



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE PROCESO EN  
LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y TEXTURALES DE  
BOTANAS FRITAS DE HABA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA

JESSICA CERÓN MONDRAGÓN

ASESORA: I.B.Q NORMA BEATRÍZ CASAS ALENCÁSTER

COASESOR: I.B.Q JOSÉ JAIME FLORES MINUTTI

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO

2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U.N.A.M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO  
Jefe del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Efecto de las condiciones de proceso en las propiedades físicas y texturales de botanas fritas de haba.

Que presenta la pasante: Jessica Cerón Mondragón

Con número de cuenta: 411078982 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POK MI KAZA HABLARÁ EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 18 de Agosto de 2015.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.B.Q. Norma Beatriz Casas Alencaster	
VOCAL	Dra. María Elena Vargas Ugaldé	
SECRETARIO	I.A. María del Pilar Molina Rubio	
1er. SUPLENTE	I.A. Virginia López García	
2do. SUPLENTE	I.A. Maritza Rocandío Pineda	

NOTA: los sindicales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

IHM/mmgm\*

## **AGRADECIMIENTOS**

Este presente trabajo es dedicado principalmente a mis padres Rosa Martha Mondragón Hernández y Juan José Cerón Morelos por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años y que siempre han estado ahí, brindándome su apoyo incondicional además de sus consejos para hacer de mí una mejor persona.

A mi hermano Juan Jesús por estar en los momentos más importantes de mi vida y espero en un futuro próximo verte realizado como profesionista.

Agradezco a Dios, por haberme dado una familia maravillosa, quienes han creído en mí siempre dándome ejemplos de superación, humildad y sacrificio, espero contar siempre con su valioso e incondicional apoyo.

A mis abuelitas Teresa y Socorro por el gran cariño y apoyo que desde pequeña me han mostrado. A mi abuelito Juan que ya no se encuentra entre nosotros pero siempre estará en nuestro corazón.

A mi asesora, la profesora Norma Beatriz Casas Alencáster por su apoyo, tiempo y valiosa colaboración.

A ti, gracias por todo tu amor, apoyo y comprensión que me has dado durante este tiempo y enseñarme que en la vida siempre es importante sonreír para ser feliz.

A amigos y compañeros que de una u otra manera me han llenado de sabiduría y de buenos momentos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México especialmente a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios universitarios, así como también a los diferentes profesores que me brindaron sus conocimientos y apoyo para seguir adelante día a día.

# ÍNDICE

	Pág.
Índice de cuadros	i
Índice de figuras	iii
Resumen	v
Introducción	vii
I. Antecedentes	1
1.1 Definición de botana	1
1.1.1 Botanas fritas	1
1.1.2 Tipos de botanas fritas	2
1.1.3 Propiedades físicas y texturales en botanas fritas	4
1.2 Proceso general de elaboración de legumbres fritas	5
1.2.1 Remojo	6
1.2.2 Adición de hidrocoloides para reducir la absorción de aceite	9
1.3 Textura de productos crujientes	18
1.3.1 Características generales de productos crujientes	19
1.3.2 Métodos de prueba de textura en productos crujientes	22
1.3.2.1 Análisis sensorial	23
1.3.2.2 Pruebas mecánicas instrumentales	30
1.3.2.3 Pruebas acústicas para la evaluación de textura de productos crujientes	35
1.3.3 Pérdida de la naturaleza crujiente durante el almacenamiento	37
1.4 Leguminosas	41

1.4.1	Haba	41
II.	Desarrollo Experimental	47
2.1	Objetivos	47
2.1.1	Objetivo General	47
2.2	Materiales	47
2.3	Métodos	48
2.3.1	Métodos de evaluación de propiedades físicas de habas secas y/o remojadas o fritas	48
2.3.1.1	Humedad	48
2.3.1.2	Densidad aparente	49
2.3.1.3	Densidad real	50
2.3.1.4	Color	51
2.3.1.5	Adquisición de imágenes de habas en las diferentes etapas del proceso	53
2.3.1.6	Medición de propiedades texturales de habas secas y/o remojadas o fritas por medio de una prueba de punción	53
2.3.1.7	Absorción de aceite	54
2.3.2	Cinéticas de absorción de agua en el remojo	55
2.4	Diseño Experimental	58
2.4.1	Obtención del haba frita	59
III.	Resultados y discusión	61
3.1	Actividades Preliminares	61
3.2	Cinéticas de Absorción	62
3.3	Propiedades físicas después del remojo y después del freído	67
3.4	Absorción de aceite	70

3.5	Textura en habas después del remojo y después del freído	74
3.6	Color después del remojo y después del freído	83
3.7	Apariencia de las habas en las diferentes etapas de proceso	88
IV	Conclusiones	91
	Bibliografía	92

## Índice de cuadros

		Pág.
1.1	Tipos de botanas	2
1.2	Definiciones del término crujiente y el modo de evaluarlo sensorialmente	25
1.3	Estímulos citados por la definición del atributo crujiente	28
1.4	Diferentes partes de eventos de fractura relacionados con la curva fuerza-deformación	32
1.5	Componentes del haba fresca y seca	42
2.1	Condiciones de proceso para remojo y freído	59
3.1	Dimensiones de habas seleccionadas y rechazadas por tamaño	61
3.2	Propiedades físicas del haba seca seleccionada	62
3.3	Modelos de Haladjian y Peleg	63
3.4	Propiedades físicas de habas después del remojo y después del freído	68
3.5	Influencia de las condiciones de proceso en las propiedades físicas de habas fritas. Resultados del análisis estadístico	70
3.6	Efecto de las condiciones de remojo y freído en la absorción de aceite	71
3.7	Influencia de las condiciones de proceso en la absorción de aceite. Resultados del análisis estadístico	73
3.8	Parámetros obtenidos en habas después del remojo	75
3.9	Influencia de las condiciones de proceso en la textura de habas después del remojo. Resultados del análisis estadístico	76
3.10	Parámetros obtenidos en habas después del freído	79
3.11	Influencia de las condiciones de proceso en la textura de habas después del freído. Resultados del análisis estadístico	80



3.12	Valores tri-estímulo L*a*b en habas después del remojo	83
3.13	Influencia de las condiciones de proceso en la diferencia de color de habas después del remojo. Resultados del análisis estadístico	84
3.14	Valores tri-estímulo L*a*b en habas después del freído	85
3.15	Influencia de las condiciones de proceso en el color de habas después del freído. Resultados del análisis estadístico	87

## Índice de figuras

		Pág.
1.1	Mecanismos de transferencia de calor y masa durante la fritura	13
1.2	Fuerza-deformación de un material crujiente, mostrando sus diferentes propiedades	31
1.3	Ejemplo de la curva de fuerza-deformación y eventos acústicos	36
1.4	Cambios con el tiempo en: naturaleza crujiente, movilidad de moléculas pequeñas, rigidez y humedad	41
1.5	Partes de la semilla de haba ( <i>Vicia Faba L.</i> )	43
2.1	Termo balanza Ohaus, modelo MB45	48
2.2	Medida del volumen en probeta graduada de 100 ml	50
2.3	Representación del sólido de colores para el espacio L*a*b	52
2.4	Diagrama de proceso de frituras de haba	59
3.1	Habas rechazadas	61
3.2	Curvas de absorción de agua a diferentes temperaturas para el modelo de Haladjian	62
3.3	Curvas de absorción de agua a diferentes temperaturas para el modelo de Peleg	63
3.4	Constante de velocidad de hidratación (k, 1/k1) vs temperatura	65
3.5	Humedad de saturación experimental vs humedad de saturación calculada para Haladjian y Peleg	66
3.6	Influencia de la humedad después del remojo en la absorción de aceite	72
3.7	Curva característica de fuerza vs tiempo de habas secas y después del remojo	74
3.8	Curvas obtenidas en diferentes condiciones de proceso de	77

	remojo y freído	
3.9	Carácter crujiente con respecto a la humedad después del freído	81
3.10	Fuerza de fractura con respecto a la humedad después del freído	81
3.11	Distancia de fractura con respecto a la humedad después del freído	82
3.12	Valores de $a^*$ y $b^*$ en las diferentes etapas de proceso del haba frita	86
3.13	Valores de $a^*$ en función del tiempo de freído	87
3.14	Ubicación de los parámetros $a^*$ y $b^*$ para haba seca ( $H_s$ ) y haba frita ( $H_f$ ), obtenida con remojo a 50 °C por 50 min y freído a 170 °C por 5 min	88
3.15	Imágenes de la superficie de habas en las diferentes etapas de proceso	89

## RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de las condiciones de proceso (remojo y freído) en las propiedades físicas y texturales de botanas de habas fritas. Para esto se determinaron las condiciones que producen propiedades físicas y texturales características de productos crujientes y baja absorción de aceite y se evaluó el efecto de la temperatura y tiempo de remojo y freído por medio de un diseño Taguchi.

Las habas se seleccionaron y clasificaron de acuerdo a forma, tamaño y color, eliminando las rotas, oxidadas y las demasiado pequeñas. En una primera etapa se estudió el efecto de la temperatura (25, 50, 60, 80 °C) en la absorción de agua durante el remojo, ajustando las cinéticas de absorción a los modelos de Peleg y Haladjian, ambos modelos produjeron un buen ajuste ( $R > 0.988$ ) y mostraron una fase inicial de rápida absorción, seguida de una fase más lenta hasta llegar al equilibrio. Las temperaturas de remojo de 35 y 60 °C no se consideraron para el estudio del freído, pues se comportaron de manera similar que las de 25 y 50 °C respectivamente.

Por medio de un diseño Taguchi se estudió la influencia de la temperatura de remojo (25, 50, 80 °C), tiempo de remojo (50, 100, 200 min), temperatura de freído (160 °C, 170 °C) y tiempo de freído (2, 3 y 5 min) en las propiedades físicas, texturales y absorción de aceite de las habas fritas.

Dentro de las propiedades físicas se determinaron después del remojo y después del freído, la humedad por termobalanza (Ohaus, MB45), color con colorímetro (Minolta, CR300), densidad aparente y real; la absorción de aceite se determinó mediante un balance de materia. Para la medición de la textura se utilizó un Texturometro Texture Analyser TAX-T2 por medio de una prueba de punción, con un dispositivo cilíndrico de acero inoxidable de 3mm. Se determinaron los parámetros carácter crujiente, fuerza de fractura, distancia de fractura y número de rupturas.

El remojo como pre-tratamiento tuvo un efecto significativo en el porcentaje de aceite, ya que temperaturas y tiempos altos de remojo resultaron en un alto porcentaje de absorción de aceite; a la temperatura de remojo de 50 °C la absorción de aceite se mantuvo por debajo del 13.5 % independientemente de las condiciones de freído; a las tres temperaturas de remojo la mayor absorción de aceite se obtuvo al mayor tiempo de remojo.

En cuanto a las condiciones del freído, la temperatura no tuvo influencia en las propiedades físicas y texturales del haba frita, sin embargo el tiempo fue un factor determinante en el color y la textura. Conforme aumentó la humedad después del freído el carácter crujiente disminuyó notoriamente; los valores más altos fueron obtenidos a temperaturas y tiempos de remojo bajos (25 °C, 50 minutos); por arriba del 10% de humedad el carácter crujiente disminuyó drásticamente, con los valores más bajos a las humedades altas. La fuerza de fractura mostró una tendencia similar a la observada para el carácter crujiente. Se observó una clara tendencia del incremento de la distancia de fractura con el aumento de la humedad después del freído; las corridas sometidas a tiempos de freído bajos (2 minutos) muestran una distancia de fractura alta, lo cual indica que el tiempo no fue suficiente para evaporar el agua contenida en el haba, mientras que las corridas sometidas a tiempos de freído altos (5 min), coinciden con el comportamiento de una botana frita al mostrar una baja distancia de fractura y un bajo contenido de humedad.

Con temperatura de remojo de 50 °C por 50 minutos y temperatura de freído de 170 °C por 5 minutos se produjeron las mejores características, ya que bajo estas condiciones se obtuvieron baja humedad (1.86 %), baja absorción de aceite (12.04 %), un carácter crujiente alto (242.7 N/s), el mayor número de picos de fractura (3.80), fuerza y distancia de fractura bajas (25 N y 1.05 mm), características típicas de una botana frita.

## INTRODUCCIÓN

Las botanas o “snacks” se han transformado en parte integral de la ingesta diaria de alimentos de la mayoría de la población mundial (Limsangouan y col., 2010). Dentro de las botanas fritas se encuentra una gran variedad como son los cacahuates, totopos, papas, tostadas, entre otros, los cuales contienen un alto contenido de grasa; estos productos son populares entre la población mexicana, sin embargo, el consumo frecuente es reconocido como uno de los mayores factores que perjudican la salud y está asociado con la alta incidencia de casos de obesidad, colesterol alto, presión alta, entre otros (Phule y Annapure, 2013). Es por eso que debe crecer el interés en el desarrollo de productos más saludables con menos contenido de aceite y que conserven sus propiedades físicas y texturales. Actualmente existen alternativas más saludables en cuanto a botanas fritas, como son el consumo de leguminosas, como el haba, la cual contiene un mayor contenido en proteínas y aminoácidos, en comparación con el maíz o arroz. Las semillas de haba se utilizan para preparar varios guisos, sopas, ensaladas, harinas e incluso galletas y botanas (López, 2007).

Si bien se encuentran en México productos comerciales de leguminosas fritas de semilla entera, el efecto de las condiciones de proceso en las propiedades físicas y texturales está poco documentado. Sin embargo, hay algunos trabajos relacionados con leguminosas fritas como frijoles (Phule y Annapure, 2013; Annapure y col., 1998) y garbanzos (Phule y Annapure, 2013) investigados en la India.

Para la transformación de leguminosas secas en diferentes productos; entre ellos botanas fritas, la semilla se somete a una etapa inicial de hidratación para facilitar la cocción, mejorar el aspecto, promover la desnaturalización de proteínas y gelatinización del almidón, además de hacer que la semilla sea más suave y uniforme en textura (Abu-Ghannam y McKenna, 1998). La comprensión de la absorción de agua durante el remojo en legumbres es de importancia práctica puesto que gobierna las operaciones subsecuentes y la calidad de productos

finales en procesos como el freído, entre otros; para esto se han empleado numerosas aproximaciones teóricas y empíricas, ejemplo de éstas es el modelo de Peleg (Abu-Ghannam y McKenna, 1998; Turhan y col., 2002; Paredes y col., 2012) y el modelo semi-empírico de primer orden (Haladjian y col., 2003), los cuales describen la velocidad de hidratación, velocidad inicial y máxima capacidad de absorción de agua.

El freído es una operación multifuncional para la transformación de alimentos. Este proceso puede definirse como la cocción por inmersión en aceite comestible a una temperatura por encima del punto de ebullición del agua (Bravo y col., 2007). El freído sigue siendo una operación compleja debido a las dos transferencias de masa en direcciones opuestas dentro del material que se está friendo; en los productos que contienen almidón, agua y material soluble, estos componentes tienden a escapar del material y en su lugar entra el aceite. Durante la fritura, el material sufre una transformación química y física al someterse a un alto intervalo de temperatura (140 a 180 ° C) (Ziaifar y col., 2008). Finalmente, la deshidratación durante el freído, junto con la gelatinización del almidón, desnaturalización de las proteínas, generación de aromas y colores a través de reacciones de Maillard y absorción de aceite (Ziaifar y col., 2008) proporcionan las características físicas y texturales finales de las botanas fritas.

Las botanas fritas, se caracterizan por tener una textura crujiente en la cual los consumidores basan su apreciación (Luyten y col., 2004). Se definen como materiales frágiles debido a su baja humedad, la presencia de espacios vacíos (celdas o bolsas de aire), que pueden actuar deteniendo la propagación de grietas. La heterogeneidad es, probablemente, un complemento importante a la fragilidad en la generación de una textura crujiente (Vincent, 2004).

Por lo arriba descrito, en este trabajo se estudiará el efecto de las temperaturas y tiempos de remojo y freído en las propiedades físicas y texturales en habas fritas.

# I. ANTECEDENTES

## 1.1 DEFINICIÓN DE BOTANA

El término de botana es difícil de definir o categorizar. Pueden ser considerados como aquellos alimentos consumidos fuera de las comidas principales diarias (desayuno, comida y cena). Entre este tipo de alimentos se encuentran las botanas crujientes y saladas, obleas de chocolate, etc. (Delgado y col., 2013). Las botanas pueden encontrarse en porciones miniatura, calientes o frías, en estado sólido o líquido, necesitan poca o ninguna preparación y se destinan a satisfacer las angustias ocasionales del hambre. Por lo tanto las botanas deben presentarse en porciones manejables y convenientes que satisfagan el hambre a corto plazo. Las diferentes categorías de botanas se muestran en el Cuadro 1.1 (Bawa y Sidhu, 2003).

Las botanas pueden ser dulces o saladas, ligeras o sustanciales, y pueden ser dotadas de atributos como saludables o simplemente para disfrutarse. Éstas son una parte importante de la industria alimenticia. El líder dominante en la rama de las botanas fritas sigue siendo las papas fritas, seguido de aperitivos extrudidos, chips de maíz, frutos secos, bocadillos de carne, pretzels y palomitas de maíz (Bawa y Sidhu, 2003), sin embargo, las botanas a base de semillas enteras de maíz y legumbres como chícharo, garbanzo, lenteja y haba son muy populares en México y otros países como la India.

### 1.1.1 Botanas fritas

Los productos fritos forman un grupo importante de productos alimenticios consumidos en todo el mundo. Estos productos se fríen directamente en el aceite caliente, como las papas fritas, papas a la francesa o empanizados, productos de pescado rebozados y todo tipo de aperitivos. Deben ser completamente crujientes o tener una corteza crujiente y un interior mucho más suave y húmedo. Este



carácter crujiente es una característica sensorial importante en la que los consumidores basan su apreciación (Van Vliet y col., 2007).

**Cuadro 1.1.** Tipos de botanas (Bawa y Sidhu, 2003)

<b>Categoría</b>	<b>Producto</b>
Calientes	Minipizzas, baguettes, tostadas, fideos, rollos primavera, croissants rellenos.
Leche y productos lácteos	Yogurt solo o con frutas, mini cubos de queso.
Productos de panadería	Cake bars, tartaletas miniatura, galletas.
Barras	Barras de granola o muesli, barras de chocolate, barras energéticas.
Productos salados	Papas fritas, galletas saladas, pretzels, palillos salados.
Otros productos	Palomitas, cereales inflados, snacks de arroz, banderillas de fruta, totopos, barras de fruta.
Confitería / repostería	Galletas, galletas tipo alambre.
Extrudidos	Papas fritas, tubos a base de cereales con relleno de queso, bolitas de maíz.
A base de nueces	Cacahuates tostados, cacahuates fritos, cacahuates recubiertos y fritos, nueces tostadas y saladas, almendras tostadas y saladas, nueces azucaradas, nueces saborizadas y mezclas de nueces.
A base de legumbres	Chicharos fritos, garbanzos, lentejas, habas.
A base de carne	Chicharrón, cecina.

### 1.1.2 Tipos de botanas fritas

En general, la manufactura de botanas fritas a base de cereales y legumbres se puede dividir en tres grandes categorías: productos de grano entero,

productos extrudidos y productos nixtamalizados. Esta última categoría se puede subdividir en productos expandidos directos, productos obtenidos como pellets y masas formadas en el extrusor para ser posteriormente sometidos al proceso de freído u acabadas con otro tipo de tratamiento térmico (Serna, 1996).

### **Productos extrudidos**

La extrusión en sus aplicaciones alimenticias se está difundiendo cada día más por su característica intrínseca de ser una tecnología extremadamente económica y versátil, pudiendo procesar la gama más amplia de harina de cereales, tubérculos o leguminosas, de prácticamente cualquier origen, característica y procedencia. La variedad de productos obtenidos con esta tecnología, sencillamente modificando los parámetros de temperatura y tiempo, sin el auxilio de aditivos, conservadores, es muy amplia, abarcando cereales para desayuno, botanas, pan y los demás derivados del pan, bases para bebidas, sopas y alimentos instantáneos (Arroyo y col., 1999).

Las principales botanas producidas por extrusión son las botanas directamente expandidas y los comprimidos (pellets), también denominados “botanas indirectamente expandidas” o “de tercera generación”. Las botanas de tercera generación, al inicio eran expandidas por freído pero éstas pueden ser expandidas por calentamiento por infrarrojo o microondas (Delgado, 2013).

### **Productos nixtamalizados**

La nixtamalización es el proceso en el cual los granos, generalmente el maíz, son cocidos con agua y cal (CaO) para formar nixtamal, el cual después de ser molido forma una pasta húmeda y suave llamada masa. Ésta es la materia prima a partir de la cual se pueden elaborar tortillas, tostadas, tacos, tamales y botanas.

Básicamente existen dos tipos de botanas nixtamalizadas: las obtenidas a partir de masa (fritos) y las hechas a partir de tortillas (doritos o tostitos) (Serna, 1996).

### **Productos de grano entero**

Entre éstos se encuentran botanas a base de leguminosas enteros o en mitades (garbanzo, lenteja, haba) o cereales (maíz). Las palomitas o rosetas de maíz, sin ser fritas, son botanas de grano entero reventado, a las cuales se les puede agregar o no algún tipo de grasa. Así mismo, constituyen uno de los productos más importantes de esta categoría, las cuales, a diferencia de otras botanas, han recibido buena aceptación entre nutriólogos dado a su bajo contenido de aceite, alta calidad de carbohidratos complejos y apropiado contenido de fibra dietética (Serna, 1996).

