente de las paredes celulares vegetales y constituye la molécula más abundante de la naturaleza. Es un polímero lineal no ramificado de D- (+) glucosa que posee enlaces β - (1,4) glucosídicos. El tracto digestivo de los mamíferos no posee enzimas capaces de degradar la celulosa, ya que no es hidrolizada ni por la α -amilasa, ni por la β -amilasa (Moreno, 2000).

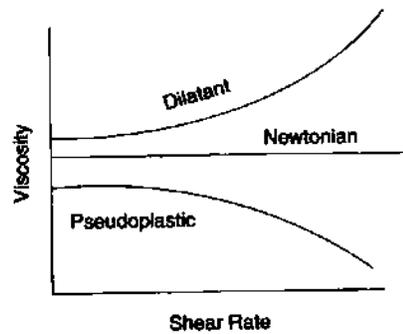
Lignina. Es un polímero que resulta de la unión de varios alcoholes fenilpropílicos; contribuye a dar rigidez a la pared celular haciéndola resistente a impactos, flexiones y ataque de microorganismos. Ésta no se digiere ni se absorbe ni tampoco es atacada por la microflora bacteriana del colon; una de sus propiedades más interesantes es su capacidad de unirse a los ácidos biliares y al colesterol retrasando o disminuyendo su absorción en el intestino delgado; es un componente menor ya que muchas verduras, hortalizas y frutas contienen un 0.3% de lignina, en especial en un estado de maduración elevado (Escudero-Álvarez y González-Sánchez, 2006).

1.2.1. Propiedades físico-químicas

Los efectos fisiológicos de la FD se relacionan con sus propiedades fisicoquímicas y tecnológicas, como son la capacidad de retención de agua, capacidad de hinchamiento, viscosidad, formación de gel, capacidad de ligar sales biliares y aceite. Estas propiedades dependen de su relación fibra insoluble/ fibra soluble, tamaño de partícula, condiciones de extracción y fuente vegetal (Figueroa *et al.*, 2008). Estas propiedades se describen a continuación.

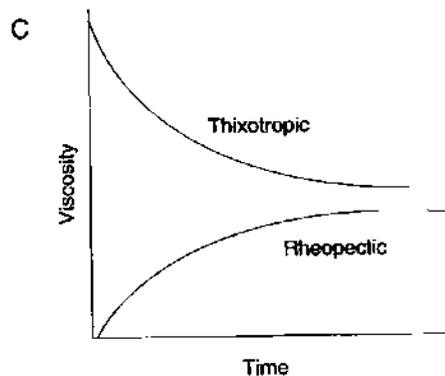
La FS en contacto con el agua forma un retículo o *gel*, originándose soluciones de gran viscosidad, mientras que la FI es capaz de retener el agua en su matriz estructural formando mezclas de baja viscosidad (Escudero-Álvarez y González-Sánchez, 2006). La formación del gel depende principalmente de la presencia de gomas, pectinas, mucílagos o hemicelulosas que interactúan con las moléculas de agua debido al gran número de grupos hidroxilo libres, además de la concentración, la temperatura, los iones y el pH juegan un papel importante (Nelson, 2001). Del mismo modo, el tamaño de partícula se vincula directamente con la *hidratación* de la FD, ya que al incrementar el área superficial de contacto incrementa también la interacción entre los componentes químicos de la FD y el agua (Martínez-Flores y Figueroa, 2008).

Como se mencionó anteriormente, el tipo de hidratación que presente la FD genera una determinada *viscosidad* la cual ayuda a retrasar la absorción de moléculas orgánicas y minerales al torrente sanguíneo o su difusión desde la luz intestinal hasta la superficie de la mucosa intestinal (Martínez-Flores y Figueroa, 2008). El tipo de viscosidad que presenta un fluido puede variar dependiendo de su comportamiento con respecto a la velocidad de corte o al tiempo. Aquellos fluidos que se mantienen constantes con respecto a la velocidad de corte y al tiempo se les conocen como Newtonianos. Los no-Newtonianos se clasifican dependiendo de la velocidad de corte o del tiempo; si la viscosidad aumenta al incrementarse la velocidad de corte se le denomina dilatantes si ocurre lo contrario son pseudoplásticos (Figura 3). Si la viscosidad aumenta al incrementarse el tiempo se le denomina reopéctico si ocurre lo contrario es tixotrópico (Figura 4). La viscosidad en alimentos se mide generalmente utilizando viscosímetros rotacionales como el Brookfield que consiste de una aguja conectada a un resorte (Nelson, 2001).



Fuente: Nelson, 2001.

Figura 3 .Viscosidad de un fluido dependiente de la velocidad de corte.



Fuente: Nelson, 2001.

Figura 4 .Viscosidad de un fluido dependiente del tiempo.

Por tal razón, los alimentos ricos en fibra soluble como frutas y verduras presentan mayor capacidad de hidratación que los cereales. Estas propiedades de hidratación de la FD determinan el nivel óptimo de uso en los alimentos debido a la textura que se desea obtener (Raghavendra *et al.*, 2006). Las propiedades de hidratación de un ingrediente rico en FD son cruciales para su aplicación satisfactoria en alimentos que serán sometidos a stress físico, como sucede, por ejemplo, en la extrusión de cereales (Wong y Cheung, 2005).

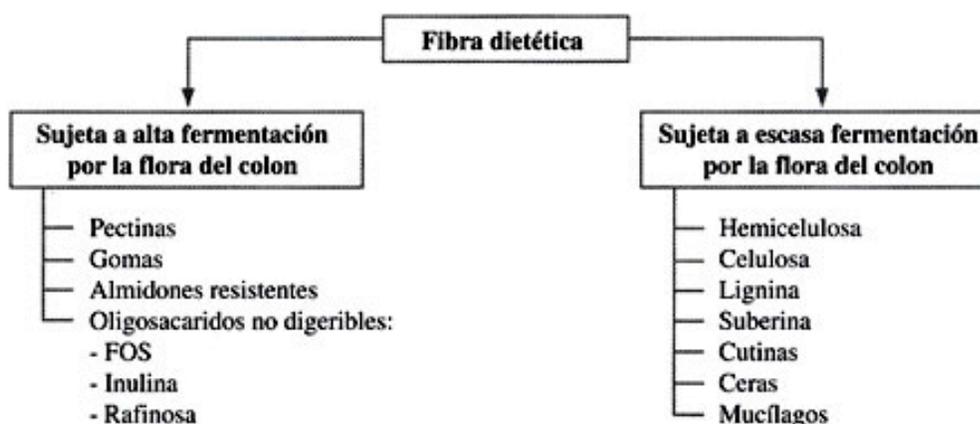
La FD también presenta la *capacidad de absorber aceite*, sin embargo a diferencia de la absorción de agua que se da principalmente por la composición química de la FD, la captación de aceite depende de la porosidad de la estructura (Nelson, 2001). Esta característica es importante ya que es la que determina la cantidad de triglicéridos, colesterol y ácidos biliares (lignina) que la fibra puede encapsular en el tracto gastrointestinal, impidiendo su absorción, y facilitando su expulsión por medio de las heces (Martínez-Flores y Figueroa, 2008). Una hidratación previa de la fibra puede impedir que

esta sea capaz de retener moléculas de aceite debido a que el agua ha ocupado previamente dichos poros. Sin embargo, además de la captación de moléculas de aceite, la FD tiene la capacidad de enlazar iones Calcio (Ca), Cadmio (Cd), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) por medio de los ácidos urónicos y grupos carboxilo libres presentes en la pectina los cuales tienen mayor afinidad por los iones Ca, dicho mecanismo se conoce como *intercambio iónico* (Nelson, 2001). Cabe mencionar que esta propiedad es poco deseable ya que la mayoría de estos minerales regulan reacciones del metabolismo biológico.

1.2.2. Propiedades fisiológicas

En la figura 5 se muestra una clasificación de la FD con respecto a su capacidad de fermentación colónica, lo que conlleva a tener efectos fisiológicos diferentes (Tabla 3) (Escudero-Álvarez y González-Sánchez, 2006; Valenzuela y Maiz, 2006). La fibra de tipo soluble retrasa el tiempo de tránsito gastrointestinal, reduce las velocidades de absorción de algunos nutrientes, disminuyendo las concentraciones plasmáticas de glucosa y colesterol, es rápidamente fermentada por las bacterias del colon y no tiene efecto laxante. En cambio, la fibra predominantemente insoluble tiene efecto laxante y no es fermentada o lo es muy escasamente (Valenzuela y Maiz, 2006).

La *fermentación colónica* de la FD es fundamental para el mantenimiento y desarrollo de la flora bacteriana, así como de las células epiteliales, como producto de la fermentación se genera hidrógeno, dióxido de carbono, gas metano y ácidos grasos de cadena corta (AGCC) como el acético, propiónico y butírico (Matos-Chamorro y Chambilla-Mamani, 2010).



Fuente: Valenzuela y Maiz, 2006.

Figura 5. Clasificación de la FD de acuerdo a su fermentabilidad.

Tabla 3. Acción de los componentes de la FD en el organismo.

Tipo de fibra	Acción
Celulosa	Capacidad de retención de agua, reducción de la presión colónica y reducción del tiempo de tránsito intestinal.
Hemicelulosa	Capacidad de retención de agua, incremento de la masa fecal, reducción de la presión colónica, reducción del tiempo de tránsito intestinal y posibilidad de retener ácidos biliares.
Pectinas, gomas y mucílagos	Retiene ácidos biliares, reduce la evacuación gástrica e incrementa la fermentación colónica.
Lignina	Capacidad de retención de agua, ligada de minerales, aumento de excreción y posibilidad de incrementar la defecación.

Fuente: Molina y Paz, 2007.

Atenuación de glucosa. Se ha demostrado la utilidad de la FD en el tratamiento de la diabetes mellitus, debido a la disminución de la glicemia postprandial y al aumento de la sensibilidad a la insulina. La FS reduce la velocidad de absorción de la glucosa, disminuyendo el incremento de la glicemia e insulinemia después de una carga oral de glucosa (Valenzuela y Maiz, 2006).

La *disminución del colesterol* debida a la FD se basa en la habilidad que esta tiene particularmente la de tipo soluble de formar un gel que encapsula al colesterol, triglicéridos, ácidos biliares y esteroides neutros, evitando su absorción en el lumen intestinal (Martínez-Flores y Figueroa, 2008).

Una ingesta alta en fibra se relaciona con un menor riesgo de *cáncer colorrectal*, ya que la fibra reduce el tiempo de contacto de las sustancias cancerígenas con las paredes del intestino. Además, la fermentación de la fibra en el colon, se relaciona con la inhibición de formación de tumores debido a la producción de ácido butírico y niveles bajos de pH (Matos-Chamorro y Chambilla-Mamani, 2010).

1.2.3. Fuentes de fibra dietética

Existen fuentes tradicionales de FD como son las cascarillas y salvados de cereales (trigo, avena y arroz), así como de algunas frutas como las manzanas, los cítricos y las leguminosas. Sin embargo, hacen falta nuevas fuentes de fibras, con características que presenten un amplio potencial de comercialización.

El uso de subproductos a partir del procesamiento de frutas y vegetales como fuentes de FD y de compuestos bioactivos, con propiedades antioxidantes como los fenólicos son de gran interés, ya que además de que se les da un valor agregado, éstas pueden ser utilizadas como ingredientes funcionales en el diseño de alimentos saludables (Jongaroontaprangsee *et al.*, 2007).

Algunos autores han reportado estudios sobre los desechos de frutas y hortalizas como fuentes alternas de FD (Tabla 4). Existen industrias que aprovechan sus residuos para diferentes propósitos, como las industrias dedicadas a la elaboración de jugo de cítricos donde las cáscaras son utilizadas para la obtención de aceites esenciales y pectinas. Sin embargo, pocas son las industrias que se han interesado en aprovechar los residuos como fuente de FD (Matos-Chamorro y Chambilla-Mamani, 2010).

Los subproductos del tamarindo también son de gran interés, ya que estos pueden llegar a tener diferentes usos, además de ser una fuente de FD comercial (Jongaroontaprangsee *et al.*, 2007). En la India, millones de toneladas de fibra proveniente del tamarindo se desperdician cada año después de la separación de las semillas de la pulpa durante el procesado de alimentos (Maheswari *et al.*, 2008).

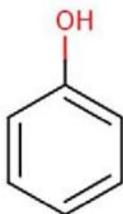
Tabla 4. Fuentes de FD a partir de residuos agroindustriales.

Tipo de residuo	Referencia
Industria de jugo de naranja y maracuyá	Tamayo y Bermúdez (1998) y Saénz <i>et al.</i> (2007)
Corazón de piña y cáscara de manzana	Bautista <i>et al.</i> (2004)
Bagazo de caña de azúcar y cascarilla del frijol lima (<i>Phaseolus lunatus</i>)	Sánchez (2005)
Cascarilla de cacao y cáscara de guayaba	Matos-Chamorro y Chambilla-Mamani (2010)
Hojas de coliflor	Jongaroontaprangsee <i>et al.</i> (2007)

1.3. Compuestos fenólicos

Estos compuestos pertenecen a un grupo heterogéneo de metabolitos secundarios, ampliamente distribuidos en el reino de las plantas que usualmente se encuentran unidos a polímeros insolubles (Reyes, 2008 y Choi *et al.*, 2011), participan en diversas funciones, tales como la asimilación de nutrientes, la síntesis proteica, la actividad enzimática, la fotosíntesis, la formación de componentes estructurales, la alelopatía y la defensa ante los

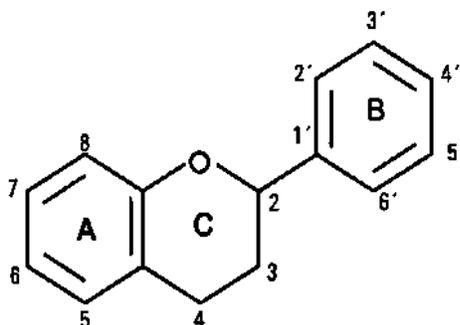
factores adversos del ambiente (Paladino y Zuritz, s.f.). Se clasifican en dos grandes grupos: los ácidos fenólicos (benzoico y cinámico) y los flavonoides (antocianinas y taninos) (Badui, 2006). Los primeros constan de un anillo bencénico conocidos como fenoles que contiene uno o diversos grupos hidroxilo (Valls *et al.*, 2000) (Figura 6).



Fuente: Paladino y Zuritz, s.f.

Figura 6. Estructura del fenol.

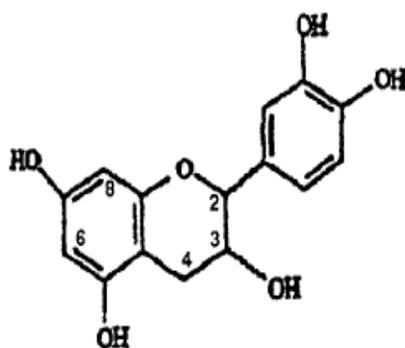
Los *flavonoides* (del latín *flavus*, amarillo) tienen características glucosídicas, ya que contienen como aglicón a un núcleo flavilo el cual se une a una fracción azúcar (glucosa, ramnosa, galactosa, arabinosa, xilosa y ácido glucurónico) por medio de un enlace β -glucosídico generalmente en la posición C3. El aglicón está formado por un esqueleto de 2 anillos bencénicos (A y B) (fenilos) unido a un heterociclo con oxígeno (C) (pirano) (Figura 7) (Badui, 2006). Este compuesto se descubrió por Szent-Gyorgy, quien en 1930 aisló de la cáscara de limón una sustancia, la citrina, que regulaba la permeabilidad de los capilares por esta razón se le denominó vitamina P y también C (por que se comprobó que algunos flavonoides tenían propiedades similares a la vitamina C), sin embargo el hecho de que se les considerara vitaminas se abandonó ya que no se pudo comprobar (Martínez-Flórez, *et al.*, 2002). Aunque es altamente variable, ha podido estimarse el consumo de flavonoides totales por día el cual oscila entre 23 a 500 mg (Tenorio *et al.*, 2006).



Fuente: Paladino y Zuritz, s.f.

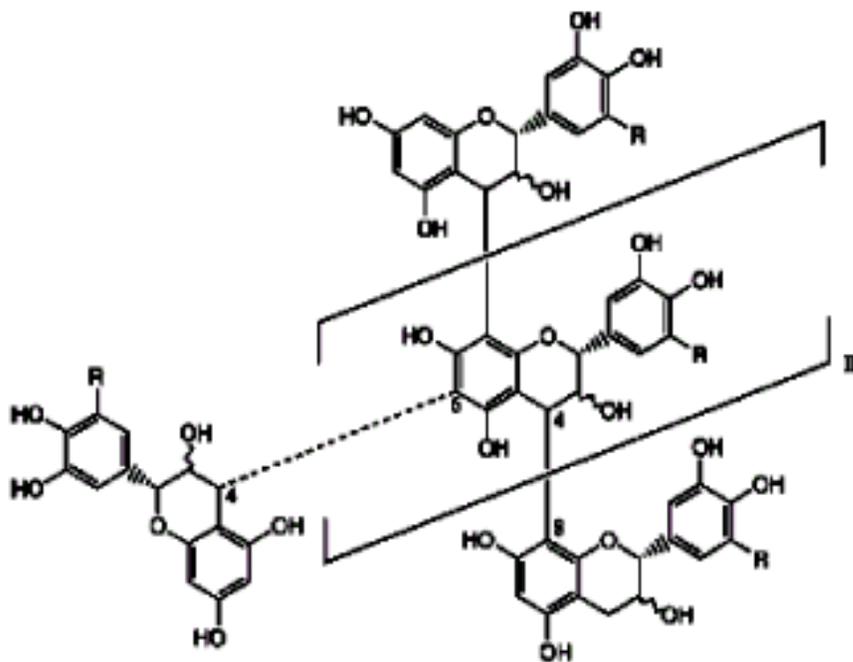
Figura 7. Estructura básica de los flavonoides.

Los *taninos* se definen según Bate-Smith y Swain como: “Compuestos fenólicos solubles en agua con pesos moleculares de 500 hasta 3000 daltones que además de dar las reacciones fenólicas usuales, tienen propiedades especiales tales como la habilidad de precipitar proteínas, alcaloides y gelatinas” (Isaza, 2007). Debido a esta afinidad de los taninos por las proteínas son muy utilizados en el curtido de pieles (tanning). Sin embargo, en el organismo esto resulta un poco indeseable ya que se considera como compuesto antinutricional. Estructuralmente están formados por polímeros de catequinas (Figura 8 y Figura 9) (Badui, 2006).



Fuente: <http://agrocenciasupc.blogspot.mx/2011/09/las-catequinas.html>.

Figura 8. Estructura de la catequina.



Fuente: Isaza, 2007.

Figura 9. Estructura de los taninos.

Los taninos se encuentran distribuidos principalmente en plantas de las familias *Leguminosae*, *Rosaceae*, *Polygonaceae*, *Fagaceae*, *Rhizophoraceae*, *Melastomataceae* y *Myrtaceae* (Badui, 2006; Isaza, 2007). En las frutas se encuentran presentes entre 2 a 10 mg/g de peso fresco y en las verduras entre 5 a 20 mg/g, la dosis diaria permitida se encuentra en 500 mg/día (García, 2009). Sintetizándose en el retículo endoplásmico y almacenándose en la vacuola celular (Romero-Lara, 2000).

Los taninos se clasifican en: a) proantocianidinas o “taninos condensados” y b) poliésteres de glucosa con el ácido gálico de los ácidos hexahidroxidifénicos o “taninos hidrolizables” (Hoagland, 1969; Agostini *et al.*, 2004). Los taninos poseen grupos hidroxilo y otros grupos sustituibles, los cuales, además de formar complejos proteínicos se unen a carbohidratos y a otras moléculas bajo condiciones ambientales particulares (Romero-Lara, 2000). El principal color de los taninos oscila entre el blanco amarillento y el pardo claro y contribuyen a la astringencia de los alimentos; brindándole color al té negro (Hoagland, 1969; Agostini *et al.*, 2004). Estos compuestos se consideran también antioxidantes, con capacidad de atrapar radicales libres (Badui, 2006).

Aengwanich *et al.* (2009) reportan que la corteza de la semilla del tamarindo está compuesta de polifenoles incluyendo antocianidinas y taninos, presentando 29.32 y 101.89 mg/g de alto peso molecular respectivamente.

Bhatta *et al.* (2001), reportaron el contenido de taninos analizados por medio de diferentes métodos los cuales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Contenido de taninos de la cáscara de la semilla de tamarindo, analizado por diferentes métodos.

Tipo de tanino	Método utilizado	Contenido (mg/g)
Fenoles totales	Método de Folin Dennis	155 ± 9.0
	Método de Azul de Prusia	145 ± 8.5
Taninos hidrolizables	Equivalente gallotanino	20 ± 8.0
Taninos condensados	Método de Vainillina-HCl	136 ± 1.0
	Método de Vainillina modificada HCl	128± 1.1

1.3.1. Estrés oxidativo

El oxígeno está asociado a las condiciones de vida aerobia, ayudando principalmente al mantenimiento del metabolismo y a la viabilidad celular al mismo tiempo que involucra un peligro potencial debido a la formación de compuestos altamente

reactivos conocidos como especies reactivas del oxígeno (EROs) conocidos como radicales libres (Martínez, 2007).

Un *radical libre* es un átomo o molécula que posee uno o más electrones no apareados que se encuentran girando en sus orbitales externos, lo cual lo hace muy inestable, por lo que tiende a sustraer un electrón a cualquier molécula cercana, oxidándola y convirtiéndola en otro radical libre, originando una reacción en cadena, en la que cada molécula implicada se convierte a su vez en reactiva y tiende a conseguir su estabilidad (Reyes, 2008).

Halliwell *et al.* (1999), mencionan que los radicales libres detectados con mayor frecuencia son las EROs que incluyen los radicales de oxígeno como: el radical hidroxilo (OH^\cdot), el radical superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$), el radical peroxilo (ROO^\cdot), el singlete de oxígeno ($^1\text{O}_2$), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el ácido hipocloroso (HClO), el ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2) y el radical de óxido nítrico (ONOO^\cdot).

Las EROs dañan los *lípidos* poliinsaturados de las membranas produciendo pérdida de fluidez y lisis celular como consecuencia de la peroxidación lipídica, también actúan sobre los glicósidos alterando las funciones celulares tales como las asociadas a la actividad de las interleucinas y la formación de prostaglandinas, hormonas y neurotransmisores; las proteínas se inactivan y desnaturalizan y finalmente las bases de los ácidos nucleicos se modifican produciendo mutagénesis y carcinogénesis (Martínez, 2007).

1.3.2. Antioxidantes

Ante el estrés oxidativo el organismo cuenta con la defensa antioxidante, pero en algunas ocasiones no es suficiente, por lo que dicho daño generado a las macromoléculas anteriormente mencionadas, desencadenan enfermedades como el cáncer, aterosclerosis, cardiopatías y diabetes, entre otras (García-Alonso *et al.*, 2004).

Los alimentos pueden contener compuestos que ayuden o afecten al organismo. Sustancias como los *antioxidantes* (compuestos fenólicos) se catalogan como moléculas que a bajas concentraciones, en comparación con el sustrato oxidable, son capaces de retrasar o inhibir significativamente la oxidación de dicho sustrato, funcionando como inactivador de radicales libres, al detener reacciones en cadena de oxidación en el organismo oxidativo, evitando daños al organismo (García-Alonso *et al.*, 2004; Stangeland *et al.*, 2007; Reyes, 2008).

Los antioxidantes son utilizados por los organismos aerobios como defensa en contra de especies de oxígeno reactivas; estas defensas pueden ser de tipo enzimático (antioxidantes endógenos) o no enzimático (antioxidantes exógenos). La primera defensa

antioxidante es intracelular y la constituyen las enzimas superóxido dismutasa, catalasa y glutatión peroxidasa. Los antioxidantes no enzimáticos o extracelulares presentes en el suero son moléculas de bajo peso molecular como la vitamina C y E, además de otras sustancias presentes en menor concentración como β -caroteno, polifenoles, bilirrubina y glutatión, entre otras. Los principales antioxidantes extracelulares son nutrientes naturales que se ingieren en la dieta (Leighton *et al.*, 1997 y Biedrzycka y Amarowicz, 2008).

En los últimos años se han dedicado grandes esfuerzos para intentar comprender el rol de los antioxidantes en la protección contra diversas enfermedades. Se ha comprobado su capacidad para actuar como donadores de hidrógenos o quelar iones metálicos como el hierro y el cobre, inhibiendo la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad (LDL), las cuales están implicadas en la patogénesis de las enfermedades coronarias. Cabe mencionar que algunos polifenoles (como los aislados del té) inhiben la oxidación de las LDL *in vitro*. En experimentos *in vitro*, también se ha confirmado el papel protector de la quercetina, la cual ejerce efectos de inhibición frente a células cancerígenas en humanos: en colon, glándula mamaria y ovario, en región gastrointestinal y en la leucemia. En experiencias con animales, una dosis oral de polifenoles suprimió la carcinogénesis de varios agentes carcinógenos. Los polifenoles también demuestran actividad de vasorrelajación y antialérgica (Martínez, 2007).

1.3.3. Métodos para medir la capacidad antioxidante

Los principales métodos para medir la capacidad antioxidante se divide en (Reyes, 2008):

- a) Transferencia de átomos de hidrógeno. Se lleva a cabo mediante un monitoreo de las cinéticas de reacción, por medio de un generador sintético de radicales libres.
- b) Transferencia de electrones. Son pruebas de óxido-reducción, donde se mide la capacidad de un antioxidante en la reducción de un oxidante el cual cambia de color cuando se reduce y dicho cambio se correlaciona con la concentración de antioxidantes presentes en la muestra.

Existe una gran cantidad de antioxidantes que han sido identificados a partir de diferentes partes de la planta tal como el aceite de las semillas, vegetales, frutas, hojas, raíces y hierbas. Además de que las plantas tienen propiedades antioxidantes excelentes y estas propiedades se pueden atribuir a constituyentes fenólicos (Soong y Barlow, 2004).

Se ha reportado que las cáscaras de los frutos son las principales fuentes de antioxidantes naturales, por lo que se ha propuesto utilizar estos subproductos de la industria como antioxidantes naturales (Rincón *et al.*, 2005).

López (2010), menciona que diversos investigadores han determinado la presencia de altas concentraciones de polifenoles y flavonoides en los extractos de diferentes partes del fruto de tamarindo, como las semillas y la pulpa. Martinello *et al.* (2006), reportan que la pulpa de tamarindo resulta ser rica en azúcares ($70.25 \pm 8.56 \mu\text{g/ml}$), polifenoles ($34.02 \pm 2.11 \text{ nmol/ml}$) y flavonoides ($35.51 \pm 5.61 \mu\text{g/ml}$).

Por otra parte, Luengthanaphol *et al.* (2004) y Tsuda *et al.* (1994), mencionan que existen cuatro antioxidantes presentes en la corteza de la semilla: 2-hidroxi-3',4'-dihidroxiacetofenona, metil 3,4-dihidroxibenzoato, 3,4-dihidroxifenil acetato y epicatequina. Además, Stangeland *et al.* (2007), encontraron que la capacidad antioxidante del tamarindo oscila entre los 0.77-3.83mmol por cada 100g en base húmeda.

1.3.4. Fuentes de antioxidantes

Son fuentes de flavonoides las frutas como la manzana, la uva y las cerezas, verduras como la cebolla, semillas y flores, así como la cerveza, vino, té verde, té negro, la soya y las especias (Tenorio *et al.*, 2006).

Actualmente se tiene la necesidad y la posibilidad de utilizar residuos agroindustriales en la obtención de compuesto fenólicos capaces de inhibir a los radicales libres (capacidad antioxidante), existen algunos estudios en los que se utilizan dichos residuos (Tabla 6).

Tabla 6. Contenido de polifenoles provenientes de distintas fuentes.

Materia Prima	Polifenoles (mg EAG/g muestra)	Referencia
Frutas		
Guayaba (<i>Psidium spp.</i>)	344.9	Thapoing <i>et al.</i> (2006)
Verduras		
Guisante (<i>Pisum sativum</i>)	0.41	Nayak <i>et al.</i> (2011)
Cereales		
Maíz azul	1.42	Mora- Rochin <i>et al.</i> (2010)
Maíz rojo	1.407	Mora- Rochin <i>et al.</i> (2010)
Maíz amarillo	1.377	Mora- Rochin <i>et al.</i> (2010)
Residuos agroindustriales		
Cáscara de mandarina	41.2	Choi <i>et al.</i> (2011)

Choi *et al.* (2011), mencionan que la cáscara de diferentes variedades de mandarina (*Citrus unshiu* Markovick, *C. reticulata* Blanco, *C. tachibana* Makino Tanaka) contienen

más compuestos bioactivos como los flavonoides, ácidos fenólicos y limonoides que el jugo de naranja, presentando buena capacidad antioxidante. En la Tabla.6 se muestra el contenido de polifenoles presentes en diferentes materias primas.

1.4. Extrusión

El proceso de extrusión se considera como una de las tecnologías más versátiles en el campo de los alimentos. Esta operación ha sido utilizada, en la obtención de cereales listos para comer, obtención de alimentos secos para mascotas, mezclas de alimentos precocinados para la alimentación infantil, proteínas vegetales texturizadas y en la industria del plástico para producir materiales de envasado. Muchas investigaciones se han centrado en los cambios funcionales, físico-químicos y nutricionales de algunos compuestos como la FD, el almidón y las proteínas (Singh *et al.*, 2007; Justo y Pérez, 2006; Fellows, 2007; Sharma *et al.*, 2004).

La extrusión es un proceso continuo que involucra la compresión sobre un material por medio de un tornillo (s) para formar una masa semisólida, que en determinadas condiciones controladas es forzada a fluir a través de una abertura restringida llamada boquilla (Figura 10), combinando distintas operaciones unitarias como el mezclado, la cocción, el amasado y el moldeo (Justo y Pérez, 2006; Fellows, 2007).

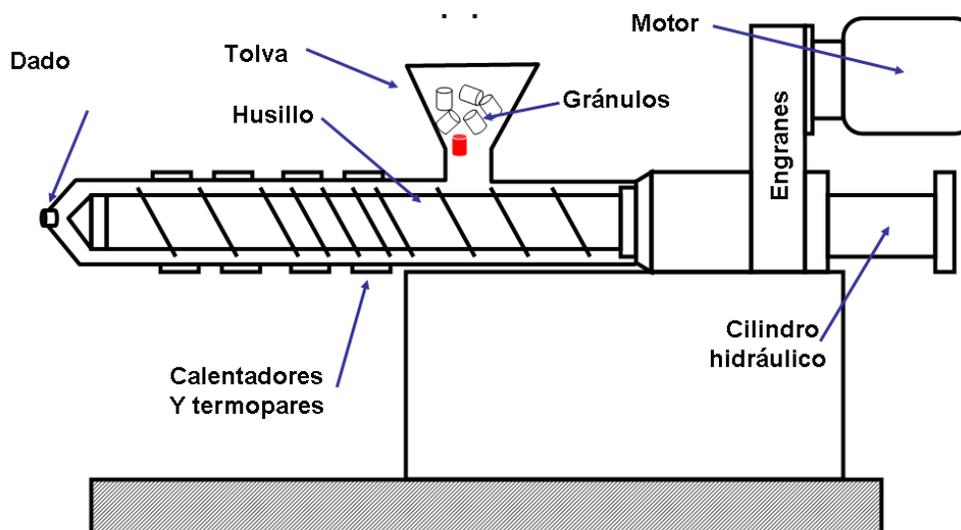
Los extrusores se clasifican de acuerdo al método de operación (extrusor en frío o extrusores con cocción o termoplástico) y al método de construcción (de tornillo único o de tornillo doble). El extrusor con cocción es el más conocido y versátil; dividiéndose en dos grandes grupos: *extrusión de productos expandidos* y *extrusión de productos comprimidos o pellets*. El proceso de extrusión es preferible que otras técnicas ya que presenta varias ventajas positivas únicas comparadas con otros procesos (Justo y Pérez, 2006; Abd El-Hady y Habiba, 2003; Sharma *et al.*, 2004):

- *Versatilidad*: es posible obtener una gran variedad de productos.
- *Costos reducidos*: desperdicia poca energía, necesita una pequeña cantidad de espacio al ser compacto, no genera efluentes por lo que no existen costos en tratamientos de agua.
- *Proceso continuo*, teniendo una alta productividad.
- *Calidad del producto*: ya que al utilizar temperaturas elevadas en tiempos cortos retiene nutrientes, color y sabor del alimento que son sensibles al calor.

1.4.1. Efecto del proceso de extrusión sobre los compuestos presentes en un alimento

Debido a que el material es sometido a un corte mecánico intenso, es posible romper enlaces covalentes en biopolímeros, se desnaturalizan enzimas indeseables, se inactivan

algunos factores antinutricionales (inhibidores de tripsina, hemaglutininas, taninos y fitatos) (Abd El-Hady y Habiba, 2003), se gelatiniza el almidón, existe un incremento en la fibra soluble y la reducción de la oxidación de los lípidos (Fellows, 2007; Singh *et al.*, 2007). En la Tabla 7 se muestran algunos ejemplos de la utilización del proceso de extrusión para obtener cambios a nivel de FD y en algunas propiedades físico-químicas.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Extrusi%C3%B3n_de_pol%C3%ADmero.

Figura 10. Esquema de un extrusor de tornillo simple.

Polifenoles

En el trabajo realizado por Agostini *et al.* (2004) se menciona que los flavonoides presentes en manzanas rojas con y sin cáscara, fresas, tomates y cebollas, disminuye su capacidad antioxidante después de un tratamiento térmico por calor seco; por lo que concluyen que los flavonoides en dichos frutos presentan una mayor actividad antioxidante en estado fresco, disminuyendo al ser sometidos a los distintos tipos de cocción (hervido, vapor, horno y microondas).

Fang *et al.* (2011), observaron una disminución en el contenido de compuestos fenólicos presentes en el camote morado después de un tratamiento térmico como el escaldado; mencionan que dicha disminución se debe principalmente a la presencia de compuestos termolábiles como las antocianinas, las cuales presentan daños al recibir tratamiento térmico por dicho proceso.

Tabla 7. Cambios generados por la extrusión en las propiedades químicas y físico-químicas de diferentes materias primas.

Referencia	Materia Prima	Condiciones del tratamiento	Resultados
Ning et al. (1991)	Fibra de maíz.	Ácido-Alcalinos Termo-mecánicos (extrusión, doble tornillo)	Incremento FS Sin trat.: 1.38% Trat. Alcalino: 3.64% Trat. Ácido: 2.13%
Gualberto et al. (1997)	Salvados de avena, arroz y trigo.	Extrusión doble tornillo Velocidad del tornillo (rpm): 50,70 y 100	Salvado avena: Sin trat. FS= 3.45% FS (50rpm)=5.46% Salvado arroz: Sin trat. FS= 2.00% FS (50rpm)= 2.59% Salvado trigo: Sin trat. FS= 3.11% FS (70rpm)=3.45%
Jae-Kwan et al. (1998)	Pulpa de manzana	Extrusión doble tornillo Velocidad del tornillo (rpm) 250, 300 y 350 Humedad (%): 20,25 y 30	FS 250rpm, 25%: 18.8% FS 350rpm, 20%: 18.8%
Vasanthan et al. (2002)	Harina de cebada	Extrusión Temperatura (°C): 90-140 Humedad (%): 20-25%	Incremento en la FD, debido al aumento de la FS.
Sharma et al. (2004)	Salvado de arroz	Extrusión	Incremento (CAA) CAA Sin trat.: 143.68g/100g CAA Extrusión: 170.93g/100g
Singh et al. (2007)	Salvado de trigo, avena y cebada	Extrusión	Incremento de la Viscosidad

FD: fibra dietética; *FS*: fibra soluble; *Sin trat.*: sin tratamiento; *rpm*: revoluciones por minuto; *CAA*: capacidad de absorción de agua.

Mora-Rochin *et al.* (2010), reporta que el proceso de extrusión en comparación con el proceso de nixtamalización no causa daño en los polifenoles en muestras de maíz azul, rojo y amarillo, por lo que consideran a este proceso como una alternativa para retener diferentes fenoles, ácido ferúlico y antocianinas, conservando la actividad antioxidante,

atribuyéndose esta retención al breve tiempo que la muestra pasa en contacto con la temperatura del extrusor.

Choi *et al.* (2011), mencionan que los polifenoles de manera natural se encuentran ligados a polímeros insolubles, por lo que esto los hace estar poco disponibles para realizar su efecto antioxidante, sin embargo, compuestos fenólicos insolubles de bajo peso molecular son transformados en ácidos fenólicos libres o solubles mediante tratamientos térmicos, reflejándose posiblemente en una mayor capacidad antioxidante.

1.5. Alimento funcional

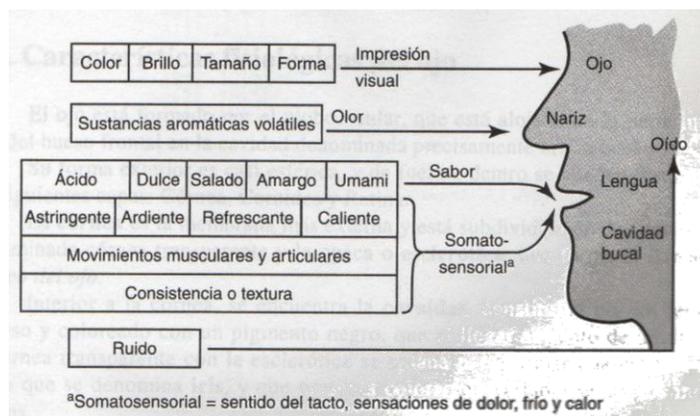
Un *alimento funcional*, se define como aquél que contiene sustancias no esenciales con potenciales beneficios para la salud y/o reducción de riesgo a enfermedades; siendo este un alimento natural o un alimento al que se le ha adicionado o removido algún componente por medios tecnológicos. Este debe ser consumido en las cantidades que son normalmente esperadas en una dieta; por lo que, no es parte de una píldora o una cápsula, sino parte de un patrón alimenticio normal. (Pew Initiative on Food and Biothechnology, 2007; Sosa-Aguirre y Campos-García, 2008).