#### **1.1.3 Propiedades físicas y texturales en botanas fritas**

Aunque el contenido de aceite es un parámetro de calidad importante para los productos fritos, en las características generales de calidad también se incluyen el color, textura y sabor (Moreira, 2014).

### **Propiedades físicas**

#### **a) Color**

La importancia del color en los productos alimenticios no puede ser subestimada. Un problema grave y aún sin resolver en el color de los alimentos está asociado con la decoloración o cambio de color en algunos productos. Con frecuencia, los cambios en el color son asociados con cambios indeseables en el sabor, textura u olor. Ciertos colores son esperados en algunos alimentos en particular, y cuando no se cumple la expectativa, hay rechazo al producto, a pesar de que el sabor no esté asociado con el color en ese caso. Se espera que los productos fritos sean de color marrón-dorado (Stier, 2000).

## **b) Sabor**

El sabor percibido de los alimentos fritos es una combinación de una serie de factores. Todas sus características sensoriales se ven afectadas por el sistema de freído y el aceite de fritura.

Específicamente, la composición química del aceite que se utiliza, el tipo de aceite, los alimentos que se fríen y su composición, el envase en el que el alimento es empaquetado, y como ha sido manejado, todo ésto afecta la forma en que es percibido el alimento por el consumidor (Stier, 2000).

### **Propiedades texturales**

El atributo de textura más importante de las botanas fritas es el carácter crujiente, que denota frescura y alta calidad. Un producto crujiente debe ser firme y romperse con facilidad cuando se dobla o comprime, emitiendo un sonido. Por ejemplo freír verduras crudas induce en mayores cambios en su microestructura, que a su vez determina sus propiedades físicas y sensoriales finales. El seguimiento de los cambios que ocurren en la textura del producto durante la fritura puede ayudar a entender la mayoría de los mecanismos de transporte (Moreira, 2014).

## **1.2 PROCESO GENERAL DE ELABORACIÓN DE LEGUMBRES FRITAS**

Entre los productos fritos a base de legumbres más comunes se encuentran el garbanzo descascarillado, el chícharo, el haba y algunos tipos de frijoles.

El proceso de elaboración de botanas fritas de grano entero a base de legumbres secas incluye varias operaciones como: selección y clasificación, remojo en agua por diferentes tiempos y temperaturas, escurrido y freído. En algunos casos, previo al freído se aplican tratamientos orientados a disminuir la absorción de aceite como el remojo en soluciones de hidrocoloides. A

continuación se describirá brevemente cada una de las operaciones antes mencionadas.

### **1.2.1 Remojo**

La transformación de las semillas secas por lo general requiere una etapa inicial de hidratación con el fin de facilitar la rápida cocción y mejorar el aspecto, promover la desnaturalización de proteínas y gelatinización del almidón. La degradación estructural en las leguminosas comienza a tener lugar durante el remojo, debido a la absorción de agua, y continúa durante toda la etapa de cocción o freído con el efecto añadido de la temperatura, haciendo así la leguminosa comestible para el consumo humano y con las características físicas y texturales deseadas (Abu-Ghannam, 1998). Como tratamiento previo al freído, las legumbres se remojan para facilitar el ablandamiento, mejorar la textura y evitar que se produzca una excesiva contracción. El grado de hidratación de las legumbres durante el remojo muestra una relación inversa con el tiempo de cocción y una reducción del 70% en el tiempo de cocción después de la inmersión durante 16 horas (Haladjian y col., 2003). Por otro lado, las legumbres contienen factores tóxicos, tales como inhibidores de tripsina. Estos compuestos condicionan la disponibilidad de la metionina (aminoácido esencial). Los inhibidores de tripsina podrían ser eliminados por la inactivación mediante un tratamiento térmico en legumbres crudas. Además, el proceso de cocción produce aromas y sabores positivos e inactiva la enzima lipoxigenasa promoviendo una mejor calidad y estabilidad en el producto final.

El proceso de remojo se ha caracterizado como una etapa que consume mucho tiempo y existen numerosos intentos para acortarlo. Las condiciones de remojo varían dependiendo de la leguminosa por lo que es necesario para aplicaciones prácticas, la caracterización y optimización de estas condiciones.

Como resultado del remojo, inicialmente se forma una película en la superficie, las moléculas de agua deben superar la resistencia de dicha película y

pasar a través de la cubierta de la semilla para entrar en los cotiledones y hacia el centro de la leguminosa. Mientras que las moléculas de agua viajan entre los cotiledones, éstas simultáneamente reaccionan con los gránulos de almidón. Si la temperatura está por debajo de la temperatura de gelatinización, el producto de la reacción es el hinchado de los gránulos de almidón. Si la temperatura de gelatinización es superior y la relación de almidón / agua  $\geq 0.75$ , el producto es la gelatinización del almidón (Sayar y col., 2001). Tal absorción de agua hace que la semilla sea más suave y uniforme en textura (Gowen y col., 2007).

Curvas de esfuerzo-deformación muestran que, aunque la absorción de agua durante el remojo reduce la dureza de las semillas de manera significativa, la pérdida de textura llega a una etapa de equilibrio una vez que se alcanza un nivel específico de contenido de humedad no importa cuánta agua extra continúe siendo absorbida (Abu-Ghannam, 1998).

La cuantificación de la magnitud de la absorción de agua y degradaciones estructurales producidas durante el remojo proporciona un indicador sobre la degradación adicional requerida para lograr un producto cocido comestible (Abu-Ghannam, 1998).

### **Modelos de absorción de agua durante el remojo**

La comprensión de la absorción de agua durante el remojo en legumbres y cereales es de importancia práctica puesto que gobierna las operaciones subsecuentes y la calidad de productos finales en procesos como cocción y freído, entre otros. Se han empleado numerosas aproximaciones teóricas y empíricas para modelar el proceso de absorción de agua durante el remojo y, en muchos casos, se prefieren los modelos empíricos por su relativa facilidad de uso (Turhan y col., 2002). Peleg propuso una ecuación de absorción de dos parámetros y probó la precisión de su predicción durante la absorción de vapor de agua en leche en polvo y remojo de arroz, además de su simplicidad y fácil manejo, ha sido validado en el modelado de fenómenos de absorción de humedad para una gran

cantidad de materiales tales como garbanzos, lentejas, frijoles blancos (Paredes y col., 2012) y rehidratación de zanahorias (Vázquez y col., 2007). Abu-Ghannam y McKenna (1997), propusieron un modelo semi empírico de una ecuación diferencial de primer orden para describir la velocidad de hidratación de frijoles durante el remojo, mismo que también fue aplicado en haba por Haladjian y col., (2003). Entre otros modelos utilizados se encuentran el difusional de Fick y el probabilístico de Weibull (Vázquez y col., 2007).

### **Modelo de Peleg**

Abu-Ghannam y McKenna (1997) utilizaron el modelo empírico de Peleg que relaciona el contenido de humedad con respecto al tiempo.

$$M = M_0 \pm \frac{t}{k_1 + k_2 t}$$

Donde M es el contenido de humedad (g agua/100 g solidos secos) al tiempo t,  $M_0$  es el contenido inicial de humedad,  $k_1$  es la constante de velocidad de absorción,  $k_2$  es la constante de capacidad de Peleg. Los símbolos  $\pm$  se utilizan según si es absorción (o adsorción) o secado (o desorción). En su forma lineal, la ecuación de Peleg se expresa como se indica en la siguiente ecuación.

$$\frac{t}{M - M_0} = k_1 + k_2 t$$

### **Modelo semi empírico de primer orden**

Haladjian y col. en 2003 utilizaron una ecuación diferencial de primer orden para describir el proceso de hidratación de habas a diferentes temperaturas.

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_S)$$

$$\frac{M - M_S}{M_0 - M_S} = e^{-kt} \quad (\text{Forma Integrada})$$

Donde  $M$  es el contenido de humedad en el tiempo  $t$ ,  $M_s$  es la humedad al equilibrio (% en base seca) o humedad de saturación, en base seca y  $k$  es la constante de velocidad de hidratación ( $\text{min}^{-1}$ ).

Algunos investigadores han estudiado el proceso y cinéticas de remojo en legumbres como son frijoles (Abu-Ghannam y McKenna, 1997) y habas (Haladjian y col., 2003) en intervalos de temperatura de de 20 – 65°C, en un periodo de 13 horas, para el caso de los frijoles los datos de hidratación resultantes se ajustaron al modelo de Peleg y concluyen que el modelo de absorción de agua de Peleg podría ser utilizado por los procesadores para predecir la cantidad de agua absorbida en cualquier temperatura.

### **1.2.2 Adición de hidrocoloides para reducir la absorción de aceite**

La preocupación de desarrollar productos más sanos que contengan menos grasa absorbida durante el pre-freído y el proceso de freído, es uno de los factores dominantes en las últimas tendencias de la investigación en esta área, dando lugar a estudios de maneras de disminuir el contenido de grasa en los alimentos fritos. Diferentes ingredientes han sido probados en su capacidad de reducir la cantidad de aceite absorbido por el alimento frito. Entre estos, los hidrocoloides desempeñan un papel importante. En la literatura se indican importantes reducciones y las formulaciones de recubrimiento utilizando varios tipos de biopolímeros solos y en mezcla han sido patentados (Varela y Fizman, 2011). Algunos hidrocoloides con propiedades de gelificación térmica o espesante, como las proteínas y los carbohidratos, han sido probados en la migración de aceite y agua, y varias opciones de revestimiento están siendo estudiados para la reducción de la incorporación de aceite durante el freído, tales como alginato, celulosa y sus derivados, aislado de proteína de soya, proteína de suero de leche, albúmina, almidón, gluten y pectina (Falguera y col., 2011).

Hay dos maneras de aplicar hidrocoloides en productos para freír. El primero consiste en una solución acuosa que generalmente se conoce como



“recubrimiento comestible” sobre el alimento a freír. Es el propósito principal, pero no el único, el de reducir la absorción de aceite. El segundo, es como ingrediente en la mezcla para recubrir, en alimentos batidos o empanizados. Éste es un campo que ha experimentado un desarrollo espectacular en las últimas décadas (Varela y Fizman, 2011).

Derivados de celulosa tales como CMC (Carboximetilcelulosa), MC (Metilcelulosa), HPMC (Hidroxipropil metil celulosa), e HPC (Hidroxipropil celulosa) tienen muy buenas propiedades de formación de película. CMC se ha utilizado para reducir la absorción de aceite en patatas fritas, particularmente en combinación con un pre-tratamiento de escaldado o cloruro de calcio. HPC se puede extruir en forma de películas, debido a sus características termoplásticas. MC es una mejor barrera a la humedad que todas las gomas, ya que es menos hidrófilo. Sin embargo, la característica más interesante para su aplicación en alimentos tratados térmicamente, en particular en productos fritos, es la capacidad de gelificación térmica reversible de MC y HPMC en sistemas acuosos, ampliamente utilizados para reducir la absorción de aceite durante la fritura de diversos alimentos, tales como carne, aves de corral, alimentos con almidón, pastas, etc. (Varela y Fizman., 2011, Rimac-Brncic y col., 2003).

Estos derivados de celulosa reducen la absorción de aceite a través de la formación de película a temperaturas por encima de su temperatura de gelificación incipiente, o refuerzan las propiedades de las barreras naturales de almidón y proteínas, sobre todo cuando se añaden en forma seca (García y col., 2002).

García y col., 2002 usaron MC y HPMC en la formulación de recubrimientos aplicados a papas fritas (0.7 × 0.7 × 5.0 cm) y discos de harina de trigo (3.7 cm de diámetro x 0.3 cm de alto), que se sumergieron en la suspensión de revestimiento durante 10 segundos y fueron freídos inmediatamente. Los revestimientos fueron más eficaces con 1% MC y 0.75% de sorbitol para discos harina de trigo y 1% MC y 0,5% de sorbitol para las patatas fritas, reduciendo la absorción de aceite en

35.2% y 40.6%, respectivamente. El uso de recubrimientos no tuvo un impacto significativo en la calidad sensorial, según el grupo de panelistas.

Por otro lado, Phule y Annapure (2013) usaron CMC y HPMC como recubrimiento a diferentes concentraciones (0.5, 1 y 2%), en la optimización del tiempo de remojo y reducción del contenido de aceite en mitades de garbanzos y green gram por el método de inmersión. La retención de humedad en el garbanzo y green gram fritos aumentaron proporcionalmente con el aumento en la concentración de HPMC. El contenido de aceite se redujo de 19.74% y 20.23% en garbanzo y green gram respectivamente para la concentración de HPMC 1% y un tiempo de inmersión de 3 minutos. Las concentraciones más altas de hidrocoloides y mayor tiempo de inmersión aumentaron el contenido de aceite gradualmente. Al 2% la reducción de la absorción de aceite observada, fue de 9.19 a 9.05% y 10.4 a 9.6%, respectivamente, para el garbanzo y green gram.

### **1.2.3 Freído**

La fritura es una operación unitaria destinada a modificar las características organolépticas del alimento. Un objetivo secundario de la fritura es el efecto conservador que se obtiene por destrucción térmica de los microorganismos y enzimas presentes en el alimento y por reducción de la actividad de agua en la superficie del mismo (o en toda su masa, en los alimentos cortados en rodajas finas) (Fellows, 2007).

#### **Transferencia de calor y de materia durante el freído**

Existen dos métodos de fritura comercial que se diferencian por los mecanismos de transmisión de calor que en ellos intervienen. Estos métodos son: la fritura por contacto y la fritura por inmersión (Fellows, 2007).

### **a) Fritura por contacto (o superficial)**

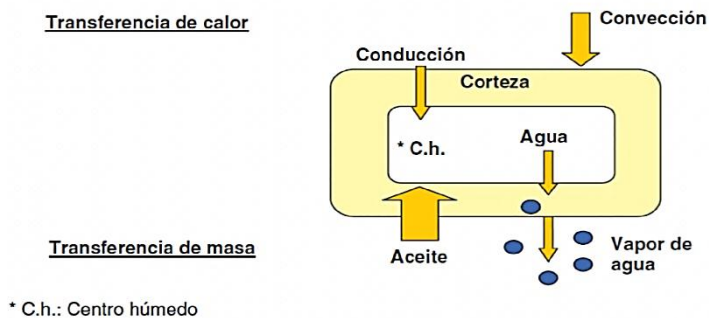
Este método resulta muy adecuado para aquellos alimentos de relación superficie/volumen favorable. En ellos, la transmisión de calor al alimento tiene lugar por conducción desde la superficie de la sartén, a través de una fina capa de aceite. El grosor de esta capa varía de acuerdo con las irregularidades de la superficie del alimento. Ello, conjuntamente con las burbujas de vapor que separan el alimento de la sartén provoca variaciones durante la fritura que son responsables de las irregularidades en el color marrón de los alimentos fritos por este sistema. El coeficiente de transmisión de calor superficial de la fritura por contacto es elevado ( $200 - 450 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ), sin embargo, no se cumple por igual en toda la superficie del alimento (Fellows, 2007).

### **b) Fritura por inmersión**

En la fritura por inmersión, la transmisión de calor se produce por una combinación de transmisión por convección (en la masa de aceite) y por conducción (en el interior del alimento). En este tipo de fritura, el alimento recibe en toda su superficie el mismo tratamiento térmico, lo cual confiere un color y aspecto uniformes. Este tipo de fritura puede aplicarse a alimentos con cualquier forma, pero los de formas irregulares y aquellos con una relación superficie/masa elevada tienden a retener más aceite cuando se retira de la freidora. El coeficiente de transmisión de calor, hasta que comienza la evaporación del agua en la superficie del alimento, es de  $250 - 300 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . En fases posteriores llega a ser de  $800 - 1000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , por la intensa turbulencia que el vapor produce en el aceite al eliminarse el agua del alimento. Sin embargo, si la velocidad de evaporación es demasiado elevada, se forma alrededor del alimento, una capa de vapor que reduce el coeficiente de transmisión de calor. Existen distintos estudios que sugieren que la pérdida de agua es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de fritura y que la absorción del aceite tiene lugar conforme se elimina el agua del alimento (Fellows, 2007).

El conocimiento preciso de los parámetros de transferencia de calor y masa es importante para los procesos de modelado en el que tienen lugar simultáneamente la transferencia de calor y masa (Yildiz y col., 2007).

Al sumergir el alimento en el aceite caliente la transferencia de calor se realiza por dos mecanismos: conducción y convección (Figura 1.1). La transferencia de calor por conducción, bajo condiciones no estacionarias, tiene lugar en el interior del alimento.



**Figura 1.1** Mecanismos de transferencia de calor y masa durante la fritura

La fritura por inmersión se puede dividir en cuatro etapas (Farkas y col., 1996): (1) calentamiento inicial, (2) ebullición de superficie, (3) tasa de descenso y (4) punto final de la burbuja.

Durante la primera etapa, la superficie de un alimento sumergido en aceite se calienta a una temperatura equivalente a la temperatura de ebullición del agua, la forma de transferencia de calor entre el aceite y el alimento es por convección natural y sin evaporación del agua de la superficie del mismo.

En la segunda etapa, en la superficie del alimento comienza a evaporarse el agua, el camino de los cambios de transferencia de calor de la convección natural a convección forzada se debe a la turbulencia en el aceite que rodea al alimento. En esta etapa, la corteza comienza a formarse en la superficie del alimento.

En la tercera etapa, la temperatura de la parte interna de los alimentos aumenta lentamente hasta el punto de ebullición del agua, debido a su humedad interna. En este momento, algunos cambios físico-químicos pueden tener lugar tales como: la gelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas, aumento en el espesor de la corteza superficial y la disminución de la velocidad de transferencia de vapor en la superficie (Tirado, 2012).

En la etapa final, la velocidad de pérdida de la humedad disminuye y no hay burbujas que se observen en la superficie de los alimentos. Estos cuatro estados durante la fritura se pueden generalizar como etapas de no ebullición (etapas 1 y 4) y las etapas de ebullición (Etapas 2 y 3).

### **Comportamiento del alimento y cambios durante el freído**

El principal objetivo de la fritura consiste en conseguir que el alimento adquiera una textura determinada y un color, aroma y sabores característicos. Estas características se desarrollan como consecuencia de la reacción de Maillard y de la absorción por el alimento de compuestos presentes en el aceite.

Durante el proceso, se modifican las características físicas, químicas y sensoriales de un alimento y del aceite. La calidad de los productos fritos depende principalmente de sus propiedades estructurales, texturales y ópticas. Importantes propiedades estructurales tales como la densidad aparente y verdadera, la porosidad y el volumen específico cambian durante la fritura. La corteza es formada durante la mayor parte de los procesos de fritura y es una de las características más agradables de los alimentos fritos (Krokida y col., 2000b).

La textura que se obtiene tras el proceso de fritura es consecuencia de los cambios producidos en la composición de los alimentos, principalmente en las proteínas y carbohidratos, que se modifican por efecto del calor transferido al alimento y por la eliminación del agua del mismo. Todo ello origina la formación de una costra que proporciona el atributo característico de crujiente al alimento

(Fellows, 2007). Adicionalmente a la formación de la costra o corteza, en el alimento se pueden apreciar otras modificaciones mecánicas, tales como contracción, expansión, desarrollo de porosidad, ruptura de la matriz sólida, etc. Cuando el alimento es rico en almidón, la costra presenta poros más pequeños que en el caso de alimentos que no lo contienen, y ésta, por tener los poros más grandes, presenta menos resistencia al paso de gases, sea vapor o aire. Además ocurren importantes transformaciones fisicoquímicas como gelatinización, retrogradación, y de transición vítrea de los carbohidratos, proteínas, etc. (Bravo y col., 2007; Vitrac y col., 2000).

Asimismo, durante la fritura, compuestos neo-formados potencialmente tóxicos pueden aparecer en el aceite como consecuencia de su deterioro, debido al oxígeno, calor y agua. Estos compuestos modifican las propiedades físicas y químicas del aceite y pueden favorecer su absorción (Ziaifar y col. 2008).

El propio alimento puede liberar alguno de sus lípidos endógenos a la grasa de fritura; la estabilidad frente a la oxidación de la mezcla así formada puede ser muy distinta de la que tenía la grasa de fritura original. La presencia de alimentos acelera el oscurecimiento del aceite (Fennema, 1993).

Los principales factores que determinan los cambios de color y sabor en un alimento son:

- La composición inicial del alimento
- El tipo de aceite usado en la fritura
- El historial térmico del aceite y el tiempo de uso
- La tensión interfacial entre el aceite y el producto
- La temperatura y el tiempo de fritura
- El tamaño y las características superficiales del alimento
- Los tratamientos a los que éste se somete tras la fritura

Cada uno de estos factores, además de tratamientos previos como el escaldado o remojo, influyen en la cantidad de aceite que se incorpora al alimento.

En muchos productos fritos, el aceite puede suponer hasta un 45% del peso total del mismo (Fellows, 2007).

### **Pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura**

El alimento absorbe cantidades variables de aceite durante la fritura profunda, lo que hace necesaria la adición continua o frecuente, de nuevas cantidades de aceite. En las freidoras continuas se alcanza rápidamente una condición de estado estacionario de las propiedades del aceite.

Varios investigadores han descrito la pérdida de humedad como un mecanismo de difusión, sin embargo todavía no está claro cómo y cuándo el aceite es absorbido por el producto. La distribución y la cantidad de aceite absorbido se ven afectados por el tratamiento de pre-secado, tiempo de fritura, tratamientos superficiales, la tensión interfacial inicial y el tamaño de la corteza. Se ha demostrado que la tensión interfacial afecta significativamente la absorción de aceite en la fritura de productos de papa, lo que sugiere que el mecanismo para la absorción de aceite se debe a las fuerzas capilares (Krokida y col., 2000b).

Pruebas en papas fritas como material alimenticio, indicaron que la humedad interior se convierte en vapor causando un gradiente de presión y, como la superficie se seca, el aceite se adhiere a la superficie del producto y entra en la superficie en áreas dañadas. Si las papas fritas se retiran de la freidora mientras que su temperatura sigue aumentando, sólo 15% de aceite será absorbido, el resto se quedará en la superficie. Adicionalmente una gran parte de este aceite se introduce en los poros cuando la papa se enfría, y el resto se escurre (Krokida y col., 2000a).

Ziaifar y col. en 2008, mencionan que cuanto más agua se separa de la superficie, más aceite se absorbe. De hecho, cuando se estudia la transferencia másica en el freído, el escape de agua suele estar vinculado a la absorción de aceite. También se ha encontrado que la pérdida de humedad y absorción de aceite están relacionados entre sí y ambas son funciones lineales de la raíz

cuadrada del tiempo de fritura. Se planteó la hipótesis de que el aceite que entra en la rebanada radicaría en los huecos dejados por el agua que se escapa. Por lo tanto, además de los aspectos cuantitativos, la pérdida de agua puede convertirse en una variable explicativa para la transformación y sobre todo la absorción de aceite. De hecho, ya que la deshidratación se produce a una temperatura por encima de 100 ° C, el vapor de agua encuentra puntos débiles selectivos para la adhesión en celdas que conduce a la formación de las vías capilares cada vez mayores en la superficie porosa.

Además, parte de este vapor puede quedar atrapado dentro de los poros como resultado de la restricción de difusión intercelular, calentándose, distorsionando las paredes de los poros y contribuyendo a la porosidad del producto. En consecuencia, algunos estudios han examinado el aumento de la porosidad durante la fritura y la han correlacionado con la cantidad de absorción de aceite. La caracterización de la microestructura del producto parece ser un factor determinante en la descripción de las transferencias a escala macroscópica, tales como la absorción de aceite (Ziaifar y col., 2008).

### **Cambios en el aceite y generación de compuestos derivados**

En cuanto al aceite, éste se oxida debido al calentamiento a las elevadas temperaturas utilizadas en la fritura durante periodos prolongados y en presencia de agua y oxígeno. Ello da lugar a la formación de una variedad de productos, como carbonilos volátiles, hidroxiácidos, cetoácidos y epoxiácidos (Fellows, 2007).

Volátiles: las reacciones oxidativas que implican la formación y descomposición de hidroperóxidos conducen a compuestos tales como aldehídos saturados e insaturados, cetonas, hidrocarburos, lactonas, alcoholes, ácidos, ésteres. Tras el calentamiento del aceite durante 30 minutos a 180 °C, en presencia de aire, pueden detectarse por cromatografía en fase gaseosa productos volátiles primarios de oxidación. La cantidad de productos volátiles varía ampliamente, dependiendo del tipo de aceite, el alimento y el tratamiento térmico.



Compuestos polares no poliméricos de volatilidad moderada: estos compuestos se producen a lo largo de varias rutas oxidativas, en las que participan los radicales alcoxi.

Dimeros y polímeros de ácidos y glicéridos: estos compuestos se generan por combinaciones térmicas y oxidativas de radicales libres. La polimerización produce un aumento sustancial de la viscosidad del aceite de fritura.

Ácidos grasos libres: estos compuestos se producen por hidrólisis de los triacilgliceroles, por el calentamiento en presencia de agua.

Las reacciones descritas son responsables de diversos cambios físicos y químicos observables en el aceite a lo largo de la fritura. Entre estos cambios, cabe citar el incremento de la viscosidad y del contenido en ácidos grasos libres, el desarrollo de un color oscuro, el descenso del índice de yodo y la tensión superficial, la modificación del índice de refracción y un aumento en la tendencia a la formación de espuma (Fellows, 2007).

### **1.3 TEXTURA DE PRODUCTOS CRUJIENTES**

Szczesniak, (2002) define la textura de los alimentos como la manifestación sensorial y funcional de la estructura, propiedades mecánicas y de superficie de alimentos percibidas por los sentidos de la visión, oído, tacto y cinestésicos. De esta definición, se concluye que la textura es una propiedad sensorial por lo que puede ser juzgada, percibida y descrita por el ser humano.

#### **Productos crujientes**

Para muchos productos alimenticios el carácter crujiente denominado “crispy/crunchy” en idioma inglés, es una característica sensorial importante en la que los consumidores basan su apreciación. Ejemplos de estos productos son las galletas, cereales para desayuno, botanas fritas, frutas frescas, entre otros. La

percepción sensorial de los alimentos crujientes es principalmente una función de su respuesta mecánica y la emisión de sonido durante la fractura.

Un conocimiento exacto del significado de estas características sensoriales aún no existe, pero hay un consenso general de que las sensaciones “crispy” /crunchy” se refieren a las propiedades de fractura de los materiales alimenticios. En general productos alimenticios “crispy/crunchy” son difíciles de deformar, pero se rompen con relativa facilidad produciendo un sonido. Se comportan como un material frágil, es decir, el esfuerzo de fractura es pequeño. Generalmente el esfuerzo de fractura es relativamente bajo para materiales sólidos. Se requiere un fallo abrupto del producto durante la masticación entre los molares. Sin embargo, la distinción entre un comportamiento “crispy”/ “crunchy” no es muy clara (Cheng y col., 2007; Luyten y col., 2004).

Entender y definir la terminología para describir las sensaciones asociadas a la textura crujiente difiere según el idioma utilizado. De tal forma que, mientras que en el idioma japonés existen numerosas expresiones (Hayakawa y col., 2012), para la lengua castellana o el inglés son mucho más reducidas siendo “crispy” y “crunchy” para el inglés las generalmente más utilizadas. La diferencia entre estos dos grupos (“crispy” y “crunchy”) fue estudiada por Vickers (1984) que los separó en función de la frecuencia del sonido emitido. Frecuencias altas que producían sonidos agudos se relacionaron con alimentos “crispy” como, por ejemplo, un “chip” de papa y frecuencias bajas se relacionaban con alimentos “crunchy” como, por ejemplo, una almendra (Luyten y col., 2004).

### **1.3.1 Características generales de productos crujientes**

En general se caracterizan por la rotura frágil (a baja deformación) a una fuerza de fractura baja y eventos de fractura distinguibles. También la emisión del sonido es un aspecto importante en la percepción del carácter crujiente. La liberación repentina de energía de deformación durante la fractura de un material frágil provoca la formación de ondas de esfuerzo. Esto hace que la velocidad de

fractura se vuelva muy rápida y se produzcan ondas de sonido audibles de baja frecuencia (10 – 20 kHz), además de ondas no audibles de alta frecuencia (Van Vliet y col., 2007).

Algunos autores diferencian “crispy” de “crunchy” comentando que los productos “crispy” son firmes y quebradizos presentando un fallo abrupto y completo del producto. “Crunchiness” probablemente se refiere a un mecanismo de fallo más complejo que implica la deformación repetitiva y la fractura de capas subsecuentes en una estructura compuesta de celdas. Curvas de esfuerzo-deformación de los productos “crunchy” muestran picos irregulares, posiblemente representando los diferentes eventos de fractura posteriores. Un patrón de distribución desigual puede ser causado por una morfología no homogénea. Para la obtención de los diferentes eventos de fractura distinguibles se requiere la presencia de subunidades estructurales, como las celdas con paredes celulares frágiles, fracturando una a una después de la otra. Durante la masticación este fenómeno puede ser incrementado debido a la complejidad de las deformaciones en la boca. Así, ambas heterogeneidades (la morfología de los alimentos y los procesos durante la masticación) se tienen que tener en cuenta para entender el comportamiento de los alimentos durante la masticación. Probablemente es el caso para el atributo “crunchy”, que requiere una serie sucesiva de eventos de fractura (Luyten y col., 2004).

Ya que la diferencia entre “crispy” y “crunchy” aún no está bien establecida (Luyten y col., 2004; van Vliet y col., 2007) y las definiciones dadas varían entre los diferentes estudios y probablemente entre los diferentes países y productos, solo el término carácter crujiente ó crujiente será empleado.

### **Tipos de productos de textura crujiente**

Los alimentos crujientes pueden subdividirse en cinco grupos distintos. Para los cuatro primeros, el carácter crujiente es el resultado del procesamiento, mientras que para el último grupo es parte de la estructura nativa.

- a) Productos con un bajo contenido en agua preparados ya sea por horneado (galletas), freído (papas fritas, botanas extrudidas) o por fusión y cristalización como las barras de chocolate. Estos productos comparten la característica de tener una estructura que consta de partículas discretas o que se encuentran en estado vítreo, por lo que son frágiles (Luyten y col., 2004).
- b) Productos con una corteza crujiente, que originalmente tenían la misma composición química que el resto de los productos alimenticios (por ejemplo, varios tipos de pan y papas fritas a la francesa). Durante la formación de la corteza, la composición local, especialmente la concentración de plastificante y la distribución, cambia.
- c) Productos con una corteza crujiente, que es el resultado del recubrimiento con otro material, el espesor de capa y su composición pueden variar en un rango bastante amplio (por ejemplo, pescado frito y productos cárnicos).
- d) Productos compuestos con una o varias capas crujientes (por ejemplo, pizza, galletas de chocolate).
- e) Productos celulares secos, están compuestos de paredes celulares rígidas los cuales encierran gas. El tamaño de las celdas dentro del producto y el espesor de las capas que rodean estas celdas son dos características importantes de los productos crujientes (por ejemplo, cereales inflados para desayuno y botanas de cereales inflados). Cuando el producto es fracturado, la rotura de las celdas de menor tamaño resulta en lo que se ha descrito como “eventos distinguibles”, mientras que la rotura de celdas de mayor tamaño produce una superposición de los eventos de sonido (Duizer, 2013).
- f) Frutas y verduras frescas (por ejemplo apio, zanahoria, manzana, papa), que se clasifican como alimentos “húmedo - crujiente” y se relaciona con la presión de turgencia que resulta de la presencia de agua dentro la matriz celular. Una vez que el producto es mordido, la liberación de la presión conduce a la generación de un sonido (Duizer, 2013).

Las diferentes estructuras morfológicas presentes en cada tipo de producto (costras, poros, celdas, capas, partículas) su tamaño, composición y distribución son determinantes para sus características crujientes y su percepción sensorial.

Otro factor determinante en la manifestación de la textura crujiente es la composición global del producto (almidón, proteínas, azúcares, agua, fibras y grasa) y su distribución a través del mismo, la cual no es homogénea.

### **1.3.2 Métodos de prueba de textura en productos crujientes**

Los atributos de calidad de la textura de los alimentos pueden ser evaluados mediante análisis instrumental y/o sensorial. La combinación del tiempo y alto costo son asociados con la percepción sensorial, lo cual ha motivado el desarrollo y el uso generalizado de los ensayos mecánicos empíricos que se correlacionan con las percepciones sensoriales de textura de los alimentos. Con los años, una amplia gama de pruebas instrumentales se han utilizado tanto en la investigación como en la industria para evaluar la textura de los alimentos, y una gran cantidad de esfuerzo se ha dedicado en la mejora de los instrumentos y técnicas de medición para la estimación significativa de propiedades texturales (Chen y col., 2013b).

Diferentes estímulos actúan durante todo el proceso (dinámico) de la masticación para formar la sensación de textura crujiente en el cerebro humano incluyendo la fractura y emisión de sonido, por lo cual otra técnica para estudiar las propiedades texturales de productos crujientes es el análisis del sonido producido durante su deformación (Luyten y col., 2004).

Debido a la relación entre la composición y estructura con las propiedades crujientes, el estudio de éstas se apoya en técnicas auxiliares como diferentes tipos de microscopía, análisis de imágenes, resonancia magnética (RMN), medición de la actividad de agua ( $A_w$ ), temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y calorimetría. Además es de gran interés la búsqueda de correlaciones entre las propiedades sensoriales, mecánicas, acústicas y estructurales.

### 1.3.2.1 Análisis sensorial

Stone y Sidel (2004) definen el análisis sensorial de los alimentos como “el método científico usado para evocar, medir, analizar e interpretar las reacciones a determinadas características de los alimentos tal y como son percibidos por los sentidos de la vista, olfato, tacto, gusto y oído”.

En general, el objetivo primordial de dicho análisis es encontrar un mínimo número de descriptores que contengan un máximo de información sobre las características sensoriales del producto. Este análisis se basa en la detección y la descripción de los aspectos sensoriales cuantitativos por grupos de catadores que han sido entrenados previamente y que siguen una terminología estandarizada para describir el producto. Estos jueces o catadores expertos deben dar valores cuantitativos proporcionales a la intensidad que perciban de cada uno de los atributos evaluados durante el análisis descriptivo (Stone y Sidel, 2004).

Uno de los enfoques es separar las sensaciones en una escala temporal, de modo que la primera respuesta registrada refleje la impresión inicial cuando la muestra es mordida por los dientes frontales; la segunda, indica la sensación cuando el material es transferido a los dientes posteriores y el último describe la sensación de deglución del bolo. Al panelista se le puede pedir que registre el número de mordidas requeridas para formar una masa determinada o volumen para deglutir o para indicar el flujo de saliva producido por el material o comentar sobre la sensación residual en la boca. Así se pueden obtener respuestas táctiles, visuales y auditivas. Debido a la dificultad de catalogar mentalmente tantas impresiones diferentes, es que es útil, si es posible, emplear materiales estándares a los que los usuarios pueden hacer referencia y utilizar para evaluar sus respuestas.

El único sistema más completo para el proceso de medición sensorial del perfil de textura está basado en el trabajo pionero de la Dra. Alina Szczesniak en 1983. Este procedimiento incluye identificar la características texturales percibidas en un producto alimenticio, la intensidad de cada uno y el orden en que estos son

percibidos. Se basa en una serie de clasificaciones. El primer grupo de características texturales está en tres clases principales: características mecánicas, características geométricas y otras (principalmente relacionadas a la humedad y contenido de aceite). Las características se distribuyen después en subclases, con cada característica definida en ambas condiciones físicas y sensoriales (Aguilera y Stanley, 1999).

### **Aplicación y problemática en productos crujientes**

Un problema asociado con la evaluación sensorial es la dificultad de compartir resultados entre diferentes áreas geográficas y regiones culturales debido a los diferentes productos consumidos y la pérdida de significado de los términos descriptivos al traducir de un idioma a otro. Sin embargo, las investigaciones sobre textura no pueden ignorar el enfoque sensorial. Hay pocos estudios que se relacionan con los aspectos metodológicos de la evaluación del carácter crujiente.

Se han reportado diferentes enfoques en la literatura sobre la evaluación del carácter crujiente, los cuales varían en cuanto a la definición del concepto crujiente, el método de prueba, entrenamiento de jueces y materiales de referencia. Roudaut y colaboradores (2002), describen las estrategias implementadas para evaluar el carácter crujiente y un resumen se muestra a continuación.

### **Definición del concepto “crujiente”**

El primer paso consiste en definir claramente el significado del (los) atributo(s) a evaluar tratando de llegar a un consenso entre los panelistas sobre el significado de cada atributo. Para lograr esto, se recomienda en los manuales proporcionar a los jueces una definición. Por lo tanto, en algunos estudios, una definición verbal es dada (Cuadro 1.2), el examen de estas definiciones muestra una gran diversidad de significado. Las definiciones proporcionan explicaciones en

las que deben centrarse los jueces para evaluar el carácter crujiente. Se citan cinco aspectos: estructura del producto intacto, sonidos emitidos a la fractura, fuerza necesaria para aplastar la muestra, cómo el producto colapsa a la fractura y cómo se muestran las piezas después de la fractura. Dependiendo de la definición, algunas características se acentúan con más o menos detalles o se omiten. Por lo general, las definiciones incluyen una descripción de los procedimientos de exploración, es decir, la manera en que la muestra debe ser manipulada (Roudaut y col., 2002).

**Cuadro 1.2** Definiciones del término crujiente y el modo de evaluarlo sensorialmente (Roudaut y col., 2002)

Definición	Localización del panel	Referencia
La fuerza horizontal percibida con la que el producto se separa en dos o más piezas diferentes durante un solo bocado con los incisivos. Se requiere un fallo abrupto y completo del producto.	Estados Unidos de América	Barrett y col., 1994
Colocar una pequeña pieza entre los molares y morder lenta y uniformemente hasta que se produzca una ruptura repentina y continua. Evaluar la velocidad a la que esta ruptura ocurre en pequeños fragmentos utilizando lo más cerca posible la misma tasa de penetración.	Reino Unido	Brennan y col., 1973
Ruidoso al morder, aireado, ligero y que se desmorona. La fractura es progresiva durante la mordida (Traducción del francés).	Francia	Dacremont, 1992
Una combinación del ruido producido y la ruptura del producto, una vez que es mordido por completo a través de los molares posteriores.	Nueva Zelanda	Duizer y col., 1998
Fuerza relativa requerida para penetrar a través de la muestra.	Estados Unidos de América	Jeon y col., 1975
La fuerza relativa percibida utilizada por el crujido (del producto) en la boca.	Estados Unidos de América	Onwulata y Heymann, 1994
Primera mordida: Colocar la muestra entre los incisivos, morder atravesando por completo y evaluar el nivel de ruido más agudo	Estados Unidos de América	Seymour y Hamman, 1998



Si la definición verbal de “crujiente” es relevante no hay necesidad de una mayor investigación sobre el significado de crujiente. Si la definición no es relevante, entonces, a lo mejor, la definición es ineficaz y, en el peor caso, conduce a los jueces a evaluar algunos otros conceptos sensoriales. Conscientes de esta carencia, algunos líderes del panel no proporcionaron a los panelistas una definición verbal, pero les permitió llegar a un consenso durante la formación, al discutir juntos cuando degustan productos. Sin embargo el problema continúa ya que no hay garantía de que dos grupos formados de manera independiente, lleguen al consenso sobre el mismo significado. Por lo tanto, los evaluadores capacitados proporcionan respuestas fiables, pero, la validez de las respuestas, es decir, la capacidad de proporcionar resultados reproducibles entre los grupos formados de manera independiente, podría poner en peligro la propia formación.

Algunos investigadores proponen un enfoque alternativo para superar esta dificultad. En primer lugar, el concepto consensual “crujiente” se mide en la población de interés. Esto se puede lograr, por ejemplo, preguntando a los consumidores que categoricen una amplia gama de productos como “crujiente”, “no crujiente” o limite. Luego, los productos prototípicos se identifican y se utilizan como definición perceptiva para entrenar un panel descriptivo convencional. Al final de la capacitación, la eficiencia de la etapa de aprendizaje se prueba, para comprobar que los conceptos de los panelistas están alineados. Después, los productos prototípicos se identifican y se utiliza como una definición perceptiva para entrenar un panel descriptivo convencional. Al final de la capacitación, la eficiencia de la etapa de aprendizaje se prueba, para comprobar que los conceptos de los panelistas están alineados. Después, el procedimiento conocido del análisis descriptivo se lleva a cabo. De esta manera, la validez de la medida y su fiabilidad son logradas.

La palabra “crunchy” se utiliza para caracterizar algunos productos descritos como “crispy” por otros paneles. La cuestión de si “crunchy” y “crispy” se refieren al mismo concepto sensorial es muy difícil de contestar. La fuerte correlación positiva observada en los estudios donde “crunchiness” y “crispiness” fueron

estimados por el mismo panel, en los mismos productos favorece la hipótesis de dos etiquetas para un concepto único. Sin embargo, otros trabajos sugieren que “crunchy” y “crispy” se refieren a conceptos diferentes. (Roudaut y col., 2002).

### **Definir el modo de prueba**

En general, las definiciones incluyen una descripción de los procedimientos exploratorios, por ejemplo la forma en que la muestra debe ser manipulada. Estos procedimientos también pueden variar (Cuadro 1.2). En algunos estudios, se instruye a los evaluadores para aplastar las muestras, ya sea con sus molares o incisivos. En otros estudios, el panel evalúa el carácter crujiente aplastando o rompiendo la muestra con los dedos. Así mismo, se les instruye en cuanto a las percepciones que deben fijar su atención como la fuerza requerida, el tono y la intensidad del sonido producido durante la ruptura y el número de piezas o fragmentos del material después de la fractura (Cuadro 1.2 y 1.3).

La medición de “crujiente” por medio sensorial no es un proceso estricto. La diferencia entre un concepto sensorial (es decir, el conjunto de percepciones identificados como relevantes para la misma clase) y su etiqueta (es decir, la palabra usada por una comunidad para referirse a él) debe ser reconocida. De este modo, el uso de la misma etiqueta en diferentes estudios, especialmente con panelistas entrenados, no es una garantía de que se mide el mismo concepto sensorial. Por el contrario, diferentes etiquetas podrían haber sido utilizadas para referirse al mismo concepto.