Evidencias epidemiológicas y clínicas indican una asociación entre dietas ricas en frutas y vegetales con la disminución en el riesgo de morbilidad y mortalidad generadas por enfermedades cardiovasculares, algunos tipos de cáncer y otras enfermedades degenerativas, considerándose actualmente a la fibra dietética y a los antioxidantes como los componentes más importantes en los alimentos funcionales que se ven involucrados en la prevención de dichas patologías (Shih *et al.*, 2009). La influencia positiva de tales dietas, es atribuida a que estos alimentos pueden suministrar una mezcla óptima de diversos fitoquímicos o compuestos bioactivos (Rincón *et al.*, 2005; Sharma *et al.*, 2011; Jongaroontaprangsee *et al.*, 2007). Con el fin obtener dichos principios activos, se ha intensificado la búsqueda de fitoquímicos de origen vegetal, que al utilizarlos en el desarrollo de un alimento funcional es posible mejorar las propiedades a nivel nutricional, textural, de color y apariencia (Drago *et al.*, 2006; AZTI-Tecnalia, 2007).

Jongaroontaprangsee *et al.* (2007) mencionan que para que la adición de una FD a un alimento sea aceptable, esta deberá poseer características satisfactorias como el contenido de FD que deberá ser mayor al 50 % en base al alimento total, el contenido de humedad menor al 9 %, tener un bajo contenido en lípidos y bajo nivel calórico. Además de la relación FS:FI que deberá de ser 1:3 para obtener los beneficios asociados con ambas fracciones.

1.5.1. Análisis sensorial

El *análisis sensorial* es la medición y cuantificación de las características de un producto involucrando principalmente a los órganos sensoriales (Pedrero y Pangborn, 1997). El primer contacto del ser humano con un producto alimenticio se produce habitualmente a través de la vista, el olfato (por el aire a través de la nariz), el oído (por ej. como se fríe un bistec en la sartén) o el tacto (por ej. al palpar una manzana), o bien por dos o tres de estas percepciones sensoriales simultáneamente (Figura 11) (Sancho *et al.*, 2002). La información obtenida, brinda la capacidad de aceptar o rechazar un producto, por lo que está muy vinculado a la calidad que pueda presentar este (Pedrero y Pangborn, 1997).



Fuente: Sancho *et al.* (2002).

Figura 11. Sensograma. Representación esquemática de las impresiones que se perciben a través del análisis sensorial.

Bioquímica del olor. La percepción del olor se produce en la parte superior de la cavidad nasal, el epitelio olfativo, el cual constituye una parte importante de la mucosa nasal con receptores olfativos. Las sustancias aromáticas volátiles llegan hasta estos receptores y se solubilizan en las secreciones acuosas que recubren las terminaciones ciliadas y luego entran en contacto con las terminaciones nerviosas. Existe una clasificación de nueve olores primarios: dulce, naftalínico, alcanforado, jazmínico, anisado, graso, floral y leñoso. Cuando las moléculas son pequeñas los grupos funcionales juegan un papel muy importante (Sancho *et al.*, 2002).

Bioquímica del sabor. La lengua está revestida por una membrana que a su vez está cubierta por papilas en las cuales se localizan los botones gustativos o células gustativas y los denominados corpúsculos de Krause que dan sensaciones táctiles. La sustancia química gustativa es difundida a través del botón gustativo y llega a la célula receptora que está conectada a las fibras nerviosas (Sancho *et al.*, 2002). En general, el sabor se considera como un fenómeno multidimensional, integrado por cinco sabores primarios: dulce, ácido,

salado, amargo y *umami*; cada uno de estos sabores básicos, corresponde a un determinado tipo de compuesto; así, el sabor dulce es producido por diferentes compuestos, como azúcares, aldehídos, alcoholes y cetonas; el sabor amargo es producido principalmente por alcaloides; el salado se debe a las sales de sodio; el ácido es originado por iones hidronio (H_3O^+); y el *umami* por aminoácidos como el glutamato monosódico (Badui, 2006).

La realización de un panel sensorial implica el contar con los materiales adecuados para su realización como: el lugar de la degustación, las muestras a degustar, los individuos o degustadores, el director del panel en el cual recae sobre él la planeación y la dirección del ensayo, así como el tratamiento estadístico de los datos obtenidos para emitir una conclusión acerca de un determinado producto. Los principales tipos de representación que se utilizan para perfilar los productos son los histogramas, las representaciones polares o la ubicación concreta en el espacio de individuos en un análisis de componentes principales (Sancho *et al.*, 2002).

Existen tres pruebas de análisis sensorial:

1. *Descriptivas*: describen, comparan y valoran las características de las muestras, en función a patrones definidos previamente.
2. *Discriminatorias*: permiten encontrar y cuantificar diferencias significativas, entre las muestras o un patrón.
3. *Pruebas de aceptación*: el panel de degustadores clasifica las muestras con relación a la preferencia que sienten por ella o su nivel de satisfacción. A su vez se dividen en:
 - 3.1. *Preferencia*.
 - 3.2. *Medida del agrado de satisfacción*: Hedónicas verbales
Hedónicas gráficas

Prueba de aceptación o hedónica. Este tipo de prueba, suele responder a requerimientos de mercado y normalmente se aprecian tendencias de consumo. El tipo de panelistas a utilizar son de tipo inexperto, es decir, son elegidos al azar o seleccionados por aspectos concretos (edad, sexo, escolaridad, etc.), a estos individuos, se les puede abordar en la calle o citarlos en algún estudio buscando un ambiente lo más parecido a la realidad “de campo”, si son individuos seleccionados pueden ser alrededor de 36, si son inexpertos el número mínimo será de 60 a 100 individuos (Sancho *et al.*, 2002). En la elaboración de esta prueba se utiliza una escala no estructurada sin mayores descriptores que los extremos de la escala, en los cuales se puntualiza la característica de agrado, esta escala debe contar con un indicador del término medio, a fin de facilitar al juez consumidor la localización de un punto de indiferencia a la muestra (Pedrero y Pangborn, 1997).

2. Justificación

Los altos índices de obesidad observados en los últimos años en la población mexicana (Secretaría de Salud, 2007) y la presencia de otras enfermedades crónico-degenerativas, han causado una gran preocupación debido a su asociación directa con la ingesta de alimentos con alto contenido en carbohidratos, grasa saturada y el bajo consumo de alimentos ricos en FD (Martínez-Flores y Figueroa, 2008), por lo que estos antecedentes han dado la pauta para la búsqueda de fuentes alternas ricas en FD.

La actividad económica que representa la industria del tamarindo en el estado de Michoacán, la problemática de los subproductos generados y el conocimiento acerca de su contenido de FD, ha despertado en nosotros el interés por utilizar el proceso de extrusión con el propósito de modificar las propiedades funcionales de la FD y de compuestos bioactivos para así ofrecer a la industria alimentaria polvos con un alto contenido en FD que puedan ser adicionados a los alimentos para conferirle efectos benéficos al ser humano.

3. Hipótesis

La aplicación del proceso de extrusión en la cáscara de tamarindo (*Tamarindus indica* L.) modificará las propiedades químicas y físico-químicas relacionadas a los compuestos funcionales, incrementando la disponibilidad de FS y compuestos fenólicos.

4. Objetivos

4.1. General

Analizar el efecto de las variables de temperatura y humedad en el proceso de extrusión sobre las propiedades funcionales de la cáscara de tamarindo (*Tamarindus indica* L.).

4.2. Específicos

1. Caracterizar químicamente la cáscara de tamarindo sin procesar.
2. Estandarizar la metodología del proceso de extrusión.
3. Promover cambios químicos, fisicoquímicos y estructurales en la cáscara de tamarindo a través del proceso de extrusión.
4. Evaluar los cambios en composición química, de la cáscara de tamarindo: en la relación de FS/FI, fenólicos totales, taninos, flavonoides así como en su capacidad antioxidante antes y después de aplicar el proceso de extrusión.
5. Evaluar los cambios físico-químicos, de la cáscara de tamarindo: capacidad de absorción de agua y aceite, así como índice de diálisis de glucosa antes y después de la extrusión.
6. Evaluar los cambios estructurales antes y después del proceso de extrusión mediante las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y la técnica de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR).
7. Desarrollar una formulación de una bebida caliente tipo atole a la cual se le adicionará el producto extruido obtenido con las mejores propiedades químicas y físico-químicas.

5. Materiales y Métodos

5.1. Material y Equipo

- Baño María marca FELISA termo-baño, modelo: FE-375, Jalisco, México.
- Bomba de vacío SIEMENS, modelo: IRF3 052-4YC31
- Balanza Analítica marca STARTORIUS, modelo: BL 120-S, Alemania.
- Balanza granataria Triple Beam Balance, OHAUS^R, U.S.A
- Centrífuga marca HERMLE, modelo Z 400 K
- Colorímetro Hunter Lab
- Desecador NALGENE Modelo: 150MM, Jalisco, México.
- Equipo Soxhlet marca TAURO
- Estufa de secado digital FELISA, modelo FE-291D, Jalisco, México.
- Espectrofotómetro UV/Vis Smartec Plus marca Bio-Rad
- Espectrofotómetro Infrarrojo Perkin-Elmer, Spectrum 400 FT-IR/FT-NIR Spectromer.
- Kit de fibra dietética total SIGMA[®].
- Kit de glucosa GOD-PAP RANDOX
- Licuadora Osterizer
- Mufla marca FELISA modelo FE-260, Jalisco, México.
- Micro-Kjeldhal marca NOVATECH
- Microscopio Electrónico de Barrido JMS-6400 Scanning Microscope, Marca: JEOL
- Placa de Calentamiento marca LINDBERG, modelo 53066, México, D.F
- Refrigerador marca general electric modelo turbo plus cooling system
- Rotor Lab. Depot, Dawsonville, GA, USA
- Tamices DAIGGER, U.S. estándar del no. 20, 40, 60, 80, 100 y 120. U.S.A.
- Viscosímetro marca Brookfield modelo LVD-II+Pro
- Vortex

5.2. Materia prima

Se utilizó cáscara proveniente de la industria de ates “La Estrella”[®] ubicada en la ciudad de Morelia, Michoacán. Se limpió retirando las semillas, hojas y pequeños trozos de madera. Se trituro en un molino Pulvex 200 del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del I.P.N. (CICATA-IPN) Unidad Querétaro (Figura 12), con una malla de 800 μm . La muestra molida se hidrató a 32 % y 39 % de humedad y se

dejó reposar en refrigeración en bolsas herméticas marca Ziploc[®], por 12 h para ser procesadas por extrusión.

5.3. Extrusión

Se utilizó un extrusor diseñado y construido en el Laboratorio de Mecatrónica del CICATA-IPN. (Figura 13), el cual consta de un tornillo simple de 470 mm de longitud (L), 21 roscas, un paso circular (p) de 18 mm y una profundidad del diente (h) de 3 mm (Figura 14). La boquilla utilizada fue de 10 cm de diámetro con un orificio de salida de 6 mm (Figura 15). El extrusor cuenta con dos zonas de calentamiento, la zona uno, la cual se mantuvo a una temperatura constante de 60 °C y la zona 2, la cual se fijó a temperaturas de 90 °C, 100 °C y 110 °C de acuerdo con las condiciones previamente establecidas. Se utilizó un Diseño Factorial completo a x b, con dos factores: temperatura y humedad, el primero con tres niveles (90 °C, 100 °C y 110 °C) y el segundo con dos niveles (32% y 39%) (Tabla 8).



Figura 12. Molino Pulvex (CICATA-IPN).

Tabla 8. Diseño Factorial completo 2^3 (a x b).

Factores			
	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Velocidad del tornillo (rpm)
Niveles	32 %	90	15
		100	
		110	
	39%	90	
		100	
		110	

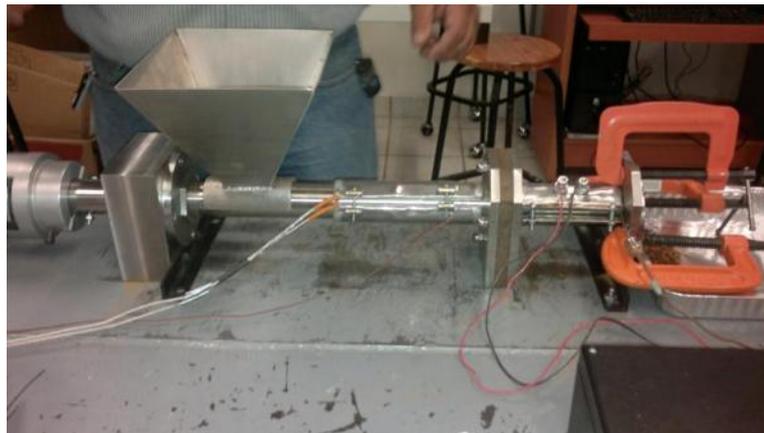


Figura 13. Equipo de extrusión del CICATA-IPN.



Figura 14. Tornillo del extrusor.

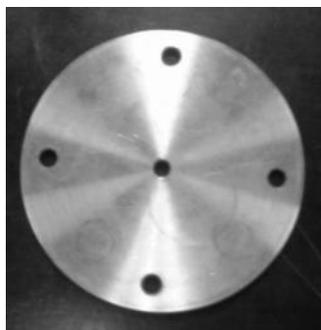


Figura 15. Boquilla del extrusor.

5.4. Composición Química

La Tabla 8 muestra las 6 condiciones en que fueron extruidas las muestras, además de la muestra control, que para fines de comparación no fue extruida. Los métodos utilizados en la caracterización de las muestras se describen a continuación.

5.4.1. Determinación de humedad (Método 934.01, AACC 2000)

La humedad de la muestra se determinó mediante el porcentaje de agua eliminada por evaporación durante un calentamiento en una estufa a 105 °C por 4 h.

5.4.2. Determinación de cenizas o minerales (Método 44.19 AACC, 2000)

El contenido de cenizas presentes en la muestra se determinó por medio de una incineración, previo calentamiento en una parrilla eléctrica para su final calcinación, en una mufla a 560 °C por 3 h.

5.4.3. Determinación de extracto etéreo (grasa) (AACC, 2000)

Se basó en una extracción Soxhlet semicontinua de 2 g de muestra con hexano, en un tiempo de aproximadamente 5 a 6 h. Terminado este tiempo se desmontó el equipo y se evaporó el hexano, los matraces fueron colocados en la estufa por 1 h a 105 °C, se atemperó y pesó hasta que este fuera constante. El contenido de grasa se cuantificó por diferencia de peso.

5.4.4. Determinación de proteína (AACC, 2000)

Se basó en la determinación de nitrógeno orgánico de la muestra, realizándose en dos partes, la primera consistió en la descomposición de la materia orgánica bajo calentamiento, en presencia de ácido sulfúrico concentrado, y luego se registró la cantidad

de amoníaco obtenido de la muestra por titulación con hidróxido de sodio (NaOH) al 0.1 N, en presencia de rojo de metilo.

5.4.5. Determinación de fibra dietética (Prosky *et al.*, 1998)

Se basó en la digestión enzimática con α -amilasa, amiloglucosidasa y proteasa para hidrolizar el almidón y la proteína. Se filtró separando la parte insoluble (sólido) de la soluble (líquido), al componente insoluble se le realizaron lavados, se secó y peso, mientras que la porción soluble se precipitó de la solución agregando alcohol al 95 %, se lavó, seco y peso. Se corrigió la técnica determinando proteína y cenizas de cada una de las fracciones. Se utilizó un Kit de fibra dietética total SIGMA[®].

5.4.6. Determinación de pectina (Carré y Haynes, 2005)

Se utilizaron 5 g de muestra, se les agregó 100 ml de agua destilada, se extrajo la pectina a ebullición 3 veces, se filtró, y en cada filtrado se recuperó el volumen agregándole 100 ml de agua, teniendo un volumen final de 400 ml. Al filtrado se le agregaron 100 ml de NaOH 0.1 N y se dejó reposar por 12 h. Posteriormente se le adicionaron 50 ml de ácido acético 1 N, se dejó reposar por 5 min para adicionarle finalmente 50 ml de cloruro de calcio (CaCl₂) 2 N y se dejó reposar por 1 h; se hirvió durante 5 min y se filtró. Después se lavó el residuo con 500 ml de agua destilada caliente para eliminar el cloro, el precipitado obtenido se redisolvió en 100 ml de agua destilada a 25°C y se llevó a ebullición durante 5 min. Por último, se filtró en papel filtro de poro abierto previamente puesto a peso constante, se lavó y secó el papel con el residuo hasta peso constante.

CÁLCULOS

El resultado se reportó como por ciento de pectina mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de } C_{17} H_{22} O_{16} Ca = \frac{(w_1 - w_2)}{w} \times 100$$

Donde:

w₁= Peso del papel con el residuo gramos

w₂= Peso del papel en gramos

w = Peso de la muestra (w) en gramos.

5.4.7. Determinación de holocelulosa (Hemicelulosa y celulosa) (Wise, 1946)

Extracción para obtener muestra libre de extracto. A 5 g de muestra se le determinó previamente el contenido de humedad y se colocó en cartuchos de celulosa, se

montó en el equipo Soxhlet y en un matraz balón se adicionaron 150 ml de ciclohexano, se llevó a reflujo y se comenzó a contar las 6 h de extracción a partir de la primera sifonada, pasado el tiempo se dejó enfriar el equipo, se desmontó y los cartuchos se dejaron orear durante toda la noche, este mismo procedimiento se realizó con la acetona, el metanol y el agua, finalmente se esparció la muestra en un papel filtro para su secado a temperatura ambiente durante toda la noche.

Determinación de holocelulosa. Se tomaron 5 g de muestra libre de extracto y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 200 ml, se le adicionaron 1.5 g de clorito de sodio (NaClO_2), 160 ml de agua destilada y 10 gotas de ácido acético, se cubrió el matraz con papel aluminio y se colocó en un baño de agua a 75 °C por 1 h, pasado este tiempo se le adicionaron nuevamente 1.5 g de NaClO_2 y 10 gotas de ácido acético, este procedimiento se repitió dos veces más hasta cumplir 4 h de digestión, al finalizar se detuvo la reacción poniendo el matraz en un baño con hielo y al enfriarse se filtró y se lavó con agua fría y acetona, se secó en una estufa a 40 °C por tres días y se pesó.

CÁLCULOS

$$\% \text{ Holocelulosa} = \frac{(Pc + M) - Pf}{M} \times 100$$

Donde:

Pc = peso constante del crisol

Pf = peso final (crisol + mtra. seca)

M = Peso de la muestra húmeda

5.4.8. Determinación de lignina (Runkel y Wilke, 1951)

Se pesaron 2 g de muestra libre de extracto y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 200 ml, se le adicionaron 50 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 72 %, 5 ml de ácido bromhídrico (HBr) al 49 % y se dejó reposar por 2 h en una campana de extracción, pasado este tiempo se le adicionaron 200 ml de agua destilada fría para detener la reacción y se hirvió por 5 min, se filtró y se enjuagó con agua caliente hasta un pH neutro y se dejó secar sobre una caja petri de vidrio en una estufa a 105 °C por 6 h, se atemperó y se pesó.

CÁLCULOS

$$\% \text{ Lignina} = \frac{(Pp + M) - Pf}{M} \times 100$$

Donde:

Pp = peso constante del papel filtro

Pf = peso final (papel filtro + mtra. seca)

M = Peso de la muestra húmeda

5.4.9. Determinación de celulosa

Esta técnica parte de la muestra obtenida en la determinación de celulosa. Se pesaron 2 g de muestra y se le adicionaron 10 ml de NaOH al 17.5 % a temperatura ambiente, se dejó reposar por 5 min y se le adicionaron otros 5 ml de NaOH y dejándolo reposar nuevamente 5 min; se repitió el procedimiento una vez más para finalmente dejarlo reposar 30 min seguidos, al término del tiempo se le adicionaron 33 ml de agua destilada a temperatura ambiente dejándolo reposar por una hora, se filtró en crisol Gooch, se lavó con 35 ml de solución de NaOH al 8.3 % , agua destilada y ácido acético al 10 % dejándolo reposar por 3 min, se neutralizó con lavados de agua (aproximadamente 250 ml), se secó en una estufa toda la noche a 105 °C y se pesó.

CALCULOS

$$\% \text{ Holocelulosa} = \frac{(Pc + M) - Pf}{M} \times 100$$

Donde:

Pc = peso constante del crisol

Pf = peso final (crisol + mtra. seca)

M = Peso de la muestra húmeda

5.4.10. Compuestos fenólicos totales (Singleton y Rossi, 1965)

Extracción. Se pesó 1 g de muestra y se le adicionaron 10 ml de metanol, la mezcla se mantuvo en constante agitación por 24 h, protegiéndose de la luz; pasado este tiempo se centrifugó a 5000 rpm/10 min y los extractos obtenidos se guardaron a 4 °C hasta su posterior utilización. Este extracto se utilizó para determinar taninos condensados, flavonoides, antioxidantes totales, así como la capacidad antioxidante (DPPH• y ABTS^{•+}).

El contenido de polifenoles totales presentes en la muestra control y el material extruido se determinaron de acuerdo con el método colorimétrico Folin–Ciocalteu. Los polifenoles son fácilmente oxidables en medios básicos, por ejemplo en presencia de carbonato de sodio (Na₂CO₃), los cuales reaccionan con los ácidos fosfotúngstico y fosfomolibdico para generar su reducción, formando un complejo colorido que es

proporcional a la cantidad presente de polifenoles. Para la realización de ésta técnica se utilizó como estándar al ácido gálico (Apéndice 1). Se tomó una alícuota de 40 µl de extracto se diluyó con 460 µl de agua, se le adicionaron 250 µl del reactivo de Folin–Ciocalteu (1:10 v/v), se mezcló manualmente por 5 min y se le adicionaron 1250 µl de carbonato de sodio (Na₂CO₃) (20 %) se incubó por 2 h a temperatura ambiente protegiéndose de la luz y se leyó a 765 nm en un espectrofotómetro. Los resultados se expresaron como mg equivalente de ácido gálico/gramo de muestra (mgEAG/g).

5.4.11. Taninos condensados (Deshpande y Cheyran, 1987)

Se utilizó el método colorimétrico de la vainillina-HCl, usando como estándar a la catequina (Apéndice 2). Este método se basa en la habilidad que tienen los taninos condensados para reaccionar con la vainillina en medio ácido produciendo un color rojo (Khandelwal *et al.*, 2010) (Apéndice 3). Para esta determinación, se tomó una alícuota de 100 µl de extracto que se hizo reaccionar con 500 µl de vainillina HCl 8 % (1:1), se mezcló manualmente protegiéndose de la luz y se leyó a 492 nm en un espectrofotómetro. Los resultados se expresaron como miligramos equivalente de catequina por gramo de muestra (mg E catequina / g).

5.4.12. Flavonoides totales (Oomah *et al.*, 2005)

Se basa en la reacción en metanol del compuesto 2-aminoetil difenilborato con el grupo hidroxilo de los flavonoides en la posición 2' del anillo B para formar el 2'-difenilborato del flavonoide, presentando una coloración amarilla en medio neutro (Apéndice 4). Para su determinación se hizo reaccionar 200 µl del extracto con 80 µl de 2-aminoetil difenilborato y 720 µl de agua destilada. Se incubó por 30 min en la oscuridad y su absorbancia se leyó a 404 nm. Se utilizó como estándar al flavonoide rutina (Apéndice 5). Los resultados se expresaron como miligramos equivalente de rutina contenidos en un gramos en muestra (mg E rutina/g).

5.5. Propiedades físico-químicas

5.5.1. Tamaño y diámetro medio de partícula (Rosell *et al.*, 2009)

Se emplearon 100 g de muestra, la cual se hizo pasar por una serie de tamices con número de malla de 20, 40, 60, 80, 100, 120 y 140: acoplados entre sí y montados en un rotor en movimiento por 30 min. Las partículas retenidas en cada malla fueron pesadas y se determinó el diámetro medio de partícula (DMP) utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{DMP} = (P_1D_1 + P_2D_2 + P_3D_3 + P_4D_4 + P_5D_5 + P_6D_6 + P_7D_7)/\text{MT}$$

Donde:

P_{1-6} = peso de las partículas retenidas en cada tamiz

D_{1-6} = diámetro de malla de cada tamiz

MT = peso total de la muestra

5.5.2. Viscosidad

Para determinar la viscosidad, se utilizó 500 ml de solución al 1 %, 3 % y 5% de muestra a una temperatura de 25 °C con un viscosímetro rotatorio Brookfield con aguja No. 1 y a 100 rpm. Los valores obtenidos se reportaron en centipoise (Cps), los cuales con las unidades fundamentales de viscosidad (Martínez-Flores *et al.*, 2009).

5.5.3. Capacidad de absorción de agua (CAA) y capacidad de absorción aceite (CAAc) (Anderson y Conway, 1969)

Para medir la CAA, se pesó un tubo Falcon, se le agregó 1 g de muestra con 10 ml de agua; se dejó reposar por 30 min agitando cada 30seg, posteriormente se centrifugó a 2500 rpm por 10 min. Se desechó el sobrenadante y se pesó. El valor de CAA se obtuvo con la siguiente fórmula:

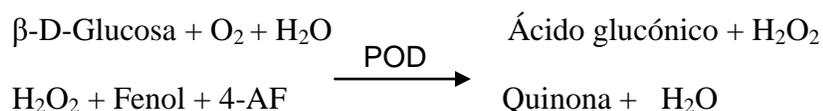
$$\text{CAA} = (\text{peso del tubo} + \text{sedimento}) - (\text{peso del tubo} + 1\text{g de muestra})$$

Para medir la CAAc se midió igual que para la CAA, excepto que en el lugar de utilizarse agua se utilizó aceite. Fórmula utilizada:

$$\text{CAAc} = (\text{peso del tubo} + \text{sedimento}) - (\text{peso del tubo} + 1\text{g de muestra})$$

5.5.4. Índice de retardo de diálisis de glucosa (IRDG) (Ou *et al.*, 2001)

La prueba de índice de retardo de diálisis de glucosa imita los eventos que ocurren en el intestino delgado y el retardo del flujo de nutrientes al medio externo es un indicativo del efecto modulador de la FD sobre la absorción de la glucosa en el yeyuno (Mora-Bedolla *et al.*, 2010). Las condiciones del método simulan el tiempo en que un alimento es digerido (4 h a 37 °C) (Adiotomre *et al.*, 1990). La glucosa oxidasa (GOD) cataliza la oxidación de glucosa a ácido glucónico. El peróxido de hidrógeno (H₂O₂) producido se detecta mediante un aceptor cromogénico de oxígeno, fenol, 4-aminofenazona (4-AF), en presencia de la peroxidasa (POD):



La intensidad del color formado es proporcional a la concentración de glucosa presente en la muestra ensayada (Kaplan, 1984 y Trinder, 1969).

Se tomaron 10 ml de una solución de glucosa 50 mmol/l (900 mg/dL), la cual contenía 0.2 g de cada muestra, estas fueron colocadas en bolsas de celulosa para diálisis de 11 cm de largo. Cada muestra (0.2 g) fueron previamente hidratadas en la solución de glucosa por 45 min. Cada bolsa fue cerrada y suspendida en 100 ml de agua destilada y luego fueron colocadas en un baño con agitación constante a 37 °C por 4h, se tomó una alícuota de 2 ml para medir su concentración de glucosa por medio del método de la glucosa oxidasa con un kit de marca RANDOX a un tiempo de 0, 10, 20, 30, 60, 120, 150, 180, 210 y 240 min. Se corrió un blanco y se midió la absorbancia a 500 nm. El IRDG fue calculado utilizando la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Abs. muestra}}{\text{Abs. Control}} \times 100 = \frac{\text{mg}}{\text{dL}}$$

La velocidad máxima de difusión de glucosa (V_{max}) fue calculada de la siguiente manera. Los datos experimentales fueron ajustados a una ecuación polinomial de grado tres: $Y = ax^3 + bx^2 + cx + d$, donde Y es el contenido de glucosa en (mmol/L), x es el tiempo; y a, b, c y d son coeficientes. La ecuación para calcular la tasa de difusión (Y') a cualquier tiempo es $Y' = 3ax^2 + 2bx + c$, cuando x es casi 0, $Y' = V_{max} = c$. La velocidad máxima de difusión se mostro en $\mu\text{mol}/\text{min}$.

5.5.5. Capacidad antioxidante: Método de captura de radicales libres por DPPH[•] (1,1-difenil-2-picril-hidrazilo) (Brand-Williams *et al.*, 1995)

El 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo es un radical libre estable que presenta una coloración púrpura en medio metanólico. Cuando hay donación de un electrón o un protón por un compuesto con poder antioxidante, esta coloración se torna amarillenta pálida (Apéndice 6), medida espectroscópicamente a 517 nm.

Para preparar el radical se tomó con una espátula una pequeña cantidad del radical DPPH y se disolvió en metanol hasta obtener una absorbancia de 0.75 a 0.78 ± 0.100 a 517 nm. La mezcla se agitó a fondo y se dejó reposar en la oscuridad a temperatura ambiente por 30 minutos. Se realizó una curva de porcentaje de inhibición utilizando como estándar al ácido gálico (Apéndice 7), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de inhibición} = \frac{\text{Absorbancia control} - \text{Absorbancia muestra}}{\text{Absorbancia control}} * 100$$

5.5.6. Capacidad antioxidante: ABTS^{•+} (2,2'-azinobis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico) (Re *et al.*, 1999)

El radical ABTS^{•+} se forma tras la reacción de ABTS (7 mM) con persulfato potásico (2.45 mM, concentración final) incubados a temperatura ambiente y en oscuridad durante 12 h. Una vez formado el radical ABTS^{•+} se diluye con etanol hasta obtener un valor de absorbancia de 0.700 ± 0.100 a 754 nm (longitud máxima de absorción). Se preparó una curva de porcentaje de inhibición utilizando como estándar al ácido gálico. Las muestras filtradas se diluyen con etanol hasta que se obtenga entre un 20 % a un 80 % de inhibición, comparada con la absorbancia del blanco, tras añadir 20 µL de la muestra. Se realizó una curva de porcentaje de inhibición utilizando como estándar al ácido gálico (Apéndice 8), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de inhibición} = \frac{\text{Absorbancia control} - \text{Absorbancia muestra}}{\text{Absorbancia control}} * 100$$

5.5.7. Características de color

Para determinar los valores de color en el control y en los extruidos se utilizó un colorímetro de la marca HunterLab, estos valores se obtuvieron en términos de la medición de L = luminosidad (0: negro, 100: blanco), a (- a : verde, + a : rojo) y b (- b : azul, + b : amarillo) en la escala de color Hunter. Se utilizó un platillo blanco como estándar para calibrar el equipo. El material se tamizó en malla 60 y posteriormente se secó a 40 °C por 24 h para retirarle la humedad y evitar interferencias en la medición.

El cambio total de color (ΔE), el ángulo hue (matiz) y el croma (saturación o pureza del color) fueron calculados de la siguiente manera (Hutchings, 1999):

$$\Delta E = [(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2]^{1/2}$$

$$Hue = [\tan^{-1}(b/a)]$$

$$Croma = [(a^2 + b^2)]^{1/2}$$

Donde: L_0 , a_0 y b_0 son los valores de L , a y b de la muestra sin tratamiento de extrusión.

5.6. Propiedades estructurales

5.6.1. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se analizaron las muestras sin tratamiento de extrusión y el material obtenido después de la extrusión, para observar sus diferencias morfológica antes y después del proceso, por medio del MEB usando un equipo JMS-6400 Scanning Microscope, Marca: JEOL, Microanálisis: Detector: Bruker Modelo X FLASH 4010 MEB, del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la U.M.S.N.H. Las muestras utilizadas se tamizaron a un tamaño de partícula de 250 μm , se secaron durante 24 h a 60 °C antes del metalizado con cobre.

5.6.2. Infrarrojo (IR)

Se evaluaron la muestra antes y después de los tratamientos de extrusión. Este análisis ayudó a diferenciar los distintos grupos funcionales presentes en las moléculas orgánicas así como sus interacciones de enlace. Se basó fundamentalmente en el hecho de que las uniones de los grupos vibran a frecuencias propias que corresponde a los diferentes grupos funcionales. Una molécula expuesta a los rayos IR emite una frecuencia que es característica de esta molécula o grupo funcional identificado (Zhang *et al.*, 2009 y Galicia-García *et al.*, 2011).

Las muestras utilizadas se tamizaron a un tamaño de partícula de 250 μm y se secaron durante 24 h a 60 °C. Para analizar las muestras se utilizó un espectrómetro infrarrojo Perkin-Elmer, Spectrum 400 FT-IR/FT-NIR Spectrometer. Los datos obtenidos se analizaron con el software Origin Pro versión 8.

5.7. Elaboración del atole de tamarindo adicionado con el producto extruido

Para realizar la estandarización de la bebida caliente tipo atole, se tomó como referencia a la fécula de maíz para preparar atole fortificado marca MAIZENA[®] elaborado con fécula de maíz, cocoa en polvo, colorante natural (caramelo clase IV), carbonato de calcio, mezcla de vitaminas y minerales, sal yodada, saborizante artificial, colorantes artificiales (rojo 40 y azul 1) y dióxido de silicio. Al atole se le determinó la viscosidad para analizar su consistencia y así establecer la cantidad de fécula de maíz a utilizar en la elaboración de nuestro producto.

Se realizaron distintas formulaciones con fécula de maíz natural y agua (base del atole) para encontrar la consistencia adecuada, tomando como referencia el contenido en gramos del producto comercial 3.62 g por cada 100 ml de agua. Una vez obtenida la consistencia se le agregaron los demás ingredientes (concentrado de tamarindo, canela, azúcar y piloncillo) hasta obtener el dulzor y la acidez característicos del atole de tamarindo. Las formulaciones de cada prueba se muestran en la sección de resultados junto con el análisis de viscosidad. Para la medición de la viscosidad y la temperatura de las distintas formulaciones se calentó hasta ebullición y se retiró del fuego tomando la lectura de los valores obtenidos cada cinco minutos con ayuda de un viscosímetro Brookfield LVD-II +Pro. La aguja utilizada varió en función de las formulaciones establecidas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización química y fisicoquímica de nuestro estudio, se eligió la muestra extruida a una humedad de 32 % a 100 °C con un tamaño de partícula de 250 µm, para adicionarla al producto final en concentraciones de 1 % y 2 %. La incorporación se realizó en la última etapa de la elaboración del atole hasta que la temperatura disminuyó a 60 °C y posteriormente se midió la viscosidad. El polvo extruido fue previamente tratado con rayos UV por un periodo de 72 h para una total eliminación de microorganismos patógenos.

5.8. Análisis sensorial del atole de tamarindo adicionado con el producto extruido

El análisis sensorial tuvo la finalidad de evaluar algunas características del atole de tamarindo mediante una escala hedónica de aceptación. Los parámetros calificados fueron: *apariciencia* evaluando el nivel de agrado, el *sabor* (ácido, dulce, amargo o astringente), *aroma*, *consistencia* (granulosidad) y *viscosidad*.

Dicha evaluación se realizó con un total de 71 jueces participantes (degustadores), de los cuales el 39 % eran hombres en un rango de edad de 18 a 24 años y un 61 % fueron

mujeres con edades entre 18 a 25 años. La prueba se realizó en las instalaciones de la Facultad de Químico Farmacobiología U.M.S.N.H., alrededor de las 12 h. Las muestras evaluadas se colocaron en recipientes cerrados y se etiquetaron de la siguiente manera con el objetivo de no influir sobre la decisión del degustador:

Muestra No. 121: Sin extruido

Muestra No. 342: Extruido al 1 %

Muestra No. 003: Extruido al 2 %

El orden que las muestras tuvieron para su degustación fue el siguiente: primero la 342, seguida de la 003 y por último la 121.

A cada uno de los degustadores se les entregó una encuesta y se les pidió que observaran la muestra de manera cuidadosa y que la olieran, para posteriormente degustarlas una por una, pasándola por toda la lengua, enjuagándose la boca con un poco de agua natural para eliminar los residuos entre la degustación de cada muestra y así poder percibir de manera objetiva, las diferencias entre las muestras. La encuesta utilizada se muestra en el Apéndice 9.

5.9. Análisis estadístico

El análisis estadístico se le realizó a los datos obtenidos en la composición química y fisicoquímica del material extruido y sin extruir. Los datos, están representados por la media de 3 repeticiones \pm desviación estándar, estos posteriormente fueron procesados estadísticamente con el software JMP®6.0, mediante un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de Tukey con $\alpha= 0.05$ con la finalidad de comparar las medias de los tratamientos, y establecer si son estadísticamente significativos. A su vez, se analizó el efecto individual y de interacción que tienen los factores sobre las diferentes variables respuesta mediante el análisis factorial completo 2^3 (a x b). La correlación entre las variables respuesta fueron evaluadas utilizando el coeficiente de correlación de Pearson(r).

6. Resultados y Discusión

6.1. Análisis de la cáscara de tamarindo

6.1.1. Análisis Bromatológico

En la Tabla 9 se presenta la composición química de la cáscara de tamarindo. Se observa como componente mayoritario a la FD (suma de la FI mas la FS) la cual esta constituida aproximadamente por un 56.8 % de FI y un 1.2 % de FS. A su vez, la porción de FI de la materia prima está constituida principalmente por celulosa (24.9 %) y lignina (18.17 %) mientras que la FS contienen un 0.93 % de pectina la cual se considera como el componente más abundante presente en la porción de FS de diferentes plantas, teniendo una gran importancia fisiológica al verse directamente involucrada en la reducción de glucosa y colesterol sanguíneo (Nelson, 2001). El siguiente componente mayoritario es el extracto libre de nitrógeno que se encuentra en un 35.24%, el cual representa el contenido de azúcares simples (glucosa, galactosa y manosa), seguido de las cenizas con un 3.6 % representando principalmente a los minerales como el calcio (Ca), hierro (Fe).y magnesio (Mg). Finalmente, el 2.43 % representa el contenido de proteína presente en la cáscara de tamarindo.

El contenido de FD presente en la cáscara de tamarindo es comparable con otros productos comerciales tradicionalmente considerados aportadores de FD como el Metamucil[®], Fibra Kania[®], Fibra Tarasca[®], Nopalinaza Plus[®] y la Xotzil Fibra[®], los cuales aportan 52.72 %, 50.57 %, 33.60 %, 33.32 % y 21.90 % de FD respectivamente (Martínez-Flores *et al.*, 2009); por lo que, el polvo obtenido de la cáscara de tamarindo, por su contenido en FD (58 %) y bajo contenido en lípidos (0.73 %) puede considerarse de acuerdo con Jongaroontaprangsee *et al.*, (2007) como fuente de fibra para incorporarse a alimentos.