### **Establecer materiales de referencia y para el atributo**

En la década de los 70's y principios de los 80's se empleó el método de estimación de magnitud. En esta técnica, un producto se elige como referencia y se le da una calificación arbitraria. A los evaluadores se les pide calificar las muestras proporcionalmente a esta referencia. En la década de 1980, el análisis descriptivo se hizo popular y fue reconocido como una técnica confiable para

medir las propiedades sensoriales y se convirtió en la técnica de referencia para la evaluación de la naturaleza crujiente y cambió profundamente los protocolos experimentales empleando escalas de intervalos y pequeños grupos de jueces entrenados.

**Cuadro 1.3** Estímulos citados por la definición del atributo crujiente (Roudaut y col., 2002)

Referencias	Ruido	Fuerza	Modo de Fractura	Piezas después de la fractura	Estructura
Barrett y col., 1994		Fuerza horizontal	Abrupto y completo	Dos o más piezas	
Brennan y col., 1973			Repentino y continuo	Pequeños fragmentos	
Dacremont, 1992	Ruidoso		Progresivo	Desmoronado	Aireado y ligero
Duizer, 1998	Ruido		Ruptura		
Jeon y col., 1975		Fuerza relativa			
Onwulata y Heymann, 1994		Fuerza relativa			
Seymour y Hamman, 1988	Agudo				

### Entrenamiento de los jueces

El uso de pruebas sensoriales para establecer los atributos que contribuyen a la calidad de un alimento es complejo. Requiere de tiempo, mucho trabajo y está sujeto a error debido a la variabilidad del juicio humano y, por consiguiente, es costoso. Sin embargo, no existen instrumentos mecánicos o eléctricos que puedan duplicar o sustituir el dictamen humano (Fermín y col., 2009).

Una de las dificultades en la evaluación sensorial es la gestión de las muchas fuentes de variabilidad. Las pruebas deben ser diseñadas de tal manera que se equilibren los entornos de pruebas controladas con la alta variabilidad que es la realidad del consumo normal del producto (Vance y Nolen, 2012).

En muchos estudios, evaluadores no entrenados fueron usados, aunque esta elección metodológica ha sido raramente justificada. Trabajar con

evaluadores no entrenados podría haber sido una manera de evitar la adulteración del concepto “crujiente” debido a la capacitación en condiciones de laboratorio. Tal método requiere trabajar con un mayor número de evaluadores (20 – 50) para compensar la posibilidad que sus conceptos no fueron alineados inicialmente, a comparación del método de estimación de magnitud que se lleva a cabo con un pequeño grupo de panelistas entrenados (alrededor de 10). La cuestión de si, los evaluadores no entrenados son capaces de cuantificar sus percepciones de una manera fiable siguen siendo objeto de debate. Sin embargo, es obvio que los protocolos desarrollados para el análisis descriptivo no pueden trasladarse directamente a los evaluadores no entrenados. Algunos autores utilizan protocolos específicos como la puntuación ó categorización de tareas, que están más adaptados a los evaluadores no entrenados que a la puntuación (Roudaut y col., 2002).

### **Problemas de idioma y culturales**

Estudios sobre el “carácter crujiente” se han llevado a cabo en muchos países, lo que añade dificultades para comparar los resultados debido a la distorsión inherente del significado en la traducción. Además de que el significado consensual de una palabra es culturalmente dependiente, ya que depende del lenguaje pero también de otros hechos culturales como lo son los hábitos alimenticios.

Los resultados de los estudios sensoriales son a menudo difíciles de comparar debido a la confusión entre el concepto y la etiqueta, la falta de homogeneidad en los procedimientos implementados para las evaluaciones sensoriales y las dificultades inherentes a los estudios multiculturales en el campo de la percepción. Por lo tanto, esto podría explicar algunos resultados contradictorios en la literatura sobre el carácter crujiente, especialmente en los estudios que se ocupan de las relaciones entre los datos instrumentales y sensoriales.

### 1.3.2.2 Pruebas mecánicas instrumentales

De manera instrumental la textura se mide en texturómetros, que son instrumentos desarrollados para medir el comportamiento mecánico de los alimentos. Se pueden realizar diferentes tipos de pruebas adaptando dispositivos de medida de diferente geometría.

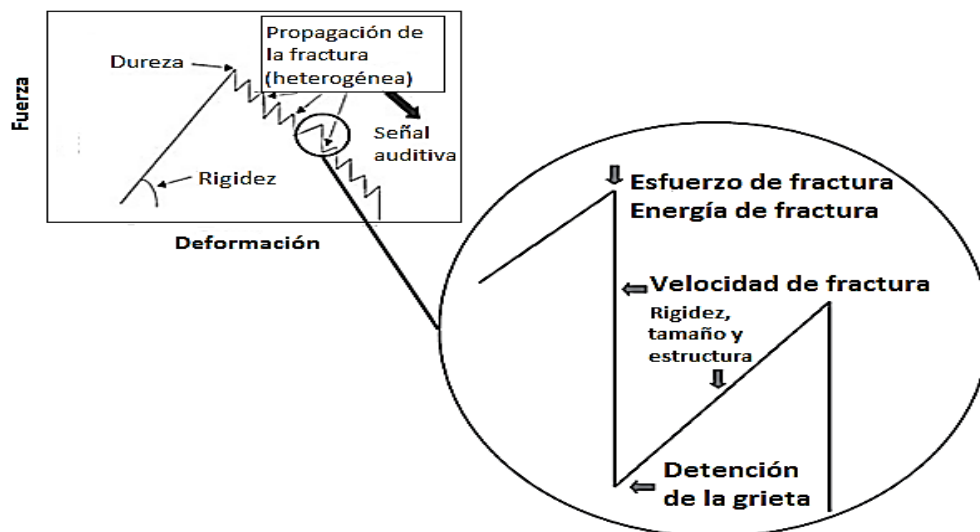
Las pruebas más comúnmente utilizadas en productos crujientes se pueden clasificar en tres grupos: pruebas de punción, de corte y compresión. Estas últimas son probablemente las más comúnmente empleadas debido a sus similitudes con el proceso de masticación. En estas pruebas, la muestra se comprime ya sea entre dos placas paralelas o por un émbolo comprimiendo la muestra con un cilindro o placa. Las muestras pueden ser probadas individualmente o al por mayor cuando estén contenidos en una celda. Se han utilizado ampliamente ensayos de punción, ya que simulan el impacto de los incisivos al morder. En este caso, una sonda cilíndrica o cónica de diámetro pequeño se sumerge en la muestra a una velocidad constante y bastante baja (Roudaut y col., 2002).

Para ambos ensayos de compresión y punción, las sondas son por lo general de forma cilíndrica, mientras que los diámetros de las cabezas son bastante diferentes. En ensayos de compresión, pueden ser de 10 mm, 25 mm, 80 mm y hasta 150 mm como un plato. En las pruebas punción, el diámetro de la cabeza (émbolo) es a menudo más pequeña (2 mm ó incluso 1 mm como una aguja). Con respecto a la velocidad de prueba de punción, es probable que sea de varios milímetros por segundo, por ejemplo 4 mm/s; sin embargo, la velocidad de la sonda de compresión puede variar de 10 mm/m hasta 30 mm/s. (Chen y col., 2013a).

## Eventos durante la fractura de productos crujientes y parámetros mecánicos de fractura

El comportamiento de deformación y fractura de los productos crujientes se estudia a menudo como una función del tiempo a velocidades bajas de deformación con el fin de estudiar los diferentes eventos de fractura por separado.

En una curva fuerza-deformación (Figura 1.2), en general, cada evento de fractura va acompañado con una caída en la fuerza y un evento acústico. La fractura inicia (de nuevo) en cada parte superior de la curva (Figura 1.2), hasta alcanzar los parámetros críticos de fractura: resistencia a la fractura y energía de fractura. La fuerza en este punto máximo depende de la composición del material y la estructura, incluyendo el tamaño de los propios defectos en donde comienza la fractura. Tras este punto máximo en la curva, la fractura se propaga a una cierta velocidad (alta) hasta que se detiene. Esto puede ser debido a la presencia de agujeros en la estructura o fragmentación de la pieza del material estudiado. Además la compresión hace que la fuerza aumente de nuevo con una pendiente que depende de la rigidez y los tamaños y la forma de los elementos estructurales del producto involucrado (Luyten y col., 2004).



**Figura 1.2.** Fuerza-Deformación de un material crujiente, mostrando sus diferentes propiedades (Luyten y col., 2004).

El área bajo la curva guarda cierta relación (dependiendo del trabajo de fractura del material) con el trabajo total realizado. La magnitud de la caída de fuerza en cada evento de fractura también está relacionada con el área de la superficie de fractura generada por la liberación de energía de deformación asociada con la reducción de la fuerza (Luyten y col., 2004).

El Cuadro 1.4 pone de manifiesto que las propiedades del material, así como la estructura del producto a diferentes escalas afectan a la curva de fuerza-deformación (o tiempo).

**Cuadro 1.4** Diferentes partes de eventos de fractura relacionados con la curva fuerza - deformación (Luyten y col., 2004)

<b>Parte del evento de fractura</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Factores Importantes</b>
Carga	Resistencia a la deformación	Composición y estructura del material
Inicio de fractura	Esfuerzo de fractura Intensidad de esfuerzo crítica Energía de fractura	Composición y estructura del material, incluyendo defectos inherentes al inicio de la grieta.
Propagación de la fractura	Velocidad de fractura Trayectoria de fractura	Energía disponible en comparación con la energía de fractura
Detención de la grieta	Heterogeneidades morfológicas Energía disponible para la propagación de la grieta	Estructura del producto Dirección de la carga Detención de la carga (deformación) Disipación de energía

Varios investigadores han utilizado información de la curva de fuerza-deformación obtenida a partir del análisis de fractura mecánica de un producto

crujiente, pero han intentado transformarla en un solo número, aparentemente simple, que por lo general no guarda relación con las propiedades del material y no es más que un constructo matemático (Vincent, 2004).

Algunos investigadores (Luyten y col., 2004; Roudaut y col., 2002; Vincent, 2004) coinciden en que el comportamiento crujiente implica una serie sucesiva de eventos de fractura. El lapso de tiempo entre estos eventos de fractura será en gran medida determinado por la morfología del producto y la velocidad de deformación. La velocidad de crecimiento de grieta puede ser mucho mayor que la velocidad de deformación. Adicionalmente la morfología (espesor y longitud de las capas verticales y horizontales entre las celdas de gas en materiales celulares) determina, en gran medida, la manera por la cual el material se fractura bajo una carga y el esfuerzo de fractura.

La base para entender el comportamiento de fractura de los materiales es que todos los materiales contienen defectos o puntos débiles. Estos llevan a la concentración local del esfuerzo y actúan como puntos de partida para la fractura. Debido a la fractura, el material alrededor de la creciente grieta se relaja y la energía elástica almacenada se vuelve disponible. Esta energía puede ser utilizada, en parte, para crear nuevas superficies en el material fracturado, para la remodelación del material deformado y otros procesos como la deformación permanente, emisión acústica, tanto dentro como fuera de la región audible, generación de calor, etc (Luyten y col., 2004). En un balance de energía general se puede escribir como:

$$W = W' + W_m'' + W_f + W_o''$$

Donde:

$W$  es la cantidad de energía suministrada al material durante la deformación (área bajo la curva)

$W'$  es la parte de la energía de deformación que se almacena elásticamente



$W_m''$  es la parte disipada debido al flujo o la deformación permanente

$W_f$  es la energía de fractura y es igual a la energía de fractura específica por área  $R_s$  ( $J \cdot m^{-2}$ ) multiplicado por el área fracturada

$W_0''$  es la parte de la energía disipada debido a otros procesos.

Los procesos de disipación de energía que no han resultado en fractura, afectan directamente a la cantidad de energía disponible para la propagación de grietas y por lo tanto afectan el proceso de fractura y la emisión de sonido. La energía total que tiene que ser suministrada, antes de la propagación de la fractura debe ser mayor. El producto será menos frágil y probablemente también más duro. Un aumento en el contenido de plastificante local provoca un aumento en la movilidad de las moléculas presentes y por lo tanto un aumento de la disipación de energía. Incluso pequeños cambios en  $W_m''$  y  $W_0''$  afectarán directamente a la fractura y la emisión del sonido, y por lo tanto también la sensación crujiente. Las mediciones de las propiedades de fractura en relación con el carácter crujiente de los productos alimenticios, por lo tanto, tienen que incluir un estudio de los procesos de disipación de energía (Luyten y col., 2004).

Un producto alimenticio crujiente debe ser rígido y quebradizo, mostrar una fractura rápida (propagación de grietas) con baja energía de fractura. El progreso exacto del proceso de fractura es probablemente importante para distinguir entre “crispy” y “crunchy (Luyten y col., 2004).

El comportamiento mecánico y de fractura de la corteza de alimentos crujientes puede ser afectado en gran medida por su morfología en diferentes escalas. La trayectoria de fractura es determinada por la distribución heterogénea del almidón y proteína. Es probable que pase a través de la matriz de la proteína o a través de las conexiones de proteína-almidón. Varios investigadores encontraron que los gránulos de almidón, o restos de éste, permanecen intactos. La concentración local de plastificante afectará a la mecánica de dicha matriz proteica

y de la capa conectiva con el almidón, lo que afecta la propagación de la fractura y la trayectoria de la fractura (Luyten y col., 2004).

Uno de los prerequisites para un comportamiento crujiente es la detención de la propagación de grieta antes de que el producto sea completamente fracturado, el próximo nuevo inicio de fractura puede ocurrir en otra parte del alimento. Esto último es importante para obtener los eventos de fractura sucesivos durante el primer bocado o masticación. Aún no se ha aclarado completamente cuáles elementos estructurales representan esta detención de la propagación de la fractura, y cuales influyen en el reinicio del proceso de fractura determinando de este modo la ruta exacta de fractura. Se puede suponer que las estructuras importantes en esta detención de la propagación de fractura de grietas podrían ser las celdas de aire, especialmente las más grandes, pero también las estructuras más pequeñas como las fases locales que exhiben un comportamiento plástico (disipación de energía).

Posibles estructuras de disipación de energía pueden ser capas de aceite o gotitas, capas débiles que rodean las partículas rígidas como el azúcar o cristales de sal, etc. (Luyten y col., 2004).

### **1.3.2.3 Pruebas acústicas para la evaluación de textura de productos crujientes**

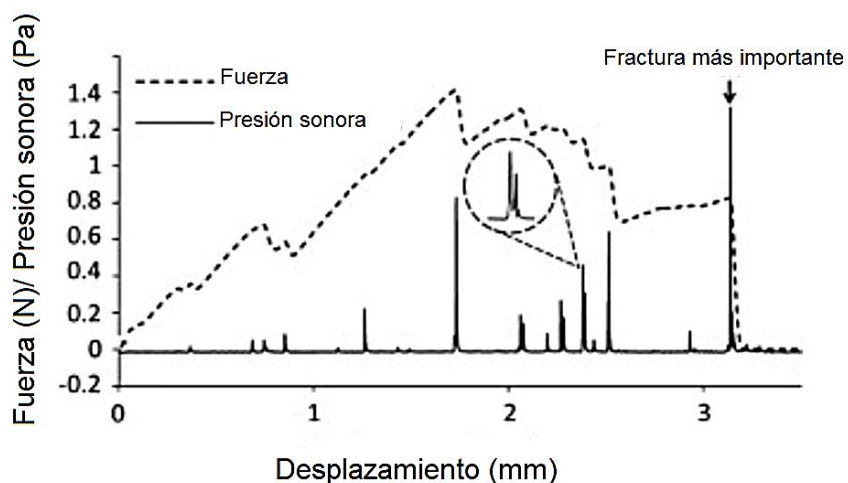
Además de las propiedades mecánicas, el grado en que se oye la ruptura durante la primer mordida y la masticación adicional, influye en la percepción del carácter crujiente. En varios estudios se encontró que el papel del sonido en las percepción sensorial es muy importante (Luyten y col., 2004).

Para generar un ruido audible durante el evento de fractura, la grieta tiene que continuar a una alta velocidad, de tal manera que se formen las ondas de choque con la velocidad del sonido. A partir de la mecánica de fractura se sabe que este conjunto, con ciertos requisitos sobre el balance de energía, rige el proceso de fractura. Por lo tanto para un estudio profundo sobre la base del

comportamiento crujiente se requiere un conocimiento completo de la mecánica de fractura.

El requerimiento de una serie sucesiva de eventos de fractura implica una importante función de la morfología de los productos además del comportamiento de la fractura como tal. En él deberán intervenir la deformación repetitiva y la fractura de "capas" posteriores en el producto. Tal comportamiento a la fractura puede producirse, por ejemplo, en materiales laminares y celulares (Luyten y col., 2004). Las señales acústicas producidas por cada evento de fractura se interfieren entre sí causando que la morfología sea aún más importante.

La caracterización instrumental del sonido se realiza comúnmente mediante la utilización de un texturómetro y un micrófono acoplado al mismo, sometiendo a los alimentos a diferentes deformaciones: compresión, punción o penetración (Castro y col., 2009). Esta combinación permite registrar las propiedades mecánicas y acústicas simultáneamente. La combinación del análisis de fractura y las emisiones acústicas permite una mayor comprensión del carácter crujiente de los alimentos, de forma que se estudia cómo es la fractura y que eventos de sonido (Figura 1.3) la acompañan (Castro y col., 2009).



**Figura 1.3** Ejemplo de la curva de fuerza-deformación y eventos acústicos. El círculo de puntos indica un evento acústico (Chen y col., 2013b).

Los datos recopilados de fuerza – acústicos se presentan en la misma gráfica; de modo que la producción de sonido que ocurre cuando el producto es deformado sea observada. Los eventos acústicos que se producen durante una ruptura estructural se documentan y los datos pueden ser analizados para caracterizar los eventos de sonido (número de eventos de sonido, intensidad del sonido, frecuencia) que se producen debido a la fractura (Duizer, 2013).

Los parámetros acústicos más importantes son el número y magnitud de los eventos sonoros (Chen y col., 2013b). Varela y colaboradores en 2009 describieron que el número de picos de sonido era el mejor parámetro para discriminar diferencias de textura de las muestras.

Algunos aspectos importantes en las características del sonido durante la fractura, son la morfología heterogénea de los productos, lo que resulta en trayectorias de fractura diferentes, así como de la detención de la propagación de grietas, combinados con la naturaleza elástica general del material, causando una alta velocidad de fractura. Con base en la literatura sobre la relación entre el sonido y el carácter crujiente de los alimentos se llegó a la conclusión de que, aunque está claro que el sonido es una característica importante para la percepción sensorial de estos productos, la forma en que afecta esta percepción y el impacto aún no están claras (Luyten y col., 2004).

### **1.3.3 Pérdida de la naturaleza crujiente durante el almacenamiento**

La principal razón de la pérdida de la textura crujiente es el aumento en el contenido de humedad como resultado de la sorción de agua del ambiente o el transporte desde otras partes del producto. Desde el punto de vista polimérico, el efecto deteriorante del incremento de la humedad, es el resultado de la acción plastificante especialmente del agua, además de otros compuestos como azúcares, poli-oles y lípidos. Este efecto produce un aumento del volumen libre en el producto permitiendo una mayor movilidad de las moléculas en el sistema. Este mecanismo implica que la presencia y propiedades de los plastificantes, otros

compuestos de bajo peso molecular y las cadenas laterales de las macromoléculas tienen una influencia significativa en las propiedades crujientes.

Originalmente se tenía la idea de que la pérdida de carácter crujiente por efecto de la acción plastificante del agua estaba gobernada por la transición vítrea, la cual se refiere al cambio del estado amorfo o “vidrioso”(glassy state en idioma inglés) de un polímero a un estado “tipo caucho” (rubbery state en idioma inglés). Por debajo de la temperatura de transición vítrea,  $T_g$ , la movilidad de los componentes macromoleculares en el producto es cercana a cero, dando como resultado un material amorfo con una viscosidad por arriba de un valor especificado (generalmente  $10^{12}$  Pa s). La movilidad del plastificante y otros componentes pequeños en general será también baja; la movilidad será menor para los azúcares que para el agua y se incrementa cuando la temperatura se aproxima a la  $T_g$  de las macromoléculas. Por arriba de la  $T_g$ , las macromoléculas empiezan a moverse en forma aleatoria, dando lugar a un líquido viscoso para macromoléculas no entrecruzadas y un comportamiento tipo gel para polímeros entrecruzados.

Se ha observado que la pérdida del carácter crujiente ocurre en un intervalo de transición de actividad de agua con un comportamiento sigmoïdal. La gráfica del cambio de capacidad calorífica en función de la temperatura también tiene forma sigmoïdal y se ha utilizado para la determinación de la  $T_g$  por calorimetría diferencial de barrido. La plastificación puede causar una disminución de la  $T_g$  por debajo de la temperatura ambiente o la temperatura de la boca y por lo tanto una disminución de la rigidez y el carácter crujiente.

Realmente la  $T_g$  de un compuesto no es una temperatura única sino un intervalo, especialmente en alimentos compuestos por varios ingredientes, cada uno con su propio intervalo de  $T_g$ . Algunos investigadores han mostrado que el inicio de la movilidad de las moléculas de agua tiene lugar mucho antes de la  $T_g$  y que el carácter crujiente ya es afectado por la hidratación debajo de la  $T_g$ . Lo anteriormente descrito muestra que la  $T_g$  no es una buena referencia para

relacionarse directamente con la pérdida del carácter crujiente, pues refleja una transición en las propiedades macroscópicas y solamente proporciona información limitada a escala molecular, inclusive esto es soportado por el hecho de que los consumidores perciben la pérdida de la naturaleza crujiente antes de que se presente un cambio en la  $T_g$ .

El efecto del agua u otros plastificantes generalmente se describe para los productos como un todo, sin considerar su distribución en el producto a escala mesoscópica y molecular y tampoco se hace referencia al estado del agua presente en el producto (cristalizada, ligada o libre).

Durante el almacenamiento ocurren varios procesos a diferentes escalas de longitud que disminuyen el carácter crujiente por acción de los plastificantes como se describe a continuación para el caso de productos compuestos de una costra dura y seca y un interior húmedo.

- Transporte de agua a escala macroscópica del interior más húmedo y suave a la costra dura y seca
- Transporte a escala mesoscópica dentro de la costra a través de los poros por evaporación y condensación
- Transporte a través de la matriz sólida de la costra por difusión, el cual es más lento que a través de los poros
- Acción del plastificante a escala molecular incrementando la movilidad

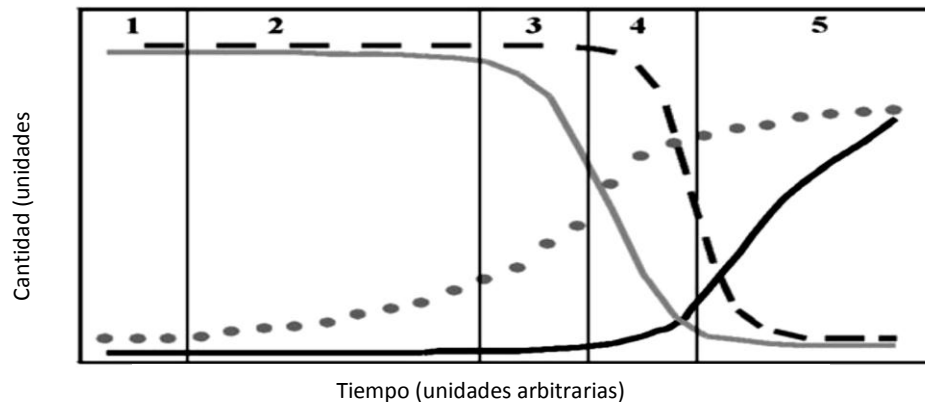
Como el coeficiente de difusión local dependerá de la cantidad de agua y la composición local (principalmente almidón y proteínas), la distribución del plastificante no será homogénea en la matriz sólida.

Un incremento en el contenido de agua causa un aumento de la movilidad de las cadenas laterales y partes del esqueleto de macromoléculas y por lo tanto una disminución de la  $T_g$  y la rigidez en los productos hidratados. El concepto de transición vítrea es una propiedad macroscópica, por lo que aún debajo de la  $T_g$ , algunas pequeñas moléculas, las cadenas laterales y probablemente también

parte del esqueleto macromolecular adquieren movilidad. Estos procesos dependerán de la composición local (a escala mesoscópica y molecular), lo cual puede causar una discrepancia entre la Tg local y la medida en el todo.

La hipótesis sugerida por Luyten y col. (2004), con relación al comportamiento del carácter crujiente es que como resultado de este aumento en la movilidad local, habrá un aumento de la disipación de energía durante el proceso de deformación y fractura a muy bajos contenidos de agua, debajo de la Tg macroscópica; este aumento de disipación de energía dará como resultado una disminución de la velocidad de fractura, de la energía acústica, la cantidad de ruido y un cambio en el tono del sonido producido, lo cual causará un aumento de la energía total y el esfuerzo requeridos para la deformación. Incluso pequeños cambios en la energía de disipación afectarán directamente la fractura, igualmente la emisión de sonido y en consecuencia la percepción crujiente. Estas observaciones no se ajustan con el concepto de que la Tg es el factor determinante para el comportamiento crujiente.

Luyten y col. (2004), sugieren la secuencia de los eventos que ocurren durante el almacenamiento de productos crujientes como se ilustra en la Figura 1.4. La fase 1 es el punto de partida después de la preparación y corresponde a un producto con un contenido de humedad muy por debajo de la transición vítrea. Durante la fase 2, la movilidad de los plastificantes aumenta, pero aún no se aprecia ningún cambio en la distribución de la humedad o en la percepción del carácter crujiente. En la fase 3, la movilidad aumenta más y empieza a afectar el movimiento de las cadenas laterales de las macromoléculas responsables del carácter glassy. Esto estará acompañado de una disminución de la percepción de la naturaleza “crispy”/”crunchy”, pero aún no se aprecian cambios medibles en la rigidez. En la fase 4 el contenido de humedad empieza a aumentar claramente y también la movilidad de los esqueletos de las macromoléculas, dando lugar a una pérdida aún mayor de la sensación “crispy” y una clara disminución en la rigidez.



**Figura 1.4.** Cambios con el tiempo en: naturaleza crujiente (línea gris continua); movilidad de moléculas pequeñas (línea gris punteada); rigidez (línea negra discontinua); humedad (línea negra continua).

## 1.4 LEGUMINOSAS

La utilización de las leguminosas para la alimentación, tanto del ser humano como de los animales, se remonta a tiempos inmemoriales. Su elevado contenido proteico las convierte en una importante y económica fuente de proteínas vegetales, que adquiere especial relevancia en aquellos países en que la ingesta proteico-calórica es baja, y donde han sido consideradas como “carne de los pobres”. Las leguminosas destacan por su contenido en hidratos de carbono y en algunos minerales y vitaminas, así como por la baja cantidad de grasa.

### 1.4.1 Haba

#### a) Origen

El haba (*Vicia faba L.*) es de origen asiático. Afganistán y Etiopia se consideran como los principales centros de origen, aunque algunos autores mencionan que posiblemente el haba es de origen africano, cultivándose desde hace unos cuatro mil años. El cultivo de haba fue introducido a América y Guatemala por los conquistadores españoles y se ha desarrollado únicamente en pocos países de América que poseen altiplano con zonas frías como México, República Dominicana, Brasil, Perú, Paraguay, Colombia, y Bolivia (Aldana, 2010).



## b) Composición

Las semillas de las leguminosas en general en estado maduro tienen un alto contenido en hidratos de carbono, en el caso del haba, puede variar de 50 a 60%, y en las semillas inmaduras puede ubicarse en un intervalo del 4 al 12%. En la semilla seca, el principal constituyente de los carbohidratos es el almidón (39%), además de xilosa (4.7%), celulosa (5%), azúcares solubles en etanol (glucosa); el haba tiene el 10% de sacarosa, 0.3% de rafinosa, 1.7% de estaquiosa, 2.5% de verbascosa y 0.1% de ajuogosa (López y col., 2007).

Las leguminosas son los vegetales más ricos en proteínas, en haba seca el contenido de proteína puede variar de 21 a 32%; en las semillas inmaduras se le puede ubicar en el intervalo de 7 al 9%, dependiendo del grado de madurez y manejo del cultivo; en el haba, 80% de la proteína son albúminas y globulinas, 15% son glutelinas y menos de 5% son prolaminas (López y col., 2007).

El contenido de grasa en las leguminosas es bajo; en el caso del haba, en estado seco puede tener 3%; en las semillas inmaduras, el contenido es insignificante (López y col., 2007).

El haba contiene niveles altos de hierro, fibra, vitaminas A, B, C y potasio.

En el Cuadro 1.5 se presenta la composición promedio de la semilla de haba fresca y seca.

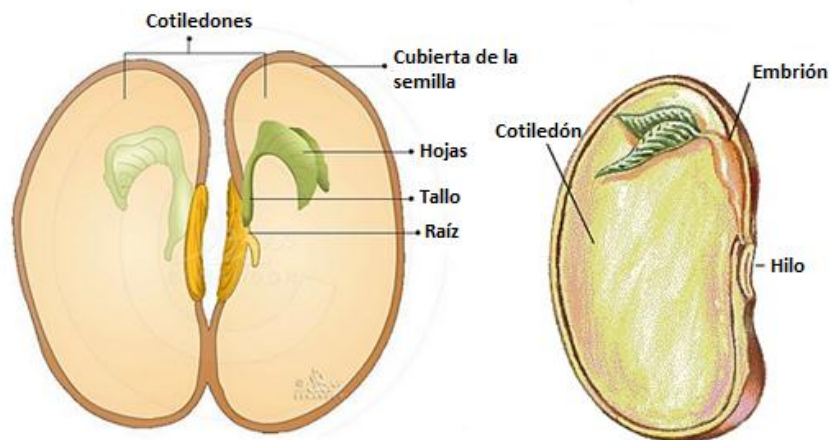
**Cuadro 1.5** Componentes del haba fresca y seca (López y col., 2007)

<b>Componente</b>	<b>Haba fresca</b>	<b>Haba seca</b>
Residuos sólidos	15.16 %	87 %
Proteína	5 %	21 %
Glúcidos	4 %	53 %
Lípidos	0 %	3 %
Cenizas	-	0.3 %

### c) Estructura de la semilla de haba (*Vicia Faba L.*)

La semilla (Figura 1.4), consta de una cubierta o testa, cotiledones que contienen material alimenticio almacenado y un embrión. Todas las semillas están rodeadas por una cubierta llamada testa, la cual puede tener muy distintas texturas y apariencias. Generalmente es dura y está formada por una capa interna y una externa de cutícula, así como una o más capas de tejido grueso que sirve de protección. Estas características le confieren a la testa cierto grado de impermeabilidad al agua y a los gases. Ello le permite ejercer una influencia reguladora sobre el metabolismo y crecimiento de la semilla.

Frecuentemente en la testa se puede observar el micrópilo. En muchas ocasiones está asociado con una cicatriz llamada hilo, que marca el punto donde la semilla se separó del tallo (funículo) por medio del cual estaba adherido al fruto.



**Figura 1.5.** Partes de la semilla de haba (*Vicia Faba L.*)

### d) Propiedades físicas y texturales del haba

La forma y el color del haba varían de modo notable dependiendo de la variedad. Así pues, se encuentran formas de riñón o formas esféricas con cascarillas blancas, verdes, amarillas, púrpúreas e incluso negras. Una característica que comparten todas ellas es el embrión que destaca del resto de la

cascarilla por su color oscuro. Su cáscara es gruesa y resistente. El resto del fruto es de un color marrón claro a café. Dependiendo de la madurez del fruto su textura varía: tiernas cuando son jóvenes, más duras y harinosas cuando maduran (Sala y Barroeta, 2003).

#### **e) Usos**

Las leguminosas en general son muy importantes, ya que son fuente de energía y otros nutrimentos como las proteínas vegetales y carbohidratos complejos. Las semillas de las habas tiernas se utilizan para preparar distintos y muy variados guisos, ya sean solas o en combinación con otros productos; también se utilizan en sopas y ensaladas. La semilla seca sirve para la elaboración de harinas, sopas, galletas, botanas, etc.

En el caso de la semilla inmadura, requiere tratamiento y manejo para desactivar las fenolasas que están presentes en la testa, lo que ocasiona que se produzca el pardeamiento, para lo cual hay técnicas y envases apropiados que disminuyen este tipo de problemas.

Para evitar el pardeamiento en las semillas inmaduras, se recomienda eliminar la testa y la vida de anaquel se prolonga, tomando en cuenta que en varias ensaladas, sopas y platillos se utiliza el haba fresca sin testa. Otra de las formas de preservar el producto, es la deshidratación de las semillas inmaduras, y la vida de anaquel es mucho más amplia. A partir de las semillas inmaduras deshidratadas se elabora harina, que sirve para elaborar sopas; éstas se pueden deshidratar y volverse sopas instantáneas.

Las semillas maduras secas se descascaran, se empacan y se procede a su venta; con esta operación se le da valor agregado al producto y su venta es mejor (López y col., 2007).

## **f) Producción y comercialización nacional de haba**

La producción de esta especie se caracteriza porque la actividad la realizan los pequeños productores tanto privados como ejidatarios y tiene como destino final el consumo de los sectores de menos recursos. De ahí que, aunque no es un producto de exportación que genera grandes cantidades de divisas, sí es un producto que en el aspecto social muestra una gran importancia.

Así mismo, se ha convertido en una importante alternativa en la generación de recursos para un gran número de pequeños productores y ejidatarios, debido a su rentabilidad que se ubica por encima de productos tradicionales como maíz y frijol. Esto hace que dicha leguminosa tenga un importante valor económico en las regiones donde se cultiva y que es factible incrementar su consumo.

La producción de haba en México, tiene como destino principal el mercado nacional, ya que a lo largo de su historia no se ha distinguido por ser una hortaliza que genere importantes cantidades de divisas, y por las características que tiene el cultivo se le pueda comercializar fresca o como semilla seca, eso hace que se pueda encontrar con distintos precios en el mercado.

En cuanto a las regiones productoras, se puede considerar que su cultivo se ha extendido a gran parte de México. En la actualidad la producción de haba se lleva a cabo en cerca de 17 entidades, las principales son estado de México, Puebla, Tlaxcala, Michoacán, Distrito Federal e Hidalgo (López y col., 2007).

En el año de 2013, se sembró una superficie de 7,523.5 hectáreas para la producción de haba fresca (haba verde), y se obtuvo una producción de 42,871.41 toneladas, donde la superficie cultivada se realizó en el ciclo de producción de primera-verano (SAGARPA, 2015).

En países como la India, las leguminosas se preparan tradicionalmente de varias maneras, como semillas enteras o descascarilladas y divididas, conocidas como “dhals”. Garbanzos (*Cicer arietinum*), lentejas (*Lens culinaris*), red gram (*Cajanus cajan*) y green gram (*Vigna radiata*), son algunas de las legumbres de

uso común en la preparación de diversos platillos dulces o salados (Mahadevamma y Tharanathan, 2004), entre los que se encuentran las botanas fritas de grano entero. En México también se consumen chícharo, lenteja y haba frita. Sin embargo el efecto de las condiciones de proceso en las propiedades físicas y texturales de dichos platillos o botanas está poco documentado.

Por lo anteriormente descrito, en este trabajo se estudió el efecto de las condiciones de proceso en las propiedades físicas y texturales de botanas fritas de haba.

En el capítulo II se presenta la metodología experimental seguida para el desarrollo del proyecto.

## II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 2.1 OBJETIVOS

#### 2.1.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de las condiciones de proceso (remojo y freído) en botanas de haba fritas, determinando las condiciones que producen propiedades físicas y texturales características de productos crujientes y baja absorción de aceite.

#### Actividades Preliminares

Clasificar y seleccionar las habas secas de acuerdo a forma, tamaño y color similar, eliminando las dañadas mecánicamente u oxidadas.

#### Objetivo Particular 1

Caracterizar la materia prima (haba seca), en cuanto a sus propiedades físicas (tamaño, densidad, color, textura).

#### Objetivo Particular 2

Determinar las cinéticas de absorción de agua del haba seca a diferentes temperaturas de remojo.

#### Objetivo Particular 3

Evaluar el efecto de la temperatura y tiempo de remojo y freído en las propiedades físicas y texturales de haba frita, por medio de un diseño Taguchi.

### 2.2 MATERIALES

Habas secas (*Vicia Faba L.*) marca “La Merced”

Aceite Vegetal de Canola marca “Capullo”.

Agua marca “E-pura”

## 2.3 MÉTODOS

Las habas fueron seleccionadas manualmente de acuerdo a forma, tamaño y color similar, eliminando las dañadas mecánicamente u oxidadas y retirando impurezas o cuerpos extraños. Las semillas fueron clasificadas manualmente y visualmente por tamaño y se midieron usando un vernier digital (Stainless Hardened, China), posteriormente se almacenaron en botes de PET cerrados a temperatura ambiente (20-25 °C) hasta su uso.

### 2.3.1 Métodos de evaluación de propiedades físicas de habas secas y/o remojadas o fritas

#### 2.3.1.1 Humedad

Se utilizó una termo balanza marca Ohaus modelo MB45 (país de origen Suiza) (Figura 2.1).



**Figura 2.1** Termo balanza Ohaus modelo MB45

El equipo funciona sobre la base del principio termo gravimétrico. Al comienzo de la medida, la termo balanza determina el peso de la muestra, a continuación, la muestra se calienta rápidamente por medio de la unidad halógena desecadora y la humedad se evapora. Durante la operación de desecación, el equipo determina continuamente el peso de la muestra y presenta el resultado (Ohaus, 2011).

#### **Procedimiento**

Se determinó la humedad de las habas secas, después del remojo y después del freído previamente trituradas en un mortero. La temperatura fue de 100°C, con

perfil de secado rápido, criterio de finalización A60 (pérdida de peso menor a 1mg en 60 s) y peso inicial de 2 g. El valor de humedad fue tomado directamente de la pantalla al término de la prueba. Se realizaron 3 repeticiones. Posteriormente se determinó media, desviación estándar y coeficiente de variación.

### **2.3.1.2 Densidad Aparente**

Se utilizó una balanza digital marca Ohaus, modelo Precision plus y como país de origen Estados Unidos de América.

#### **Procedimiento**

Se determinó la densidad aparente en habas secas y después del freído, las habas seleccionadas se pesaron y se registró el valor. En seguida se llenó con las habas pesadas una probeta graduada de 100 ml (Figura 2.2) y se agitó varias veces para asegurar que ocupen el menor espacio posible, en seguida el volumen ocupado se registró. Posteriormente se obtuvo la densidad aparente por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho_{aparente} = \frac{M}{V_a} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde

M: Peso obtenido de haba seca en g

Va: Volumen ocupado por las habas en probeta en 100 ml

Se realizaron 3 repeticiones. Posteriormente se determinó media, desviación estándar y coeficiente de variación.





**Figura 2.2** Medida del volumen en probeta graduada de 100 ml.

### 2.3.1.3 Densidad Real

Se determinó la densidad real en habas secas y después del freído, para esto se utilizó una probeta graduada de 100 ml la cual fue pesada vacía, posteriormente se llenó con las habas hasta la marca, en seguida se pesó la probeta.

Con el objetivo de determinar el peso de las habas, se restó el peso de la probeta vacía menos el peso de la probeta con las habas.

En una segunda probeta graduada se midieron 100 ml de alcohol al 70 %, el cual fue vertido lentamente en la primera probeta hasta llegar a la marca de 100 ml, evitando y/o retirando las burbujas de aire atrapadas, posteriormente se registró el número de mililitros de alcohol que quedaron en la segunda probeta (que es igual al volumen ocupado por las habas) y se obtuvo la densidad real por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho_{real} = \frac{M}{V_r} \quad Ec. 2.2$$

Donde

M: Peso de habas secas en g

Vr: ml de alcohol sobrante en la probeta

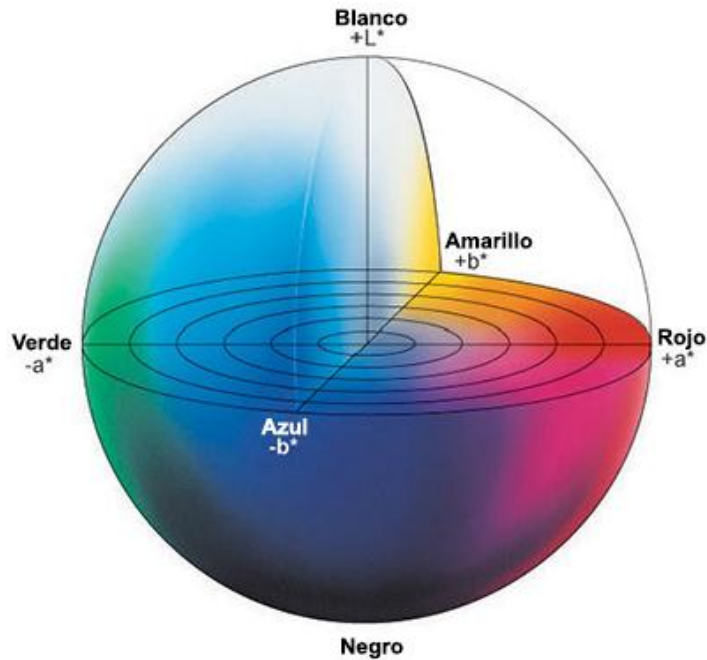
Se realizaron 3 repeticiones. Posteriormente se determinó media, desviación estándar y coeficiente de variación.

#### 2.3.1.4 Color

Se utilizó un colorímetro marca Minolta, modelo CR300 (país de origen Japón).