Actualmente, no se han encontrado reportes sobre la composición química de la cáscara de tamarindo, por lo que no es posible hacer comparaciones bibliográficas entre los resultados obtenidos y otros autores.

Tabla 9. Composición química de la cáscara de tamarindo

Componentes	Cantidad⁽²⁾
Fibra dietética total (FD) ⁽¹⁾ , (corresponde a la suma de la FI y FS)	58.00 ± 0.69
Fibra insoluble (FI) ⁽¹⁾ , que se distribuye de la siguiente manera:	56.8 ± 0.53
<i>Lignina</i>	31.57 ± 0.38
<i>Celulosa</i>	16.21 ± 0.03
<i>Hemicelulosa</i>	9 ± 0.34
... <i>Otros</i>	0.13
Fibra soluble (FS) ⁽¹⁾ , que se distribuye de la siguiente manera:	1.2 ± 0.35
<i>Pectina</i>	0.93 ± 0.1
.... <i>Otros</i>	0.27
Extracto libre de nitrógeno ⁽³⁾	35.24
Cenizas ⁽¹⁾	3.6 ± 0.02
Proteínas ⁽¹⁾	2.43 ± 0.19
Extracto Etéreo ⁽¹⁾	0.73 ± 0.12
Polifenoles totales (mgEAG/g)	19.86 ± 2
Taninos (mgEcatequina/g)	90.16 ± 15.77
Flavonoides (mgErutina/g)	13.54 ± 0.09

⁽¹⁾Valores representados en porcentaje (%). ⁽²⁾Cada valor representa la media de 3 repeticiones ± la desviación estándar. ⁽³⁾Se obtuvo mediante la siguiente fórmula: 100 - (FT+ Cenizas + Proteínas + Extracto etéreo).

6.1.2. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula juega un papel importante en la funcionalidad de la fibra. Además, la forma y el tamaño de las fibras dependen del tipo e intensidad de reducción de tamaño de partícula al que fueron sometidas. También, las fibras pueden presentar cambios durante el tránsito en el tracto intestinal como resultado del proceso de digestión (Zhang *et al.*, 2011). En la Tabla 10 se presenta la distribución de partícula del polvo de la cáscara de tamarindo y en la Figura 16 se muestra la curva granulométrica en la cual es posible visualizar la distribución del tamaño de partícula.

Tabla 10. Distribución de partícula del polvo de la cáscara de tamarindo.

No. Malla ⁽²⁾	Abertura (μm)	Fracción (g/100g) ⁽¹⁾
20	850	0.05 ± 0.04
40	425	7.18 ± 0.03
60	250	29.00 ± 0.82
80	180	14.83 ± 0.65
100	150	5.20 ± 0.18
120	125	8.93 ± 0.15
140	106	2.35 ± 0.35
Fondo	<106	27.63 ± 0.61

⁽¹⁾Cada valor representa la media de 3 repeticiones ± la desviación estándar. ⁽²⁾Número de cables por pulgada lineal.

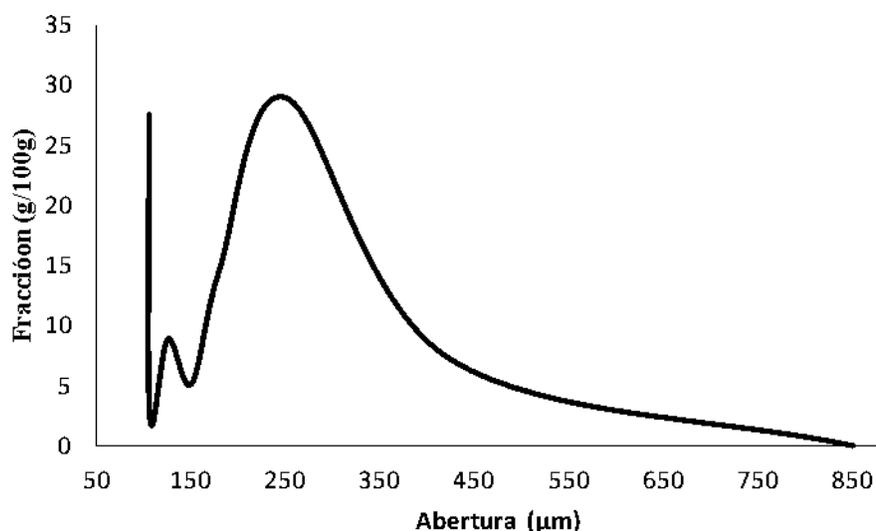


Figura 16. Curva de distribución de tamaño de partícula.

Los datos obtenidos muestran que el 43.83% del material se retuvo en las mallas 60 y 80 predominando el tamaño de partícula media de 180 a 250 μm. Sin embargo, el 27.63% se considera partícula pequeña (<106 μm) al retenerse en la base de los tamices.

Finalmente, sólo un 0.05% fue retenido en la malla 20 constituyendo así una cantidad pequeña del tamaño de partícula grande (>850 μm), existiendo una pérdida de 4.83 g de muestra durante el desarrollo del experimento debido a que las partículas más pequeñas se adhirieron al recipiente donde se pesaba dicho material. El diámetro medio de partícula (DMP) fue de 201.42 μm; este tamaño permite una mayor capacidad de

hidratación que las partículas de menor tamaño, lo que permite reconocer que estas partículas son las más aptas para la incorporación a alimentos funcionales (Jongaroontaprangsee *et al.*, 2007).

6.1.3. Viscosidad

Se realizaron pruebas de viscosidad en la cáscara de tamarindo sin extruir a una velocidad de corte de 100 rpm y concentraciones de 1, 3 y 5 % de muestra. Los valores obtenidos de viscosidad, oscilaron entre 0 y 0.54 Cps, indicando que el material no generó viscosidad al sistema. La FS, se caracteriza por la capacidad de incrementar la viscosidad en un sistema acuoso, por lo que su presencia es importante (Elleuch *et al.*, 2011). Abdul-Hamid y Luan (2000), observaron una baja viscosidad en salvado de arroz desgrasado, obteniendo valores de 1.25 Cps a 7% de concentración, explicando que este valor se debía a que su muestra tan sólo contenía un 9 % de FS.

Sin embargo, en nuestro estudio los valores máximos de FS obtenidos en las muestras extruidas fueron de 3.93 % y 3.91 % en los tratamientos de 32 % de humedad a 90 °C de temperatura y 32 % de humedad a 100 °C de temperatura respectivamente, por esta razón se observó que la cantidad de fibra soluble presente en las muestras extruidas no es suficiente para modificar (aumentar) la viscosidad del sistema.

6.2. Efecto del proceso de extrusión en las propiedades químicas de la cáscara de tamarindo

6.2.1. Fibra dietética total (FT), fibra insoluble (FI) y fibra soluble (FS)

En la Tabla 11 se muestran los valores obtenidos de la FT, FI y FS de cada uno de los tratamientos después del proceso de extrusión. En general, el tratamiento por extrusión logró hacer modificaciones en la porción de FT, FI y FS del material incrementando en promedio después del proceso en un 9.3 %, 7 % y 138 %, respectivamente. Algunos autores han encontrado cambios a nivel químico aplicando el proceso de extrusión en contenidos de fibra provenientes de diversas fuentes alimenticias. A continuación se describen algunos de esos trabajos, que se comparan con los resultados obtenidos en esta investigación, y se plantean las posibles hipótesis de los cambios ocurridos.

De acuerdo al incremento obtenido de FI en este estudio, puede suponerse, que como afirman Stojceska *et al.* (2010), este incremento se debe a la formación de complejos generados por la interacción de los fenoles (ácidos hidrocínámicos, estilbenos (resveratrol), taninos y flavonoides) con polisacáridos componentes de la FD o glicoproteínas ricas en prolina, generando insolubilización de los complejos formados y por lo tanto cuantificándose como fibra que a su vez repercute en una disminución de los

compuestos fenólicos debido a la polimerización de dichas moléculas (Singh *et al.*, 2007; Goñi *et al.*, 2009; Romero-Lara, 2000). La cáscara de tamarindo de manera natural posee azúcares reductores como la xilosa (considerada como el azúcar reductor más activo), la glucosa, la galactosa y la fructosa que interactúan con las proteínas presentes en la cáscara, generando los complejos arriba citados, debido a la temperatura generada durante el proceso de extrusión (Singh *et al.*, 2007).

En nuestra materia prima se cuantificó el contenido de lignina en un 31.57 %, de celulosa en un 16.21 % y de hemicelulosa en un 9 %; la lignina y la celulosa presentaron un incremento del 12.49 % y 29.90 % respectivamente, mientras que la hemicelulosa disminuyó en un 58 % después del proceso de extrusión (Tabla 12).

Tabla 11. Valores en porcentaje de FT, FI y FS después del proceso de extrusión (32 % y 39 % de humedad, 90 °C, 100 °C y 110 °C de temperatura y una velocidad de extrusión de 15 rpm.

Tratamiento	FT (%)⁽¹⁾	FI (%)⁽¹⁾	FS (%)⁽¹⁾
Control	58.00 ± 0.69 ^c	56.80 ± 0.53 ^{cd}	1.2 ± 0.35 ^d
32% 90 °C	64.02 ± 1.07 ^b	60.1 ± 0.85 ^{bc}	3.93 ± 0.29 ^a
32% 100 °C	74.30 ± 0.40 ^a	70.4 ± 0.40 ^a	3.91 ± 0.01 ^a
32% 110 °C	59.59 ± 0.51 ^c	55.94 ± 0.35 ^d	3.65 ± 0.15 ^a
39% 90 °C	58.41 ± 2.74 ^c	56.99 ± 2.79 ^{cd}	1.42 ± 0.34 ^{cd}
39% 100 °C	60.32 ± 1.41 ^{bc}	58.9 ± 0.40 ^{bcd}	2.12 ± 0.31 ^b
39% 110 °C	63.76 ± 1.71 ^b	62 ± 2.0 ^b	2.16 ± 0.11 ^b

⁽¹⁾Cada valor representa la media de 3 repeticiones ± la desviación estándar. Distintas letras en la misma columna, tienen una diferencia estadística significativa (P<0.05).

De acuerdo con los resultados obtenidos, es importante mencionar, que los polifenoles acoplejados a la FD son poco capaces de atravesar la mucosa en el intestino delgado, por lo que los que llegan al colon se convierten en sustrato fermentable para la microflora, generando metabolitos de fermentación absorbibles como son el ácido fenilpropiónico, fenilacético y fenilbutírico que ejercen efectos sistémicos. Los metabolitos no absorbibles y los polifenoles no fermentados permanecen en la luz del colon generando un ambiente antioxidante saludable al inhibir a los radicales libres presentes en la región, previniendo el desarrollo de cáncer de colon (Goñi *et al.*, 2009).

Goñi *et al.* (2009), mencionan que la asociación de la FD con los polifenoles se da en mayor proporción en la parte insoluble de la FD que en la soluble viéndose más favorecida esta unión en frutos seguido de las verduras y por último en los cereales. Por

otro lado, el aumento de la fibra soluble se atribuye al rompimiento de los enlaces glucosídicos de los componentes de la fibra insoluble (celulosa y algunas hemicelulosas) favoreciendo la disminución del tamaño de la molécula y por ende exponiendo más fácilmente sus grupos funcionales polares como los grupos hidroxilo (OH) y carboxilo (COOH) generando un incremento en la solubilización de la porción insoluble (Stojceska *et al.*, 2010). Este mismo comportamiento fue reportado por Jae-Kwan *et al.* (1998), Du *et al.* (1998), y García-Méndez *et al.* (2011).

En la Tabla 13 se muestra una comparación del incremento de la FS después del proceso de extrusión obtenido de diferentes residuos agroindustriales.

Tabla.12. Cuantificación de la lignina, celulosa y hemicelulosa presente en la cáscara de tamarindo sin extruir y extruida a 32 % y 39 % de humedad y 90 °C, 100 °C y 110 °C de temperatura.

Tratamiento	Lignina (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)
Control	31.57 ± 0.38 ^{cd}	16.21 ± 0.03 ^d	9 ± 0.34 ^a
32% 90 °C	33.29 ± 1.0 ^c	21.96 ± 0.99 ^b	4.83 ± 0.02 ^b
32% 100 °C	43.23 ± 0.83 ^a	22.64 ± 0.65 ^{ab}	3.53 ± 0.39 ^{cd}
32% 110 °C	30.12 ± 0.93 ^d	21.82 ± 0.81 ^b	3.7 ± 0.02 ^{bcd}
39% 90 °C	30.68 ± 0.79 ^d	23.93 ± 1.35 ^a	3.26 ± 0.35 ^{cd}
39% 100 °C	37.01 ± 0.86 ^b	16.51 ± 0.36 ^d	2.95 ± 0.63 ^d
39% 110 °C	38.75 ± 0.01 ^b	19.49 ± 0.37 ^c	4.42 ± 1.02 ^{bc}

⁽¹⁾Cada valor representa la media de 3 repeticiones ± la desviación estándar. Distintas letras en la misma columna, tienen una diferencia estadística significativa (P<0.05).

Tabla 13. Incremento de FS (%) después del proceso de extrusión en residuos agroindustriales.

Materia Prima	Incremento de FS (%) después del proceso de extrusión	Referencia
Cáscara de tamarindo	138	Este trabajo
Cáscara de manzana	121.16	Jae-Kwan <i>et al.</i> (1998)
Cáscara de plátano	30.3	Du <i>et al.</i> (2011)
Cáscara y bagazo de limón (CITROLIM S.A. de C.V. Apatzingán, Michoacán)	29.5	García-Méndez <i>et al.</i> (2011)

Por su parte, Larrea *et al.* (2005), reportaron que la pulpa de naranja incrementó su contenido de FS en un 80 % después del proceso de extrusión y Stojceska *et al.* (2010), mencionan que aún no está claramente dilucidado cuales son los componentes de la fibra que experimentan cambios durante el calentamiento.

La Figura 17 corresponde a los gráficos del ajuste al modelo general del Análisis Factorial Completo, es decir, muestran el efecto de los factores, temperatura o humedad, de manera global, sobre las variables respuesta de FT (Figura 17-a)), FI (Figura 17-b)) y FS (Figura 17-c)).

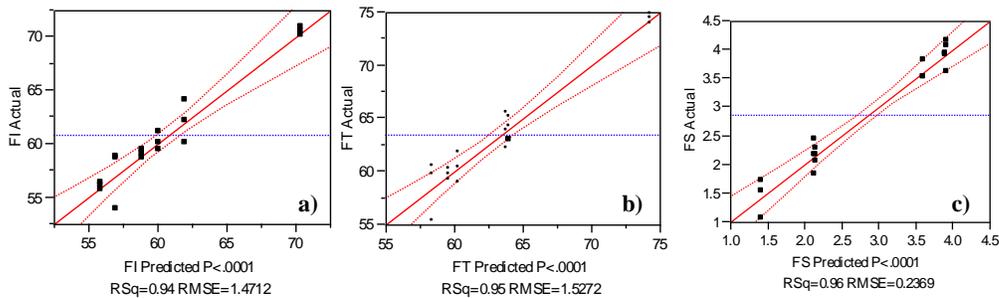


Figura 17. Gráficos del modelo general del Análisis Factorial Completo para FT, FI y FS. El cruce entre la media muestral (línea azul) y los intervalos de confianza (línea roja punteada) y la línea de regresión (línea roja continua), indica el efecto significativo de alguno de los factores como la temperatura, la humedad o su interacción (temperatura*humedad) sobre la variable respuesta: a) FT, b) FI y c) FS. RSq: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.

En las gráficas de la Figura 17, se observa la distribución de los datos (puntos negros) delimitados por los intervalos de confianza (línea roja punteada), y la línea de regresión (línea roja continua) obtenida del ajuste. El cruce entre los intervalos de confianza con la línea de la media muestral (línea azul), indica un efecto significativo de un factor (temperatura, humedad o su interacción) sobre la variable respuesta. Para el caso de la FT (Figura 17-a)), FI (Figura 17-b)) y FS (Figura 17-c)) se observó que el valor de probabilidad mostrado en los gráficos ($P < 0.0001$) indicó que sí existe un efecto significativo de alguno de los factores de temperatura, humedad o la interacción, sobre la variable de FT, FI y FS. En el Apéndice 10.1 se presentan los gráficos obtenidos del modelo que representan el efecto de los factores individuales de temperatura y humedad, y su interacción sobre la FT, la FI y la FS.

El ajuste del modelo a la nube de puntos o datos, fue explicado por el coeficiente de determinación R^2 (Rsq por sus siglas en inglés) el cual, presentó valores de 0.94, 0.95 y 0.96 para FT, FI y FS, respectivamente. Otro dato importante que se presenta en el gráfico es el error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés), el cual explica la media de las

distancias entre cada uno de los puntos y la recta ajustada al modelo, mientras más pequeños sean estos valores mejor será el ajuste de regresión lineal, en las Figuras 17-a), b) y c) se obtuvieron errores cuadráticos medios de 1.47, 1.52 y 0.23 para las variables respuesta de FT, FI y FS, respectivamente indicando un buen ajuste del modelo.

En la tabla 14 se muestran los niveles de significancia del modelo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta de FT, FI y FS. Es decir, el nivel de significancia indica cuál de los factores tuvo influencia sobre la variable respuesta, y que tan significativo fue este efecto.

Tabla 14. Niveles de significancia del Análisis Factorial Completo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta de FT, FI y FS.

Efecto	FT	FI	FS
Temperatura	< 0.0001***	< 0.0001***	0.0730
90 °C	N.S.	N.S.	0.0372*
100 °C	< 0.0001***	< 0.0001***	N.S.
Humedad	< 0.0001***	0.0015**	< 0.0001***
32%	< 0.0001***	0.0015**	< 0.0001***
Temperatura*Humedad	< 0.0001***	< 0.0001***	0.0063**
90 °C * 32%	N.S.	N.S.	0.0026**
100 °C * 32%	< 0.0001***	< 0.0001***	N.S.

*Significancia al 5 % (P<0.05), ** Significancia al 1% (P<0.01), ***Significancia menor al 1 % (P<0.001). N.S.: No significativo.

El efecto de la temperatura a 100°C, la humedad a 32 % y la interacción de ambos factores (temperatura y humedad), fueron altamente significativos para la FT, es decir, los cambios generados en la composición química de la fracción total de la fibra, se debieron a las condiciones del proceso de extrusión. Para la FI, se observó un efecto altamente significativo para el factor individual de la temperatura a 100 °C y su interacción entre esta misma temperatura y la humedad generada a un 32 %. Sin embargo, para el caso de la FS, la humedad a 32 %, mostró un mayor efecto significativo comparado con el factor de temperatura o su interacción.

6.2.2. Compuestos bioactivos

6.2.2.1. Polifenoles totales

Para conocer más acerca de los compuestos bioactivos presentes en la materia prima se cuantificaron los compuestos fenólicos y se evaluó la capacidad de atrapar a los radicales libres (antioxidantes). Asimismo, era imprescindible conocer su posible relación con el incremento en el contenido de FI (Tabla 11) obtenida después del proceso de extrusión. Los datos obtenidos y la discusión correspondiente se muestran a continuación.

El contenido de fenoles totales presentes en la cáscara de tamarindo fue de 19.86 mg EAG/g (Figura 18) inferior a 116 mg reportado por Razali *et al.* (2012), para esta misma porción del fruto. Las diferencias en el contenido de fenoles totales se atribuye posiblemente a la variedad entre los cultivares utilizados ya que al ser metabolitos secundarios de las plantas se ven afectados por condiciones ambientales y regionales, teniendo el conocimiento de que este tipo de compuestos se sintetizan a partir del estrés de la planta producido por periodos prolongados de sequía, tipo de suelo, radiación UV o infecciones por patógenos dependiendo también de la madurez al momento de la cosecha, del procesamiento y del almacenamiento (Bonoli *et al.*, 2004; Khandelwal *et al.*, 2010; Beltrán, 2011).

Razali *et al.* (2012), reportaron contenidos de polifenoles en distintas porciones del árbol de tamarindo como las hojas, semillas, venas y cáscara. Realizaron un estudio previo con distintos tipos de solvente como el metanol, acetato etílico y hexano, concluyendo que la mayor extracción de estos compuestos se dio en metanol. Los valores obtenidos de polifenoles en metanol para las distintas porciones fueron los siguientes, hojas: 309 mg/g, semillas: 272 mg/g, venas: 230 mg/g y cáscara: 116 mg/g. Además, Soong y Barlow (2004), cuantificaron 3.9 mg EAG/g en pulpa de tamarindo y Skupien *et al.* (2006), encontraron valores de polifenoles en berries de 16.45 mgEAG /g, por lo que comparado con nuestros resultados y lo reportado por Razali *et al.* (2012) se sugiere que el contenido de polifenoles presentes en las fracciones consideradas como residuos agroindustriales pueden emplearse como fuentes potenciales de antioxidantes naturales para su incorporación en alimentos funcionales.

En este estudio, el contenido total de polifenoles presentes en las muestras tratadas por extrusión presentaron, en promedio, una disminución significativa del 40.28 % en comparación con la muestra sin tratamiento (Figura 18). Esta misma tendencia, se presentó en las investigaciones reportadas por Sharma *et al.* (2011) en harina de cebada extruida; por Delgado-Licon *et al.* (2009) en muestras extruidas de harina de maíz-frijol y en frijoles (Korus *et al.* 2007). Además, en los trabajos de Repo-Carrasco-Valencia *et al.* (2009) en amaranto y en reportes de Abd El-Hady y Habiba (2003). De acuerdo con estos estudios, la disminución en los compuestos fenólicos es consecuencia del daño producido en la

estabilidad del material, debido a la descomposición química y enzimática (Soong y Barlow, 2004) de sus compuestos bioactivos, generado por las condiciones del proceso como el contenido de humedad y la temperatura del tornillo tal y como lo mencionan Brennan *et al.* (2011) y Yagci y Gogus (2009). Este daño producido se genera principalmente por una descarboxilación (Figura 19) (Brennan *et al.*, 2011), conjugación malónica y desesterificación de los fenoles (Mahungu *et al.*, 1999) ya que estos son sensibles a temperaturas por encima de los 80 °C, generando su destrucción o alteración en su estructura molecular (Shih *et al.*, 2009).

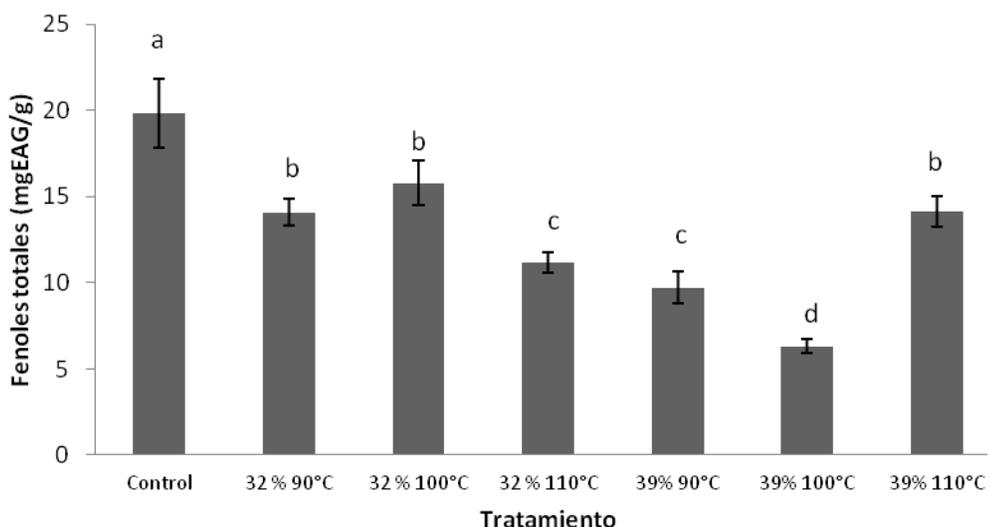


Figura 18. Contenido total de polifenoles en la muestra control y en las muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad. Cada valor representa la media de 3 repeticiones \pm la desviación estándar. Distintas letras indican que los tratamientos son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$)

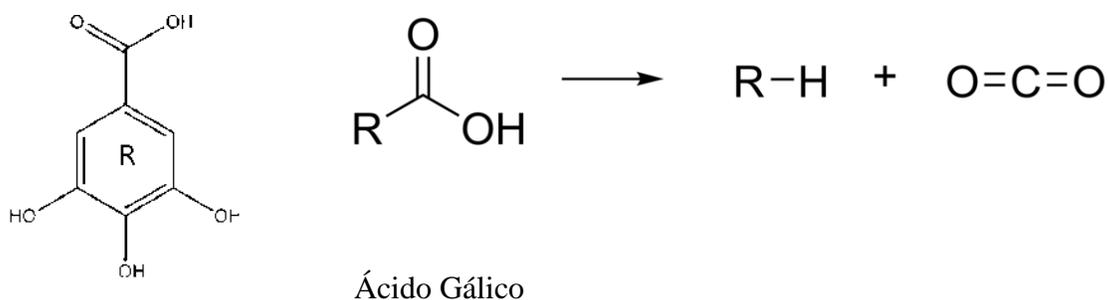


Figura 19. Reacción de descarboxilación del ácido gálico (compuesto fenólico), donde R corresponde al anillo aromático, generándose como producto de reacción dióxido de carbono (CO_2).

Como se mencionaba anteriormente, se reporta que los compuestos fenólicos, flavonoides y taninos pueden interactuar con otras macromoléculas como las proteínas y polisacáridos de la fibra dietética (Goñi *et al.*, 2009; Romero-Lara, 2000) las cuales por efecto del proceso se genera un reacomodo en su estructura promoviendo interacciones compuesto fenólico-proteína o compuesto fenólico-polisacárido, con una actividad antioxidante potencial, que cuando dicho complejo entra al tracto gastrointestinal del humano ocurre un desacoplamiento del complejo activando estos compuestos que actúan como inhibidores de los radicales libres (Rield y Hagerman, 2001; López, 2010; Singh *et al.*, 2007). Estos complejos se forman por puentes de hidrógeno donde el hidrógeno del ácido fenólico interactúa con el centro básico (carga negativa) de la otra molécula (Romero-Lara, 2000).

Comparando entre los tratamientos se observó una disminución del 50.63 % de los polifenoles a 39 % de humedad en relación al 32 % de humedad después del proceso de extrusión.

6.2.2.2. Taninos Condensados

En este trabajo, la cantidad de taninos presentes en la cáscara de tamarindo sin procesar fue de 90.16 mg equivalentes de catequina/g (Figura 20). Para fines de comparación, se tomaron como referencia los valores de taninos reportados por Bhatta *et al.* (2001) y Siddhuraju *et al.* (2007) en la testa de la semilla de tamarindo, la cual presentó valores de taninos de 136 mg/g y 232 mg/g respectivamente. Las muestras extruidas presentaron un incremento del 142 % en taninos; este comportamiento se explica considerando lo reportado por algunos autores como Zielinski *et al.* (2001), Shih *et al.* (2009), Brennan *et al.* (2011), Choi *et al.* (2011); Nayak *et al.* (2011), los cuales mencionan que posiblemente los taninos se encuentran atrapados o ligados a compuestos o polímeros en la pared celular (insolubles) y como una consecuencia de la temperatura durante el proceso de extrusión estos se liberan y es posible cuantificarlos de manera soluble. De esta manera, en nuestro estudio pudiera ser que las condiciones del proceso hacen que los taninos sean liberados y se obtengan compuestos más solubles que son cuantificados y podría considerarse que están en mayor cantidad en los materiales extruidos comparados con la cáscara de tamarindo sin procesar.

Aunque el efecto que tiene el proceso de extrusión sobre los taninos y la actividad antioxidante presentes en el alimento ha sido poco estudiado, Shih *et al.* (2009), mencionan que otros autores como Zielinski *et al.* (2001); Gumul y Korus (2006), han revelado que el contenido de algunos polifenoles como el ácido ferúlico, diferúlico y cumárico puede incrementar después del proceso de extrusión (Stojceska *et al.*, 2008). Anton *et al.* (2009). Estos autores, observaron un incremento en los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante del frijol común, extruido con una mezcla de almidón de maíz. Han y Baik

(2008) reportaron un comportamiento similar en los polifenoles totales de soya, garbanzo, guisantes amarillos y guisantes verdes cocinados.

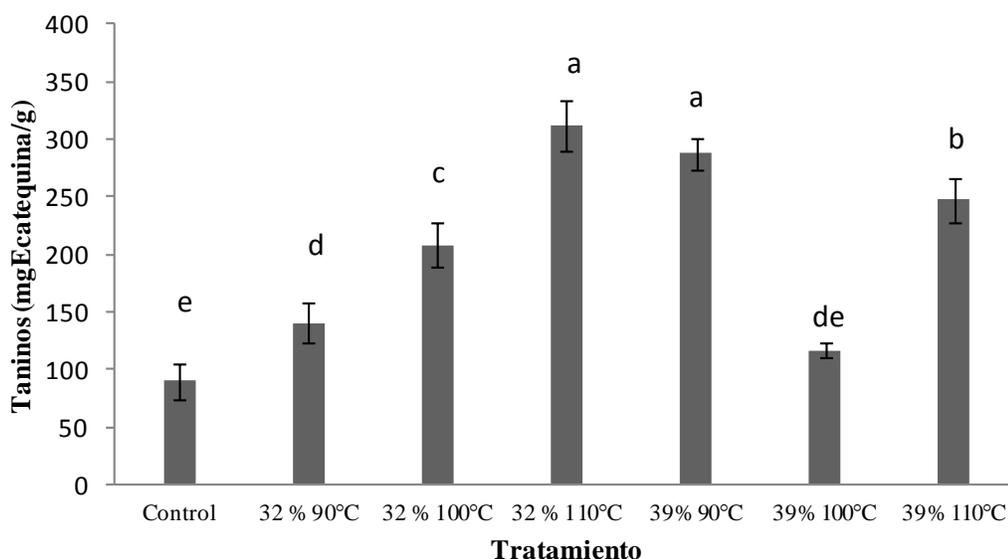


Figura 20. Contenido de taninos condensados en la muestra control y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad. Cada valor representa la media de 3 repeticiones \pm la desviación estándar. Distintas letras indican que los tratamientos son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$).

6.2.2.3. Flavonoides

Los flavonoides provenientes de las plantas han generado un gran interés debido a sus efectos producidos en la salud humana, los cuales están relacionados con un poder antioxidante alto y un efecto sinérgico con otros antioxidantes naturales (Sun *et al.*, 2011).

En la Figura 21 se muestra el contenido de flavonoides presente en la cáscara de tamarindo sin procesar, el cual fue de 13.54 mg equivalentes de rutina/g. Otros autores reportan valores de flavonoides menores que los obtenidos en este trabajo; López (2010), quien reportó 0.21 mg/g en extracto metanólico, aunque el midió en harina de semilla de tamarindo. Debido a que los flavonoides son responsables de la actividad antioxidante, el alto contenido que presenta la materia prima utilizada en este estudio sugiere que posee buena actividad antioxidante *in vitro*, tal como lo propusieron Sun *et al.*, (2011), para otras materias primas provenientes de frutas.

Razali *et al.* (2012), realizaron un análisis por HPLC de los flavonoides presentes en las hojas del árbol de tamarindo encontrando principalmente epicatequinas, catequinas, quercetinas, isoramnetina, mientras que Sudjaroen *et al.* (2005), encontraron por este

mismo análisis en el pericarpio de la semilla la presencia de proantocianidinas, procianidinas, (-)-epicatequinas y catequinas.

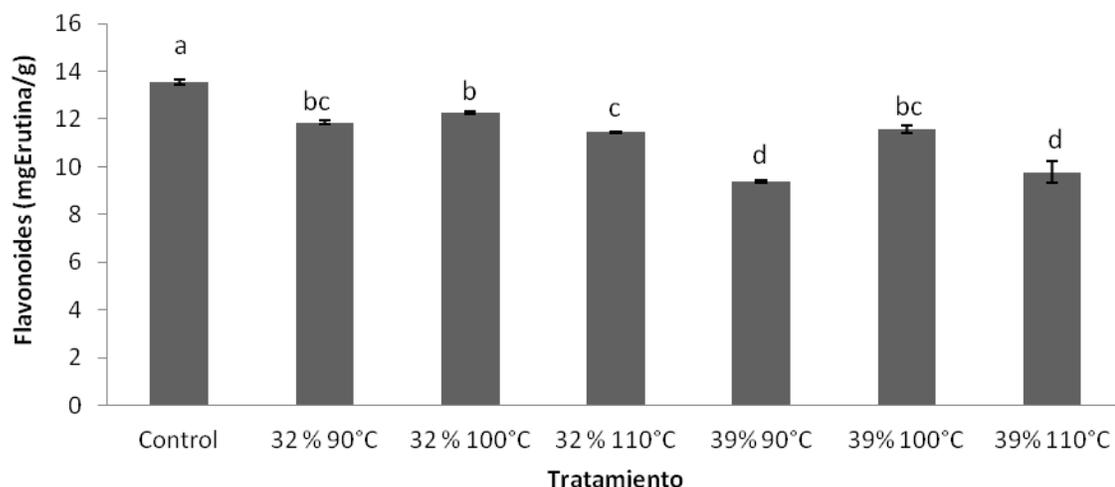


Figura 21. Contenido de flavonoides totales en la muestra control y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad. Cada valor representa la media de 3 repeticiones \pm la desviación estándar. Distintas letras indican que los tratamientos son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$).

En este estudio, después del proceso de extrusión se observó un decremento del 18.38 % de flavonoides (Figura 21). Otros autores reportan este comportamiento, como Im *et al.* (2003) y Huang *et al.* (2006). Sharma *et al.* (2011), también observaron esta tendencia al trabajar con cebada de distintas variedades y cuantificaron valores disminuidos en los flavonoides después de la extrusión. Los valores obtenidos de flavonoides a 32 % de humedad a diferentes condiciones de temperatura, se encontraron en un rango entre 11.44 y 12.26 mg equivalentes de rutina/g, observándose una disminución de estos al incrementar la humedad (39 %) oscilando entre 9.37 y 11.57 mg equivalentes de rutina. Los valores de disminución de los tratamientos a 32 % y 39 % de humedad fueron de 12.48 % y 24.37 %, respectivamente (Figura 21). El tratamiento que presentó menor pérdida de estos compuestos después del proceso de extrusión fue a 32 % de humedad a 100 °C de temperatura.

Con respecto a los compuestos bioactivos, la Figura 22 presenta los gráficos del ajuste al modelo general en el Análisis Factorial Completo, es decir, muestran el efecto de los factores (temperatura o humedad) de manera global, sobre las variables respuesta de polifenoles, (Figura 22-a), taninos (Figura 22-b) y flavonoides (Figura 22-c).

La probabilidad mostrada en los gráficos ($P < 0.0001$) indica que sí existió un efecto significativo generado por algunos de los factores, como la temperatura, la humedad o la interacción, sobre los polifenoles, los taninos y los flavonoides (Figura 22). Los

coeficientes de determinación R^2 , presentaron valores de 0.94, 0.95 y 0.98 para polifenoles, taninos y flavonoides, con errores cuadráticos de 0.91, 17.3 y 0.15 respectivamente, por lo que los datos muestran un buen ajuste al modelo. En el Apéndice 10.2 se presentan los gráficos obtenidos del modelo que representan el efecto de los factores individuales de temperatura y humedad, y su interacción (temperatura * humedad) sobre los polifenoles, los taninos y los flavonoides.

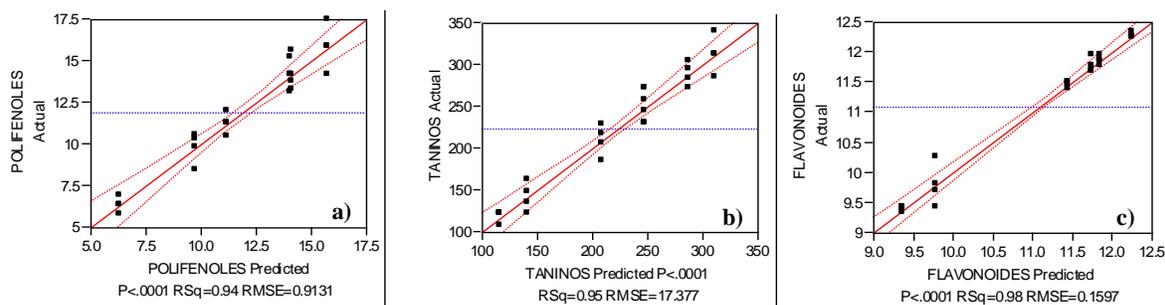


Figura 22. Gráficos del modelo general del Análisis Factorial Completo para Polifenoles, Taninos y Flavonoides. El cruce entre la media muestral (línea azul) y los intervalos de confianza (línea roja punteada) y la línea de regresión (línea roja continua), indica el efecto significativo de alguno de los factores como la temperatura, la humedad o su interacción (temperatura*humedad) sobre la variable respuesta: a) Polifenoles, b) Taninos y c) Flavonoides. RSq: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.

En la tabla 15 se muestran los niveles de significancia del modelo, para cada uno de los factores de humedad y de temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta de polifenoles, taninos y flavonoides. Es decir, el nivel de significancia indica cuál de los factores tuvo influencia sobre la variable respuesta, y que tan significativo fue este efecto.

Tabla 15. Niveles de significancia del Análisis Factorial Completo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta de polifenoles, taninos y flavonoides.

Efecto	Polifenoles	Taninos	Flavonoides
Temperatura	0.0082**	< 0.0001***	< 0.0001***
100 °C	0.0054**	< 0.0001***	< 0.0001***
Humedad	< 0.0001***	N.S.	< 0.0001***
32 %	< 0.0001***	N.S.	< 0.0001***
Temperatura*Humedad	< 0.0001***	< 0.0001***	< 0.0001***
100 °C * 32%	< 0.0001***	N.S.	< 0.0001***

*Significancia al 5 % ($P < 0.05$), ** Significancia al 1% ($P < 0.01$), ***Significancia menor al 1 % ($P < 0.001$). N.S. No significativo.