La cabeza de medición tiene un área de medición de 8mm de diámetro y utiliza iluminación difusa y un ángulo de visión de 0°. Una lámpara de pulsos de xenón en una cámara de mezclado proporciona iluminación en la superficie de la muestra. Seis fotoceldas de silicón altamente sensibles, filtradas para igualar la respuesta del observador estándar CIE (Comission Internationale de l'Éclairage), se usan por el sistema de retroalimentación de doble haz para medir tanto la luz incidente como la reflejada. Las mediciones absolutas pueden desplegarse como valores de triestímulo  $Y_{xy}$  (CIE 1931),  $L^*C^*H^*$ ,  $L^*a^*b$  (CIE 1976), Hunter  $L^*a^*b$  o XYZ; la diferencia de color puede desplegarse como  $\Delta Y_{xy}$ ,  $\Delta L^*a^*b / \Delta E_{ab}$ ,  $\Delta(L^*C^*H^*) / \Delta E_{ab}$  o Hunter  $\Delta(L^*a^*b) / \Delta E$ . Los datos pueden convertirse entre los diferentes sistemas de color y las medidas pueden imprimirse. Se pueden utilizar iluminantes C o  $D_{65}$ . Para mediciones de diferencia de color se pueden almacenar hasta 20 colores base (Konica Minolta, 2013).

La Figura 2.3 es una representación del sólido de colores del sistema  $L^*a^*b$ . El eje  $L^*$  indica luminosidad y va de 0 (negro) a 100 (blanco),  $a^*$  y  $b^*$  son las coordenadas de cromaticidad. En este diagrama (Figura 2.3)  $a^*$  y  $b^*$  indican direcciones de colores:  $+a^*$  es la dirección del rojo,  $-a^*$  es la dirección del verde,  $+b^*$  es la dirección del amarillo y  $-b^*$  es la dirección del azul. El centro es acromático; a medida que los valores de  $a^*$  y  $b^*$  aumentan y el punto se separa del centro, la saturación del color se incrementa (Konica Minolta, 2006).



**Figura 2.3.** Representación del sólido de colores para el espacio  $L^*a^*b^*$  (Konica Minolta, 2006).

### Procedimiento

Se realizó en habas secas, después del remojo y después de freído; para ésto se seleccionaron habas de color y tamaño similar, las cuales se colocaron en un fondo de color similar a estas (hoja de papel amarillo con valores  $L$ ,  $a$ ,  $b$  de 91.95, -9.00 y 42.03 respectivamente). Se calibró previamente con una placa de porcelana incluida en el equipo; se seleccionó el espacio de color  $L^*a^*b^*$ . Se colocó la cabeza de medición (tubo de proyección estándar) sobre la superficie a medir, en seguida se presionó el botón de medición y se obtuvieron 3 disparos con la Fuente de iluminación C. En la pantalla se mostraron los valores de tri estímulo  $L^*a^*b^*$  (CIE 1976).

A partir de estos valores se obtuvieron las diferencias de color con respecto al haba seca  $a^*$ ,  $b^*$  (Ec. 2.3 y 2.4) y la diferencia global de color ( $\Delta a$ ,  $\Delta b$  y  $\Delta E$  respectivamente) los cuales se obtienen de las ecuaciones CIE  $L^*a^*b^*$  2000. Para

el cálculo de la diferencia de color utilizando la Ecuación 2.5, se empleó la calculadora de color disponible en internet (Lindbloom, 2008).

$$\Delta a = \sqrt{a_{ref.}^2 - a_{muestra}^2} \quad Ec. 2.3$$

$$\Delta b = \sqrt{b_{ref.}^2 - b_{muestra}^2} \quad Ec. 2.4$$

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2} + RT \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H} \quad Ec. 2.5$$

Se realizaron 20 repeticiones. Posteriormente se determinó media, desviación estándar y coeficiente de variación.

### **2.3.1.5 Adquisición de imágenes de habas en las diferentes etapas del proceso**

Se adquirieron imágenes digitales de habas secas, después del remojo y después del freído mediante un multifuncional (HP LaserJet 3030, EUA), para la posterior observación de la estructura superficial de las muestras, mediante el software Image-Pro, donde a las imágenes digitales a color se les ajustó el brillo y contraste.

### **2.3.1.6 Medición de propiedades texturales de habas secas y/o remojadas o fritas por medio de una prueba de punción**

Se utilizó un texturómetro marca Stable Micro Systems, modelo TA-XT2 (país de origen Inglaterra).

El equipo cuantifica pruebas empíricas e imitativas, tanto en compresión y tensión. Utiliza una gama de diferentes sondas y accesorios de acuerdo con el método de ensayo requerido. Cada sonda o accesorio está diseñado para un grupo específico de aplicaciones, y se puede conectar al brazo y/o a la base del analizador. Las muestras se colocan ya sea en la base del analizador de textura,

en el brazo, o se llevan a cabo entre dos accesorios. En una prueba simple, el brazo del analizador de textura (el cual contiene la celda de carga), se mueve hacia abajo para penetrar o comprimir el producto, y luego vuelve a su posición inicial (Texturolab, s.f.).

### **Procedimiento**

La prueba de punción se llevó a cabo en habas secas, después del remojo y después del freído. Se seleccionaron 15 habas con un tamaño y color similar, la punción se realizó con un cilindro de acero inoxidable de 3 mm de diámetro, celda de carga de 25 kg, velocidad de 5.0 mm/s, distancia de penetración 8.0 mm, y una velocidad de adquisición de 200 pps como condiciones de operación. Las habas se colocaron sobre una base con una perforación de 5 mm de diámetro.

Mediante el software Texture Expert se obtuvieron las gráficas de fuerza (N) vs tiempo (s) donde se extrajeron: el trabajo de fractura (área bajo la curva), fuerza de fractura (pico de fuerza más alto), carácter crujiente (pendiente inicial), distancia de la primera fractura y número de rupturas o picos de fuerza.

Posteriormente se determinó media, desviación estándar y coeficiente de variación.

#### **2.3.1.7 Absorción de Aceite**

Se determinó a partir de balances de materia considerando la humedad y el peso total de las habas antes y después del freído.

#### **Balance Global**

$$B + A_c - H = C \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde

B: Peso haba después del remojo (g)

C: Peso haba frita (g)

H: Agua perdida por evaporación durante el freído

Ac: Aceite absorbido

Despejando Ac

$$Ac = C - B + H \quad \text{Ec. 2.7}$$

### **Balance de Agua después del freído**

$$B (X_{BH}) - H = C (X_{CH}) \quad \text{Ec. 2.8}$$

Despejando H

$$-H = C (X_{CH}) - B (X_{BH}) \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$H = -C (X_{CH}) + B (X_{BH}) \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde

$X_{CH}$ : Fracción de humedad de haba frita.

$X_{BH}$ : Fracción de humedad de haba después del remojo.

Se calculó H con los pesos y fracciones de humedad de las habas antes y después del freído y su valor se sustituyó en la Ecuación 2.7 para calcular la cantidad de aceite absorbido y se convirtió en porcentaje con relación al peso inicial de haba seca.

### **2.3.2 Cinéticas de absorción**

La absorción de agua durante el remojo se determinó con base en el método reportado por Haladjian y col. (2003). Se pesaron 40 g de habas secas y se colocaron en un vaso de precipitados de 500 ml con una relación de 1:5.6 (habas/agua). El agua de remojo se llevó a la temperatura requerida (25, 35, 50, 60, 70 y 80 °C), colocando el vaso de precipitados en un baño de agua (Brookfield, EX-200) antes de la inmersión de las habas. El peso de las habas se registró cada

10 minutos. Las habas se retiraron del agua de remojo, con un escurrido posterior para eliminar el agua superficial y posteriormente se pesaron. El aumento de peso se registró y se devolvieron las semillas al agua de remojo, se mantuvieron a la temperatura requerida, y el proceso se continuó hasta que la diferencia entre los pesos consecutivos fuera insignificante. Los valores de absorción de agua a cada tiempo, se registraron en  $g_{\text{agua}}/100 g$  de sólidos secos, para esto se siguió la siguiente secuencia de cálculo.

1. Cálculo del contenido inicial de agua en habas secas ( $W_0$ )

$$W_0 = (P_0)(H_0) \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde

$P_0$ : Peso inicial de habas secas (g)

$H_0$ : Fracción de humedad inicial en la habas (g)

2. Cálculo del contenido inicial de sólidos en haba seca ( $W_s$ )

$$W_s = P_0 (1 - H_0) \quad \text{Ec. 2.12}$$

$W_s$ : sólidos en la muestra

3. Cálculo de los g de agua absorbidos/ 100g sólidos secos en cada tiempo

$$M = \frac{(P_i - P_0) \times 100}{W_s} \quad \text{Ec. 2.13}$$

$P_i$ : Peso en el tiempo i (g)

M:  $g_{\text{agua abs}}/100 g_{\text{s.s}}$

Las curvas de absorción de agua ( $g$  agua absorbida/100 g de sólidos secos) en función del tiempo se ajustaron a los modelos de Peleg y Haladjian como se describe a continuación:

## Modelo de Peleg

Abu-Ghannam y McKenna (1997) utilizaron el modelo empírico de Peleg en frijoles, este modelo relaciona el contenido de humedad con respecto al tiempo con la Ecuación 2.14.

$$M = M_0 \pm \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Dónde

M: contenido de humedad ( $g_{\text{agua}}/g_{\text{ss}}$ ) al tiempo t

$M_0$ : contenido inicial de humedad ( $g_{\text{agua}}/g_{\text{ss}}$ )

$k_1$ : constante de velocidad ( $\text{min } g_{\text{ss}}/g_{\text{agua}}$ )

$k_2$ : constante de capacidad de Peleg ( $g_{\text{ss}}/g_{\text{agua}}$ )

En su forma lineal, la ecuación de Peleg se expresa como se indica en la Ecuación 2.15.

$$\frac{t}{M - M_0} = k_1 + k_2 t \quad \text{Ec. 2.15}$$

$k_1$ , es una constante que se relaciona con la velocidad de transferencia de masa, a menor valor de k, mayor velocidad inicial de absorción de agua. El inverso de  $k_1$  es equivalente a un parámetro difusivo.

$$k_1 = \left[ \frac{\text{min} * g_{ss}}{g_{\text{agua}}} \right] \quad \text{Ec. 2.16}$$

$$\frac{1}{k_1} = \left[ \frac{g_{\text{agua}}}{\text{min} * g_{ss}} \right] \quad \text{Ec. 2.17}$$

De la pendiente se obtiene  $k_2$ , la cual es una constante relacionada con la máxima capacidad de absorción de agua, entre más bajo  $k_2$ , más alta la capacidad de absorción de agua.

$$k_2 = \left[ \frac{g_{ss}}{g_{\text{agua}}} \right] \quad \text{Ec. 2.18}$$



La humedad de equilibrio ( $M_s$ ), se calcula con la Ecuación 2.19.

$$M_s = M_0 + \frac{1}{k_2} \quad \text{Ec. 2.19}$$

El ajuste al modelo para el cálculo de las constantes se llevó a cabo por medio del software Curve Expert 1.4 (Microsoft Corporation).

### **Modelo semi empírico de primer orden**

Haladjian y col. en 2003 utilizaron una ecuación diferencial de primer orden para describir el proceso de hidratación de habas a diferentes temperaturas y pH (Ecuación 2.20).

$$M = M_s + (M_0 - M_s)e^{-kt} \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde

M: contenido de humedad ( $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{s.s}}$ ) al tiempo t

$M_s$ : humedad al equilibrio (% en base seca) o humedad de saturación, en base seca ( $\text{g}_{\text{agua abs}}/100 \text{g}_{\text{ss}}$ )

k: constante de velocidad de hidratación ( $\text{min}^{-1}$ )

El ajuste al modelo para el cálculo de las constantes se llevó a cabo por medio del software Curve Expert 1.4 (Microsoft Corporation).

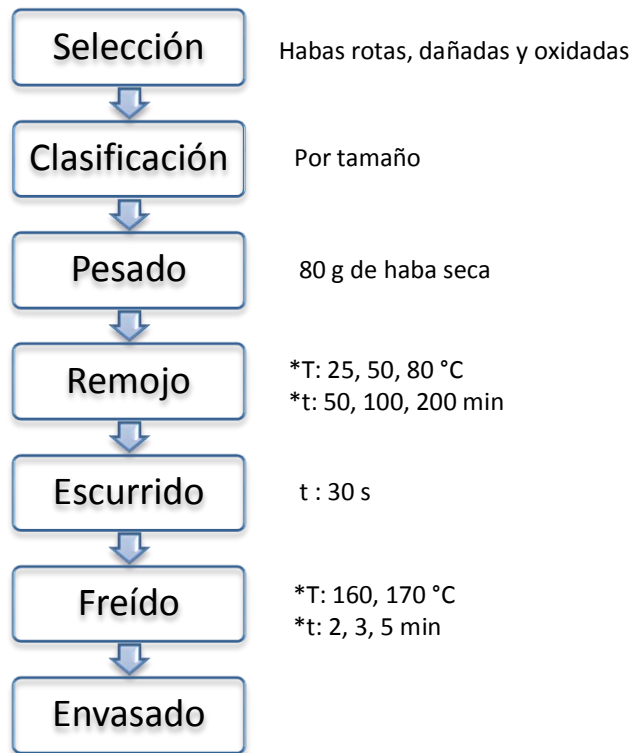
## **2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL**

Las condiciones de proceso utilizadas en remojo y freído, se obtuvieron usando el programa Minitab 14 (Minitab Inc.) aplicando un diseño Taguchi L18 ( $2^{**}13^{**}3$ ), el cual se muestra en el Cuadro 2.1.

**Cuadro 2.1** Condiciones de proceso para remojo y freído

No. Corrida	Temperatura Remojo (°C)	Tiempo Remojo (minutos)	Temperatura Freído (°C)	Tiempo Freído (minutos)
1	25	50	160	2
2			160	3
3		100	160	5
4			170	3
5		200	170	2
6			170	5
7	50	50	170	2
8			170	5
9		100	160	2
10			160	3
11		200	160	5
12			170	3
13	80	50	160	5
14			170	3
15		100	170	2
16			170	5
17		200	160	2
18			160	3

**2.4.1 Obtención del haba frita**



**Figura 2.4.** Diagrama de proceso de frituras de haba (\* corridas Taguchi)

Con las corridas del diseño Taguchi, se obtuvieron habas fritas con el proceso descrito en la Figura 2.4.

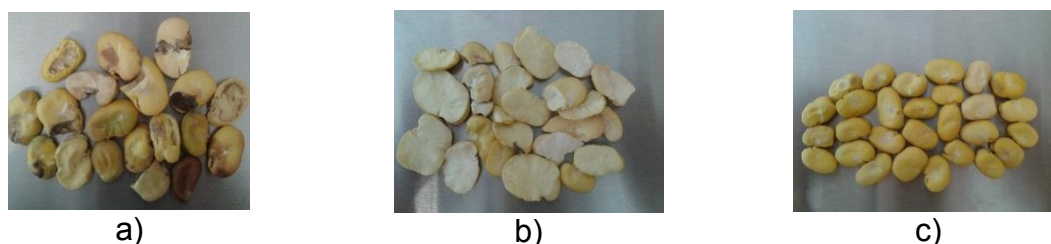
Para el freído se utilizó una freidora eléctrica (Túrmix FT-2, México) con aceite vegetal de canola (marca Capullo) con una relación habas/aceite de 80.25 g/ 3 l, se dejaron enfriar y se les retiró el exceso de aceite mediante papel absorbente, posteriormente se pesaron.

En el capítulo III se presentan y discuten los resultados obtenidos.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 ACTIVIDADES PRELIMINARES

Las habas fueron seleccionadas manualmente de acuerdo a forma, tamaño y color similar, eliminando las dañadas mecánicamente u oxidadas y retirando impurezas o cuerpos extraños (Figura 3.1). Las semillas fueron ordenadas por tamaño y separadas en mitades, se midieron usando un vernier digital (Stainless Hardened, China), seleccionando las de mayor tamaño. Las dimensiones de las habas seleccionadas y rechazadas se muestran en el Cuadro 3.1. Las habas seleccionadas se almacenaron en botes de PET cerrados a temperatura ambiente (20-25 °C) hasta su uso.



**Figura 3.1** Habas rechazadas a) Habas oxidadas, b) Habas rotas, c) Habas pequeñas

En el Cuadro 3.1 se muestra las dimensiones de las habas seleccionadas y rechazadas por tamaño donde las habas seleccionadas mostraron un largo, ancho y espesor de 24.9, 16.1 y 5.3 mm respectivamente. El Cuadro 3.2 muestra las propiedades físicas del haba seca como son la humedad, color y densidad real y aparente.

**Cuadro 3.1** Dimensiones de habas seleccionadas y rechazadas por tamaño

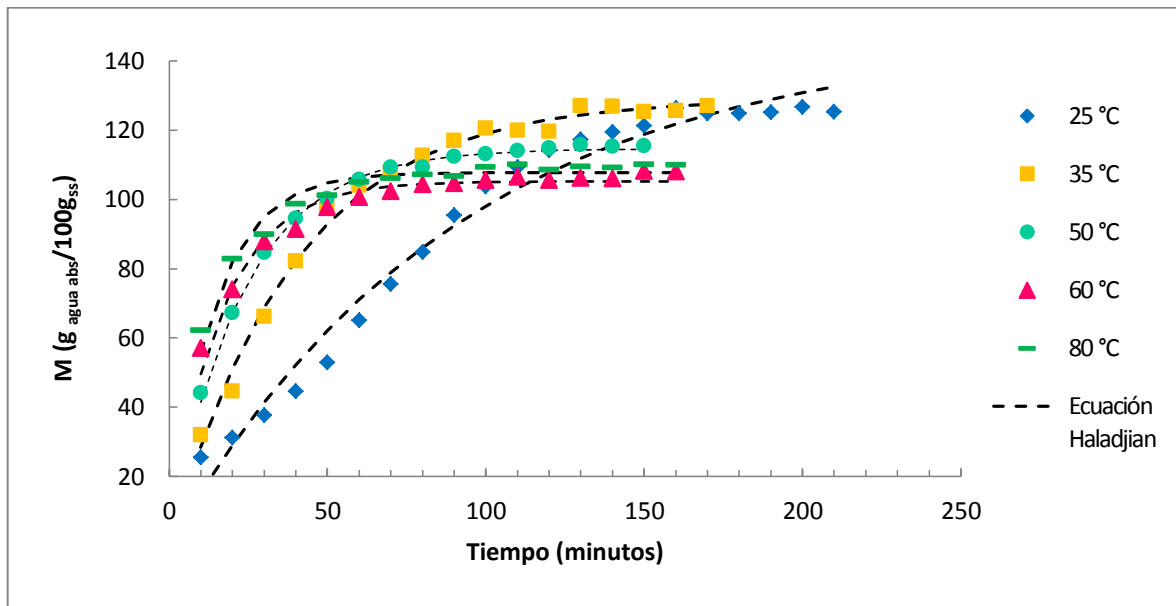
	Habas seleccionadas			Habas rechazadas		
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
Promedio	24.89	16.07	5.35	14.75	9.89	5.28
C.V (%)	5.46	6.27	9.69	7.09	6.18	18.20

**Cuadro 3.2** Propiedades físicas del haba seca seleccionada

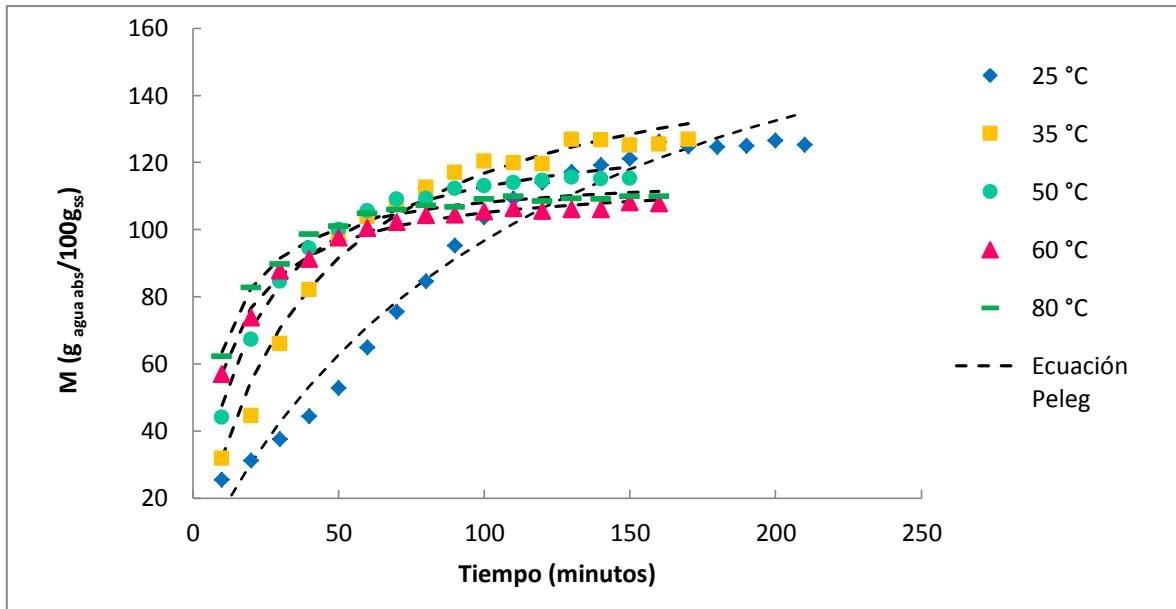
	Humedad (%)	Color			Densidad aparente (g/ml)	Densidad real (g/ml)
		L	a	b		
Promedio	11.62	70.26	-2.06	45.4	0.58	1.13
C.V (%)	0.87	-	-	-	0.90	1.38

### 3.2 CINÉTICAS DE ABSORCIÓN

Las curvas de absorción a diferentes temperaturas para los modelos de Haladjian y Peleg se ilustran en las Figuras 3.2 y 3.3 respectivamente, las cuales se caracterizan por una fase inicial rápida de absorción, seguida de una fase más lenta hasta llegar al equilibrio. En general, la velocidad de absorción de agua fue más alta para los primeros 30 minutos, y pasando las 2 h, la velocidad se redujo a un nivel aún más bajo, especialmente a altas temperaturas. Como se muestra, a altas temperaturas de remojo la muestra llega al equilibrio más rápido (100 min) que a bajas temperaturas (180 min).