El efecto individual de la humedad a 32 % y su interacción con la temperatura a 100 °C, presentaron un efecto altamente significativo sobre los polifenoles, mientras que los taninos estuvieron altamente influenciados por el efecto individual de la temperatura a 100 °C y su interacción con la humedad a 32 %. La influencia individual y la interacción de los factores afectaron altamente a los flavonoides.

6.2.2.4. Actividad antioxidante

Método por DPPH[•] y ABTS^{•+}

En la figura 23 se muestran los datos obtenidos de la actividad antioxidante presente en la cáscara sin procesar (control) y las muestras extruidas. Se observa que en la muestra control, la capacidad antioxidante es mayor para el cromógeno ABTS^{•+} (2,2'azinobis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico) que para DPPH[•] (1,1-difenil-2-picril-hidrazilo) cuyos valores de inhibición fueron de 97.26 % y 90.75 %, respectivamente. Esto refleja que en la muestra control ocurre una mayor habilidad de reducir al radical ABTS^{•+} por la presencia de compuestos fenólicos (Thapoing *et al.*, 2006) los cuales al ser de naturaleza hidrofílica muestran mayor atracción hacia el cromógeno hidrofílico (ABTS^{•+}) (Macheix *et al.*, 1990).

Sin embargo, se muestra una disminución en promedio en el porcentaje de inhibición en ambos cromógenos después del proceso de extrusión en un 2.8 % para DPPH[•] y un 19.6 % para ABTS^{•+}. Los porcentajes de inhibición de DPPH[•] oscilaron entre 85.94 % y 91.49 %, mientras que los de ABTS^{•+} se encontraron entre 51.88 % y 96.64 %. Estos valores nos indican que los compuestos bioactivos presentes en la cáscara de tamarindo tienen alto poder antioxidante en comparación con otros materiales como la cebada descascarillada que presenta un porcentaje de inhibición para DPPH[•] de 19.8 % (Sharma *et al.*, 2011).

Se observa que la capacidad que tienen los compuestos bioactivos para inhibir al radical ABTS^{•+} disminuyó a temperaturas de 90 °C, particularmente la humedad más alta (39 %) causó mayor pérdida de compuestos bioactivos que las humedades bajas de 32 %, posiblemente por el efecto sinérgico mencionado anteriormente (Sharma *et al.*, 2011). Se observa también que las muestras presentaron menor pérdida cuando fueron tratadas a 32 % de humedad y 100 °C.

Por lo tanto, con los resultados obtenidos, podemos asegurar, que la cáscara de tamarindo es fuente principalmente de flavonoides tal y como lo mencionan Martinello *et al.* (2006), y que son considerados como antioxidantes fuertes; por lo que se esperaría que la capacidad antioxidante de esta materia prima es generada por la presencia de los flavonoides. Aunque se sabe que los procesos térmicos causan daño a este tipo de compuestos, en este trabajo se demuestra que la cáscara de tamarindo estudiada no perdió la capacidad de inhibir las reacciones de oxidación, después del proceso de extrusión. Por

lo que las propiedades antioxidantes en esta materia prima pueden ser explotadas como fuente potencial de antioxidantes además de brindar características propias de la FD.

En la Figura 24 se muestra el gráfico del modelo general del ajuste, para cada una de las variables respuesta como ABTS^{•+} y DPPH[•]. Para ambos radicales, se observó el efecto significativo ($P < 0.0001$) de alguno de los factores, como la temperatura, la humedad o la interacción. En la Tabla 16 se muestran los niveles de significancia del modelo para cada uno de los factores de humedad y temperatura, así como su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta de DPPH[•] y ABTS^{•+}. El efecto individual de la temperatura a 32%, fue altamente significativa ($P < 0.001$) para el radical DPPH[•], mientras que el radical ABTS^{•+} se vió influenciado por el efecto significativo ($P < 0.001$). de todos los factores y la interacción.

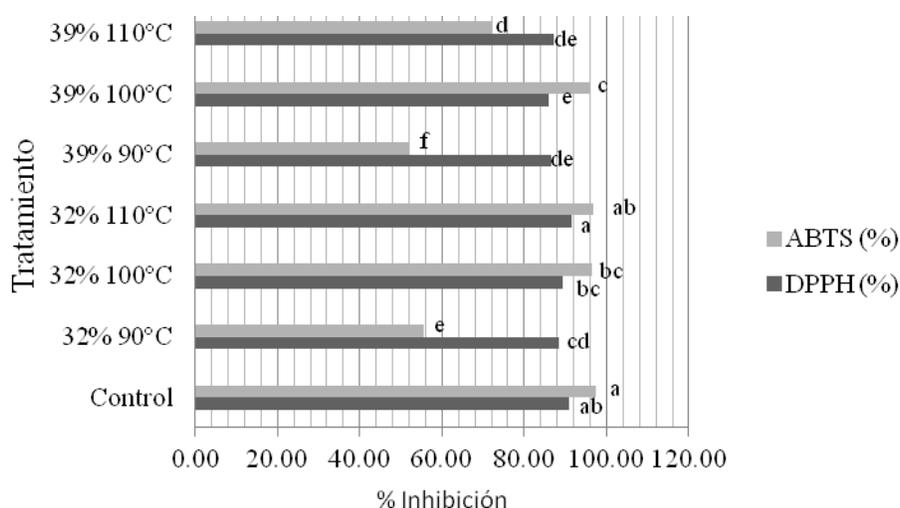


Figura 23. Porcentaje de inhibición de los radicales ABTS^{•+} y DPPH[•] en la muestra control y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad. Cada valor representa la media de 3 repeticiones \pm la desviación estándar. Distintas letras indican que los tratamientos son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$).

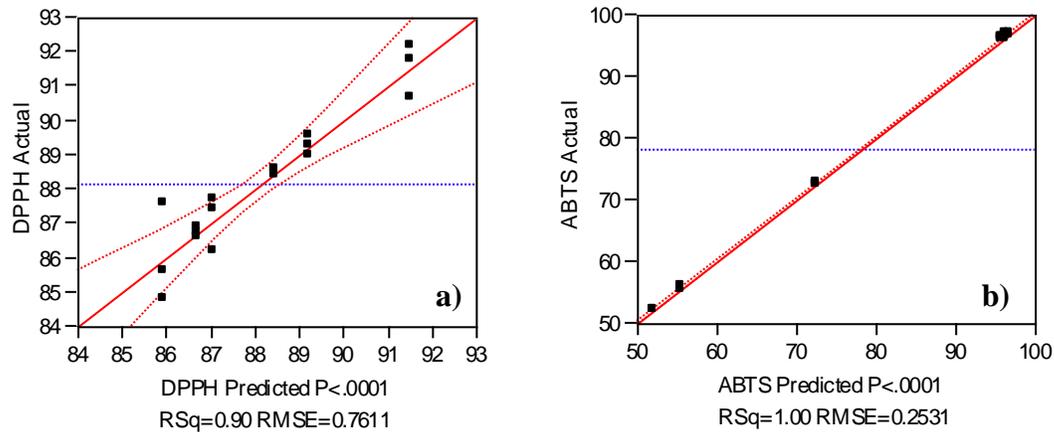


Figura 24. Gráficos del modelo general del Análisis Factorial Completo para ABTS^{•+} y DPPH[•]. El cruce entre la media muestral (línea azul) y los intervalos de confianza (línea roja punteada) y la línea de regresión (línea roja continua), indica el efecto significativo de alguno de los factores como la temperatura, la humedad o su interacción (temperatura*humedad) sobre la variable respuesta: a) DPPD[•]: 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo; b) ABTS^{•+}: 2,2'azinobis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico. RSq: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.

Tabla 16. Niveles de significancia del Análisis Factorial Completo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta: a) DPPD[•]: 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo; b) ABTS^{•+}: 2,2'azinobis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico.

Efecto	DPPH[•]	ABTS^{•+}
Temperatura	0.0028**	< 0.0001***
90 °C	0.0450*	< 0.0001***
100 °C	0.0450*	< 0.0001***
Humedad	< 0.0001***	< 0.0001***
32 %	< 0.0001***	< 0.0001***
Temperatura*Humedad	0.0328*	< 0.0001***
90 °C * 32%	0.0183*	< 0.0001***
100 °C * 32%	N.S.	< 0.0001***

*Significancia al 5 % (P<0.05), ** Significancia al 1% (P<0.01), ***Significancia menor al 1 % (P<0.001). N.S. No significativo.

6.3. Efecto del proceso de extrusión en las propiedades físico-químicas de la cáscara de tamarindo

6.3.1. Capacidad de absorción de agua (CAA) y capacidad de absorción de aceite (CAAc)

En la Tabla 17 se muestran los valores obtenidos antes y después del proceso de extrusión sobre la CAA y la CAAc. De manera general, la muestra control presentó valores mayores en la CAAc de 2.42 g aceite/g que en la CAA la cual fue de 1.85 g agua/g. En un estudio realizado por Sangnark y Noomhorm (2003) con residuos de bagazo de caña de azúcar también observaron el mismo comportamiento, presentando valores mayores en la CAAc que en la CAA los cuales fueron de 11.3 g aceite/g y 7.5 g agua/g, respectivamente. Un punto de interés a resaltar es que generalmente cuando hay menor CAA existe un aumento en la CAAc. Este comportamiento pudiera estar mostrando que existe una competencia entre el agua y el aceite por interactuar con el material, cuando hay mayor cantidad de agua enlazada a los componentes de la fibra entonces habrá menos sitios de adhesión del aceite, y cuando el contenido de agua es menor, entonces el aceite encontrará sitios de adsorción en el material. Otra forma en que el aceite se enlaza a los materiales es debido a las atracciones hidrofóbicas que se dan entre el aceite y los componentes hidrocarbonados. Sin embargo, la presencia de poros observados en las micrografías del material estudiado en esta investigación (Figura 32 C-F), pudiera influir en la mayor capitación de aceite.

Las propiedades de hidratación que tienen las fibras se relacionan principalmente con la habilidad de los grupos hidrófilos presentes en los polisacáridos para interactuar con el agua (Rocha-Guzmán *et al.*, 2008). Otros factores tales como la porosidad, tamaño de partícula, forma iónica, pH, temperatura y fuerza iónica también juegan un papel importante en esta propiedad, la cual se relaciona principalmente con efectos fisiológicos benéficos como son el laxante y la reducción de glucosa en sangre, por lo que disminuye la posibilidad de tener padecimientos como diabetes y obesidad (Elleuch *et al.*, 2011). Valores altos en esta propiedad, indican un uso potencial como ingrediente funcional para permitir la sinéresis y modificar la viscosidad y la textura de un alimento formulado (Wachirasiri *et al.*, 2009).

Martínez-Flores *et al.* (2009), obtuvieron valores similares a los obtenidos en esta investigación en la CAA en una muestra de fibra dietética llamada Fibra Tarasca[®] siendo de 1.54 g agua/g. Wachirasiri *et al.* (2009), mencionan que los valores bajos en la CAA se debe principalmente al bajo contenido de FS en la materia prima, la cual se relaciona con compuestos como las pectinas, fructanos y arabinosilanos los cuales tienen la habilidad de interactuar con el agua, como por ejemplo, el Metamucil[®] que presenta 13.30 % de FS y

esto se traduce en valores altos de la CAA que fue de 15.01 g agua/g (Martínez-Flores *et al.*, 2009).

Tabla 17. Valores asociados a la CAA y CAAC después del proceso de extrusión a 15 rpm.

Tratamiento	CAA (g agua/g muestra)	CAAc (g aceite/g muestra)
Control	1.85 ± 0.02 ^a	2.42 ± 0.20 ^a
32% 90 °C	1.77 ± 0.14 ^a	2.71 ± 0.18 ^a
32% 100 °C	1.78 ± 0.05 ^a	2.82 ± 0.16 ^a
32% 110 °C	1.69 ± 0.10 ^a	2.88 ± 0.22 ^a
39% 90 °C	1.76 ± 0.04 ^a	2.93 ± 0.03 ^a
39% 100 °C	1.75 ± 0.08 ^a	2.92 ± 0.09 ^a
39% 110 °C	1.75 ± 0.14 ^a	2.55 ± 0.64 ^a
Media	Porcentaje de disminución : 5.4%	Porcentaje de aumento: 16%

⁽¹⁾Cada valor representa la media de 3 repeticiones ± la desviación estándar. Distintas letras en la misma columna, tienen una diferencia estadística significativa (P<0.05).

Los valores obtenidos en la CAAC antes y después del proceso de extrusión (Tabla 17), oscilaron entre 2.93 a 2.42 g aceite/g muestra. Grigelmo-Miguel y Martina-Belloso (1999), reportaron valores menores en esta misma propiedad, a partir de fibras obtenidas de naranja y durazno, los valores de CAAC fueron de 1.27 y 1.09 g aceite/g, respectivamente.

Por otra parte, la capacidad que tienen las fibras para absorber aceite se relaciona principalmente con las propiedades de superficie de las partículas, con la densidad de carga general y la naturaleza hidrofílica de las moléculas presentes (Elleuch *et al.*, 2011). Es importante mencionar que la CAAC depende mucho de la porosidad del material, ya que en dichos sitios se aloja el aceite, así como del área superficial, que depende del tamaño de partícula, en donde a menor tamaño de partícula, mayor es el área superficial. Los ingredientes con altos valores en la CAAC se pueden utilizar como emulsificantes en alimentos ricos en grasa (Wachirasiri *et al.*, 2009) además de involucrarse con la absorción de aceite y colesterol sanguíneos disminuyendo padecimientos cardiacos y cáncer (Elleuch *et al.*, 2011).

En este estudio, se observó que en promedio existió una disminución de la CAA en un 5.4% y un incremento en la CAAC de un 16.1 % después del proceso de extrusión. No se observaron diferencias significativas (P < 0.05) entre los tratamientos, por lo que se

demuestra que estas dos propiedades no presentan cambios drásticos generados por el proceso de extrusión.

En la Figura 25 se presentan los gráficos del ajuste al modelo general en el Análisis Factorial Completo, sobre las variables respuesta de CAA y CAAC. Es posible observar que no existió un cruce entre los intervalos de confianza (línea roja punteada) y la línea de la media muestral (línea azul), por lo que se concluye que no hubo un efecto significativo generado por los factores del proceso de extrusión sobre la CAA y la CAAC. En la Tabla 18 se observa la falta de significancia para los factores individuales y la interacción.

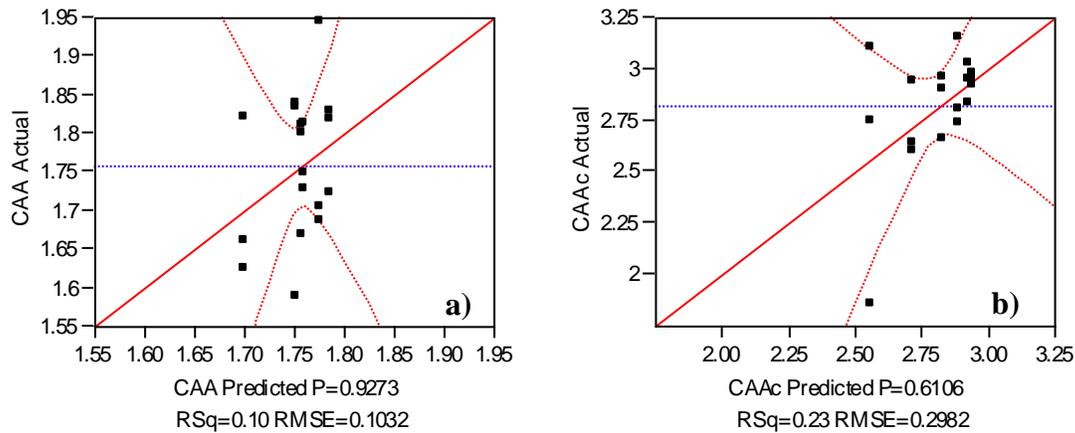


Figura 25. Gráficos del modelo general del Análisis Factorial Completo para CAA y CAAC. El cruce entre la media muestral (línea azul) y los intervalos de confianza (línea roja punteada) y la línea de regresión (línea roja continua), indica el efecto significativo de alguno de los factores como la temperatura, la humedad o su interacción (temperatura*humedad) sobre la variable respuesta: a) CAA: Capacidad de absorción de agua; b) CAAC: Capacidad de absorción de aceite. RSq: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.

Tabla 18. Niveles de significancia del Análisis Factorial Completo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta: a) CAA: Capacidad de absorción de agua; b) CAAC: Capacidad de absorción de aceite.

Efecto	CAA	CAAC
Temperatura	N.S.	N.S.
Humedad	N.S.	N.S.
Temperatura*Humedad	N.S.	N.S.

*Significancia al 5 % ($P < 0.05$), ** Significancia al 1% ($P < 0.01$), ***Significancia menor al 1 % ($P < 0.001$). N.S. No significativo.

Robertson y Eastwood (1981), mencionan que condiciones severas como las altas temperaturas, alteran grandemente la composición química de la fibra, por lo que existe una mayor solubilización de los componentes con liberación de azúcares neutros y azúcares ácidos, llegando a una completa destrucción de los mismos; por lo que de esta manera existe una mayor liberación de grupos hidrófilos (-OH) que estarían disponibles para ligar el agua. Sin embargo se han observado casos en el que la disminución de la CAA se puede deber a un aumento de la temperatura del equipo de extrusión, causando daños a la estructura, Stojceska *et al.* (2010) observaron este comportamiento en muestras de manzana.

En comparación con materias primas de la misma familia (*Fabaceae*), Rocha-Guzmán *et al.* (2008), observaron un incremento en la CAA, después del proceso de extrusión en frijoles de tres variedades distintas como el Flor de mayo, el Pinto Villa y el Bayo Victoria, los valores obtenidos antes del proceso de extrusión fueron 0.9 g/g, 1g/g y 0.8g/g incrementando hasta 3.8g/g 4.1g/g y 3.3 g/g respectivamente después del proceso. En este trabajo, la CAAC en las mismas muestras, se vió disminuida después de la extrusión encontrándose entre valores de 0.6 g aceite/g, 0.66 g aceite/g y 0.65 g aceite/g respectivamente. La disminución en esta propiedad, se debe a la desnaturalización de las proteínas presentes en el frijol, ya que la captación de aceite depende de las cadenas laterales de las proteínas, las cuales al verse desnaturalizadas por las condiciones de calor, genera una disminución significativa en la CAAC.

6.3.2. Índice de Retardo de Diálisis de Glucosa (IRDG)

Existen varios autores que afirman que la ingesta de FD ayuda a regular niveles de colesterol y glucosa en sangre, particularmente las que presentan mayor solubilidad en agua y generan viscosidad como el *Plantago psyllium* (Jenkins *et al.*, 1978; Adiotomre *et al.*, 1990; Huna *et al.*, 1993; Bourdon *et al.*, 1999; Ou *et al.*, 2001; Socarrás *et al.*, 2002; Larrea *et al.*, 2010), por lo que los análisis realizados de Índice de Retardo de Diálisis de Glucosa (IRDG) *in vitro* ayudan a comprender el comportamiento de las fibras *in vivo* a través del tracto gastro intestinal (Fuentes-Alventosa *et al.*, 2009; Martínez-Flores *et al.*, 2009).

Como se sabe, la FS es capaz de interactuar con el agua mediante los grupos hidrofílicos, por ello, es posible la formación de un gel viscoso que se relaciona con la capacidad de atrapar algunas moléculas como la glucosa y los lípidos (Martínez-Flores *et al.*, 2009). Estas fibras viscosas pueden retrasar el vaciamiento gástrico de los alimentos ingeridos hacia el intestino delgado, lo que brinda una sensación de saciedad. Este retraso en el vaciado gástrico reduce las concentraciones postprandiales de la glucosa en sangre presentando un efecto benéfico sobre la sensibilidad de la insulina y sobre el control de peso (Jenkins, 1986; Gourgue *et al.*, 1994; Larrea *et al.*, 2010). Sin embargo, algunos

autores como Larrea *et al.* (2010) mencionan que también se ha visto que la FI puede presentar un IRDG mayor que la FS.

Se ha observado que el proceso de extrusión aplicado a diferentes materias primas ayuda a incrementar la cantidad de FS presente en estos, debido al efecto termomecánico - húmedo generado durante el proceso, estos cambios químicos repercuten en las propiedades fisiológicas de la materia prima. Wang y Klopfenstein (1993), mencionan que tallarines de arroz extruidos ayudaron a mitigar la respuesta de glucosa en sangre en sujetos saludables.

Tabla 19. Glucosa difundida (mg/dL) y glucosa retenida (%) de la muestra sin extruir y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.

Tratamiento	Tiempo 30 min		Tiempo 60 min	
	Difusión (mg/dL)	Retención (IRDG %)	Difusión (mg/dL)	Retención (IRDG %)
Sin extruir	47.18 ± 2.5 ^d	54.2	52.71 ± 3.4 ^c	51.3
32 % 90 °C	41.63 ± 7.7 ^d	59.6	52.54 ± 3.9 ^c	51.4
32 % 100 °C	41.54 ± 0.4 ^d	59.7	48.07 ± 6.1 ^c	55.6
32 % 110 °C	49.11 ± 5.7 ^d	52.3	48.59 ± 1.5 ^c	55.1
39 % 90 °C	80.35 ± 9.6 ^{bc}	22.0	93.51 ± 12.1 ^{ab}	13.6
39 % 100 °C	75.69 ± 5.7 ^c	26.5	76.52 ± 6.1 ^b	29.3
39 % 110 °C	94.68 ± 6.3 ^{ab}	8.1	104.06 ± 4.2 ^a	3.8
Control	102.98 ± 2. ^a	0	108.21 ± 5.9 ^a	0

Cada valor representa la media de 3 repeticiones ± la desviación estándar. Distintas letras indican que los tratamientos son estadísticamente diferentes (P<0.05).

Tabla 20. Glucosa difundida (mg/dL) y glucosa retenida (%) de la muestra sin extruir y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.

Tratamiento	Tiempo 120 min		Tiempo 240 min	
	Difusión (mg/dL)	Retención (IRDG %)	Difusión (mg/dL)	Retención (IRDG %)
Sin extruir	59.29 ± 4.5 ^c	46.7	102.16 ± 2.1 ^{ab}	11.4
32 % 90 °C	60.06 ± 9.0 ^c	46.0	101.49 ± 1.6 ^{ab}	12.0
32 % 100 °C	59.87 ± 2.3 ^c	46.2	100.13 ± 4.4 ^b	13.2
32 % 110 °C	58.58 ± 6.6 ^c	47.3	104.63 ± 3.9 ^{ab}	9.3
39 % 90 °C	97.32 ± 2.6 ^{ab}	12.5	108.94 ± 2.8 ^{ab}	5.6
39 % 100 °C	89.01 ± 6.8 ^b	19.9	102.02 ± 5.2 ^{ab}	11.6
39 % 110 °C	108.34 ± 6.4 ^a	2.6	111.45 ± 10.1 ^{ab}	3.4
Control	111.19 ± 4.5 ^a	0	115.36 ± 3.6 ^a	0

Cada valor representa la media de 3 repeticiones ± la desviación estándar. Distintas letras indican que los tratamientos son estadísticamente diferentes (P<0.05).

En las tablas 19 y 20 se muestran los valores obtenidos en el sistema de la glucosa con la materia prima antes y después de la extrusión bajo diferentes condiciones de procesamiento. Este sistema se incubó por 4 h con la intención de simular el tiempo que le lleva al estómago digerir el alimento ingerido. Se muestra el monitoreo de la difusión de la glucosa a los 30 min, 60 min, 120 min y 240 min.

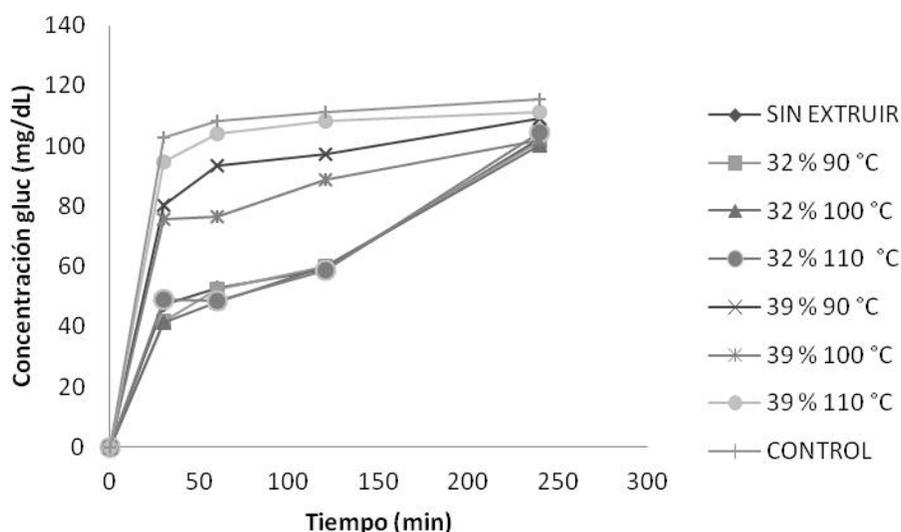


Figura 26. Índice de retardo de diálisis de glucosa de la muestra sin extruir y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.

Tabla 21. Velocidad máxima de difusión de glucosa en la muestra sin extruir y muestras extruidas a diferentes temperaturas y porcentajes de humedad.

Tratamiento	Vmax mg/dL
Sin extruir	1.7
32 % 90 °C	1.59
32 % 100 °C	1.46
32 % 110 °C	1.63
39 % 90 °C	2.99
39 % 100 °C	2.51
39 % 110 °C	3.41
Control	3.64

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó que hubo una mayor retención (IRDG) en las muestras extruidas a 32 % de humedad durante todo el transcurso del experimento; los valores oscilaron entre 52.3 – 59.7 %, 51.3 – 55.6 %, 46 – 47.3 % y 9.3 – 13.2 % para los 30 min, 60 min, 120 min y 240 min respectivamente, presentando velocidades de difusión menores que las muestras a 39 % (Tabla 21), dicho comportamiento se puede observar en la Figura 26. Sin embargo, las muestras extruidas a ambas humedades (32 % y 39 %), presentaron una mayor retención de glucosa en el minuto 30, observándose la liberación de la glucosa conforme aumenta el tiempo.

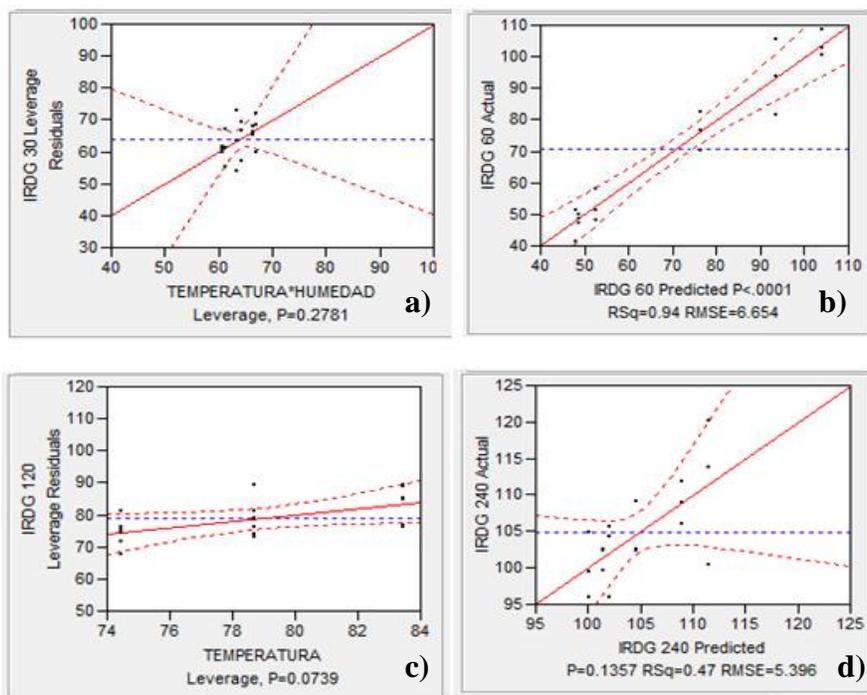


Figura 27. Gráficos del efecto de los factores sobre el Índice de Retardo de Diálisis de Glucosa (IRDG) a diferentes tiempos expresado en minutos: a) efecto de la interacción entre la humedad y la temperatura sobre IRDG 30, b) modelo general que muestra un efecto significativo de un factor sobre IRDG 60, c) efecto de la temperatura sobre IRDG 120 y c) modelo general que no muestra un efecto significativo de los factores sobre IRDG 240. El cruce entre la media muestral (línea azul) y los intervalos de confianza (línea roja punteada) y la línea de regresión (línea roja continua), indica el efecto significativo de alguno de los factores como la temperatura, la humedad o su interacción (temperatura*humedad) sobre la variable respuesta. RSq: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.

Larrea *et al.* (2010), estudiaron el efecto que tiene la fibra proveniente del bagazo de naranja antes y después del proceso de extrusión sobre el IRDG y observaron que las muestras extruidas presentaron un mayor índice de retardo comparado con el valor de la

muestra no extruida, obteniendo también un incremento tanto en la FS, como en la viscosidad de las muestras extruidas.

Tabla 22. Efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta: a) IRDG 30: Índice de retardo de diálisis de glucosa a los 30 minutos; b) IRDG 60: Índice de retardo de diálisis de glucosa a los 60 minutos; c) IRDG 240: Índice de retardo de diálisis de glucosa a los 240 minutos.

Efecto	IRDG 30	IRDG 60	IRDG 120	IRDG 240
Temperatura	0.0047**	0.0084**	-	-
90 °C	-	-	-	-
100 °C	0.0209*	0.0029**	-	-
Humedad	< 0.0001***	< 0.0001***	< 0.0001***	-
32 %	< 0.0001***	< 0.0001***	< 0.0001***	-
Temperatura*Humedad	-	0.0142*	0.0142*	-
90 °C * 32%	-	-	-	-
100 °C * 32%	-	0.0117*	0.0370*	-

*Significancia al 5 % (P<0.05), ** Significancia al 1% (P<0.01), ***Significancia menor al 1 % (P<0.001).

En la Tabla 23 se muestra una comparación de la glucosa difundida (mg/dL) entre diferentes fuentes de fibra.

Tabla 23. Comparación de la glucosa difundida a 30 min, 60 min y 120 min entre varias fuentes dietéticas con respecto a la cáscara de tamarindo, a 30 min, 60 min y 120 min.

Materia prima	Tiempo 30 min	Tiempo 60 min	Tiempo 120 min	Referencia
Almidón resistente	8.18 mg/dL	14.67 mg/dL	26.64 mg/dL	Ou <i>et al.</i> (2001)
Pectina	11.89 mg/dL	17.89 mg/dL	-	Adiotomre <i>et al.</i> (1990)
Pulpa de naranja	12.79 mg/dL	19.81 mg/dL	-	Larrea <i>et al.</i> (2010)
Salvado de trigo	17.47 mg/dL	25.85 mg/dL	-	Adiotomre <i>et al.</i> (1990)
Fibra Tarasca®	77.4 mg/dL	80 mg/dL	148 mg/dL	Martínez <i>et al.</i> (2009)
Cáscara de tamarindo	47.18 mg/dL	52.71 mg/dL	59.29 mg/dL	Este trabajo

En la Figura 27 y la Tabla 22 se muestra el efecto significativo que tiene la humedad de 32 % sobre el comportamiento del material en el sistema a los 30, 60 y 120 min, con un nivel de significancia menor al 1 % ($P < 0.001$).

El almidón resistente presenta valores de difusión pequeños en comparación con las demás fuentes, a pesar de que este se caracteriza por su poca solubilización en agua fría. También se puede observar este comportamiento en el salvado de trigo, el cual tiene valores de diálisis menores a nuestra materia prima, por lo que es posible pensar que la FI también puede estar vinculada a la retención de glucosa tal y como lo menciona Larrea *et al.* (2010). Sin embargo, la Fibra Tarasca[®] presentó niveles de difusión de glucosa mayores que la cáscara de tamarindo indicando que su capacidad de captar a este monosacárido en su matriz es menor que el material utilizado en esta investigación.

6.4. Efecto del proceso de extrusión en las características de color en la cáscara de tamarindo

El color está relacionado directamente con el factor de calidad y aceptabilidad de los productos alimenticios, convirtiéndose en una importante propiedad física que describe a los productos extruidos (Altan *et al.*, 2008).

En la Tabla 24 se observan las escalas de color L , a y b , las cuales disminuyeron con respecto al control en un 4.68 %, 0.3 % y 3.40 % después del tratamiento de extrusión respectivamente.

Tabla 24. Escalas de color (L , a , b) después de los tratamientos de extrusión.

Tratamiento/escala		$L^{(1)}$	$a^{(1)}$	$b^{(1)}$
Control		45.07 ± 0.12 ^a	10.77 ± 0.04 ^{bc}	17.91 ± 0.03 ^a
32 %	90°C	43.22 ± 0.40 ^b	10.70 ± 0.03 ^{cd}	17.46 ± 0.13 ^b
	100°C	43.04 ± 0.07 ^b	10.59 ± 0.06 ^d	17.46 ± 0.03 ^b
	110°C	41.79 ± 0.05 ^c	11.06 ± 0.02 ^a	17.42 ± 0.04 ^b
39 %	90°C	43.35 ± 0.36 ^b	10.72 ± 0.02 ^c	17.30 ± 0.07 ^{bc}
	100°C	43.47 ± 0.16 ^b	10.43 ± 0.01 ^e	17.26 ± 0.10 ^{bc}
	110°C	42.87 ± 0.08 ^b	10.88 ± 0.08 ^b	17.20 ± 0.06 ^c

⁽¹⁾Cada valor representa la media de 3 repeticiones ± la desviación estándar. Distintas letras en la misma columna, tienen una diferencia estadística significativa ($P < 0.05$).

El parámetro de luminosidad L observado en el control fue de 45.07, notándose que es un valor que se encuentra en un punto intermedio de la escala de luminosidad indicando que el cuerpo es originalmente opaco (Figura 28a), sin embargo, después del proceso de extrusión ocurrió una ligera disminución de este valor, menor al 5%, lo cual indica su tendencia a presentar y conservar tonos mate. Lo anterior muestra que el proceso de extrusión tuvo poco efecto en los cambios de coloración, que generalmente se asocian cuando hay degradación de compuestos coloridos o bien formación de nuevos compuestos que poseen color. En este caso posiblemente hubo una reacción entre compuestos fenólicos y proteína o azúcares reductores y proteína formándose nuevos compuestos que proporcionaron un ligero oscurecimiento en la muestra, el cual se considera poco significativo. La disminución del parámetro L después del proceso fue similar a lo reportado por Altan *et al.* (2008); Ilo y Berghofer (1999). Los valores del parámetro a (Figura 28a) se encontraron en un rango positivo de 10.43 y 11.06, indicando que el material extruido y el control muestran colores rojizos, tendiendo a combinarse con el amarillo, al mostrar también valores positivos en el parámetro b (Figura 28a), encontrándose en el cuadrante de los tonos rojos, amarillos y cafés. Esto corrobora el color natural del tamarindo el cual es generado principalmente por la presencia de compuestos fenólicos como los taninos (tono amarillo-café) (Badui, 2006).

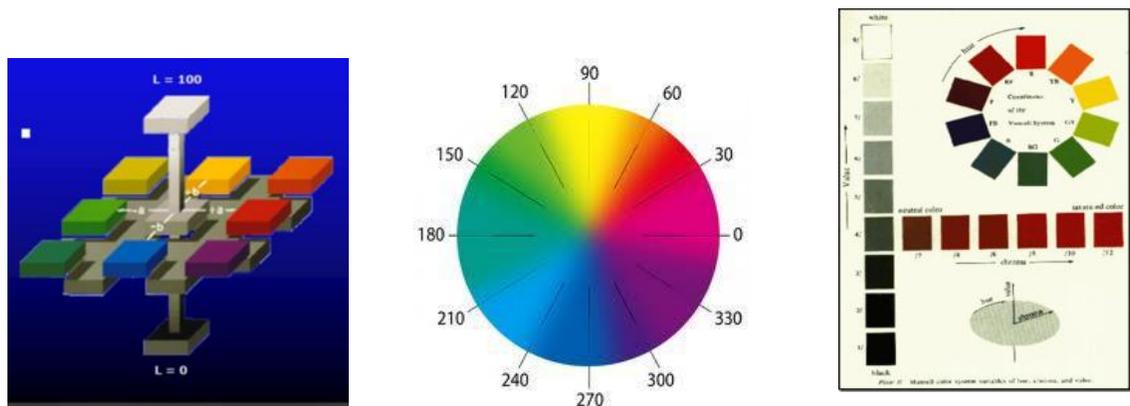


Figura 28 a) Espacio de color Hunter L , a y b ; b) ángulo Hue del círculo cromático; c) propiedad de cromaticidad (0 = grises (izquierda), 60 = saturación (derecha)).

Por lo anterior, se observa que las altas temperaturas (110°C) disminuyen el parámetro de luminosidad, generando coloraciones más oscuras debidas al daño térmico (ligero tueste), confirmando dicho comportamiento con los valores del parámetro a , los cuales se ven incrementados a esta misma temperatura, indicando la aparición de tonos más rojizos, mientras que el parámetro b se ve disminuido por causa de dicho efecto térmico, dando lugar a coloraciones amarillas menos intensas.

Los cambios generados en el color después del proceso de extrusión se debe a reacciones comunes en los alimentos que generan productos de reacción coloreados, entre estas se encuentran las reacciones de Maillard y caramelización, las cuales favorecen a un incremento en la coloración final del producto (parámetro *a* y *L* en esta investigación). Estas reacciones se favorecen por el pH (acidez), humedad (*Aw*), proteínas (aminoácidos), fenoles (taninos), azúcares y temperatura (Badui, 2006; Altan *et al.*, 2008). Camacho-Hernández *et al.* (2011), mencionan que las antocianinas (compuestos fenólicos (Brennan *et al.*, 2011; Yagci y Gogus, 2009) presentes en el maíz azul se ven afectadas por el proceso de extrusión provocando una disminución en los parámetros de color (*L*, *a*, *b*), debido a la sensibilidad de estos compuestos por la temperatura.

En la Tabla 25 se muestran las propiedades de color ΔE , ángulo Hue y cromaticidad después del tratamiento termo-mecánico. Se observó que no existen diferencias significativas entre los tratamientos con respecto a un cambio total de color en ΔE y el croma (Figura 29 y Figura 30).

Tabla 25. Propiedades de color (ΔE , Hue y Croma) después de los tratamientos de extrusión.

Tratamiento/escala		$\Delta E^{(1)}$	$^{\circ}$ Hue ⁽¹⁾	Croma ⁽¹⁾
Control		N.D.	58.97 ± 0.12^a	20.98 ± 0.01^a
32 %	90°C	1.90 ± 0.31^a	58.50 ± 0.25^{bc}	20.48 ± 0.09^a
	100°C	2.08 ± 0.16^a	58.74 ± 0.09^{ab}	20.42 ± 0.05^a
	110°C	3.32 ± 0.06^a	57.58 ± 0.05^d	20.63 ± 0.03^a
39 %	90°C	3.84 ± 0.38^a	58.27 ± 0.02^c	22.09 ± 0.02^a
	100°C	1.76 ± 0.24^a	58.83 ± 0.12^{ab}	20.17 ± 0.90^a
	110°C	2.31 ± 0.10^a	57.68 ± 0.28^d	20.35 ± 0.10^a

⁽¹⁾Cada valor representa la media de 3 repeticiones \pm la desviación estándar. Distintas letras en la misma columna, tienen una diferencia estadística significativa ($P < 0.05$). N.D. No determinado.

El $^{\circ}$ Hue presenta valores entre 58.27° y 58.97° posicionándose en los colores rojizos-amarillos del círculo cromático (Figura 28b), por lo que este ángulo corrobora la información obtenida de los parámetros *a* y *b*. Sin embargo, esta propiedad se ve afectada por la temperatura más alta del proceso de 110 °C; tal y como se observó también con los parámetros de luminosidad y *b*. La escala de cromaticidad muestra la tendencia del material a presentar tonos más cercanos al neutro que al saturado (Figura 28c).

En la Figura 31 se observa el modelo general del Ajuste al Análisis Factorial sobre las variables respuesta *L*, *a* y *b*. Se observa que en todos los parámetros de color existió un efecto significativo de alguno de los factores o su interacción. En la Tabla 26, se muestra el nivel de

significancia de los factores que causan un efecto significativo sobre la variable respuesta, para los parámetros L y a , se observó un efecto altamente significativo generado por el factor de temperatura, principalmente a 100 °C %, mientras que para el parámetro b se vio afectado por la humedad a 32 %.

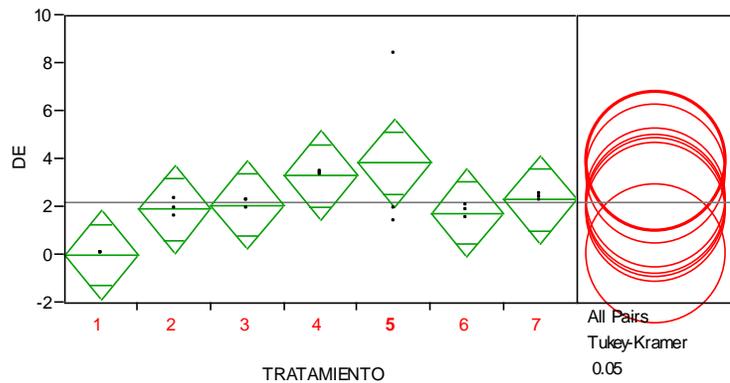


Figura 29. Gráfico de ANOVA y comparación de medias por la prueba Tukey, entre las muestras extruidas (2-7) y el control (1) para el cambio de color ΔE .

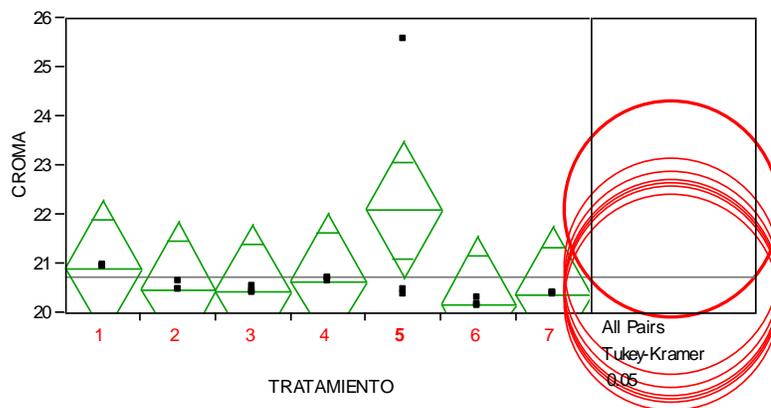


Figura 30. Gráfico de ANOVA y comparación de medias por la prueba Tukey, entre las muestras extruidas (2-7) y el control (1) para la cromaticidad.

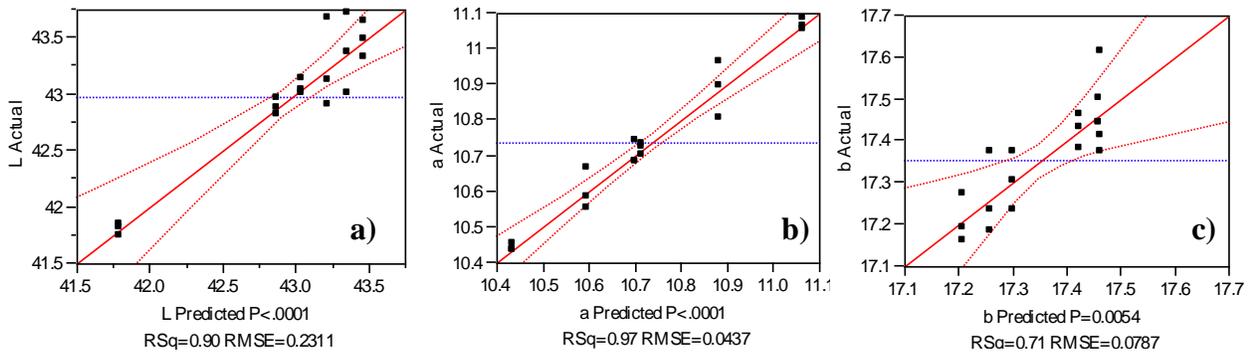


Figura 31. Gráficos del modelo general del Análisis Factorial Completo para los parámetros de color: L , a y b . El cruce entre la media muestral (línea azul) y los intervalos de confianza (línea roja punteada) y la línea de regresión (línea roja continua), indica el efecto significativo de alguno de los factores como la temperatura, la humedad o su interacción (temperatura*humedad) sobre la variable respuesta: a) Parámetro de color L ; b) Parámetro de color a ; c) Parámetro de color b : coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio.

Tabla 26. Niveles de significancia del Análisis Factorial Completo, para cada uno de los factores de humedad y temperatura, y su interacción (temperatura*humedad), sobre las variables respuesta: a) Parámetro de color L ; b) Parámetro de color a ; c) Parámetro de color b .

Efecto	L	a	b
Temperatura	< 0.0001***	< 0.0001***	N.S.
100 °C	0.0022**	< 0.0001***	N.S.
Humedad	0.0003***	0.0002***	0.0002***
32 %	0.0003***	0.0002***	0.0002***
Temperatura*Humedad	0.0117*	0.0038**	N.S.
90 °C * 32%	0.0199*	0.0011**	N.S.

*Significancia al 5 % ($P < 0.05$), ** Significancia al 1% ($P < 0.01$), ***Significancia menor al 1 % ($P < 0.001$). N.S. No significativo.

6.5. Efecto del proceso de extrusión en las propiedades estructurales de la cáscara de tamarindo

6.5.1. Microscopia electrónica de barrido

Las micrografías obtenidas de la cáscara de tamarindo bajo diferentes condiciones se muestran en la Figura 32. La morfología de la parte interna de la cáscara de tamarindo sin molienda (Fig. 32-A) mostró una superficie heterogénea con partes lisas y rugosas, mientras que la parte externa (Fig. 32-B) tiene una superficie mucho más rugosa pareciéndose a la de un panal, dicha morfología también fue reportada por Sivasankar *et al.* (2012), en muestras de cáscara de tamarindo. En la Figura 32-C se presenta la cáscara de tamarindo molida sin extruir, observándose pequeños fragmentos aislados, los cuales presentan morfología porosa tal como lo reportaron Sivasankar *et al.* (2012) y estriada debido a la presencia de las microfibrillas de celulosa. La característica de porosidad le brinda a la FD la capacidad de atrapar moléculas de aceite en comparación con la CAA que esta más ligada a su composición química (Nelson, 2001). Las micrografías 32-D-E, muestran la morfología de la cáscara molida y extruida, observándose una estructura más interconectada (homogenizada), donde no se observan los fragmentos aislados de cáscara, tal como se evidencia en el material molido sin extruir (Fig. 32-C). Además el material extruido presenta pequeños poros en su superficie lo cual se puede vincular con la capacidad que tiene el material de captar aceite debido a su porosidad. Valls-Porta (1993), menciona que después del proceso de extrusión, la celulosa presente en el salvado de trigo es más delgada y la superficie más rugosa que la muestra inicial sin procesar, tal como lo encontrado por nosotros, como se observa en la Figura 32-F, en la cual se observa una estructura celular cilíndrica bien definida, que coincide también con lo reportado por Maheswari *et al.* (2008).

6.5.2. Infrarrojo

La espectroscopia infrarroja proporciona un método muy valioso para reconocer rápida y sencillamente la presencia de ciertos grupos funcionales, debido a la vibración producida en los enlaces covalentes de los átomos en una molécula orgánica, generando diversas bandas o picos de absorción, y brindando información acerca de la estructura química del compuesto (Solomons, 1999; Zhang *et al.*, 2009). En la Figura 33 se muestra el espectro de IR de la muestra sin proceso de extrusión (control), y las muestras extruidas a distintas humedades y temperaturas. El desplazamiento en las bandas de transmitancia se relaciona directamente con los cambios generados en los grupos funcionales de los componentes químicos como las proteínas, los azúcares, los polifenoles y los carbohidratos complejos (componentes de la fibra dietética) (Marín-Rangel *et al.*, 2011), presentes principalmente en la pared celular de la cáscara de tamarindo. En la Tabla 27 se muestran las frecuencias a las que son absorbidos determinados grupos funcionales.

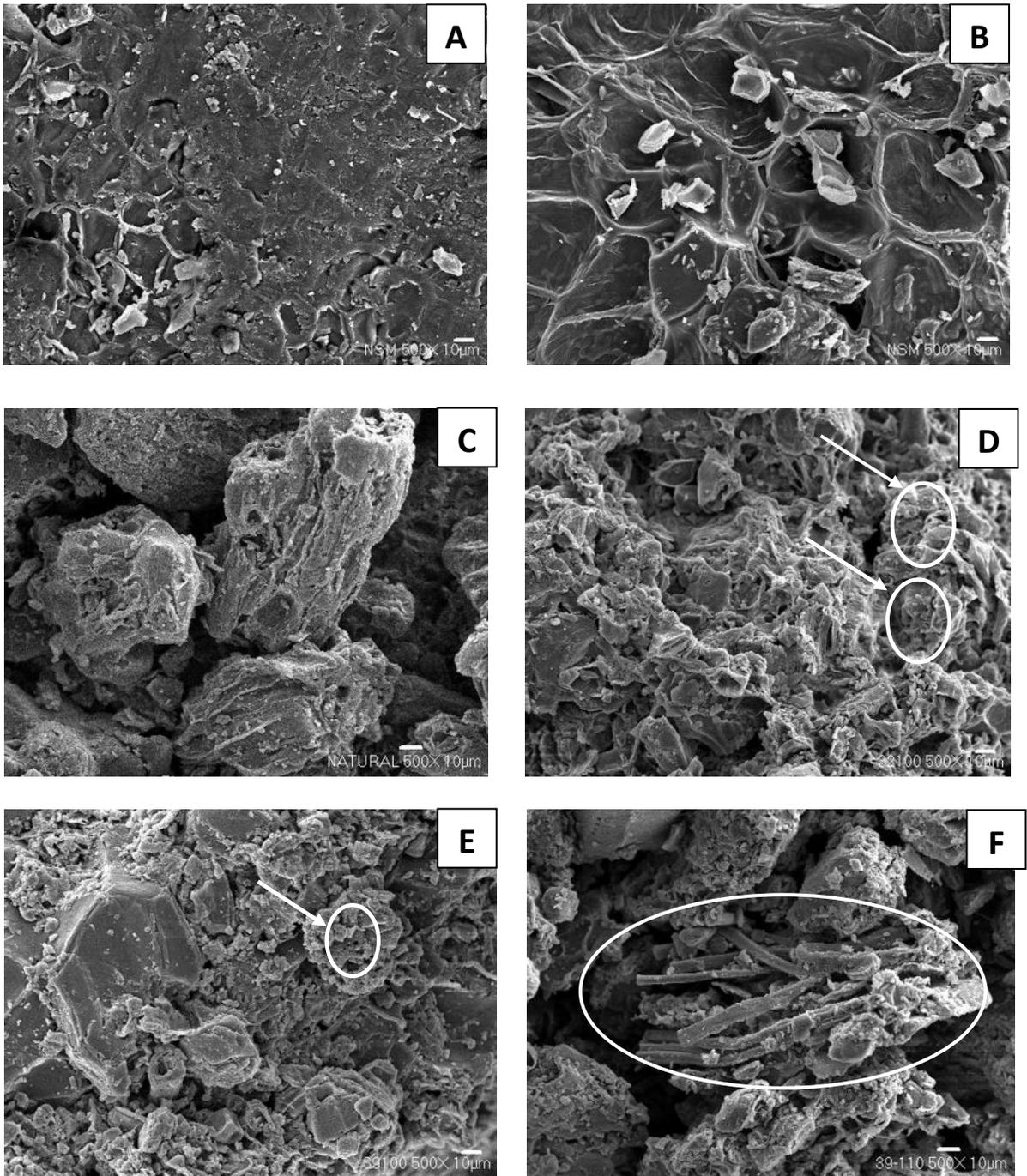


Figura 32. Micrografías electrónicas de barrido de la cáscara de tamarindo. **A-B**: muestras sin extraer y sin moler a 500x (parte interna y externa de la cáscara respectivamente); **C**: muestra molida sin extraer a 500x; **D-E**: muestras extraídas a 32 % y 39 % de humedad respectivamente y 100 °C de temperatura a 500x; **F**: estructura de microfibrillas de celulosa en la muestra de 39 % de humedad y 110 °C de temperatura a 500x.

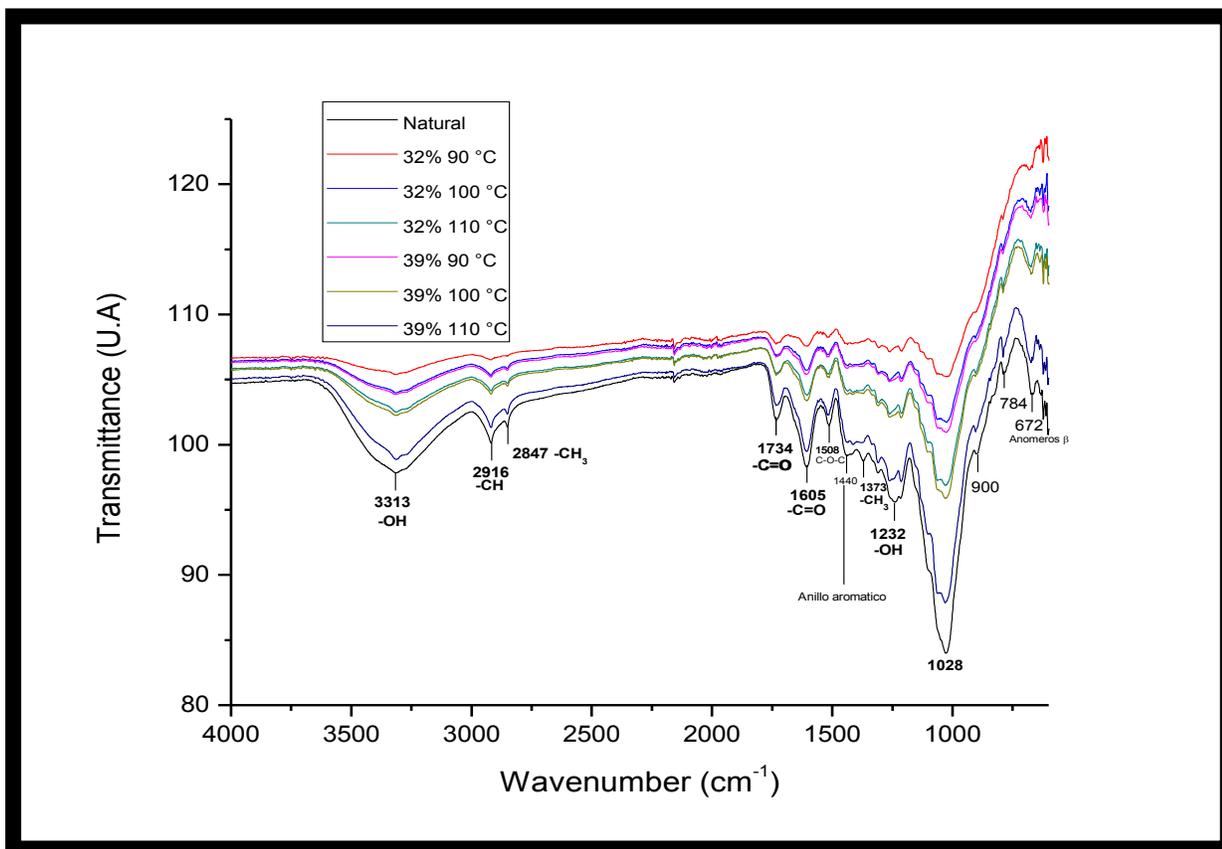


Figura 33. Espectro infrarrojo de la muestra sin tratamiento de extrusión y las muestras tratadas a 32 % y 39 % de humedad con 90 °C, 100 °C y 110 °C de temperatura.

Tabla 27. Bandas de absorción de espectroscopia IR de los grupos funcionales presentes en la cáscara de tamarindo.

Longitud de onda (cm ⁻¹)	Grupo funcional	Estiramiento	Compuesto
3313	Alcohol	O-H	Azúcares, pectina, celulosa, hemicelulosa, lignina y polifenoles (ácido tánico)
2916, 2847	Alcano	C-H	Celulosa, hemicelulosa, lignina, catequina y ácido gálico
1734, 1605	Carboxilo	C=O	Proteína, pectina, hemicelulosa y lignina
1440	Anillo aromático		Polifenoles y lignina
960-650	Anómeros β		Celulosa

Los resultados obtenidos muestran claramente una banda amplia a una frecuencia de 3313 cm^{-1} que corresponde a los estiramientos de los grupos hidroxilo (-OH) de la celulosa, la lignina y polifenoles (Anirudhan *et al.*, 2008; Sun, 2008), además de los estiramientos generados por los -OH pertenecientes a los grupos carboxilo (-COOH) de moléculas como las pectina y la hemicelulosas. (Ruiz, 2006; Maheswari *et al.*, 2008; Arroyo *et al.*, 2008; Galicia-García *et al.*, 2011; Sivam *et al.*, 2011; Marín-Rangel *et al.*, 2011). La amplitud de la banda indica la presencia de puentes de hidrógeno intermoleculares tal y como lo menciona Ruiz (2006). Es posible que la disminución del ancho de banda de las muestras extruidas, en comparación con la muestra sin procesar, sea el resultado de una disminución de puentes de hidrógeno, o el rompimiento de los enlaces de hidrógeno, con los que la celulosa estaba unida a otras moléculas como hemicelulosas y pectinas antes de extruir el material. Quizá la intensidad del tratamiento térmico y el grado de cizallamiento, ocurrido durante la extrusión, haya causado la hidrólisis de otros enlaces, causando una parcial disminución en el contenido de algunos componentes de la fibra, como es el caso de las hemicelulosas, las cuales se vieron disminuidas en un 58 %, después del proceso de extrusión.

Los estiramientos de los grupos hidroxilo en las pectinas se deben a la presencia de los ácidos D-galacturónicos (Figura 34). Mientras que las hemicelulosas al poseer una estructura química heterogénea, presentan dichos estiramientos o vibraciones en sus distintos grupos funcionales, presentes en los monosacáridos como la arabinosa, xilosa, glucosa, manosa, galactosa y ácidos urónicos. De la misma manera se observó la presencia de grupos hidroxilo a una frecuencia de 1232 cm^{-1} , señal correspondiente de la lignina (Arroyo *et al.*, 2008).

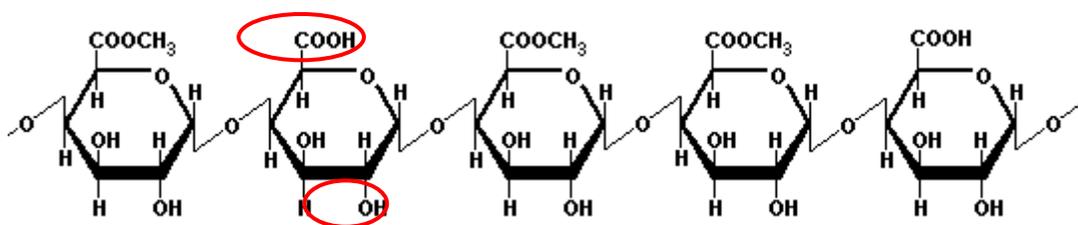


Figura 34. Estructura de la pectina integrada por moléculas de ácido D-galacturónico, unidas por enlaces glucosídicos α -D - (1,4), donde se observan los principales grupos funcionales (-COOH y OH) que presentan vibración.

Los picos presentes a 2916 cm^{-1} , 2847 cm^{-1} y 1373 cm^{-1} están asociados con las vibraciones de elongación carbono-hidrógeno del grupo alcano (-CH) (Ruiz, 2006; Marín-Rangel *et al.*, 2011) de la celulosa, hemicelulosa y lignina (Arroyo *et al.*, 2008). Galicia-Galicia *et al.* (2011), mencionan que Aguilar-Palazuelos *et al.* (2007) encontraron que la reducción en la intensidad de los picos de 2800 a 2400 cm^{-1} generadas en las uniones de C-H, probablemente se deben al posible rompimiento de los enlaces, generado por el proceso de extrusión. Sin embargo, en nuestra investigación no se observaron estos cambios,

indicando que las condiciones del proceso no fueron tan severas y por lo tanto no se detectó degradación en este tipo de uniones.

El grupo carbonilo ($-C=O$) es un grupo funcional importante que produjo en nuestro estudio dos picos a las frecuencias de 1734 y 1605 cm^{-1} . Estas señales se atribuyen a moléculas como los aldehídos y cetonas de carbohidratos sencillos o complejos y también a ácidos carboxílicos esterificados provenientes de la pectina, hemicelulosa y lignina (Arroyo *et al.*, 2008). Sivam *et al.* (2011), relacionan la banda transmitida a 1734 cm^{-1} con la presencia de pectinas metiladas. La banda característica del grupo aromático perteneciente a los polifenoles se registró a una frecuencia de 1440 cm^{-1} que corresponde a la señal reportada por Neira, 2009.

Por otra parte, los picos a una frecuencia de 1028 cm^{-1} se relacionan con estiramientos asimétricos, C-O de los grupos hidroxilo (alcoholes primarios) provenientes de los fenoles y de la composición química de la fibra como la lignina, la cual absorbe a esta misma frecuencia, caracterizándose por tener en su estructura alcoholes secundarios aromáticos (Colthup *et al.*, 1990, Ruiz, 2006; Zhang *et al.*, 2009) (Figura 35). En nuestro trabajo el contenido de lignina se encuentra entre un 30.12 % y 43.23 %. En el presente estudio, también se detectaron dos señales más, correspondientes a carbohidratos y anómeros β . De acuerdo con Colthup *et al.* 1990 los azúcares piranosos y furanosos presentan un pico característico de los carbohidratos a 784 cm^{-1} y los anómeros β pertenecientes a la celulosa se presentan en una región de $960 - 700\text{ cm}^{-1}$.

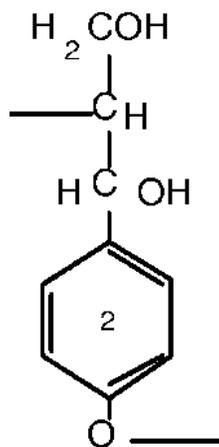


Figura 35. Estructura química de la lignina:

Con respecto a la presencia de polifenoles Sun (2008) menciona que los picos característicos de catequina se presentan a frecuencias de 2937 cm^{-1} y 2849 cm^{-1} , mientras que para el ácido gálico se presenta a 2875 cm^{-1} y el ácido tánico presenta bandas a 3232 cm^{-1} . Dichas bandas corresponden a lo obtenido en este trabajo presentándose a 2916 cm^{-1} .

y 2897 cm^{-1} para catequina, 2847 cm^{-1} para el ácido gálico y 3313 cm^{-1} , para el ácido tánico, sugiriendo la presencia de estos compuestos en la cáscara de tamarindo.

Los diferentes espectros de infrarrojo obtenidos a partir de las muestras extruidas con respecto a la muestra control, mostraron una disminución en la intensidad de las bandas. Este comportamiento indica que existió un cambio en los principales grupos funcionales de las moléculas descritas anteriormente como son las hemicelulosas, la celulosa y la lignina principalmente, debido a la conversión de la fibra insoluble a fibra soluble. Este cambio mayor se observó en aquellas muestras que presentaron un mayor incremento en el porcentaje de FS, como son la de 32 % de humedad a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura, principalmente. Zhang *et al.* (2009), también observaron una disminución en la intensidad de las frecuencias después del proceso de extrusión en muestras de avena.

6.6. Análisis Estadístico

6.6.1. Análisis de correlación de Pearson

En la tabla 28 se muestran las relaciones o asociaciones entre las variables repuesta, representadas como coeficientes de correlación (r) y su nivel de significancia estadística. Con respecto a la FT, se observan correlaciones significativas ($P < 0.001$) con la FI (0.978) y con la lignina (0.825). De los componentes que constituyen a la FI, la lignina es el componente que presentó la mayor correlación de 0.881, en comparación con las hemicelulosas (-0.256) y celulosas (0.226); un valor positivo de correlación, indica un sentido directamente proporcional, es decir, un incremento en la lignina elevará el valor de la FI presente en el material, mientras que las correlaciones negativas indican un sentido inversamente proporcional.

Se sabe que los compuestos fenólicos presentes en la cáscara de tamarindo, pueden interaccionar con los componentes de las fracciones de FT (Singh *et al.*, 2007, Goñi *et al.*, 2009; Stojceska *et al.*, 2010), generando complejos insolubles que se cuantifican como fibra. El análisis de correlación, mostró que existió una afinidad entre los componentes de la FI y los compuestos bioactivos presentes en el material. Las hemicelulosas presentaron afinidad por los polifenoles y los flavonoides, sin embargo, se observó una mayor correlación para los polifenoles ($r = 0.732$) que para los flavonoides ($r = 0.586$), mientras que la celulosa presentó una correlación moderada por los taninos de 0.677. Esto indica que las hemicelulosas son más afines a los polifenoles, y la celulosa a los taninos, sugiriendo su posible acomplejamiento entre ellos. Con respecto a la capacidad que tienen los compuestos bioactivos de inhibir reacciones de oxidación, se observó que los flavonoides tuvieron una moderada afinidad por el radical $\text{ABTS}^{*\cdot}$, presentando una correlación de

0.646, mientras que las reacciones de oxidación generadas por el radical DPPH[•] son inhibidas por los polifenoles debido a una correlación moderada de 0.552 entre estos dos compuestos. La correlación negativa existente entre los flavonoides y los taninos ($r = -0.723$), indican un sentido inversamente proporcional en su comportamiento, es decir el incremento de alguno de estos dos compuestos genera la disminución del otro.

Con respecto al color de los componentes presentes en la materia prima, el análisis correlacionó a los polifenoles ($r = 0.699$) y a los flavonoides ($r = 0.769$) con el parámetro b , el cual está dado por tonalidades que van desde el azul hasta el amarillo, sin embargo comparando los resultados obtenidos en colorimetría de esta investigación, fue posible conocer que nuestra materia prima presenta una tendencia hacia los tonos amarillos, cafés y rojizos. Los taninos se correlacionaron moderadamente con el parámetro a , confirmando la presencia de tonos rojo-café ($r = 0.577$). También es posible que las hemicelulosas contribuyan con tonos amarillos debido a su alta correlación con el parámetro b ($r = 0.84$).

Tabla 28. Análisis de correlación de Pearson.

	FT	FI	FS	POLIFEN	TANINOS	FLAVO	DPPH [†]	ABTS ^{††}	CAA	CAAc	IRDG	IRDG	IRDG	IRDG	L	a	b	LIG	CEL	HEMICEL
											30	60	210	240						
FT	1.000	0.978	0.639	0.223	0.014	0.120	0.011	0.139	0.067	0.080	-0.312	-0.287	-0.209	-0.200	-0.202	-0.279	-0.112	0.825	0.323	-0.256
FI	0.978***	1.000	0.476	0.222	-0.034	0.085	-0.100	0.151	0.101	0.057	-0.196	-0.163	-0.092	-0.172	-0.081	-0.366	-0.116	0.881	0.224	-0.226
FS	0.639**	0.476	1.000	0.013	0.154	0.162	0.285	0.070	-0.157	0.191	-0.549	-0.555	-0.513	-0.298	-0.619	0.083	-0.164	0.313	0.469	-0.366
POLIFEN	0.223	0.222	0.013	1.000	-0.280	0.495	0.552	0.148	0.330	-0.590	-0.456	-0.351	-0.422	-0.226	0.432	0.274	0.699	0.079	-0.090	0.732
TANINOS	0.014	-0.034	0.154	-0.280	1.000	-0.723	0.052	-0.232	-0.343	0.326	0.321	0.308	0.276	0.407	-0.719	0.577	-0.487	-0.127	0.677	-0.506
FLAVO	0.120	0.085	0.162	0.490	-0.723	1.000	0.561	0.646	0.250	-0.245	-0.739	-0.791	-0.763	-0.555	0.475	-0.190	0.769	0.053	-0.493	0.586
DPPH [†]	0.011	-0.100	0.285	0.552**	0.052	0.561	1.000	0.452	0.039	-0.127	-0.673	-0.731	-0.743	-0.160	-0.039	0.579	0.690	-0.308	0.027	0.501
ABTS ^{††}	0.139	0.151	0.070	0.148	-0.232	0.646**	0.452	1.000	0.045	-0.055	-0.309	-0.468	-0.400	-0.331	0.064	-0.024	0.351	0.264	-0.526	0.191
CAA	0.067	0.101	-0.157	0.330	-0.343	0.250	0.039	0.045	1.000	-0.364	-0.102	-0.042	-0.015	-0.301	0.395	-0.209	0.302	0.095	-0.196	0.379
CAAc	0.080	0.057	0.191	-0.590	0.326	-0.245	-0.127	-0.055	-0.364	1.000	0.087	-0.047	-0.062	0.299	-0.314	-0.224	-0.284	0.007	0.293	-0.414
IRDG 30	-0.312	-0.196	-0.540	-0.456	0.321	-0.739	-0.673	-0.309	-0.102	0.087	1.000	0.946	0.944	0.603	-0.085	-0.044	-0.625	0.094	-0.126	-0.288
IRDG 60	-0.287	-0.163	-0.555	-0.351	0.308	-0.791	-0.731	-0.468	-0.042	-0.047	0.946***	1.000	0.937	0.505	-0.042	-0.045	-0.621	0.080	-0.025	-0.299
IRDG 210	-0.209	-0.092	-0.513	-0.422	0.276	-0.763	-0.743	-0.400	-0.015	-0.062	0.944***	0.937***	1.000	0.508	-0.072	-0.107	-0.665	0.145	-0.053	-0.354
IRDG 240	-0.200	-0.172	-0.298	-0.226	0.407	-0.555	-0.160	-0.331	-0.301	0.299	0.600	0.505	0.508	1.000	-0.160	0.252	-0.325	-0.111	0.068	-0.047
L	-0.202	-0.081	-0.619	0.432	-0.719	0.475	-0.039	0.064	0.395	-0.314	-0.085	-0.042	-0.072	-0.160	1.000	-0.412	0.675	-0.081	-0.564	0.716
a	-0.279	-0.366	0.083	0.274	0.577**	-0.190	0.579	-0.024	-0.209	-0.224	-0.044	-0.045	-0.107	0.252	-0.412	1.000	0.099	-0.459	0.240	0.176
b	-0.112	-0.116	-0.164	0.699***	-0.487	0.769***	0.690	0.351	0.302	-0.284	-0.625	-0.621	-0.665	-0.325	0.675	0.099	1.000	-0.302	-0.332	0.850
LIG	0.825***	0.881***	0.313	0.079	-0.127	0.053	-0.308	0.264	0.095	0.007	0.094	0.080	0.145	-0.111	-0.081	-0.459	-0.302	1.000	-0.050	-0.277
CEL	0.323	0.224	0.469	-0.090	0.677***	-0.493	0.027	-0.526	-0.196	0.293	-0.126	-0.025	-0.053	0.068	-0.564	0.240	-0.332	-0.050	1.000	-0.498
HEMICEL	-0.256	-0.226	-0.366	0.732***	-0.506	0.586**	0.501*	0.191	0.379	-0.414	-0.288	-0.299	-0.354	-0.047	0.716	0.176	0.850***	-0.277	-0.498	1.000

*Significancia al 5 % (P<0.05), ** Significancia al 1% (P<0.01), ***Significancia menor al 1 % (P<0.001).

FT: Fibra total; FI: Fibra insoluble; FS: Fibra soluble; Polifen: Polifenoles; Tan: Taninos Flavo: Flavonoides; DPPH[†]: 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo; ABTS^{††}: 2,2'azinobis-3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico; CAA: Capacidad de absorción de agua; CAAc : Capacidad de absorción de aceite; IRDG 30: Índice de retardo de diálisis de glucosa a los 30 minutos; IRDG 60: Índice de retardo de diálisis de glucosa a los 60 minutos; IRDG 240: Índice de retardo de diálisis de glucosa a los 240 minutos; L, a, b: parámetros de color

6.7. Elaboración del atole de tamarindo

6.7.1. Estandarización

La búsqueda de fuentes alternas de fibra dietética, se ha centrado la atención en el aprovechamiento de residuos obtenidos a partir de industrias alimentarias, dedicadas a la manufactura de productos generados a partir de frutos. Actualmente, estos desechos industriales, han captado una mayor atención para su posible incorporación a diversos alimentos. Industrialmente, la pulpa de tamarindo es utilizada principalmente en la preparación de concentrados, licores, dulces, néctares y jugos, por lo que las fibras y la cáscara obtenida después de dicha extracción se desaprovecha. (Hernández-Estrada y González-Palomares, 2010).

A continuación, se presenta el desarrollo del método para la elaboración de una bebida caliente tipo atole, a la cual se le adicionó la cáscara de tamarindo extruida, como fuente principal de fibra dietética y antioxidantes.

La estandarización de la bebida se llevó a cabo realizando distintas formulaciones. Se tomó como referencia al atole marca MAIZENA[®], al cual se le denominó “muestra comercial” y se le aplicó una prueba comparativa de viscosidad con fécula de maíz natural, (Figura 33 y Figura 34 respectivamente), esto con la finalidad de observar su comportamiento. La cantidad de materia prima utilizada para esta primera prueba fue de 3.62 g de fécula de maíz natural (Figura 37) y 3.62 g de atole marca MAIZENA[®] (Figura 36) disueltos en 100ml de agua. La viscosidad obtenida fue de 38 cP y 43.3 cP, respectivamente. Sin embargo, visualmente la consistencia de estas dos muestras era demasiado líquida, por lo que se decidió modificar la formulación aumentando la cantidad de fécula de maíz hasta obtener la viscosidad característica de un atole. Se establecieron formulaciones con 4 g y 4.26 g de fécula de maíz, obteniendo una viscosidad de 58.3 cP y 58.9 cP respectivamente, observando que la segunda muestra presentó visualmente la consistencia esperada.



Figura 36. Medición de la viscosidad en la muestra comercial en 500 ml de agua.



Figura 37. Medición de la viscosidad en la muestra con fécula de maíz natural en 500 ml de agua.

A partir del comportamiento obtenido de la fécula de maíz con agua, se procedió a realizar la estandarización del producto adicionando los demás ingredientes: pulpa de tamarindo, canela, azúcar y piloncillo. Las formulaciones establecidas se basaron en la viscosidad deseada obtenida a partir de la relación de 4.26 g de fécula de maíz en 100 ml de agua.

La estandarización de las formulaciones se presenta en la Tabla 29. Se observó que la Formulación I presentó una consistencia muy viscosa de 106.9 cP, además de que su sabor fue muy ácido e insípido ya que no se percibía dulzor. Este incremento en la viscosidad, se debió a que al incorporar todos los ingredientes, estos brindaron una mayor consistencia y cuerpo al producto, debido principalmente a la adición de la pulpa de tamarindo.

Con base al resultado obtenido se desarrollo la Formulación II, reduciendo la cantidad de harina, pulpa de tamarindo y aumentando el contenido de azúcar. El producto obtenido a partir de la Formulación II, presentó una buena consistencia, sin embargo su sabor continuó siendo muy ácido e insípido por lo que se desarrolló la Formulación III, la

cual se caracterizó por la incorporación del piloncillo que le brindó una consistencia adecuada y un equilibrio entre los sabores, ya que era posible percibir al mismo tiempo lo ácido del tamarindo, el dulzor de los azúcares y la consistencia característica de un atole.

Tabla 29. Estandarización de la formulación del atole de tamarindo en 100 ml de volumen.

Ingredientes	Formulación I		Formulación II		Formulación III	
	g	%	g	%	G	%
Agua	10.00	32.7	10.0	33.11	10.0	32.5
Harina	4.26	13.9	3.8	12.50	3.7	12.1
Pulpa	9.30	30.4	8.0	26.50	6.6	21.5
Canela	0.40	1.3	0.4	1.30	0.4	1.3
Azúcar	6.60	21.6	8.0	26.50	8.0	26.1
Piloncillo	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	2.0	6.5
Total	30.56	99.9	30.2	99.9	30.7	100

N.I. No integrado.