**Figura 3.2** Curvas de absorción de agua a diferentes temperaturas para el modelo de Haladjian



**Figura 3.3** Curvas de absorción de agua a diferentes temperaturas para el modelo de Peleg

Las constantes obtenidas al ajustar las curvas a los modelos de Haladjian y Peleg se muestran en el Cuadro 3.3.

**Cuadro 3.3** Modelos de Haladjian y Peleg (entre paréntesis los coeficientes de variación)

Haladjian				Peleg				
Temperatura (°C)	Ms (g <sub>agua</sub> abs/100g <sub>ss</sub> )	k (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	k <sub>1</sub> (min g <sub>ss</sub> /g <sub>agua</sub> )	k <sub>2</sub> (g <sub>ss</sub> /g <sub>agua</sub> )	Ms (g <sub>agua</sub> /100g <sub>ss</sub> )	1/k <sub>1</sub> (g <sub>agua</sub> /min g <sub>ss</sub> )	R <sup>2</sup>
25	139.967 (7.24)	0.011 (5.61)	0.992 (0.04)	0.545 (2.12)	0.005 (12.12)	193.524 (11.96)	1.837 (2.12)	0.988 (0.01)
35	125.136 (4.44)	0.024 (7.57)	0.998 (0.07)	0.245 (13.15)	0.006 (0)	156.098 (3.92)	4.108 (13.34)	0.995 (0.21)
50	115.722 (1.28)	0.044 (0.65)	0.999 (0.10)	0.126 (3.37)	0.007 (1.91)	133.610 (1.15)	7.911 (3.02)	0.997 (0.01)
60	104.742 (0.66)	0.053 (20.28)	0.995 (0.03)	0.107 (24.74)	0.009 (4.404)	116.514 (0.86)	9.647 (24.74)	0.999 (0.04)
80	107.914 (0.15)	0.070 (2.34)	0.994 (0.10)	0.073 (1.94)	0.009 (0)	117.347 (0.09)	13.696 (2.35)	0.999 (0.03)

La humedad de equilibrio ( $M_s$ ) disminuyó para ambos modelos conforme la temperatura aumentó de 25 a 60 °C, entre 60 y 80 °C no se encontró diferencia. Resultados similares fueron encontrados por Sayar y col. (2001) en garbanzo a temperaturas entre 20 y 100 °C. Haladjian y col. (2003) en habas remojadas a pH 6, entre 20 y 50 °C no encontraron diferencias importantes en cuanto a  $M_s$  la cual se encontró alrededor de 120 % en base seca, sin embargo para 65 °C ésta disminuyó a 108 %. Abu-Ghannam y McKenna (1997) encontraron disminución de  $M_s$  en frijoles rojos remojados al aumentar la temperatura de 20 y 60 °C, pero cuando los frijoles fueron sometidos a un blanqueo a 100 °C la humedad de equilibrio no fue afectada por la temperatura. Sin embargo, Shafaei y col. (2014) encontraron que en garbanzos no hubo diferencia en la humedad de equilibrio a temperaturas de 5 a 45 °C, mientras que en diferentes variedades de frijoles la humedad de equilibrio aumentó en el mismo intervalo de temperaturas.

Shafaei y col. (2014) y Turhan y col. (2002) explican que el efecto diverso en  $M_s$  por el efecto de la temperatura se debe a las diferencias fisiológicas y morfológicas entre las semillas y a la pérdida de sólidos solubles durante el remojo.

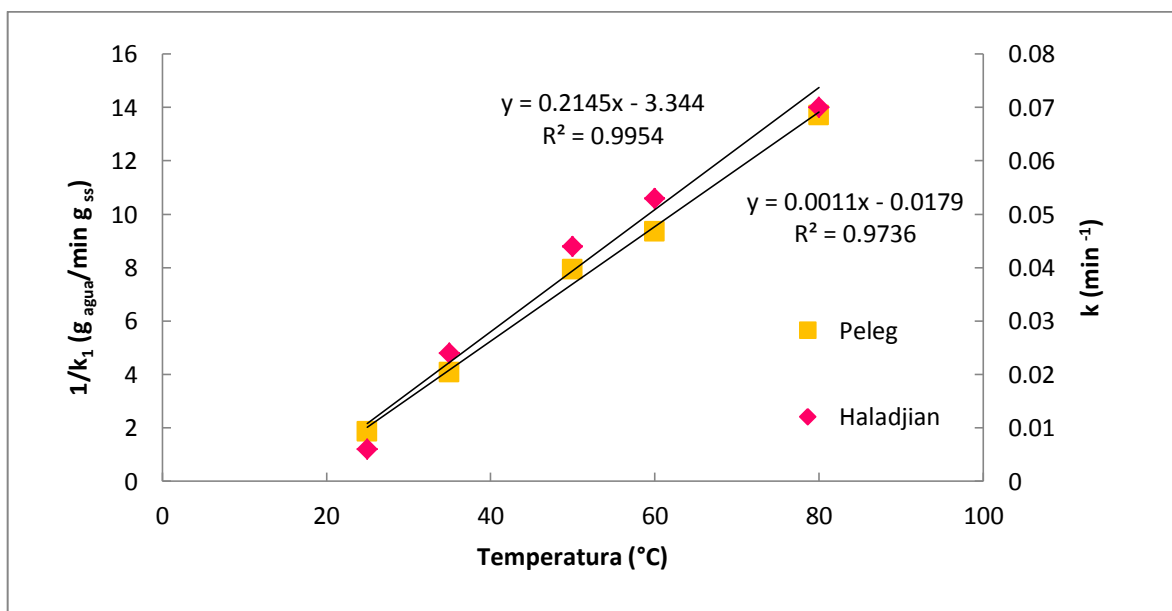
Las constantes de velocidad de absorción para los modelos de Haladjian y Peleg ( $k$  y  $1/k_1$  respectivamente) aumentaron conforme se incrementó la temperatura (Cuadro 3.3), tendencias similares fueron encontradas por Haladjian y col. (2003) en habas, Abu-Ghannam (1998) en frijoles rojos, Abu-Ghannam y McKenna (1997) en frijoles rojos y Turhan y col. (2002) en garbanzos.

Shafaei y col. (2014) explican estos hallazgos con el hecho de que temperaturas más altas de remojo dan como resultado la gelatinización y, posteriormente, la expansión y el ablandamiento de la semilla. Por lo tanto, más poros y grietas se abren y, finalmente, se incrementa la transmisión de agua a través de la semilla.

Haladjian y col. (2003) comentan que varios factores influyen en la rápida absorción de agua inicial de las semillas como es el llenado de los capilares en la superficie de sus cubiertas y el descenso de la tasa de hidratación en las etapas

posteriores que se relacionan con los efectos combinados del aumento de las tasas de extracción de materiales solubles y menor absorción de agua debido posiblemente al llenado de los capilares y espacios libres con agua. Otro factor importante es la superficie de la semilla ya que ésta, gobierna el grado de hidratación, este hallazgo indica que la temperatura juega un papel fundamental en la modulación de la plasticidad y, por tanto, las propiedades de barrera de la cubierta. La inmersión de las semillas a temperaturas a partir de 50 °C, mejora la conversión de la cubierta de la semilla en material similar al caucho y esto permite la rápida difusión de agua entre los cotiledones.

La Figura 3.4 muestra que las constantes de velocidad de ambos modelos presentan una tendencia de aumentar de manera lineal con respecto a la temperatura.

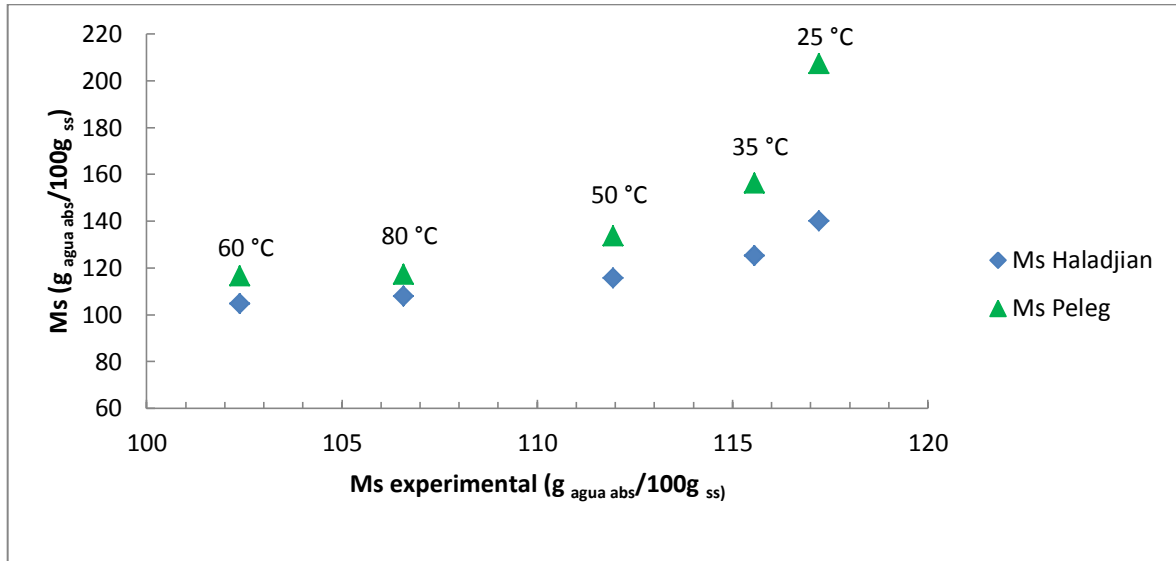


**Figura 3.4.** Constantes de velocidad de hidratación ( $k$ ,  $1/k_1$ ) vs temperatura

La Figura 3.5 muestra la relación de la humedad de equilibrio experimental con respecto a la humedad de equilibrio obtenida con ambos modelos, observándose que con el modelo de Peleg se obtienen valores de  $M_s$  más altos que con el de



Haladjian especialmente a bajas temperaturas. Además ambos modelos la subestiman particularmente entre 25 y 50 °C.



**Figura 3.5.** Humedad de saturación experimental vs Humedad de saturación calculada para Haladjian y Peleg

Como se ha visto, en cuanto al análisis matemático del modelo de Peleg además de su simplicidad y fácil manejo, ha sido validado en el modelado de fenómenos de absorción de humedad para una gran cantidad de materiales tales como garbanzos, lentejas, habas, frijoles, avellanas y hojas (Paredes y col., 2012).

Ambos modelos (Haladjian y Peleg) muestran una tendencia similar, sin embargo, se llega a la conclusión de que el modelo de Haladjian es el que se ajusta mejor y sugiere que es adecuado para describir la absorción de agua durante el remojo de habas, ya que presenta  $R^2$  más próximas a 1.

Para el estudio de la influencia de las variables de proceso en las propiedades físicas y texturales del haba frita se seleccionaron las temperaturas de remojo de 25 °C (como referencia) y de 50 y 80 °C por tener mayor velocidad de absorción.

### **3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DESPUÉS DEL REMOJO Y DESPUÉS DEL FREÍDO**

#### **Humedad**

En el Cuadro 3.4 se muestra que la humedad después del remojo aumentó conforme incrementan la temperatura y tiempo de remojo, en un intervalo de 37.8 a 61.5 % de humedad. La humedad después del freído a la temperatura de remojo de 25 °C varió de 2.9 - 14.5%, mientras que para 50 °C fue de 1.9 - 16.9 % y finalmente para 80 °C varió de 1.9 a 15.6 % de humedad. Así mismo, se puede observar que tiempos altos de remojo (200 min) y tiempos cortos de freído (3 min) dan como resultado altos valores de humedad después del freído ya que no se evapora toda el agua absorbida dentro de la semilla, por el contrario a tiempos cortos de remojo (50, 100 min) y mayores tiempos de freído (5 min) se obtiene una menor humedad después del freído.

#### **Densidad real y aparente**

En el Cuadro 3.4 se muestran los valores de la densidad real y aparente obtenida para las habas fritas bajo las diferentes condiciones de proceso, donde se puede observar que después del proceso, la densidad disminuye drásticamente en comparación del haba seca, y se ve afectada por las variables de proceso. Los fenómenos de transferencia de masa que tienen lugar durante la fritura afectan significativamente la densidad, ya que la pérdida de agua tiende a incrementarla, mientras que el aumento de aceite tiende a disminuirlo. Así mismo, la temperatura del aceite afecta significativamente la densidad; esto puede explicarse por el mayor contenido de aceite y menor contenido de agua dentro del material al elevar la temperatura, ya que se produce la vaporización del agua, el desarrollo de poros de aire y la absorción de aceite (Krokida y col., 2000a).

**Cuadro 3.4** Propiedades físicas de habas después del remojo y después del freído (entre paréntesis los coeficientes de variación)

T Remojo (°C)	t Remojo (minutos)	T Freído (°C)	Tiempo Freído (minutos)	Humedad Remojo (%)	Humedad Freído (%)	Densidad Aparente (g/ml)	Densidad Real (g/ml)	Agua evaporada (%)
Haba seca						0.58 (0.90)	1.13 (1.38)	-
25	50	160	2	37.75 (3.86)	4.80 (5.81)	0.41 (0.50)	0.96 (1.40)	92.03
		160	3		2.90 (3.06)	0.34 (0.99)	0.91 (6.06)	95.4
	100	160	5	51.59 (1.09)	4.05 (4.86)	0.34 (0.73)	0.86 (0.92)	95.9
		170	3		5.32 (4.04)	0.33 (0.65)	0.84 (3.29)	93.8
	200	170	2	54.43 (0.67)	14.53 (2.63)	0.34 (0.97)	0.80 (2.54)	84.5
		170	5		2.96 (5.31)	0.33 (0.90)	0.74 (0.07)	90.8
50	50	170	2	52.12 (1.57)	9.97 (1.63)	0.33 (0.96)	0.71 (3.13)	88.7
		170	5		1.86 (3.91)	0.37 (0.42)	0.82 (6.17)	98
	100	160	2	56.95 (0.84)	16.87 (4.53)	0.32 (1.25)	0.92 (0.43)	82.2
		160	3		11.50 (3.16)	0.32 (0.67)	0.39 (5.79)	88.8
	200	160	5	59.95 (0.73)	4.35 (1.48)	0.34 (0.64)	0.87 (6.41)	96.3
		170	3		8.31 (0.57)	0.32 (0.66)	0.79 (0.65)	92.7
80	50	160	5	56.34 (0.53)	2.80 (4.64)	0.34 (0.54)	0.89 (1.33)	97.7
		170	3		6.78 (3.38)	0.36 (0.53)	0.76 (1.57)	93.5
	100	170	2	57.91 (0.96)	10.89 (4.36)	0.34 (0.51)	0.91 (6.09)	89.9
		170	5		1.95 (2.24)	0.36 (0.84)	0.75 (5.21)	98.4
	200	160	2	61.48 (0.28)	15.58 (3.28)	0.34 (0.43)	0.82 (3.78)	85
		160	3		9.93 (2.91)	0.36 (0.30)	0.82 (2.66)	91.3

Nimkar y Chattopadhyay (2001) encontraron en semillas de green gram (*Vigna radiata*, leguminosa originaria de la India) que la densidad de la semilla seca disminuía con el acondicionamiento a diferentes niveles de humedad (8-14%) de 807 a 708 kg/m<sup>3</sup>, lo cual atribuyen al hecho de que el aumento de masa debido a la ganancia de humedad en la semilla fue baja en comparación con la expansión volumétrica. En esta misma semilla sometida a remojo y freído a diferentes condiciones, Phule y Annapure (2013) encontraron menores densidades

aparentes ( $367 - 572 \text{ kg/m}^3$ ) confirmando lo encontrado en este trabajo, con respecto a la influencia del remojo y freído en la densidad.

Vitrac y col. (2000) mencionan que durante el freído, la alta disponibilidad de calor y el bajo espesor del material alimenticio dan lugar a una alta densidad de flujo de calor (por ejemplo, 4-20 litros de vapor/s para 1 kg de chips de papa de 2 mm de espesor). La intensa vaporización causa un esfuerzo alto que induce a que el material: i) se expanda si es deformable (comportamiento visco elástico) y su permeabilidad al vapor es baja, ii) se produzcan grietas si es rígido y su permeabilidad al vapor es baja, iii) se colapse o se encoja en otros casos (chips o papas a la francesa).

En el caso de las habas de este estudio, el estado antes del freído fue diferente, pues se tenía un contenido de humedad de 37.8 a 61.5 % (Cuadro 3.4) lo cual influyó notablemente en su deformabilidad y permeabilidad al vapor. Así mismo, se supone que la velocidad de evaporación varió con la carga inicial de agua y temperatura de freído, dando como resultado pérdidas de agua que variaron entre 82.2 – 98.4 %.

En el Cuadro 3.4 se muestra que la mayor densidad aparente y real (0.41 y 0.96 g/ml respectivamente) se obtuvo con los menores tiempos y temperaturas de remojo (25 °C, 50 minutos) y freído (160 °C, 2 y 3 minutos), donde el material fue más rígido y no hubo oportunidad de expansión.

En la presente investigación no parece haber una relación clara entre la densidad y el contenido de humedad final o absorción de aceite, y tampoco se puede relacionar con los fenómenos mencionados por Vitrac y colaboradores en 2000.

Con respecto al análisis estadístico, en el Cuadro 3.5 se muestra que para la humedad después del remojo, solo la temperatura influyó de manera de significativa y tuvo un mayor porcentaje de influencia; por otro lado para la humedad después del freído la condición de proceso que presentó mayor

influencia fue el tiempo de freído seguido por el tiempo de remojo, por el contrario las temperaturas de remojo y freído no tuvieron efecto significativo.

Tanto para la densidad aparente y real, ninguna variable tuvo efecto significativo sin embargo, el tiempo de remojo tuvo un mayor porcentaje de influencia en la densidad aparente y la temperatura de remojo en la densidad real.

**Cuadro 3.5** Influencia de las condiciones de proceso en las propiedades físicas de habas fritas. Resultados del análisis estadístico.

Variable	Nivel	Humedad después del remojo (%)		Humedad después del freído (%)		Densidad Aparente (g/ml)		Densidad Real (g/ml)	
		Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)
Temperatura de remojo (°C)	25	47.9 <sup>a</sup>	<b>47.9</b>	5.7 <sup>a</sup>	7.5	0.35 <sup>a</sup>	13	0.85 <sup>a</sup>	12.5
	50	56.3 <sup>a, b</sup>		8.9 <sup>a</sup>		0.33 <sup>a</sup>		0.75 <sup>a</sup>	
	80	58.5 <sup>b</sup>		7.9 <sup>a</sup>		0.35 <sup>a</sup>		0.83 <sup>a</sup>	
Tiempo de remojo (min)	50	48.7 <sup>a</sup>	39.2	4.7 <sup>a</sup>	<b>17.7</b>	0.36 <sup>a</sup>	25.2	0.84 <sup>a</sup>	4.5
	100	55.5 <sup>a</sup>		8.5 <sup>b</sup>		0.33 <sup>a</sup>		0.78 <sup>a</sup>	
	200	58.6 <sup>a</sup>		9.3 <sup>b, c</sup>		0.34 <sup>a</sup>		0.81 <sup>a</sup>	
Temperatura de freído (°C)	160	-	-	8 <sup>a</sup>	1	0.34 <sup>a</sup>	0.50	0.76 <sup>a</sup>	2.1
	170	-	-	7 <sup>a</sup>		0.34 <sup>a</sup>		0.79 <sup>a</sup>	
Tiempo de freído (min)	2	-	-	12.1 <sup>a</sup>	<b>61.4</b>	0.35 <sup>a</sup>	5.9	0.76 <sup>a</sup>	12.2
	3	-	-	7.5 <sup>b</sup>		0.34 <sup>a</sup>		0.75 <sup>a</sup>	
	5	-	-	2.9 <sup>c</sup>		0.35 <sup>a</sup>		0.82 <sup>a</sup>	

(Los valores con el mismo superíndice fueron estadísticamente iguales con  $\alpha$ : 0.05, al realizar la prueba de Tukey). Los porcentajes de efectos significativos están marcadas con negritas.

### 3.4 ABSORCIÓN DE ACEITE

El mecanismo de absorción de aceite es un aspecto importante en el área de la fritura y ha sido examinado por muchos investigadores. Varios estudios demostraron que la mayor parte del aceite no penetra en el producto durante la fritura, sino durante el período de enfriamiento cuando se retira el producto de la freidora (Krokida y col., 2000b). En el presente trabajo la absorción de aceite se determinó después de retirar las muestras de la freidora y eliminar el exceso de aceite de la superficie con papel absorbente, mediante balances de masa, por lo que el mecanismo de absorción de aceite no fue examinado, los valores de absorción de aceite obtenidos se muestran en el Cuadro 3.6.