Cabe destacar que la viscosidad que brinda la fécula de maíz al producto se debe principalmente a los gránulos de almidón presentes, los cuales son insolubles en agua fría. El calentamiento progresivo del sistema genera una absorción de agua por parte de los gránulos de almidón, particularmente de las zonas amorfas (amilosa) que son las menos organizadas y por lo tanto son las más accesibles, a medida que aumenta la temperatura, se retiene más agua y el gránulo comienza a hincharse y a aumentar de volumen, por lo que una vez que la parte amorfa se ha hidratado completamente, la zona cristalina (amilopectina) comienza un proceso semejante requiriendo más energía (calor). Generalmente al llegar a temperaturas cercanas a los 65 °C el gránulo de almidón alcanza su volumen máximo, perdiendo propiedades de difracción y de birrefringencia; si se sigue aumentando calor, el granulo hinchado e incapacitado para retener más agua se rompe parcialmente y la amilopectina y la amilosa pierden su estructura original y se dispersan en el seno de la disolución incrementando notablemente la viscosidad; este fenómeno es conocido como *gelatinización* (Badui, 2006; Sánchez, 2007; González, 2009).

Tomando como patrón a la Formulación III, se procedió a incorporar la cáscara de tamarindo extruida al producto. Se realizaron varias pruebas adicionándola en porcentajes de 0.5, 1, 2, y 3, observando que al 0.5 % era casi imperceptible la presencia de la cáscara y

al 3 % la consistencia era muy desagradable, ya que se percibía de manera muy marcada la presencia de gránulos y la sensación de astringencia, por lo que se decidió trabajar con los porcentajes intermedios de 1 % y 2%. La muestra extruida utilizada en la elaboración del producto fue la de 32 % de humedad y 100 °C ya que fue la que presentó un mayor contenido en FD, FI; FS, compuestos fenólicos y flavonoides además de una buena capacidad antioxidante (% de inhibición), como se muestra en la composición química (Tabla 30). La incorporación del material extruido se realizó en la última etapa de la elaboración del atole una vez que temperatura disminuyó a 60 °C y posteriormente se midió la viscosidad. Cabe mencionar, que se utilizó el polvo extruido tamizado a un tamaño de partícula de 250 µm y previamente tratado con rayos UV por un periodo de 72 h, para una total eliminación de microorganismos patógenos.

Tabla 30. Composición química de la muestra extruida a 32 % de humedad y 100 °C utilizada en la incorporación del producto.

FD	FI	FS	Polifenoles	Flavonoides	Inhibición DPPH*	Inhibición ABTS**
74.3 %	70.4 %	3.9 %	15.7 mg/g	12.2 mg/g	89.2 %	96.3 %

En la Figura 38, se presenta la gráfica de los valores de viscosidad de las diferentes muestras de atole con respecto al tiempo.

Durante la medición se observó que antes de la adición de la FD al 1 y 2 % la viscosidad de ambas muestras se mantuvieron entre 50.9 cP y 67.8 cP respectivamente. Sin embargo, alrededor de los 20 min a una temperatura de 60 °C, se adicionó la FD incrementando considerablemente su viscosidad, este aumento es posible visualizarlo en la gráfica como la aparición de un pico, observándose un incremento en la viscosidad de 128 cP y 144.5 cP en la muestra al 1 % y en la muestra al 2 % respectivamente. La muestra con extruido al 1 % mostró una disminución en la viscosidad después de la adición de la FD de 112.9 cP, mientras que la viscosidad de la muestra con el extruido al 2 % incrementó su viscosidad hasta 151.8 cP.

Cabe mencionar que este sistema presentó un periodo de estabilización hasta que alcanzó el equilibrio, observándose que la muestra que contiene mayor cantidad de extruido tuvo una mayor viscosidad con respecto a la muestra con menor contenido de FD.

La Figura 39 muestra los valores de la viscosidad de las muestras con respecto a la temperatura generada en el sistema. Es posible notar que al alcanzar la temperatura de 60 °C existió un incremento en la viscosidad, esto se debió a la adición de la FD. La muestra

con FD al 1 % y 2 % presentaron un periodo de estabilización después de la adición de la FD y poco a poco fue incrementando la viscosidad. Este comportamiento también se presentó en la muestra sin cáscara, el cual fue de esperarse ya que se sabe que conforme un fluido va perdiendo temperatura por consecuencia va ganando viscosidad, debido a la *retrogradación* de las moléculas de amilosa (realineación), por medio de la orientación paralela e interacción entre sí por puentes de hidrógeno de los grupos hidroxilo, generando firmeza en el gel debido a la disminución paulatina de la temperatura, provocando también la asociación de las cadenas de amilopectina en el almidón (Badui, 2006; Sánchez, 2007; González, 2009).

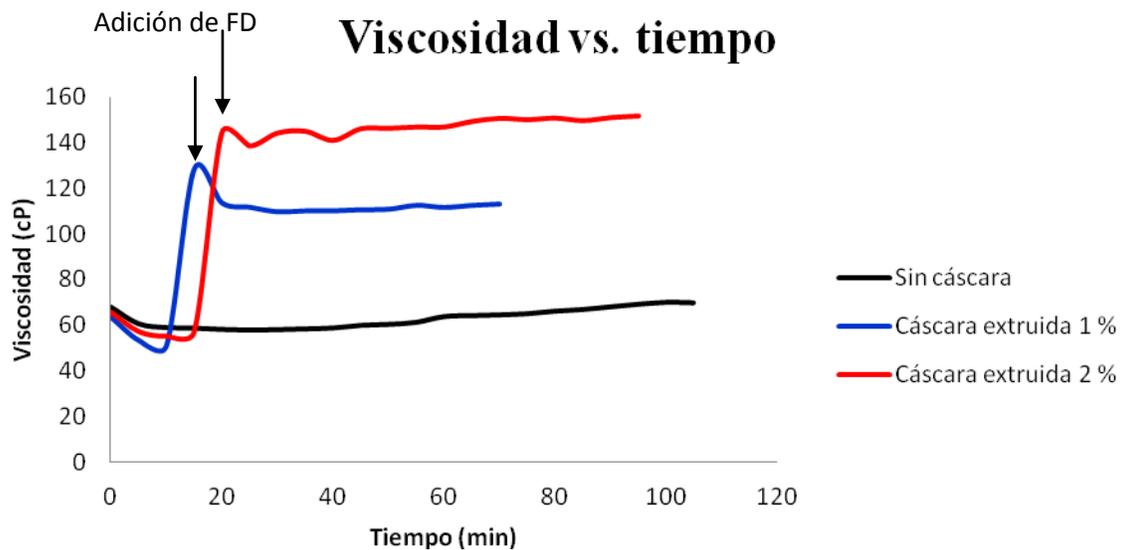


Figura 38. Comportamiento de la viscosidad del atole (sin cáscara, cáscara extruida al 1 % y cáscara extruida al 2 %) con respecto al tiempo. Adición de la FD a 60 °C.

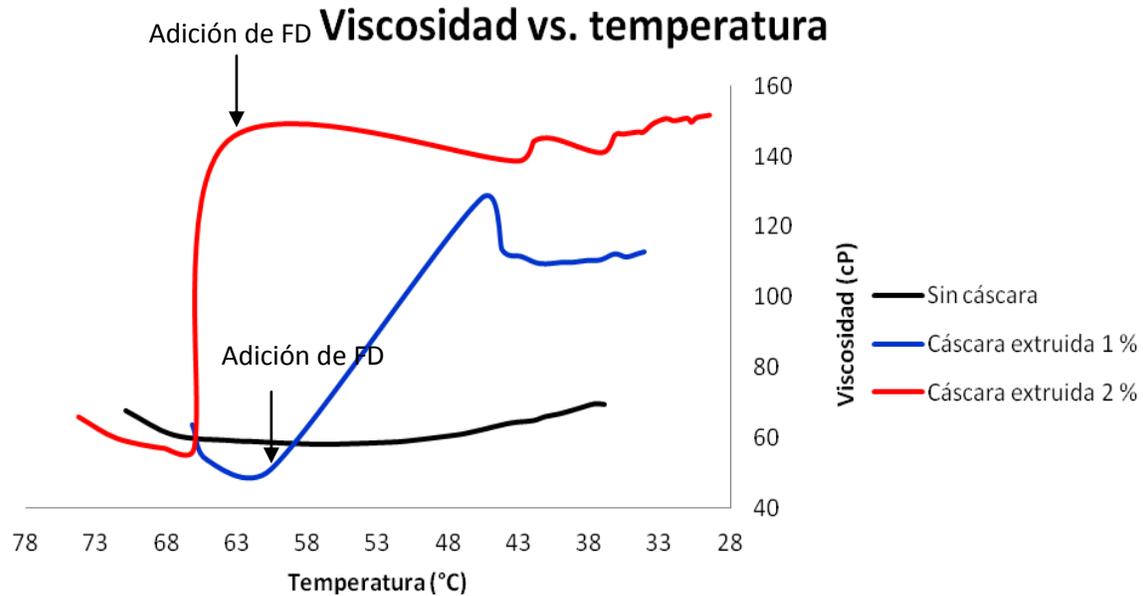


Figura 39. Comportamiento de la viscosidad del atole (sin cáscara, cáscara extruida al 1 % y cáscara extruida al 2 %) con respecto a la temperatura.

6.7.2. Análisis sensorial

Apariencia (Sentido de la vista)

Con respecto a los resultados obtenidos a partir de la encuesta realizada, se generaron tres gráficos (Figura 40, Figura 41 y Figura 42) los cuales muestran el grado de aceptabilidad de la apariencia de las muestras analizadas. A continuación se explica cada una de ellas.

Comparando los tres gráficos, se observa que la muestra con cáscara extruida al 1 % (Figura 41) tuvo una mayor aceptabilidad. El 56 % de las personas que participaron en el análisis sensorial consideraron la muestra agradable y el 25 % como muy agradable. Sin embargo, con respecto a las otras dos muestras también se observó un mayor porcentaje de aceptabilidad de la muestra con cáscara al 2 % (Figura 42), considerándose por los panelistas, en un 39 % como agradable y en un 24 % como muy agradable. Esto nos hace pensar que la adición de la FD al producto generó una mejoría en el color y la apariencia general con respecto a la muestra sin cáscara de tamarindo (Figura 40).

Sabor y resabio (Sentido del gusto)

En la Figura 43 se muestra el gráfico radial obtenido de la evaluación de los tres productos. El parámetro medido fue el sabor generado por los ingredientes. En este gráfico es posible observar el sabor a tamarindo como el principal ingrediente percibido en las tres muestras tal y como se espera de un producto elaborado a base de este fruto. Posteriormente, se observó una mayor percepción de la canela seguida del azúcar para las tres muestras. De manera general es importante que cualquier producto alimenticio cuente con una buena palatabilidad, y esto se logra generando un equilibrio en los sabores traduciéndose en una buena aceptación por parte del consumidor. La Figura 44 muestra los sabores fundamentales percibidos en las tres muestras. El sabor ácido fue el principal parámetro detectado por los panelistas, esto se atribuye directamente a los ácidos orgánicos característicos del tamarindo, como el ácido tartárico que se presenta en mayor proporción seguido del ácido málico y del ácido ascórbico, relacionados directamente con la concentración de iones hidrógeno. Los valores obtenidos en la escala establecida para la evaluación sensorial muestra que la acidez presentó un valor de entre 2.5 y 2.9 considerándose como “Muy perceptible”, mientras que el segundo parámetro más percibido fue el azúcar, cuyo valor osciló entre 1.8 y 2.4 considerándose como “Perceptible”. En esta misma figura es posible observar que para la muestra con extruido al 2 %, existió un incremento en la percepción de los panelistas en los parámetros de acidez, astringencia y amargor, debido a que esta muestra contenía un mayor porcentaje de muestra extruida. Este comportamiento, también fue ligeramente observado en la percepción del resabio.

Se considera como resabio aquel sabor que prevalece después de ingerir un alimento, entre los resabios que puede presentar nuestro producto está el ácido, amargo, astringente y dulce. En la Figura 45, se muestran los resultados obtenidos con respecto a este parámetro. Los resabios detectados por los panelistas, se presentaron en el siguiente orden: ácido, dulce, amargo y astringente; por lo que se observa que siguen prevaleciendo los sabores característicos del tamarindo, sin embargo era de esperarse que también se presentara una gran percepción de la astringencia, debido al contenido de taninos presentes en el fruto, en este caso la cáscara de tamarindo. Sin embargo es sabido que la astringencia es producida principalmente por los taninos hidrolizables y los condensados, debido a su acción precipitante tienden a ser más afines a las proteínas y a las glucoproteínas de la saliva, con lo que se pierde el efecto lubricante o aceitoso de las mismas, generando la sensación de deshidratación en las papilas gustativas (Sancho *et al.*, 2002). A pesar de lo esperado, es bien sabido que para el consumidor en general, la presencia de astringencia llega a ser no muy deseable en un producto final.

Apariencia: sin cáscara

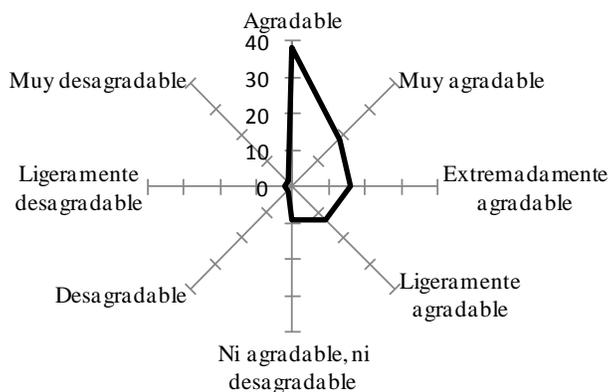


Figura 40. Gráfico radial de la apariencia del atole de tamarindo sin cáscara.

Apariencia: cáscara extruida 1 %

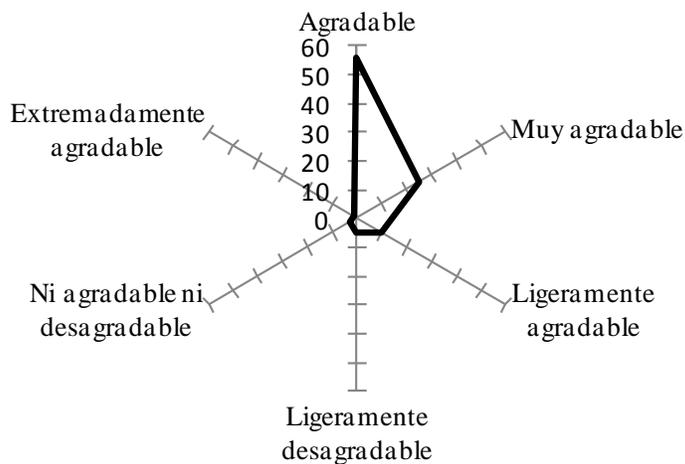


Figura 41. Evaluación sensorial de la apariencia del atole de tamarindo con cáscara al 1 %.

Apariencia: cáscara extruida 2 %

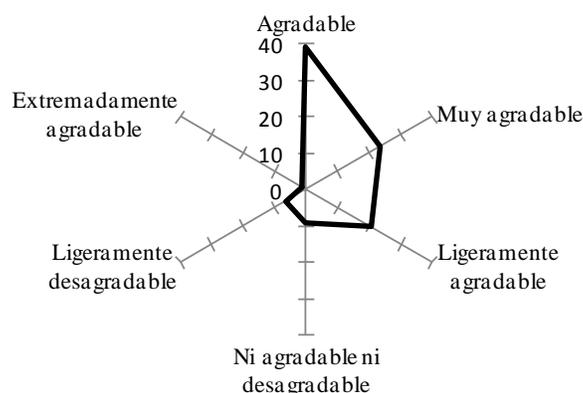


Figura 42. Evaluación sensorial de la apariencia del atole de tamarindo con cáscara al 2 %.

Aroma (Sentido del olfato)

Se sabe que el aroma generado por los alimentos está ampliamente influenciado por las sustancias aromáticas volátiles, principalmente por aquellos grupos funcionales que forman parte de moléculas más grandes presentes en el alimento (Sancho *et al.*, 2002). La Figura 46, representa los resultados obtenidos del Análisis sensorial del parámetro aroma de las tres muestras. Se observa, que los aromas percibidos con mayor intensidad, son el tamarindo, oscilando entre valores de 2.5 y 3, considerándose como “Muy perceptible”, seguido de la canela la cual se consideró como “Ligeramente perceptible - Perceptible”, presentando valores en la escala establecida entre 1.8 y 2.5. Finalmente, el piloncillo se consideró como “Ligeramente perceptible” y la harina como “No perceptible” mostrando valores entre 0.4-0.7. Estos resultados son similares a los obtenidos en el parámetro de sabor generados por los ingredientes de la Formulación III, desarrollada en este trabajo. Esta correlación entre el sabor y el aroma, pone de manifiesto que fisiológicamente existe una relación directa entre los sentidos del gusto y del olfato, teniendo un papel muy importante las partículas olfativas retro nasales tal y como lo mencionan Sancho *et al.* (2002).

Sabor: Ingredientes

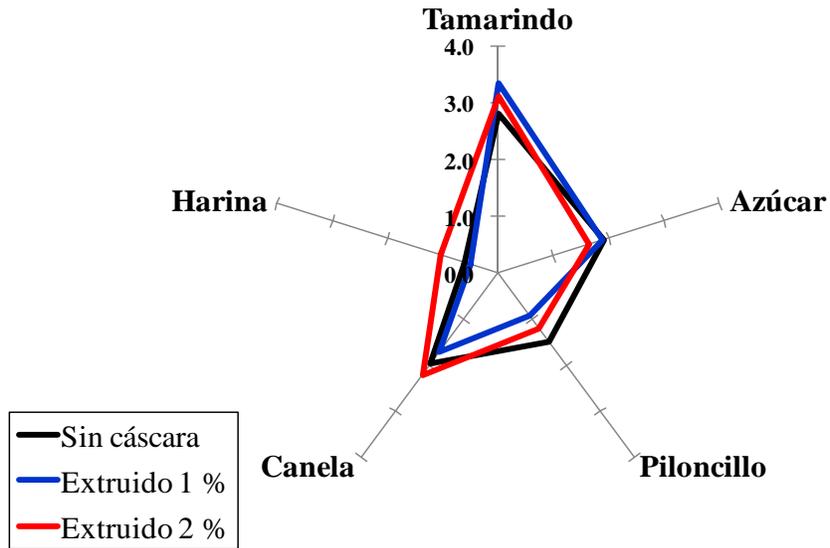


Figura 43. Gráfico radial de comparación entre los sabores generados por los ingredientes.

Sabores fundamentales

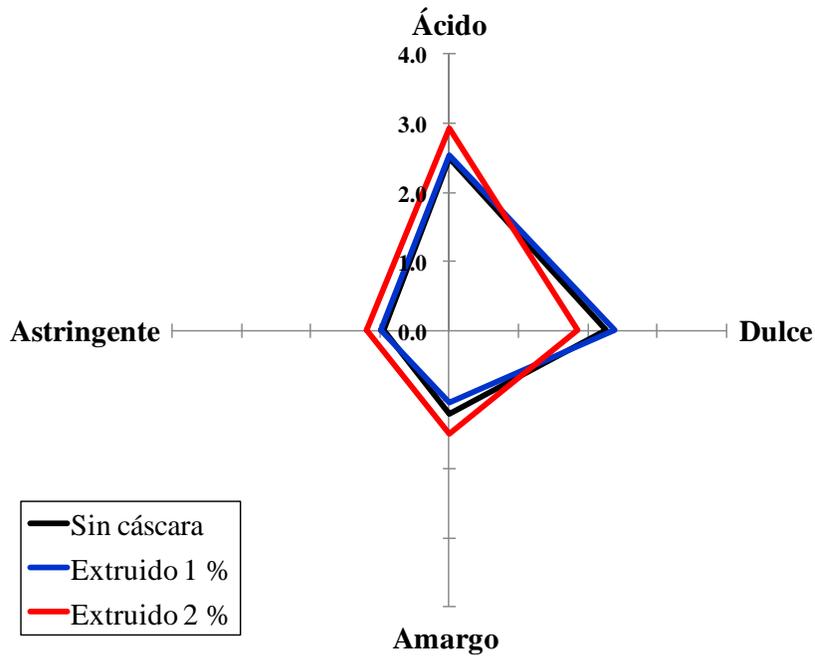


Figura 44. Gráfico radial de comparación entre los sabores fundamentales.

Resabio

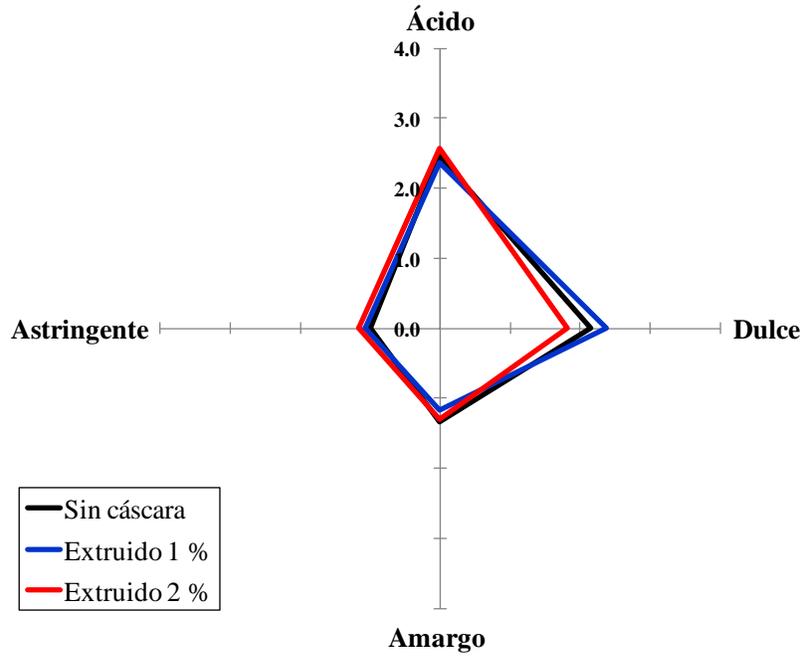


Figura 45. Gráfico radial de comparación del resabio.

Aroma

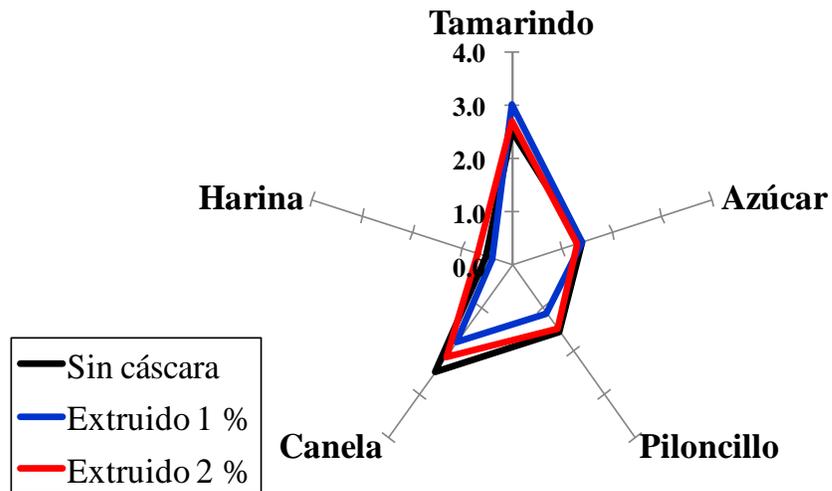


Figura 46. Gráfico radial de comparación del aroma.

Consistencia: Granulosidad

En la Figura 47, se muestra el gráfico radial en el cual se observa la granulosidad de las tres muestras percibida por los panelistas encuestados. En ésta se aprecia que el 34.37 % de las personas detectaron que en la muestra sin cáscara se presentó una nula granulosidad posicionándose en el valor 2 de la escala establecida, que indica “Poco granulada”. En la muestra con cáscara extruida al 1 %, el 21.87 % la consideró también como poco granulosa, sin embargo, como era de esperarse, en la muestra al 2 % los panelistas detectaron la presencia de gránulos, clasificándola como “Moderadamente granulada” y calificándola con un valor de 7, lo cual indica una tendencia a desviarse hacia los valores de la escala considerados como “Muy granulado (8, 9 y 10)”.

Consistencia: granulosidad

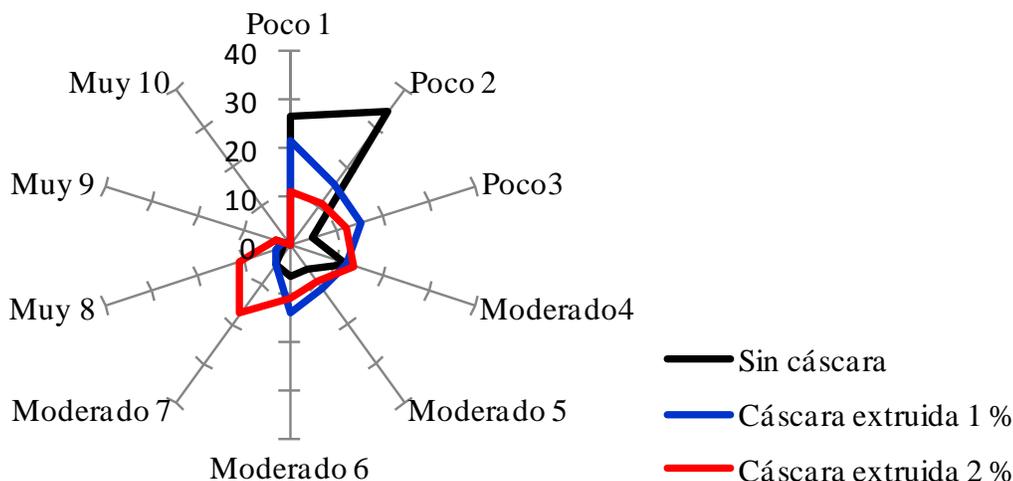


Figura 47. Gráfico radial de comparación de la granulosidad entre las tres muestras.

Viscosidad

De acuerdo con lo representado en la Figura 48, se observa que la percepción de la viscosidad de las muestras, presenta una ligera tendencia a aumentar en la escala establecida, con respecto al incremento en el contenido de FD. El 17.18 % de los panelistas, indicaron que la muestra sin cáscara de tamarindo presentó una “Viscosidad moderada”, posicionándose en el valor 4 de la escala. La muestra con cáscara al 1 %, generó un poco más de viscosidad tal y como se observó en la Figura 38, por lo que el 26.56 % de los panelistas la clasificaron como “Moderadamente viscosa”, perteneciendo al número 5 de la

escala. Finalmente, la muestra con mayor contenido de FD (2 %) presentó un valor de 6, clasificándose también como “Moderadamente viscosa”. Sin embargo, es necesario mencionar que este tipo de sensaciones se consideran como complejas, ya que no corresponden a ningún órgano o sentido concreto; por lo que generalmente la dificultad que ha generado la medición de estas sensaciones, ha llevado al diseño de complejos aparatos experimentales como los texturómetros y los viscosímetros, que permiten estimar objetivamente estas características (Sancho *et al.*, 2002).

Viscosidad

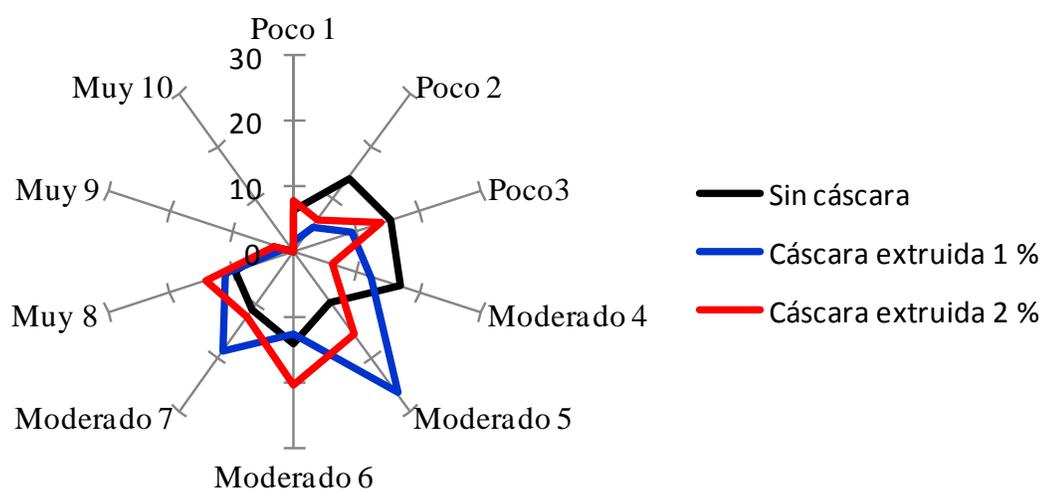


Figura 48. Gráfico radial de comparación de la viscosidad entre las tres muestras.

Por último, además de la importancia que tiene la evaluación de cada uno de los parámetros que caracterizaron a nuestro producto, también se consideró necesario conocer cuál de las muestras preferían los panelistas, ya que es posible, que esta información se extrapole hacia un mercado potencial. De acuerdo con la Figura 49, se observa que el 43.75 % de los panelistas, prefirieron la muestra con cáscara extruida al 1 % y, el 34.37 % la prefirieron sin cáscara, es decir, se observa que el consumidor tiende a aceptar un producto nuevo que presente un equilibrio en sus componentes, caso contrario la muestra con cáscara al 2 %, debido a que la cantidad de cáscara extruida representaba la saturación del producto con FD.

Preferencia

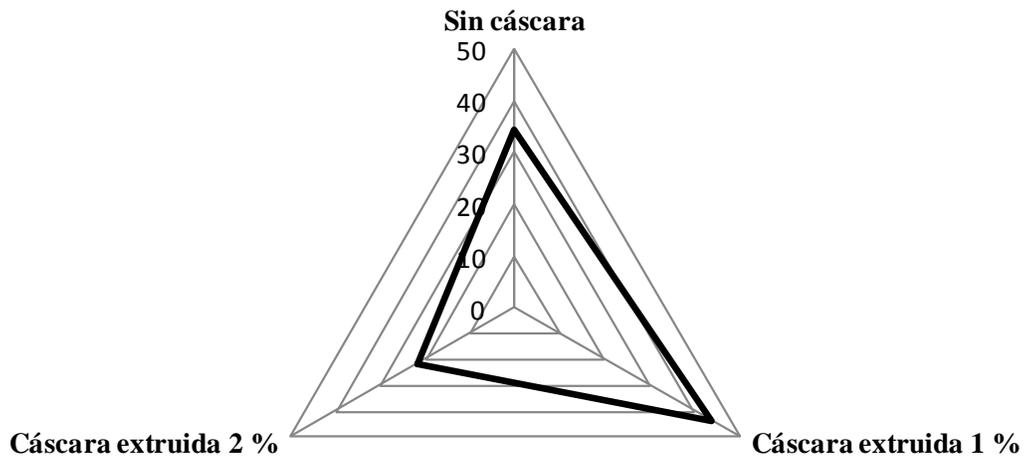


Figura 49. Gráfico radial que muestra la preferencia de los panelistas por las muestra con cáscara extruida al 1 %.

7. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se obtienen las siguientes conclusiones:

1. El proceso de extrusión promovió cambios químicos, fisicoquímicos y estructurales. Incrementó el contenido de FS, en un 138 %. Este aumento posiblemente ayude a mejorar las propiedades de textura, particularmente si se desea incorporarlo a un alimento funcional.
2. El proceso de extrusión afectó de manera diferente a los compuestos bioactivos presentes en el material. Los polifenoles disminuyeron en un 40 % de polifenoles, los flavonoides en un 18 %, mientras que existió un aumento del 140 % en los taninos. Aún cuando hubo una disminución en la cantidad de algunos compuestos bioactivos, su contenido final es similar al de algunos frutos como las bayas. Por lo que es posible considerar y proponer a nuestro producto como una materia prima, fuente aceptable de estos compuestos, tomando en cuenta que se aprovecharía un recurso considerado por muchas industrias alimenticias como un desecho.
3. Las condiciones de humedad y temperatura del proceso de extrusión, no tuvieron una influencia significativa en la CAA y la CAAC, por esta razón estas propiedades presentaron valores similares a la cáscara sin extruir.
4. El análisis de MEB permite concluir que el proceso de extrusión si promueve cambios morfológicos en la cáscara de tamarindo, los cuales se detectaron por medio del análisis de IR, mostrando una disminución en las bandas de transmitancia con respecto a la muestra sin extruir.
5. La modificación en la porción de FS, flavonoides y capacidad antioxidante (DPPH[•]) se debió principalmente a la variable de humedad, mientras que el sinergismo producido por la humedad y la temperatura promovió cambios en compuestos como los polifenoles, los taninos y la capacidad antioxidante (ABTS^{•+}).
6. Se concluye que las mejores condiciones para extruir la cáscara de tamarindo fueron a humedades bajas (32 %) y temperaturas intermedias (100 ° C), ya que a estas condiciones se observó que se mantienen o incrementan los componentes como la FI, FS, polifenoles, flavonoides y capacidad antioxidante (DPPH[•] y ABTS^{•+}). Por lo que dichas propiedades, en esta materia prima, pueden ser exploradas como fuente potencial de antioxidantes, además de brindar características propias de la FD. El material extruido cuenta con un alto contenido de FI, por lo que puede ayudar a promover algunos efectos fisiológicos benéficos al ser humano, típicos de esta fracción de la fibra como son la promoción de los movimientos peristálticos que previenen el estreñimiento, con lo cual permite un menor tiempo de contacto entre las sustancias tóxicas que pudieran estar presentes en las heces con la mucosa intestinal, previniendo de esta forma el cáncer de colon.

7. Las correlaciones entre la hemicelulosa y los polifenoles y los flavonoides ayudan a entender la posible afinidad de estos últimos compuestos para formar complejos con los polisacáridos, al igual que la celulosa con los taninos. Este acomplejamiento también se pudo ver reflejado en el incremento de la FI después del proceso de extrusión.
8. La aplicación del material extruido, obtenido en este trabajo, a un producto alimenticio como fue la elaboración del atole de tamarindo adicionado con 1 % de muestra extruida, mostró una buena aceptación en la evaluación sensorial realizada por los panelistas. Este resultado sugiere que la formulación desarrollada tienen buenas probabilidades de introducción potencial al mercado en un futuro.

8. Perspectivas

Una vez concluido el presente proyecto de investigación y analizados los resultados se recomienda hacer algunos estudios adicionales que se mencionan a continuación:

1. Realizar pruebas biológicas, donde se prueben los efectos obtenidos en los cambios de FS y FI, además de la disposición de los compuestos fenólicos, flavonoides y taninos en la inhibición de sustancias radicalarias como ABTS y DPPH *in vivo*. Además de realizar pruebas para conocer el comportamiento de los taninos obtenidos después del proceso como factor antinutricional.
2. Efectuar el análisis bromatológico al atole de tamarindo elaborado, para conocer su composición química y nutricional.
3. Realizar pruebas de vida de anaquel para un posible lanzamiento al mercado comercial.

9. Bibliografía

- AACC.** 2000. American Association of Cereal Chemists. Approved Methods. 10th edition. Editado por la American Association of Cereal Chemists. Minneapolis, MN, USA.
- AACC.** 2001. American Association of Cereal Chemists. Dietary fiber Technical Committee. The definition of dietary fiber. *Cereal Foods World*, 46:112-126.
- Abd El-Hady, E. A. A., y Habiba, R. A.** 2003. Effect of soaking and extrusion conditions on antinutrients and protein digestibility of legume seeds. *Lebensmittel-Wissenschaft y Technologie*, 36(3): 285-293.
- Abdul-Hamid, A., y Luan, Y. S.** 2000. Functional properties of dietary fiber prepared from defatted rice bran. *Food Chemistry*, 68: 15–19.
- Aceves-Navarro, L. A., Juárez-López, J.F., Palma-López, D. J., López-López, R., Rivera-Hernández, B., Rincón-Ramírez, J. A., Morales-Colorado, R., Hernández - Alvarado, R.** 2008. Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo del tamarindo (*Tamarindus Indica*) en el estado de tabasco. SAGARPA, INIFAP, Tabasco, México. Tomo XVIII. 36 p.
- Acharya, J.; Sahu, J. N., Mohanty, C. R.; Meikap, B. C.** 2009. Removal of lead (II) from wastewater by activated carbon developed from tamarind wood by zinc chloride activation. *Chemical Engineering Journal*, 149: 249-262.
- Adiotomre, J., Eastwood, M. A., Edwards, C. A.Y, Brydon, W.G.** 1990. Dietary fiber: in vitro methods that anticipate nutrition and metabolic activity in human. *American Journal of Clinical Nutrition*, 52: 128-134.
- Aengwanich, W., Suttajit, M., Narkkong, N. A.** 2009. Effects of Polyphenols Extracted from Tamarind (*Tamarindus indica* L.) Seed Coat on Differential White Blood Cell Count in Broilers (*Gallus domesticus*) Exposed to high Enviromental Temperature. *International Journal of Poultry Science*, 8 (10): 957-962.
- Agostini, L. R., Morón, M. J., Ramón, A. N., Ayala, A.** 2004. Determinación de la capacidad antioxidante de flavonoides en frutas y verduras frescas y tratadas térmicamente. *Sociedad Latinoamericana de nutrición*, 54 (1).
- Aguilar-Ávila, D. S.** (2009). Uso de residuos de naranja (*Citrus sinensis*) y tamarindo (*Tamarindus indica*) como biosorbentes en la remoción de plomo, cadmio y zinc de aguas contaminadas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. pp. 40.

- Altan, A.,** McCarthy, K. L., Maskan, M. 2008. Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing. *Journal of Food Engineering*, 84: 231-242.
- Anderson, R. A.,** y Conway, H. F. 1969. Effect of Processing on dietary fibre content of wheat bran, pureed green beans and carrots. *Journal of Food Science*, 45: 1533-1537.
- Anirudhan, T. S.,** Radhakrishnan, P. G., Suchithra, P. S. 2008. Adsorptive Removal of Mercury (II) Ions from Water and Wastewater by Polymerized Tamarind Fruit Shell. *Separation Science and Technology*, 43: 3522-3544.
- Aquino, L. V.,** Rodríguez, J., Méndez, L. L., Torres, K. F. 2009. Inhibición del oscurecimiento con Mucilago de Nopal (*Opuntia ficus indica*) en el secado de Plátano Roatán. *Información tecnológica.*, 20(4):15-20.
- Arroyo, S. Y.,** Carrasco, C. M., Bueno, L. A., Cardaña, C. R., Luí zar, O. C. 2008. Obtención y caracterización fisicoquímica y funcional de las fibras dietéticas del níspero común (*Mesillas germánica*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 74 (4) :269-281.
- AZTI-Tecnalia.** 2007. AGROFIBRA: Desarrollo de ingredientes alimentarios a base de fibra dietética procedentes de residuos agroalimentarios. Sumarita, España. pp.1-16. Consultada en Enero de 2011. http://www.nasdap.ejgv.euskadi.net/r50-3813/es/contenidos/informacion/resultado_07/es_dapa/adjuntos/AGROFIBRA.pdf.
- Badui, D. S.** 2006. Química de los alimentos. 4° ed. Pearson Addison Wesley. México. pp. 92-93.
- Bautista, J. M.,** Gamiño, S. Z., Barboza, C. J. E., Alanís, G. M. G., Martínez, S. G. 2004. Composición química proximal y fibra dietética en desperdicios agroindustriales. V Congreso Regional en Ciencias de los Alimentos. Consultado en Mayo de 2011. <http://www.respyn.uanl.mx/especiales/ee-1-2004/03.htm>
- Beltrán, D.R.** 2011. Caracterización de los efectos biológicos de los polifenoles en la inflamación y el metabolismo: nuevas perspectivas nutricionales. Tesis Doctoral. Departament de Medicina i Cirurgia. Universitat Rovira I Virgili. pp. 20.
- Bhatta, R.,** Krishnamoorthy, U., Mohammed, F. 2001. Effect of tamarind (*Tamarindus indica*) seed husk tannins on in vitro rumen fermentation. *Animal Feed Science and Technology*, 90:143-152.
- Bhattacharya, S.;** Bal, S.; Mukherjee, R. K. 1994. Functional and nutritional properties of tamarind (*Tamarindus indica*) kernel protein. *Food Chemistry*, 49: 1-9.
- Bhattacharya, S.;** Bal, S.; Mukherjee, R. K.; Bhattacharya, S. 1997. Kinetics of tamarind seed hydration. *Journal of Food Engineering*. 33: 129-138.
- Biedrzycka, E.,** Amarowicz, R. 2008. Diet and Health: Apple Polyphenols as Antioxidants. *Food Reviews international*, 24: 235-251.
- Brand-Williams, W.,** Cuvelier, M. E., y Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*, 28(1): 25–30.

- Brennan, C., Brennan, M., Derbyshire, E., Tiwari, B. K.** 2011. Effects of extrusion on the Polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. *Trends in Food Science y Technology*, 22: 570-575.
- Boatella, R. J., Codoni, S. R., López, A. P.** 2004. Química y Bioquímica de los alimentos II. Ediciones Universitat Barcelona. España. pp. 111.
- Bonoli, M., Verardo, V., Marconi, E., y Caboni, M. F.** 2004. Antioxidant phenols in barley (*Hordeum vulgare L.*) flour: Comparative spectrophotometric study among extraction methods of free and bound phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52: 5195 – 5200.
- Bourdon, I., Yokoyama, W., Hudson, C., Backus, R., Richter, D., Knuckles, B. y O Schneeman, B.** 1999. Postprandial lipid, glucose, insulin, and cholecystokinin responses in men fed barley pasta enriched with β – glucan. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 69:55-63.
- Buyinza, M.; Senjonga, M.; Lusiba, B.** 2010. Economic valuation of a tamarind (*Tamarindus indica L.*) production system: Green money from drylands of eastern Uganda. *Small-scale Forestry*, 9: 317-329.
- Camacho-Hernández, I. L., Navarro-Cortez, R. O., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J., Valenzuela, J. A., Gallegos-Infante, J. A.** 2011. Cambios de color y antocianinas en una botana de tercera generación elaborada por extrusión a partir de maíz azul y almidón de maíz. Memorias del Simposium Internacional sobre Tecnologías Convencionales y Alternativas en el Procesamiento de Maíz. Chihuahua, Chihuahua. México. 3-5 de Agosto de 2011. ISBN: 978-607-7691-88-4.
- Canché-Escamilla, G., De los Santos-Hernández, J. M., Andrade-Canto, S., Gómez-Cruz, R.** 2005. Obtención de Celulosa a Partir de los Desechos Agrícolas del Banano. *Information. Technological*, 16 (1): 83 - 88.
- Choi, M. Y., Chai, C., Park, J. H., Lim, J., Lee, J., Kwon, S. W.** 2011. Effects of storage period and heat treatment on phenolics compound composition in dried *Citrus* peels (Chenpi) and discrimination of Chenpi with different storage periods through targeted metabolomic study using HPLC-DAD analysis. *Journal of pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 54: 638-645.
- Colthup, N. B., Daly, L. H., Wiberley, S. E.** 1990. Introduction to infrared and raman spectroscopy. 3ra ed. San Diego: Academic Press Inc. pp. 335–7.
- De Caluwé, E.; Halamová, K.; Van Damme, P.** 2010. *Tamarindus indica L.* – A review of traditional uses, phytochemistry and pharmacology. *Africa focus*, 23 (1): 53-83.
- Delgado-Licon, E., Martínez, A. A. L., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J-A., Atienzo-Lazos, M., Drzewiecki, J, Martínez-Sánchez, C. E., Goristein, S.** (2009). Influence of extrusion on the bioactive compounds and the oxidant capacity of the

- bean/corn mixtures. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(6): 522-532.
- Dhasade, V. V.**; Nirmal, S. A.; Dighe, N. S.; Pattan, S. R. 2009. An overview of *Tamarindus indica* Linn.: chemistry and pharmacological profile. *Pharmacologyonline*, 3: 809-820.
- Doughari, J. H.** 2006. Antimicrobial activity of *Tamarindus indica* Linn. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 5 (2): 597-603.
- Drago, S. M. E.**, López, L. M., Saínez, E. T. 2006. Componentes bioactivos de alimentos funcionales de origen vegetal. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 37 (4): 58-68.
- Duke, J. A.** 1981. Handbook of Legumes of World Economic Importance, p.p 228-230. Plenum Press, New York.
- Escudero-Álvarez, E.**, González-Sánchez, P. 2006. La fibra dietética. *Nutrición Hospitalaria*, 21(2): 61-72.
- El-Siddig, K.**; Gunasena, H. P. M.; Prasad, B. A.; Pushpakumara, D. K. N. G.; Ramana, K. Y. R.; Vijayanand, P.; Williams, J. T. 2006. Tamarind *Tamarindus indica* L. fruits for the future 1, pp 11, 29, 31. En J.T. Williams, R.W. Smith, N. Haq, Z. Dunsiger (ed.) International Centre for Underutilised Crops, W. Sussex, England.
- Elleuch, M.**, Bedigian, D., Roiseux, O., Besbes, S., Blecker, C. 2011. Dietary fibre and fibre-rich by products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: a review. *Food Chemistry*, 124: 411-421.
- Fang, Z.**, Wu, D., Yu, D., Ye, X., Liu, D., Chen, J. 2011. Phenolic compounds in Chinese purple yam and changes during vacuum fryin. *Food Chemistry*. 128: 943-948.
- Fellows, P.** 2007. Tecnología del procesado de los alimentos: Principios y práctica. Editorial Acribia. Zaragoza, España. pp. 355.
- Figuerola, F.**, Muñoz, O., Estévez, A. M. 2008. La linaza como fuente de compuestos bioactivos para la elaboración de alimentos. *Agro sur*. 36 (2): 49-58.
- Fuentes-Alventosa, J. M.**, Rodríguez-Gutiérrez, G., Jaramillo-Carmona, S., Espejo-Calvo, R., Rodríguez-Arcos, R., Fernández-Bolaños, J., Guillén-Bejarano, R., Jimenez-Araujo, A. 2009. Effect of extraction method on Chemical composition and functional characteristics of High Dietary fibre powders obtained from asparagus by-products. *Food Chemistry*, 13: 665-671.
- Galicia-García, T.**, Martínez-Bustos, F., Jimenez-Arévalo, O., Martínez, A.B., Ibarra-Gómez, R., Gaytán-Martínez, M., Mendoza-Duarte, M. 2001. Thermal and microstructural characterization of biodegradable films prepared by extrusión-calendaring process. *Carbohydrate Polymers*, 83: 345-361.
- García, M.L.** 2009. Contenido total de taninos condensados en las variedades Pinto Zapata, Azufrado Higuera, Negro 8025 y Bayo Madero de frijol común (*Phaseolus Vulgaris* L.) cocidas por calentamiento óhmico. Tesis para obtener el grado de Maestra.

- Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Unidad Querétaro. pp. 8 y 9.
- García-Alonso, M., Pascual-Teresa, S., Santos-Buelga, C., Rivas-Gonzalo, J.C.** 2004. Evaluation of the antioxidant properties of fruits. *Food Chemistry*. 84:13-18.
- García-Méndez, S., Martínez-Flores, H. E., Morales-Sánchez, E.** 2011. Effect of extrusion parameter on some Properties of Dietary fiber from lemon (*Citrus aurantifolia* Swingle) residues. *African Journal of Biotechnology*, 10 (73): 16589-16593.
- García-Obregón, O. P.** 2002. Fibra en general. En enciclopedia de la fibra. Kellogg de México, México. pp. 3-17.
- Ghosh, S.; Sen, G.; Jha, U.; Pal, S.** 2010. Novel biodegradable polymeric flocculant based on polyacrylamide-grafted tamarind kernel polysaccharide. *Bioresource Technology*, 101: 9638–9644.
- González, C. F. M. A.** 2009. Determinación de la estabilidad de mezclas de almidón de maíz y concentrado de proteína de suero modificado por extrusión a través del cálculo de las isothermas de sorción y desarrollo de un análogo de queso tipo asadero utilizando una de estas mezclas. Tesis para obtener el título de Químico en Alimentos. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Química. Querétaro, Querétaro. p. p. 16-20.
- González-González, L. R., García, M. I., Pérez, B. R., Gutiérrez, P. K. L., García, C. A.** 2007. Obtención de azúcares fermentables a partir de inulinasas inmovilizadas por el método de sol-gel. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria*. 6: 106-111.
- Goñi, I., Díaz-Rubio, M. E., Pérez-Jiménez, J., Saura-Calxto, F.** 2009. Towards an updated methodology for measurement of Dietary fiber, including associated Polyphenols, in Food and beverages. *Food Research International*, 42: 840-846.
- Gourgue, C., Champ, M., Guillon, F., & Delort-Laval, J.** 1994. Effect of extrusion-cooking on the hypoglycemic properties of citrus fiber: An in vitro study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 64, 493–499. doi:10.1002/jsfa.2740640416.
- Gray, J.** 2006. Dietary Fibre: Definition, Analysis, Physiology y Health. ILSY Europe Concise Monograph Series. Brucellas, Belgica. p. p. 1- 44.
- Grigelmo-Miguel, N., Martina-Belloso, O.** 1999. Comparison of dietary fibre from by-products of processing fruits and greens and from cereals. *LWT Food Science and Technology*, 32: 503-508.
- Gualberto, D. G., Bergman, C. J., Kazemzadeh, M., Weber, C. W.** 1997. Effect of extrusión processing on the soluble and insoluble fiber, and phytic acid contents of cereal brans. *Plants Foods for Human Nutritio*, 51:187-198.
- Gumul, D., & Korus, J.** 2006. Polyphenol content and antioxidant activity of rye bran extrudates produced at varying parameters of extrusion process. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 9 (4).
- Gunasena, H. P. M.; Pushpakumara, D. K. N. G.** 2006. Chapter 12: Tamarind *Tamarindus indica* L., pp. 352-387. En J.T. Williams, R.W. Smith, Z. Dunsiger (eds.) Tamarind:

- Tamarindus Indica. Southampton Centre for Underutilized Crops, Southampton, UK.
- Havinga, R. M.;** Hart, A., Putscher, J.; Prehler, S.; Buchmann, C. 2010. *Tamarindus indica* L. (Fabaceae): Patterns of use in traditional African medicine. *Journal of Ethnopharmacology*, 127: 573-588.
- Hernández-Estrada, A.** y González-Palomares, S. 2010. Galletas de tamarindo (*Tamarindus indica* L.). *U. Tecnociencia* 4 (1): 16 - 22.
- Hoagland, M. L.** 1969. Food Chemistry. Reinhold Publishing Corporation. New York, E.U.A. p. p. 219-225.
- Huang, Y. C.,** Chang, Y. H., y Shao, Y. Y. 2006. Effects of genotype and treatment on the antioxidant activity of sweet potato in Taiwan. *Food Chemistry*. 98:529-538.
- Hutchings, B. J.** 1999. Food color and appearance. Second Edition. Ed. Aspen Publishers. USA p. p.610.
- Ilo, S.,** y Berghofer, E. 1999. Kinetics of colour changes during extrusion cooking of maize gritz. *Journal of Food Engineering*, 39: 73–80.
- Iftekhar, A. S. M.;** Rayhan, M. I.; Quadir, M. A.; Akhteruzzaman, S.; Hasnat, A. 2006. Effect of *Tamarindus indica* fruits on blood pressure and lipid-profile in human model.: an in vivo approach. *Pakistan journal of pharmaceutical sciences*, 19 (2): 125-129.
- Im, J. S.,** Huff, H. E., y Hsieh, F. H. 2003. Effects of precesing conditions on the physical and chemical properties of buckwheat grit cakes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51: 659-666.
- Isaza, M. J. H.** 2007. Taninos o Polifenoles vegetales. *Scientia et Technica*. 33: 13-18.
- Jadhav, D. Y.;** Sahoo, A. K.; Ghosh, J. S.; Ranveer, R. C.; Mali, A. M. 2010. Phytochemical detection and *in vitro* evaluation of tamarind fruit pulp for potential antimicrobial activity. *International Journal of Tropical Medicine*, 5 (3): 68-72.
- Jae-Kwan, H.,** Jung-Sun, C., Chul-Jin, K., Chong-Tai, K. 1998. Solubilization of apple pomace by extrusion. *Journal of Food Processing Preservation*, 22: 477-491.
- Jenkins, D. J. A.,** Wolever, T. M., Leeds, A. R., Gassull, M. A., Haisman, P., Dilawari, J. Goff, D., Metz, G. L., Alberti, K. G.M.M. 1978. Dietary fibre, fibre analogues, and glucose tolerance: importance of viscosity. *British Medical Journal*, 1: 1392-1394.
- Jenkins, D. J. A.** 1986. Slow release carbohydrate: mechanism of action of viscous fiber. *Journal of Clinical Nutrition and Gastroenterology*, 1:237-241.
- Jongarootaprangsee, S.,** Tritrong, W., Chokanaporn, W. 2007. Effects of drying temperature and particle size on hydration properties of dietary fiber powder from lime and cabbage by-products. *International Journal of Food Properties*, 10 (4): 887-897.
- Justo, T. O.,** Pérez, W. 2006. Tecnología de extrusión de alimentos. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 16(3): 78-86.
- Kaplan, L. A.** 1984. Glucose. Clin Chem The C.V. Mosby Co. St. Louis. Toronto. Princeton. 1032-1036.

- Khalid**, S.; Mossadeq, W. M. S.; Israf, D.A.; Hashim, P.; Rejab, S.; Shaberi, A. M.; Mohamad, A.S.; Zakaria, Z.A.; Sulaiman, M.R. 2010. *In vivo* analgesic effect of aqueous extract of *Tamarindus indica* L. Fruits. *Medical Principles and Practice*, 19: 255–259.
- Khandelwal**, S., Audipi, S. A., Ghugre, P. 2010. Polyphenols and tannins in Indian pulses: effect of soaking, germination and pressure cooking. *Food Research International*, 43: 526-530.
- Komutarina**, T.; Azadib, S.; Butterworthb, L.; Keilb, D.; Chitsomboona, B.; Suttajitc, M.; Meadeb, B.J. 2004. Extract of the seed coat of *Tamarindus indica* inhibits nitric oxide production by murine macrophages in vitro and in vivo. *Food and Chemical Toxicology*, 42: 649–658.
- Korus**, J., Gumul, D., y Czechowska, K. 2007. Effect of extrusion on the phenolic composition and antioxidant activity of dry beans of *Phaseolus vulgaris* I. *Food Technology and Biotechnology*, 45 (2): 139-146.
- Kumar**, C. S., Bhattacharya, S. 2008. Tamarind seed: properties, processing and utilization. *Food Science and Nutrition*, 48: 1-20.
- Larrea**, M. A., Chang, Y. K., Martínez-Bustos, F. 2005. Effect of some operational extrusion parameters on the constituents of orange pulp. *Food Chemistry*, 89: 301-308.
- Larrea**, M. A., Chang, Y. K., Martínez-Bustos, F. 2010. The effect of extruded orange pulp on Enzymatic Hydrolysis of starch and Glucose Retardation Index. *Food Bioprocess Technology*, 3: 684-692.
- Leighton**, F., Urquiaga, I., Diez, M. S. 1997. Propiedades antioxidantes del vino y sus componentes. Memorias del XXII Congreso Mundial de la Vid y del Vino. Buenos Aires. Argentina. pp. 1-29.
- Lewis**, Y. S.; Neelakantan, S. 1964. The Chemistry, biochemistry, and technology of tamarind. *Journal of Scientific y Industrial Research*, 23: 204-206.
- López**, H. L. H. 2010. Efecto de la incorporación de extracto de tamarindo (*Tamarindus indica*) con actividad antioxidante en la elaboración y funcionalidad de películas biodegradables proteína-almidón. Tesis para obtener el grado de Maestro en Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. México D.F. pp. 55.
- López-Perea**, P. 2007. Efectos de microondas e infrarrojo en la calidad maltera de cebada (*Hordeum vulgare* L.). Tesis de Maestría. Facultad de Química. Universidad Autónoma de Querétaro. pp.16.
- Luengthanaphol**, S., Mongkholkhajornsilp, D., Douglas, S., Douglas, P. L., Pengsopa, L., Pongamphai, S. 2004. Extraction of antioxidants from sweet Thai tamarind seed coat-preliminary experiments. *Journal of Food Engineering*, 63: 247-252.
- Macheix**, J. J. Fleuriet, A., Billot, J. 1990. Fruit Phenolics. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Madrigal**, L., Sangronis, E. 2007. La inulina y derivados como ingredientes claves en alimentos funcionales. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 57 (4): 387-396.

- Maheswari**, C. U., Guduri, B. R., Rajulu, A. V. 2008. Properties of lignocellulose Tamarind Fruit Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 110: 1986-1989.
- Mahungu**, S. M., Diaz-Mercado, S., Li, J., Schwenk, M., Singletary, K., y Faller, J. 1999. Stability of isoflavones during extraction processing of soy/corn mixture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47: 279-284.
- Martín-Rangel**, V. M., Cortés-Martínez, R., Alfaro, C. V. R., Garnica-Romo, M. G., Martínez-Flores, H. E. 2011. Biosorption in an Aqueous Solution Using Chemically Treated Lemon (*Citrus aurantifolia* Swingle) Residues. *Journal of Food Science*, 1-5.
- Martinello**, F., Soares, S. M., Franco, J. J., Santos, A. C., Sugora, A., Garcia, S. B., Curti, C., Uyemura, S. A. 2006. Hypolipemic and antioxidant activities from *Tamarindus indica* L. pulp fruit extract in hypercholesterolemic hamsters. *Food and Chemical Toxicology*, 44: 810-818.
- Martínez**, V. J. B. 2007. Evaluación de la actividad antioxidante de extractos orgánicos de semillas de *Heliocharpus terebinthinaceus*. Tesis para obtener el título de ingeniero en alimentos. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapán de León, Oaxaca. p. p.4-7.
- Martínez-Flórez**, S., González-Gallego, J., Culebras, J. M., Tuñón, M^a. J. 2002. Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes. *Nutrición Hospitalaria*, 17 (6): 271-278.
- Martínez- Flores**, H. E., y Figueroa, J. D. C. 2008. La fibra dietética y su importancia en la salud. Temas selectos en alimentos, nutrición y salud. Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. p. p. 18.
- Martínez-Flores**, H. E., Maya-Cortés, D. C., Figueroa-Cárdenas, J. D., Garnica-Romo, M. G., Ponce-Saavedra, J. 2009. Chemical composition and physicochemical Properties of shiitake mushroom and high fiber products. *CyTA-Journal of Food*, 7 (1): 6-14.
- Matos-Chamorro**, A., Chambilla-Mamani, E. 2010. Importancia de la Fibra Dietética, sus Propiedades Funcionales en la Alimentación Humana y en la Industria Alimentaria. *Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología*, 1 (1): 4-17.
- Menon**, V.; Prakash, G.; Rao, M. 2010. Enzymatic hydrolysis and ethanol production using xyloglucanase and *Debaromyces hansenii* from tamarind kernel powder: Galactoxyloglucan predominant hemicelluloses. *Journal of Biotechnology* 148: 233–239.
- Mishra**, A.; Bajpai, M. 2006. The flocculation performance of *Tamarindus* mucilage in relation to removal of vat and direct dyes. *Bioresource Technology*, 97: 1055-1059.
- Molina**, M., Paz, M. 2007. La Fibra Dietética Procesada como Alimento Funcional. Escuela Andaluza de Salud Pública. Consejería de Salud. Junta de Andalucía. Granada. Csic. Estación experimental del Zaidón. Granada. p. p. 70-77.
- Mora-Bedolla**, M. T., Martínez-Flores, H. E., Arévalo – León, L. E. 2010. Establecimiento de las propiedades físico-químicas de la fibra dietética medidas *in vitro* que

permitan predecir su posible comportamiento fisiológico *in vivo*. Tesis de Licenciatura de la Facultad de Químico Farmacobiología, UMSNH. pp. 24, 30, 31 y 42.

- Mora-Rochin**, S., Gutiérrez-Urbe, J., Serna-Saldivar, O., Sánchez-Peña, P., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J. 2010. Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization or extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 52: 502-508.
- Moreno**, R. R. 2000. Nutrición y dietética para tecnólogos de alimentos. Editorial Díaz de Santos. Madrid, España. p. p. 42.
- Nayak**, B., Liu, R. H., De J Berrios, J., Tang, J., Derito, C. 2011. Bioactive of Antioxidants in Extruded Products Prepares from Potato and Dry Pea Flours. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59: 8233-8243.
- Neira**, G. A. M. 2009. Aislamiento e identificación de los compuestos con actividad antioxidante del extracto de cloroformo de la orquídea comestible *Prosthechea michuacana*. Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias en alimentos. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas Sección de Estudios de Posgrado e Investigación departamento de graduados e Investigación en Alimentos. Instituto Politécnico Nacional. México D.F. pp.74 y 75.
- Nelson**, A. L. 2001. High-Fiber Ingredients. Editado por American Association of Cereal Chemists, Minneapolis, MN, USA, pp. 3.
- Ning**, L., Villota, R., Artz, W. E. 1991. Modification of Corn Fiber Through Chemical Treatments in Combination with Twin-Screw Extrusion. *American Association of Cereal Chemists*, 68 (6): 632-636.
- Nwodo**, U. U.; Ngene, A. A.; Iroegbu, C. U.; Obiiyeke G. C 2010. Effects of fractionation on antibacterial activity of crude extracts of *Tamarindus indica*. *African Journal of Biotechnology*, 9 (42): 7108-7113.
- Nyadoi**, P., Jamnadass, R., Okori, P., Okullo, J. B. L., Obua, J., Magogo, N., Haji, S., Pushpakumara, D. K. N. G., Roshetko, J., Kalinganire, A., Muchugi, A., Temu, A. B., Fluch, S., Burg, K. 2010. *Tamarindus indica* Tropical Populations Genetic Structure. 37: 152-166.
- Oomah**, B. D., Cardador-Martínez, A., & Loarca-Piña, G. 2005. Phenolics and antioxidative activities in common beans (*Phaseolus vulgaris* L). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85 (6): 935-942.
- Orozco-Santos**, M. 2006. Cenicilla (*Oidium sp.*) del tamarindo (*Tamarindus Indica L.*): Un problema recurrente y su manejo integrado en el trópico seco de México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 24(202):152-155.
- Ou**, S., Kwok, K., Li, Y., Fu, L. 2001. In Vitro Study of Possible Role of Dietary fiber in lowering postprandial serum glucose. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 49: 1026–1029.

- Parrotta, J. A.** 1990. *Tamarindus indica* L. Tamarind. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. pp. 519- 523.
- Paladino, S. C., Zuritz, C. A.** (s.f.). Actividad antioxidante de los compuestos fenólicos contenidos en las semillas de la vid (*Vitis vinífera* L.). Tesis para obtener el grado de Maestro del Posgrado Regional Cooperativo en Alimentos. Universidades Nacionales de Cuyo, La Rioja, San Juan y San Luis. Sede Mendoza: Facultad de Ciencias Agrarias – UNCuyo. pp. 12-14.
- Panigrahi, S., Bland, B., Carlaw, P. M.** 1989. The Nutritive Value of Tamarind Seed for Broiler Chicks. *Animal Feed Science and Technology*, 22: 285-293.
- Pedrero, D. L., Pangborn, R. M.** 1997. Evaluación Sensorial de los Alimentos: Métodos Analíticos. 2 reimposición. Editorial Alhambra Mexicana. México, D.F. pp.15 y 16.
- Pew Initiative on Food and Biotechnology.** 2007. Application of Biotechnology for Functional Foods. pp. 1-78.
- Poommarinvarakul, S.; Tattiyakul, J.; Muangnapoh, C.** 2010. Isolation and rheological properties of tamarind seed polysaccharide from tamarind kernel powder using protease enzyme and high-intensity ultrasound. *Journal of Food Science*, 75 (5): E253-E260.
- Prosky, L., Asp, N. G., Scheweizer, T., Furda, I., Devries, J. W.** 1998. Determination of Insoluble, Soluble, and Total Dietary Fiber in Food and Products: Interlaboratory study. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 71: 1018-23.
- Raghavendra, S., Ramachandra, S., Rastogi, N., Raghavarao, K., Kumar, S., Tharanathan.** 2006. Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber. *Journal of Food Engineering*, 72: 281-286.
- Razali, N., Mat-Junit, S., Abdul-Muthalib, A. F., Abdul-Aziz, S. A.** 2012. Effects of various solvents on the extraction of antioxidant from the leaves, seeds, veins and skins of *Tamarindus indica*. *Food Chemistry*, 131: 441- 448.
- Re, R. Pellegrinni, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., y Rie-Evans, C.** 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26: 1231-1237.
- Repo-Carrasco-Valencia, R., Pena, J., Kallio, H., y Salminen, S.** 2009. Dietary fiber and other functional components in two varieties of crude extruded kiwicha (*Amarantus caudatus*). *Journal of Cereal Science*, 49 (2): 219-224.
- Reyes, C. J.** 2008. Antioxidantes en los alimentos y sus efectos en la salud. En: Martínez, F.H.E. (Ed.). *Temas selectos en alimentos, nutrición y salud*. Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. pp. 108-110.
- Reyes, C. J.** 2008. Antioxidantes en los alimentos y su efecto en la salud. Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. pp. 105.
- Riedl, K. M., & Hagerman, A. E.** 2001. Tannin-protein complexes as radical scavengers and radical sinks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49 (10): 4917-4923.

- Rincón**, A. M., Vásquez, A. M., Padilla, F. C. 2005. Composición química y compuestos bioactivos de las harinas de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*), mandarina (*Citrus reticulata*) y toronja (*Citrus paradisi*) cultivadas en Venezuela. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 55(3).
- Robertson**, J. A., Eastwood, M. A. 1981. An investigation of the experimental condition which could affect water holding capacity of dietary fiber. *Journal of Food Science and Agriculture*, 32: 819-825.
- Rocha-Guzmán**, N. E., Gallegos-Infante, J. A., González-Laredo, R. F. Bello-Pérez, A., Delgado-Licon, E., Ochoa-Martínez, A., Prado-Ortiz, M. J. 2008. Physical Properties of Extruded Products from Mexican Common Beans (*Phaseolus Vulgaris* L.). *Plant Foods and Human Nutrition*, DOI 10.1007/s11130-008-0076. 63:99-104.
- Romero-Lara**, C. E. 2000. Efecto del pastoreo con ovinos sobre la concentración de taninos condensados en *Gliricida sepium* (Jacq) Walp en el trópico seco. Tesis para obtener grado de maestría. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia posgrado Interinstitucional en ciencias pecuarias. Colima, Colima.
- Rosell**, C. M., Santos, E., Collar, C. 2009. Physico chemical properties of commercial fibres from different sources: A comparative approach. *Food Research International*, 42: 176-184.
- Runkel**, R. O. H., Wilke, K. D. 1951. Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. *Holz Roh Werkstoff*. 9: 260-270.
- Sadik**, H. A. 2010. The nutritional value of “Poha Beer” (tamarind fruit drink) and its Social Usage in Tamale Metropolis. *Pakistan Journal of Nutrition*, 9 (8): 797-805.
- Sahoo**, R.; Sahoo; S., Nayak, P. L. 2010. Release behavior of anticancer drug paclitaxel from tamarind seed polysaccharide galactoxyloglucan. *European Journal of Scientific Research*, 47 (2): 197-206.
- Saideswara-Rao**, Y. and Mary Mathew, K. 2001. *Tamarind*. In: Peter, K.V. (ed.) Handbook of Herbs and Spices. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, pp. 287-296.
- Sánchez**, B. 2005. Caracterización Fisicoquímica y funcional de la fibra Dietética del Fruto del Níspero y de Cáscara de Mango Obo. [Tesis para obtener el grado de Ingeniero en Alimentos]. Huajuapán de León. México. Universidad Tecnológica de la Mixteca. pp.76.
- Sanchez**, G. I. 2007. Propiedades fisicoquímicas de almidones catiónicos elaborados por extrusión. Tesis para obtener el grado de Maestro en Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. México D.F. pp. 8-11.
- Sancho**, J., Bota, E., de Castro, J. J. 2002. Introducción al Análisis sensorial de los alimentos. 1ª edición. México, D.F. Alfaomega ed. pp. 43, 102-103, 119-120, 142-145.

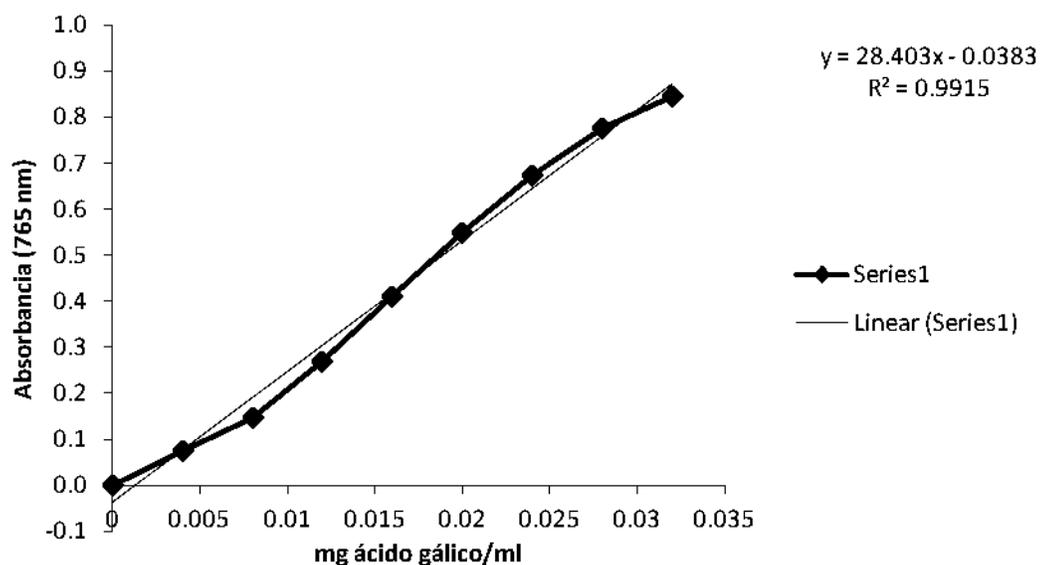
- Sangnark, A.**, y Noomhorm, A. 2003. Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse. *Food Chemistry*, 80: 221–229.
- Secretaría de Salud.** 2007. Por un México sano: construyendo alianzas para una mejor salud. *Programa Nacional de Salud, 2007-2012*. p. p.1-75.
- Segura-Ledesma, S.**, Zavala-Robles, D., Equihua-Cervantes, C., Andrés-Agustín, J., Yopez-Torres, E. 2009. Los recursos genéticos en Michoacán. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 15(3): 293-305.
- Sharma, H. R.**, Chauhan, G. S., Agrawal, K. 2004. Physico-Chemical Characteristics of Rice Bran Processed by Dry Heating and Extrusion Cooking. *International Journal of Food Properties*, 7(3): 603-614.
- Sharma, P.**, Singh, G. H., Singh, B. 2011. Antioxidant activity of barley as affected by extrusion. *Food Chemistry*, Doi: 10.1016/j.foodchem. 2011.10.009.
- Shih, M. C.**, Kuo, C. C., y Chiang, W. 2009. Effects of drying and extrusion on colour, chemical composition, antioxidant activities and mitogenic response of spleen lymphocytes of sweet potatoes. *Food Chemistry*, 117(1): 114-121.
- Singh, S.**, Gamlath, S., Wakeling, L. 2007. Nutricional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology*. 42: 916-929.
- Singleton, V. L.**, and Rossi, J. A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16: 144-158.
- Sivam, A. S.**, Sun-Waterhouse, D., Perera, C. O., Waterhouse, G. I. N. 2011. Application of FT-IR and Raman spectroscopy for the study of biopolymers in breads fortified with fibre and Polyphenols. *Food Research International*, doi:10.1016/j.foodres.2011.03.039.
- Sivasankar, V.**, Rajkumar, S., Muruges, S., Darchen, A. 2012. Tamarind (*Tamarindus indica*) fruit Shell carbon: A calcium-rich promising adsorbent for fluoride removal from groundwater. *Journal of Hazardous Materials*, 225-226:164-172.
- Skupien, K.**, Oszmianski, J., Kostrzewa-Nowak, D., & Tarasiuk, J. 2006. In vitro antileukaemic activity of extracts from berry plant leaves against sensitive and multidrug resistant HL60 cells. *Cancer Lett*, 236(2): 282-291.
- Socarrás, S. M. M.**, Bolet, A. M., Licea, P. M. 2002. Diabetes Mellitus: Tratamiento dietético. *Revista Cubana de Investigación Biomédica*, 21 (2): 102-108.
- Solomons, T.W.G.** 1999. Fundamentos de Química Orgánica. 2da. Edición. Editorial LIMUSA. México, D.F. pp. 694-703.
- Soong, Y.**, Barlow, P. J. 2004. Antioxidant activity and phenolics content of selected fruit seeds. *Food Chemistry*, 88: 411-417.
- Sosa-Aguirre, C. R.**, y Campos-García, J. 2008. Introducción a los prebióticos y sus perspectivas de industrialización en México. Temas selectos en alimentos, nutrición y salud. Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. pp. 39.

- Stangeland, T., Remberg, S. F., Lye, K. A.** 2007. Antioxidants in some Ugandan fruits. *African Journal of Ecology*, 45 (3): 29-30.
- Stangeland, T., Remberg, S. F., Lye, K. A.** 2009. Total antioxidant activity in 35 Ugandan fruits and vegetables. *Food Chemistry*, 113: 85-91.
- Stojceska, V., Ainsworth, P., Plunkett, A., Ibanoglu, E., y Ibanoglu, S.** 2008. Cauliflower by-products as a new source of dietary fibre, antioxidants and proteins in cereal based ready-to-eat expanded *Journal of Food Engineering*, 87(4): 554-563.
- Stojceska, V., Ainsworth, P., Plunkett, A., Ibanoglu, S.** 2010. The advantage of using extrusion for increasing dietary fibre level in gluten-free products. *Food Chemistry*, 121: 156-164.
- Sudjaroen, Y.; Haubner, R.; Würtele, G.; Hull, W.E.; Erben, G.; Spiegelhalder, B.; Changbumrung, S.; Bartsch, H.; Owen, R.W.** 2005. Isolation and structure elucidation of phenolics antioxidants from tamarind (*Tamarind indica* L.) seeds and pericarp. *Food and Chemical Toxicology*, 43: 1673-1682.
- Suksomtip, M., Pongsamart, S.** 2008. Protective effect against oxidation of human low-density lipoprotein and plasmid DNA strand scission of Tamarind seed coat extract in vitro. *Food Science and Technology*, 41:2002-2007.
- Sun, D.** 2008. Infrared Spectroscopy for Food Quality Analysis and Control. ELSEVIER. pp.124-136.
- Tamayo, Y., Bermúdez, A.** 1998. Los residuos vegetales del jugo de naranja como fuente de fibra dietética. En *termas de Tecnología de Alimentos*. Vol. 2. Fibra Dietética. Editado por Lajolo M. y Wenzel E. CYTED. Instituto Politécnico Nacional, México. pp.181-189.
- Tenorio, L. F. A., del Valle, M. L., Pastelín, H. G.** 2006. Los flavonoides y el sistema cardiovascular: Pueden ser una alternativa terapéutica? *Archivos de cardiología de México*. 76 (4): 33-45.
- Thapoiing, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Cisneros-Ceballos, L., Hwkins, B. D.** 2006. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19: 669-675.
- The Wealth of India.** 1976. Raw Materials, pp 114-122. CSIR, India, New Delhi.
- Trinder, P.** 1969. *Annals of Clinical Biochemistry*. 6: 24-33.
- Tsuda, T; Watanabe, M; Ohshima, K; Yamamoto, A; Kawakishi, S; Osawa, T.** 1994. Antioxidative components isolated from the seed of Tamarind (*Tamarindus indica* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42: 2671-2674.
- Valenzuela, A., Maiz, A.** 2006. El rol de la fibra dietética en la nutrición enteral. *Revista Chilena de Nutrición*, 33 (2): 342-351.
- Valls, J., Lampreave, M., Nadal, M., Arola, L.** 2000. Importancia de los compuestos fenólicos en la calidad de los vinos tintos de crianza. *Alimentación: equipos y tecnología*. Unidad de Enología. Dpto. De Bioquímica y Biotecnología, Universidad Rovira I Virgili (Tarragona). p. p. 119-124.

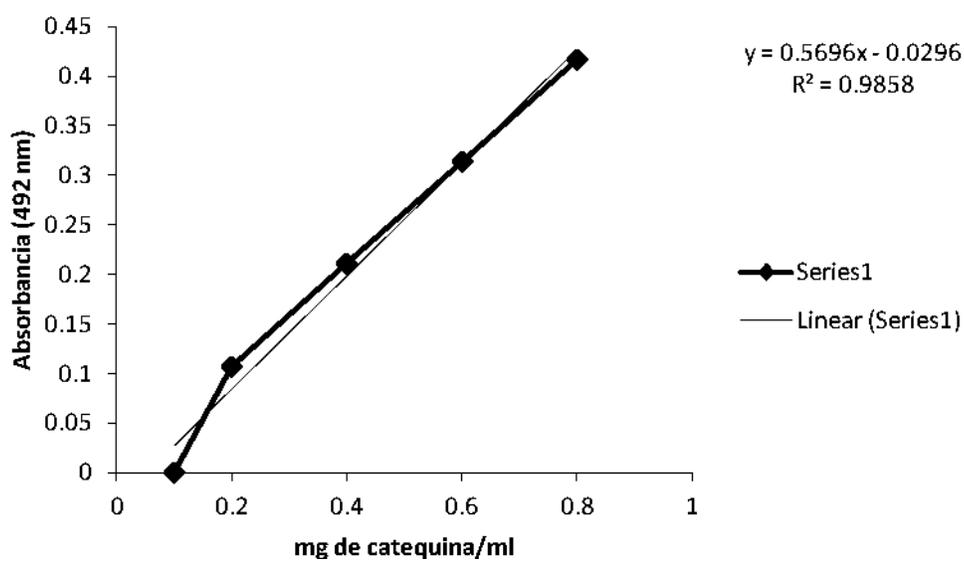
- Valls-Porta**, A. 1993. El proceso de extrusión en cereales y habas de soja. I. Efecto de la extrusión sobre la utilización de nutrientes. IX Curso de especialización FEDNA. Barcelona, España. Consultado en Marzo del 2011. http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Extrusi%C3%B3n_y_su_efecto.pdf.
- Vasanthan**, T., Gaosong, J., Yeung, J. y Li, J. 2002. Dietary fibre profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *Food Chemistry*, 77: 35–40.
- Villegas**, P. B. 2008. Efecto de la adición de inulina en las características físicas y sensoriales de batidos lácteos. Tesis Doctoral. Instituto de agroquímica y tecnología de alimentos. Universidad Politécnica de Valencia. pp. 6-7.
- Wachirasiri**, P., Julakarangka, S., Wanlapa, S. 2009. The effects of banana peel preparations on the properties of banana peel dietary fibre concentrate. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 31 (6): 605-611.
- Wang**, W. M., & Klopfenstein, C. F. 1993. Effect of twin-screw extrusion on the nutritional quality of wheat, barley and oats. *Cereal Chemistr*, 70: 712–715.
- WISE**. 1946. Determinación de holocelulosa. Guía práctica para la especialidad en celulosa y papel. Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Guadalajara. México.
- Wong**, K., Cheung, P. 2005. Dietary fibers from mushroom sclerotia: 1. Preparation and physicochemical and functional properties. *Journal of Agriculture Food Chemistry*, 53: 9395-9400.
- Yagci**, S., y Gogus, F. 2009. Effect of incorporation of various food by-products on some nutritional properties of rice-based extruded foods. *Food Science and Technology International*, 15(6): 571- 581.
- Zhang**, M., Liang, Y., Pei, Y., Gao, W., Zhang, Z. 2009. Effect of Process on Physicochemical Properties of Oat Bran Soluble Dietary Fiber. *Journal of Food Science*, 74 (8): 628-636.
- Zhang**, M., Bai, X., Zhang, Z. 2011. Extrusion process improves the functionality of soluble dietary. *Journal of Cereal Science*, 54: 98-103.
- Zielinski**, H., Kozłowska, H., y Lewczuk, B. 2001. Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing. *Innovative. Food Science and Emerging Technologies*, 2(3): 159-169.

10. Apéndice

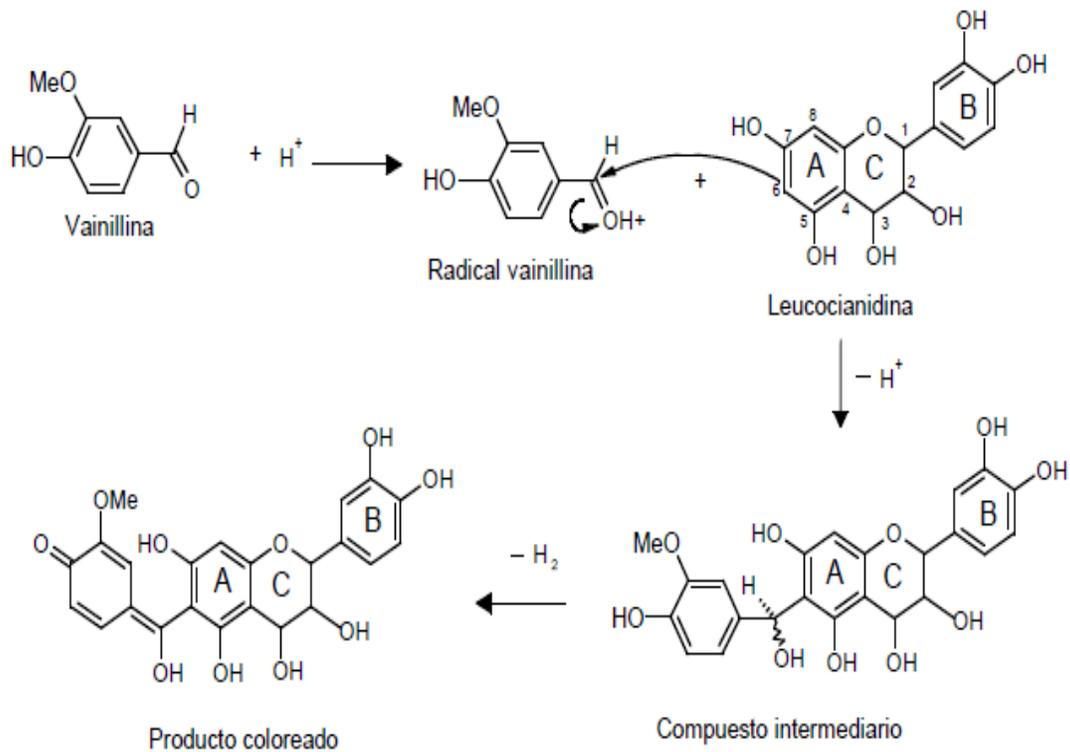
Apéndice 1. Polifenoles totales: Curva de calibración de ácido gálico



Apéndice 2. Taninos condensados: Curva de calibración de (+) - catequina

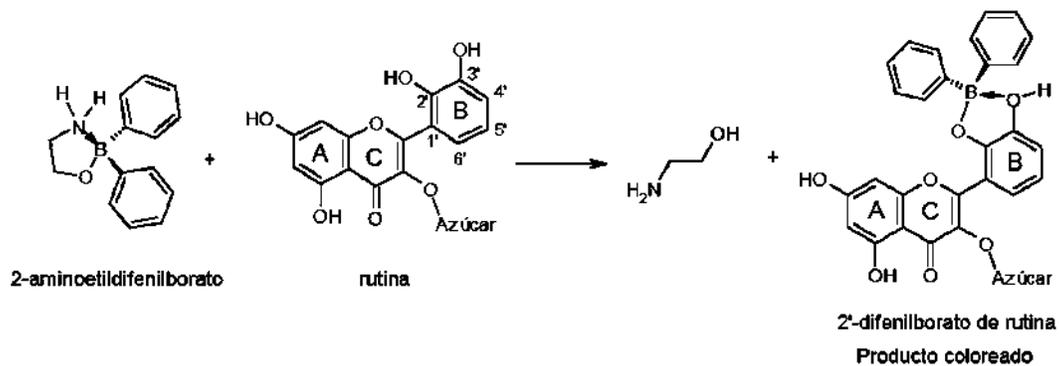


Apéndice 3. Reacción entre la vainillina y los taninos condensados.



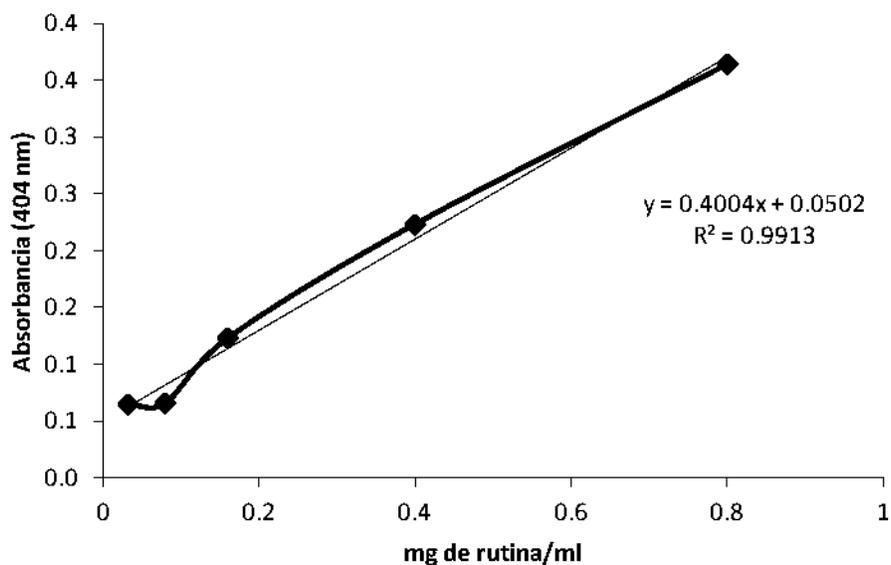
Fuente: Martínez (2007).

Apéndice 4. Reacción del compuesto 2-aminoetil difenilborato con los flavonoides

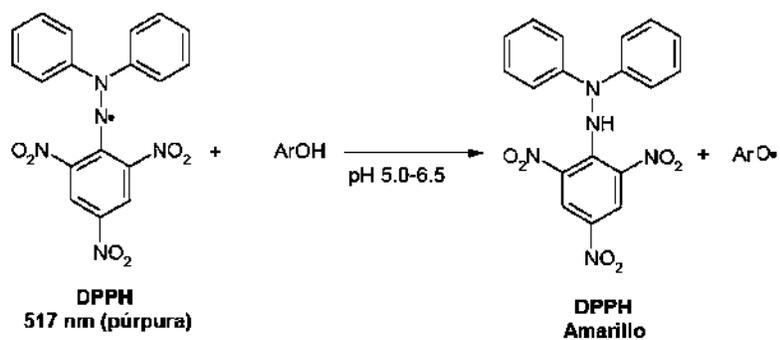


Fuente: Martínez (2007).

Apéndice 5. Flavonoides totales: Curva de calibración de rutina

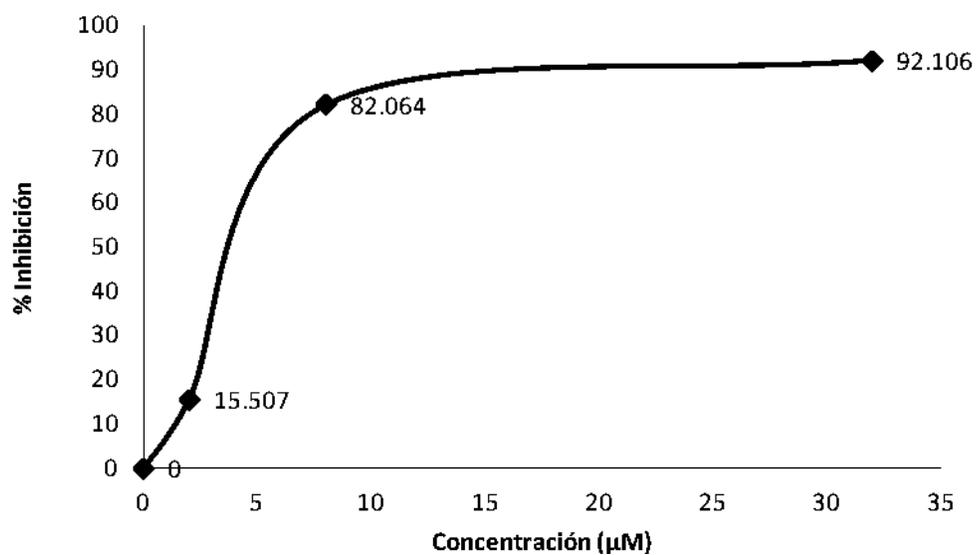


Apéndice 6. DPPH: Antioxidantes como secuestradores de radicales libre

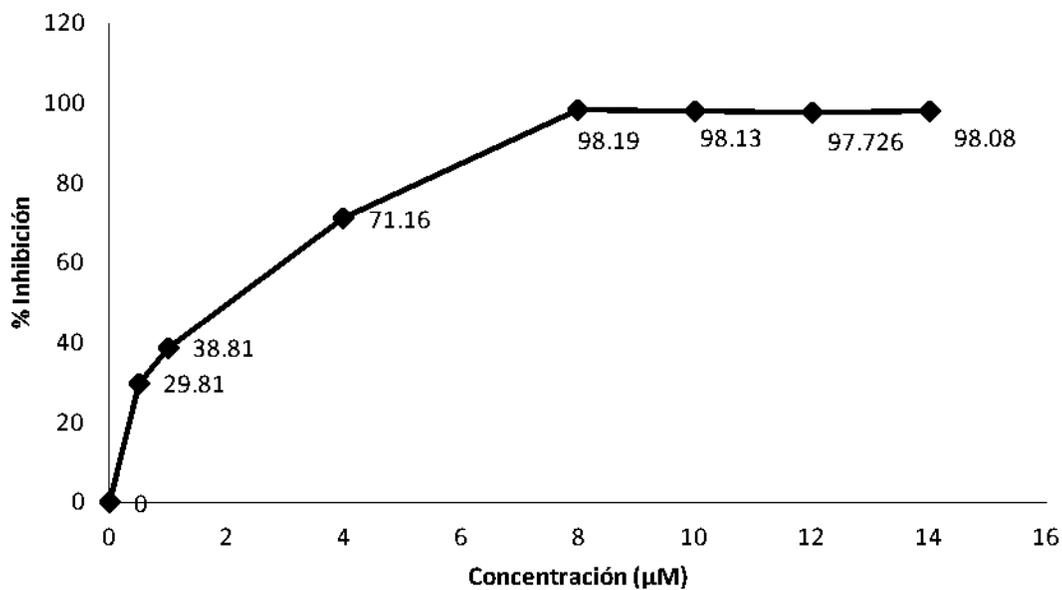


Fuente: Martínez (2007).

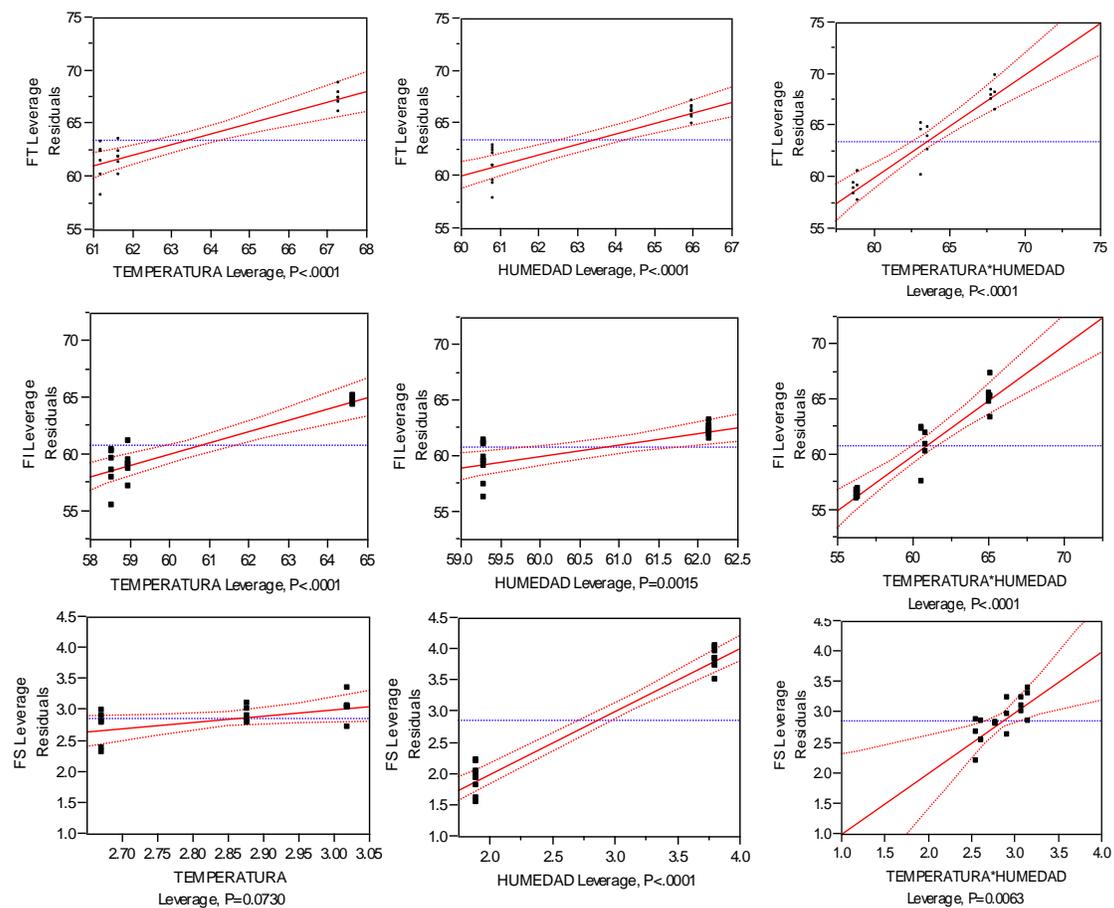
Apéndice 7. DPPH: Curva de porcentaje de inhibición con ácido gálico



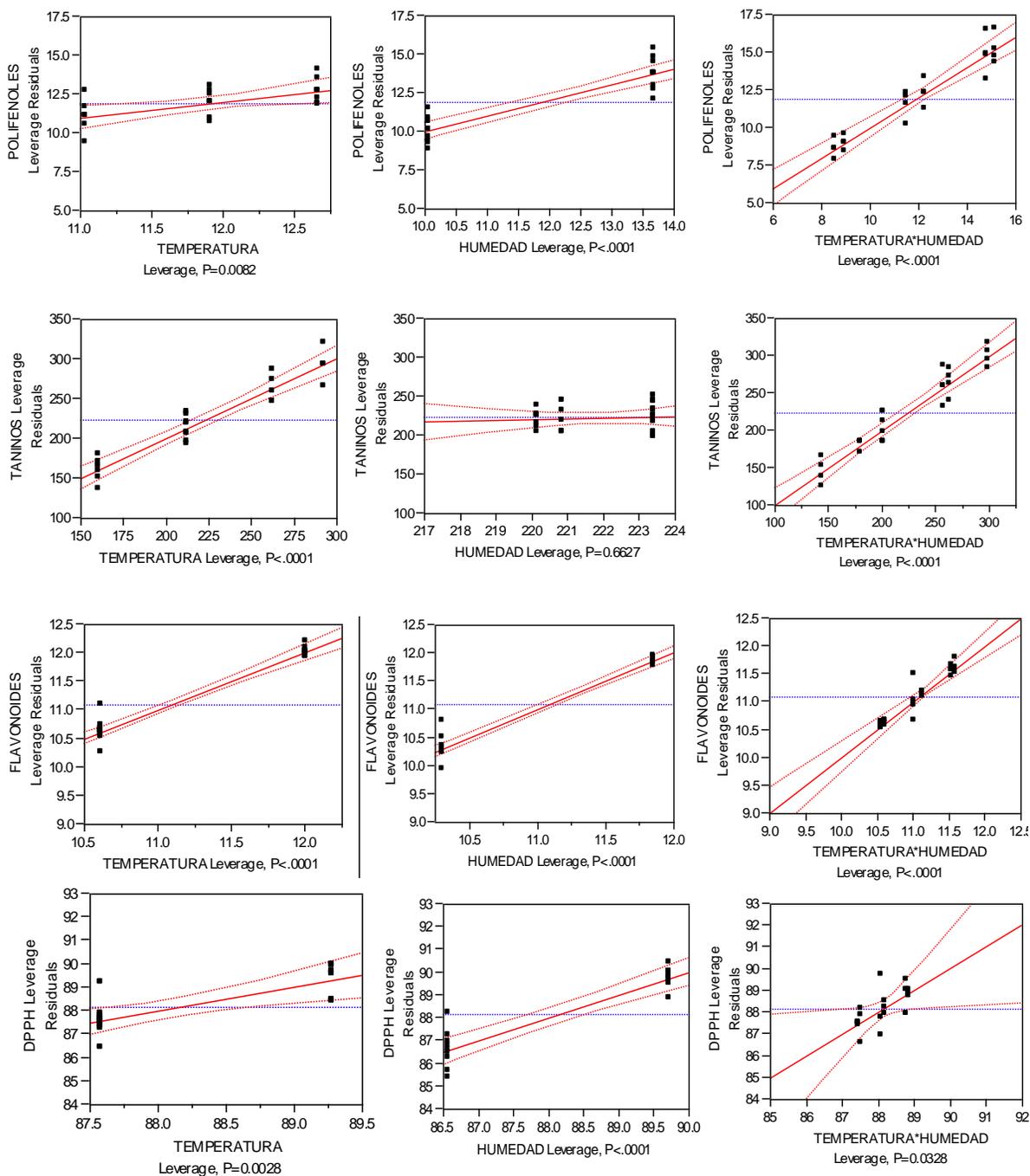
Apéndice 8. ABTS^{•+}: Curva de porcentaje de inhibición con ácido gálico



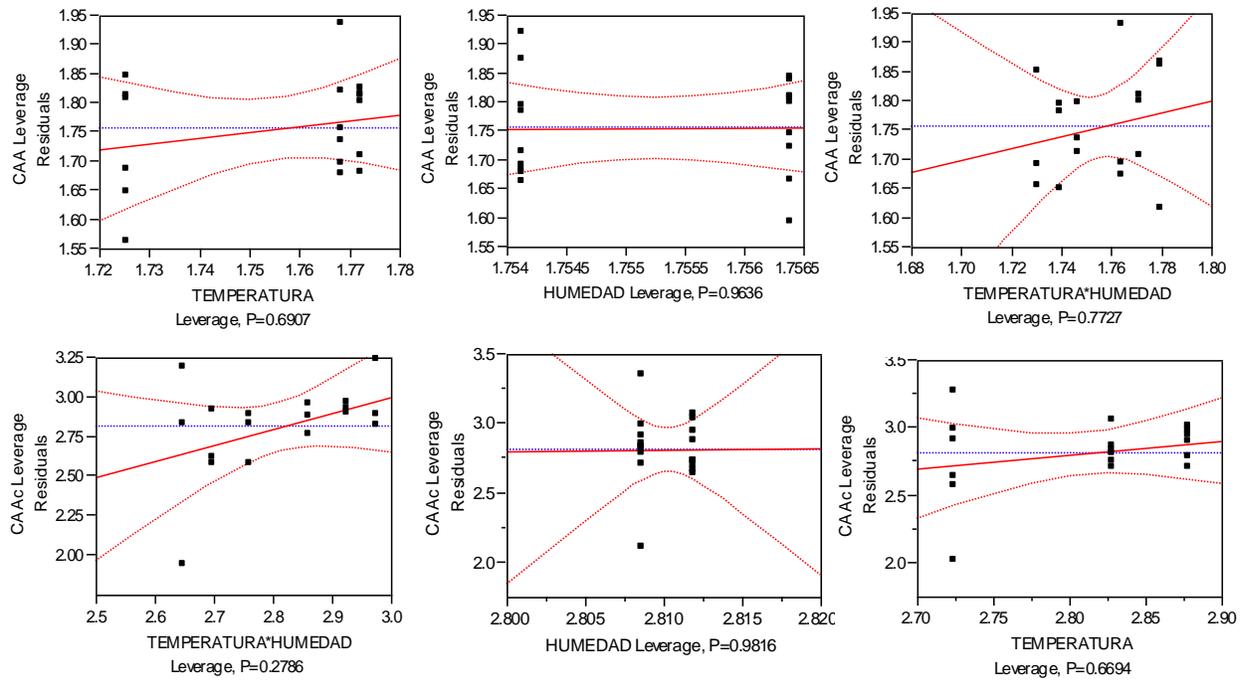
Apéndice 10. Análisis Factorial Completo para las variables respuesta de FT, FI y FS. Efecto individual de la temperatura y humedad, e interacción entre ambos factores (temperatura y humedad).



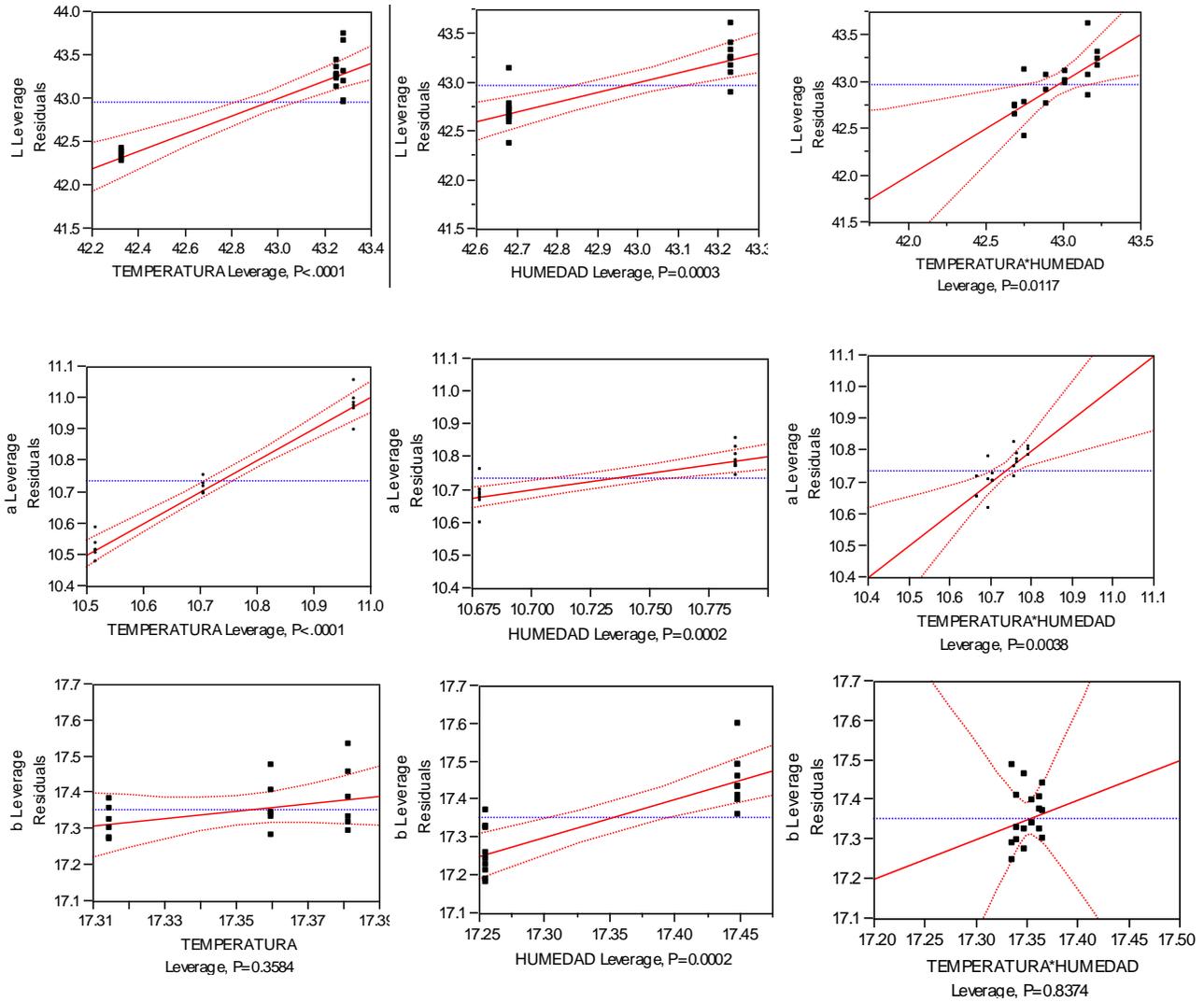
Apéndice 10.1. Análisis Factorial Completo para las variables respuesta de Polifenoles, Taninos, Flavonoides y DPPD: 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo. Efecto individual de la temperatura y humedad, e interacción entre ambos factores (temperatura y humedad).



Apéndice 10.2. Análisis Factorial Completo para las variables respuesta: CAA: Capacidad de Absorción de Agua y CAAc: Capacidad de absorción de Aceite. Efecto individual de la temperatura y humedad, e interacción entre ambos factores (temperatura y humedad).

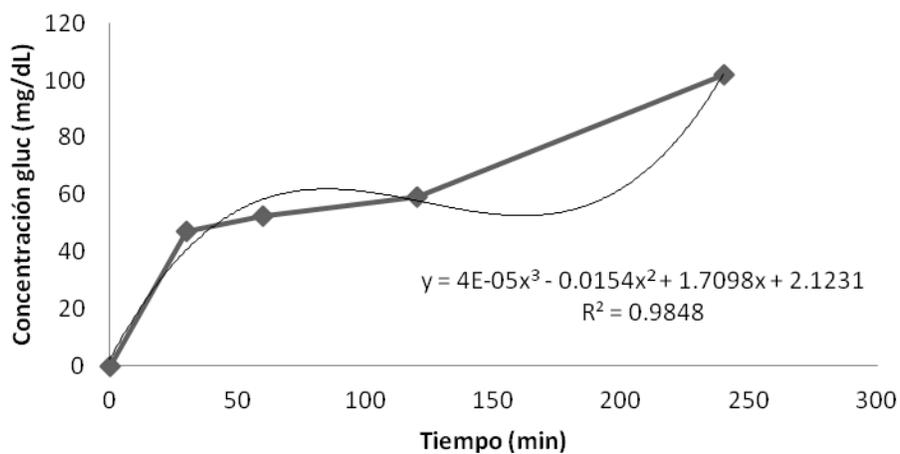


Apéndice 10.3. Análisis Factorial Completo para las variables respuesta: Parámetros de color, L, a y b. Efecto individual de la temperatura y humedad, e interacción entre ambos factores (temperatura y humedad).

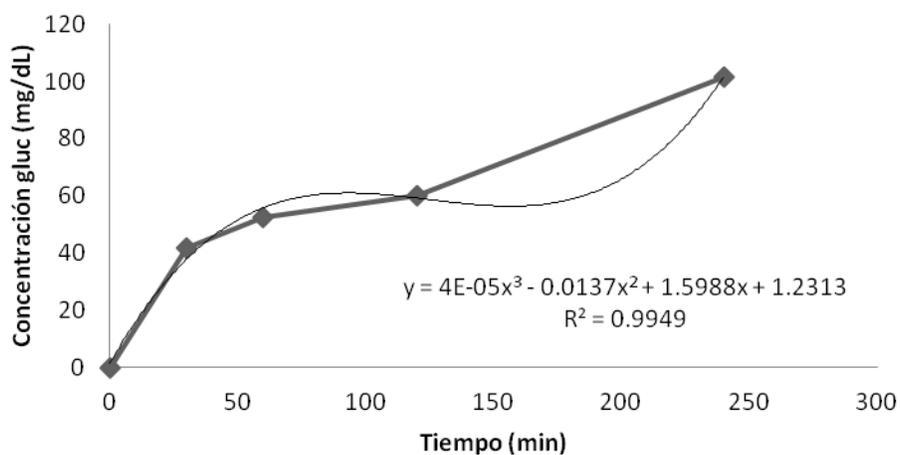


Apéndice 11. Gráficos ajustados a una ecuación polinomial de tercer grado para calcular la velocidad máxima de difusión de glucosa.

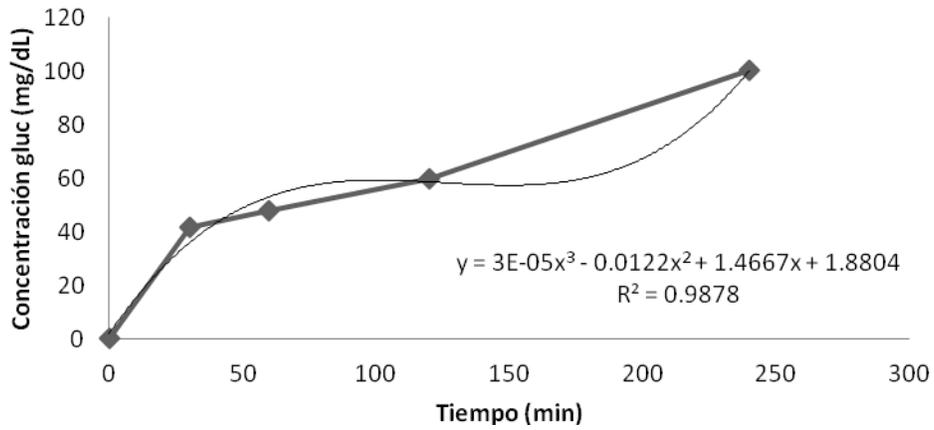
Tasa de difusión- muestra sin extruir



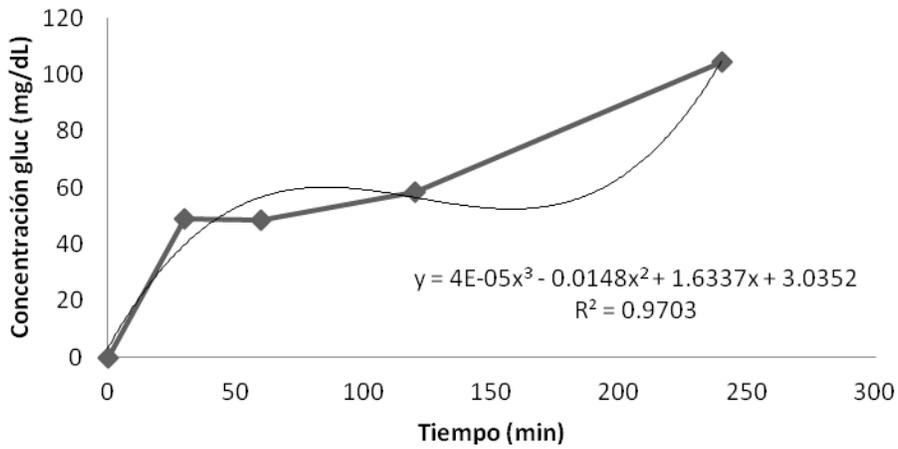
Tasa de difusión 32 % - 90°C



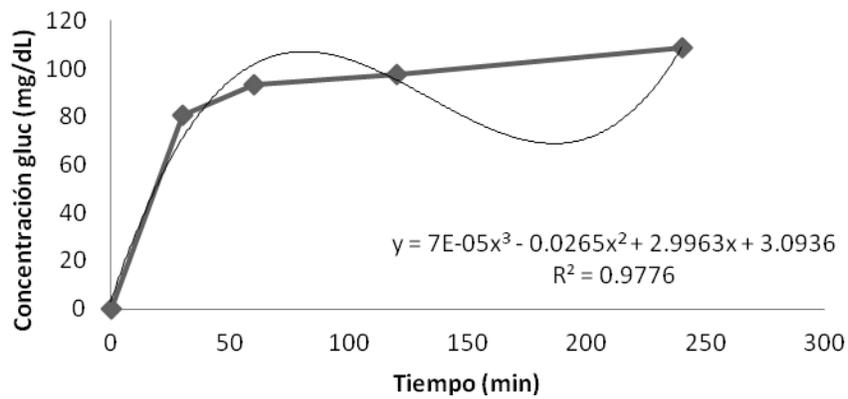
Tasa de difusión 32 % - 100 °C



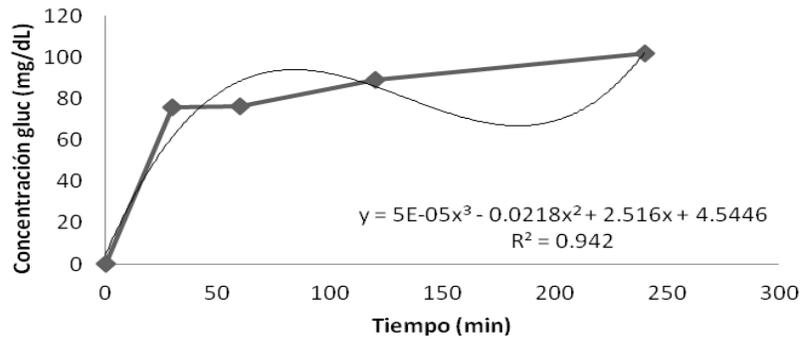
Tasa de difusión 32 % - 110 °C



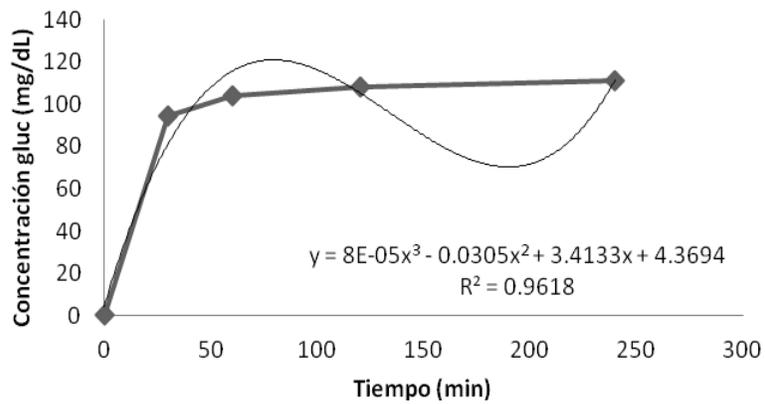
Tasa de difusión 39 % - 90 °C



Tasa de difusión 39 % - 100 °C



Tasa de difusión 39 % - 110 °C



Tasa de difusión control