**Cuadro 3.6** Efecto de las condiciones de remojo y freído en la absorción de aceite

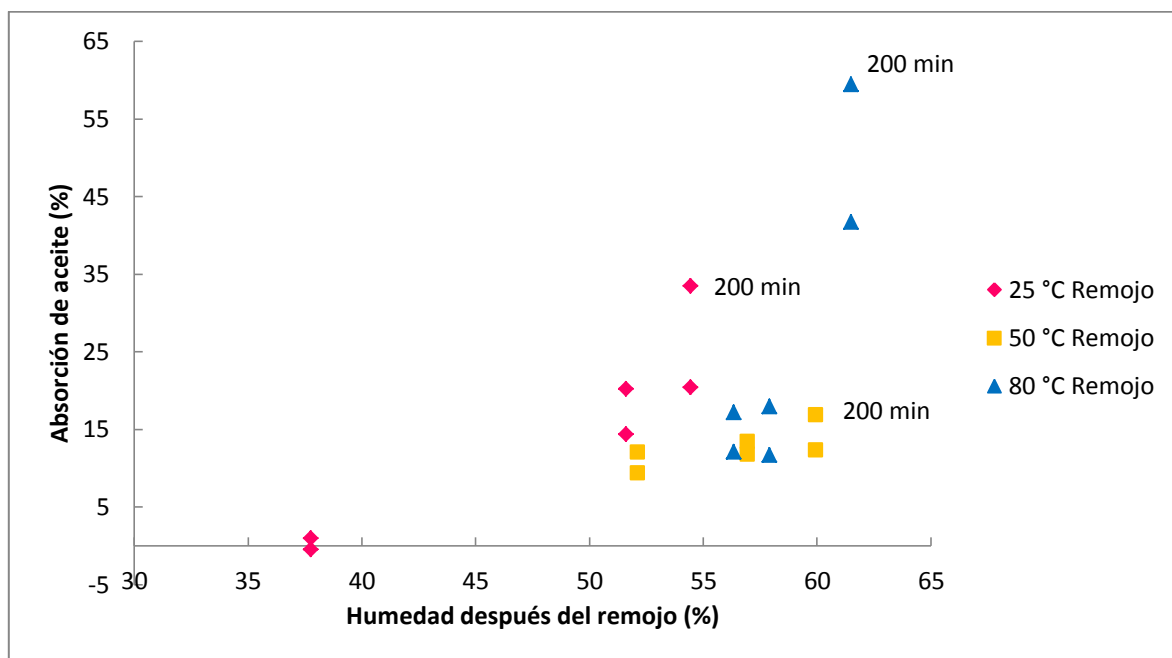
Temperatura Remojo (°C)	Tiempo Remojo (minutos)	Temperatura Freído (°C)	Tiempo Freído (minutos)	Absorción de aceite (g aceite/ 100 g haba seca)
25	50	160	2	-0.48
		160	3	0.94
	100	160	5	14.34
		170	3	20.21
	200	170	2	33.48
		170	5	20.41
50	50	170	2	9.37
		170	5	12.04
	100	160	2	13.39
		160	3	11.75
	200	160	5	16.83
		170	3	12.30
80	50	160	5	17.20
		170	3	12.08
	100	170	2	11.65
		170	5	17.93
	200	160	2	59.42
		160	3	41.68

El porcentaje de absorción de aceite varió de 0.9 – 59.4 %, en el caso de la haba remojada a 25 °C por 50 minutos y freída a 160 °C por 2 minutos, la absorción dio negativa indicando que hubo pérdida de la grasa natural del haba seca (Fennema, 1993). Por otro lado, el haba remojada a 80 °C por 200 minutos y freída a 160 °C por 2 minutos mostró la mayor absorción de aceite (59.4 %) debido a que su humedad después del remojo fue la más la alta y las condiciones de freído no fueron suficientes para eliminarla con el aumento del tiempo, provocando una alta absorción de aceite. Phule y Annapure en 2013 obtuvieron resultados similares en green gram y garbanzos donde al incrementarse el porcentaje de absorción de agua de 43.1 a 47.6 la absorción de aceite aumentaba de 19.12 a 24.97 % a una temperatura de freído de 150 °C, tendencias similares se encontraron a mayores temperaturas de freído.

La Figura 3.6 muestra que la absorción de aceite aumenta conforme incrementa la humedad después del remojo y que por arriba de 52 % de humedad después del remojo se puede incrementar notablemente la absorción de aceite dependiendo de las condiciones de freído. Además se puede observar que a la temperatura de

remojo de 50 °C aún cuando el tiempo de remojo y las condiciones de freído cambien, en la mayoría, la absorción de aceite se mantiene por debajo del 13 %.

Así mismo se puede observar que a las tres temperaturas de remojo la mayor absorción de aceite se obtuvo al mayor tiempo de remojo.



**Figura 3.6** Influencia de la humedad después del remojo en la absorción de aceite

En el Cuadro 3.7 se muestran los resultados del análisis estadístico para absorción de aceite después del freído, donde se observa que las condiciones de proceso que más influyeron fueron el tiempo y temperatura de remojo con 45.3 y 19.8% respectivamente, el mayor porcentaje de absorción de aceite se adquirió cuando el tiempo de remojo fue por 200 minutos independientemente de la temperatura de remojo y las condiciones de freído; la temperatura y tiempo de freído no tuvieron efecto significativo en la absorción de aceite.

Se han estudiado diferentes alternativas enfocadas a reducir la absorción de aceite en productos fritos (chips, papas a la francesa, leguminosas enteras y botanas a base de harinas). Entre estos está el blanqueo a 50 °C por 3 minutos en chips de papa que ha sido reportado como un pre-tratamiento que podría mejorar

el color y la textura de botanas fritas y reducir la absorción de aceite por la gelatinización del almidón de la superficie (Pedreschi y Moyano, 2004). Estudios hechos en papas a la francesa (Aguilar, 1997) indican que el remojo a bajas temperaturas, antes de freír activa la enzima pectinesterasa (PME) y las reacciones resultantes disminuyen la porosidad y por lo tanto reducen la absorción de aceite y por el contrario el remojo a altas temperaturas y tiempos cortos antes de freír, que se traduce en un mayor contenido de aceite después de la fritura.

**Cuadro 3.7** Influencia de las condiciones de proceso en la absorción de aceite.

Resultados del análisis estadístico

Variable	Nivel	Absorción de aceite (%)	
		Media	Influencia (%)
Temperatura de remojo (°C)	25	14.87 <sup>a</sup>	<b>19.84</b>
	50	12.61 <sup>a</sup>	
	80	26.66 <sup>b</sup>	
Tiempo de remojo (min)	50	8.53 <sup>a</sup>	<b>45.26</b>
	100	14.88 <sup>a, b</sup>	
	200	30.69 <sup>b</sup>	
Temperatura de freído (°C)	160	19.45 <sup>a</sup>	1.05
	170	16.60 <sup>a</sup>	
Tiempo de freído (min)	2	21.14 <sup>a</sup>	2.52
	3	16.49 <sup>a</sup>	
	5	16.46 <sup>a</sup>	

(Los valores con el mismo superíndice fueron estadísticamente iguales con  $\alpha$ : 0.05, al realizar la prueba de Tukey). Los porcentajes de efectos significativos están marcadas con negritas.

Phule y Annapure (2013) estudiaron el recubrimiento de garbanzos y green gram con hidroxilpropil metil celulosa (HPMC) y carboximetilcelulosa (CMC). El estudio indica que estos recubrimientos aplicados antes del freído podrían ser una barrera eficaz a la absorción de aceite durante la fritura, ya que mostraron una reducción en la absorción de aceite de 37.41 % en garbanzos y 16.15 % en green gram; para los garbanzos el recubrimiento de CMC fue mas adecuado para la reducción de absorción de aceite, por el contrario en green gram recubierto con HPMC fue encontrado más eficaz que el CMC. Sin embargo, en los mismos productos sin recubrir, se obtuvieron calificaciones de aceptación global (8.0) e índice de

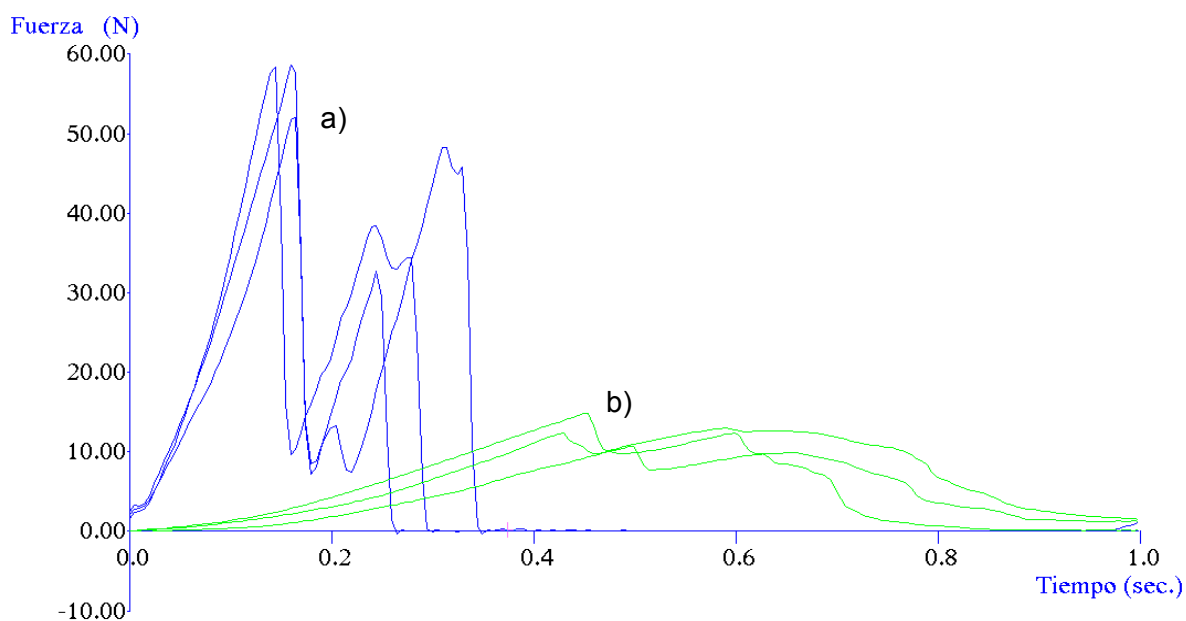


absorción de aceite (0.47) similares, optimizando las condiciones de remojo y freído.

### 3.5 TEXTURA EN HABAS DESPUÉS DEL REMOJO Y DESPUÉS DEL FREÍDO

#### Textura después del remojo

En la Figura 3.7 se observa que las habas secas muestran una fractura de tipo frágil estable ya que se fracturaron a baja distancia con una pendiente inicial pronunciada, una fuerza alta y emitieron sonido al fracturarse; las habas después del remojo presentaron una fractura de tipo dúctil ya que hubo una alta absorción de energía y deformación plástica antes de fracturarse, debido a la cantidad de agua absorbida.



**Figura 3.7** Curva característica de fuerza vs tiempo de habas secas (a) y habas después del remojo (50 °C, 50 minutos) (b)

Para todas las temperaturas de remojo estudiadas la fuerza necesaria para fracturar las semillas y el trabajo de fractura disminuyeron al aumentar el tiempo de remojo, particularmente a 200 minutos, y este comportamiento es más evidente a temperaturas de 80 °C (Cuadro 3.8), un comportamiento similar fue encontrado

por Gowen y colaboradores (2007) en garbanzos donde la fuerza de fractura disminuyó conforme incremento la temperatura y tiempo de remojo. La rápida tasa inicial de absorción de agua durante el remojo es responsable de la fuerte reducción inicial en la fuerza de fractura con relación al haba seca. A medida que el tiempo de remojo aumentaba, la tasa de absorción de agua se hacía más lenta, causando por lo tanto muy poco cambio en la fuerza de fractura de las semillas remojadas, especialmente en la fase de equilibrio. Así mismo, por efecto del remojo, el agua es absorbida, dando como resultado una textura más uniforme.

Igualmente en el Cuadro 3.8 se observa que a todas las condiciones de remojo los parámetros texturales muestran coeficientes de variación altos, esto puede ser debido a la falta de homogeneidad morfológica y de dimensiones del alimento, así mismo Luyten y colaboradores en 2004 mencionan que un patrón desigual de ruptura puede ser causado por una morfología no homogénea. Gowen y colaboradores (2007) reportaron una amplia dispersión de la fuerza de ruptura en garbanzos remojados bajo las mismas condiciones de tiempo y temperatura, lo cual atribuyen a la variabilidad inherente en el garbanzo seco.

**Cuadro 3.8** Parámetros obtenidos en habas después del remojo (entre paréntesis los coeficientes de variación)

Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Carácter Crujiente (N/s)	Fuerza de Fractura (N)	Distancia de Fractura (mm)	Trabajo de Fractura (N.s)
Haba seca		401.04 (39.05)	64.12 (36.79)	0.73 (18.25)	4.45 (40.10)
25	50	35.79 (23.59)	15.22 (24.62)	4.87 (15.59)	3.71 (28.44)
	100	28.42 (24.61)	13.84 (17.94)	3.81 (17.44)	4.05 (27.38)
	200	34.22 (19.18)	14.51 (17.94)	2.71 (22.08)	3.38 (19.32)
50	50	43.81 (21.30)	16.46 (17.15)	2.72 (22.67)	3.56 (33.88)
	100	43.47 (23.17)	17.76 (23.68)	2.71 (22.27)	4.31 (34.28)
	200	30.97 (33.13)	13.86 (22.79)	2.69 (23.12)	3.22 (31.73)
80	50	28.14 (24.95)	13.28 (28.61)	2.68 (18.30)	2.77 (43.78)
	100	28.74 (28.59)	12.20 (26.66)	2.62 (19.96)	2.84 (43.04)
	200	27.25 (36.63)	9.63 (33.90)	2.59 (22.17)	1.92 (47.58)

En el Cuadro 3.9 se puede observar que el carácter crujiente y la fuerza de fractura fueron influenciados de manera significativa por la temperatura de remojo, mientras que en el trabajo de fractura influyeron ambas condiciones de remojo (temperatura y tiempo) predominando la temperatura de remojo con un 67.6 % de influencia. En la distancia de fractura ninguna variable tuvo efecto significativo.

**Cuadro 3.9** Influencia de las condiciones de proceso en la textura de habas después del remojo. Resultados del análisis estadístico

Variable	Nivel	Carácter Crujiente (N/s)		Fuerza de Fractura (N)		Distancia de Fractura (mm)		Trabajo de Fractura (N.s)	
		Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)
Temperatura de remojo (°C)	25	32.8 <sup>a</sup>	<b>58.6</b>	14.5 <sup>a</sup>	<b>64.6</b>	3.7 <sup>a</sup>	52.2	3.7 <sup>a</sup>	<b>67.6</b>
	50	39.4 <sup>b</sup>		16 <sup>b</sup>		2.7 <sup>a</sup>		3.7 <sup>a</sup>	
	80	28 <sup>a,b</sup>		11.7 <sup>a,b</sup>		2.6 <sup>a</sup>		2.5 <sup>b</sup>	
Tiempo de remojo (min)	50	36 <sup>a</sup>	11.8	15 <sup>a</sup>	20.7	3.4 <sup>a</sup>	17.7	3.3 <sup>a,b</sup>	<b>28.5</b>
	100	33.5 <sup>a</sup>		14.6 <sup>a</sup>		3 <sup>a</sup>		3.7 <sup>a</sup>	
	200	30.8 <sup>a</sup>		12.7 <sup>a</sup>		2.7 <sup>a</sup>		2.8 <sup>b</sup>	

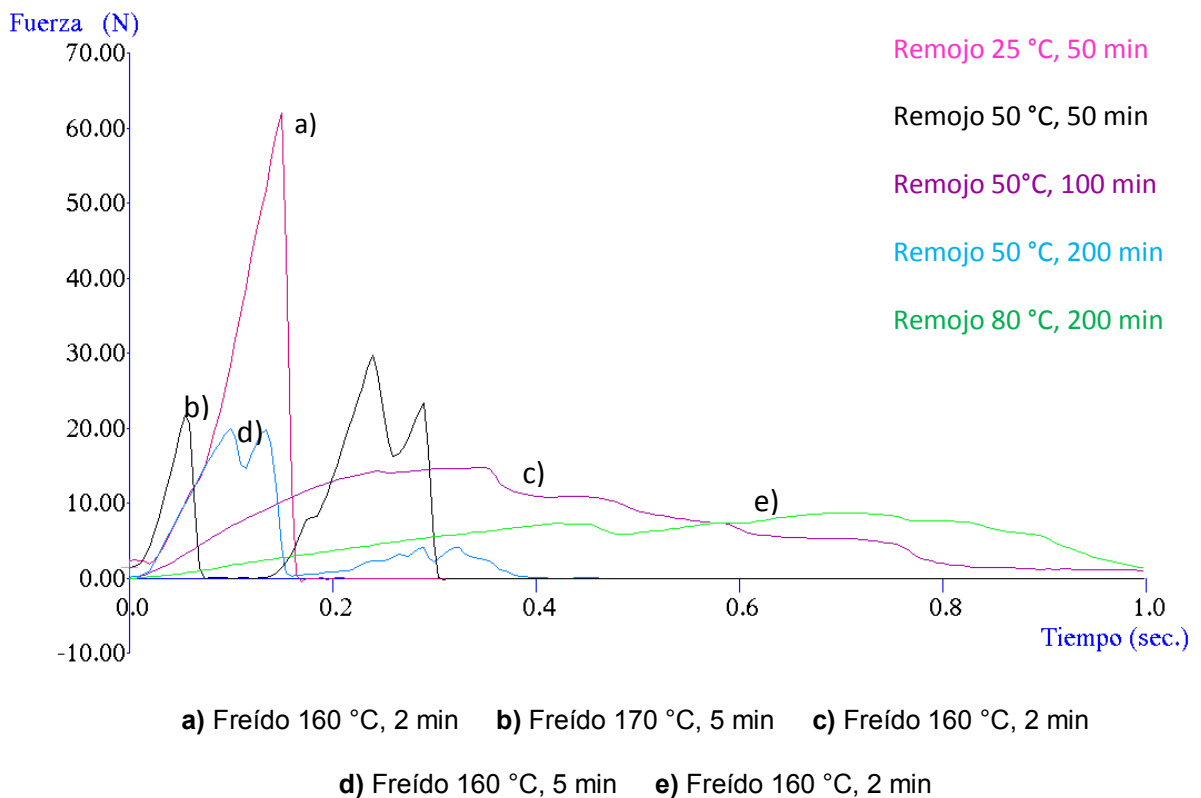
Los valores con el mismo superíndice fueron estadísticamente iguales con  $\alpha$ : 0.05, al realizar la prueba de Tukey Los porcentajes de influencia en negritas tuvieron efecto significativo

### Textura después del freído

En los productos crujientes, la curva de fuerza en función de la deformación inicia con una subida importante de fuerza con pequeñas deformaciones implicando una pendiente pronunciada y la muestra es acústicamente silenciosa hasta que se llega a un punto donde ocurre la primera ruptura estructural (fractura), presentándose una caída de fuerza acompañada de la emisión de sonido, que se manifiesta como una caída repentina de fuerza que corresponde a la propagación de la fractura hasta que ésta es detenida y la fuerza vuelve a subir. En algunos materiales se puede presentar un solo evento de fractura mientras que en otros se presentan varios picos sucesivos cada uno acompañado de sonido. El número de rupturas producidas son el resultado de los eventos de fractura que se han producido durante el ensayo (Roudaut y col., 2012; Mohamed y col., 1982; Luyten y col., 2004; Varela y col., 2006). Generalmente una pendiente inicial alta (carácter

crujiente), distancia y fuerza de fractura bajas son asociados con un producto más crujiente. Luyten y colaboradores (2004) mencionan que el carácter crujiente probablemente se refiere a un mecanismo de rotura más complejo que implica la deformación repetitiva y la fracturación de las capas posteriores en una estructura celular.

En la Figura 3.8, se muestran ejemplos de las curvas de textura de habas fritas a diferentes condiciones de proceso de remojo y freído, donde puede notarse una amplia influencia de las condiciones de proceso. La curva a) tiene una pendiente pronunciada, una alta fuerza de fractura y un solo evento de fractura; b) y d) muestran una fractura de tipo frágil estable con una pendiente pronunciada (alto carácter crujiente), fuerza y distancia de fractura intermedias y con más de un evento de fractura, mientras que c) y e) presentan una pendiente y fuerza de fractura bajas y una distancia alta lo que indica una fractura de tipo dúctil ya que hubo una alta absorción de energía y deformación plástica antes de fracturarse.



**Figura 3.8** Curvas obtenidas en diferentes condiciones de proceso de remojo y freído

En el Cuadro 3.10 se puede observar que para todas las temperaturas se obtuvo un carácter crujiente y una fuerza de fractura inferiores a los del haba seca. A la temperatura de remojo de 25 °C se obtuvo un carácter crujiente entre 67.9 – 388.4 N/s, fuerza de fractura entre 11.6 y 54.7 N, número de rupturas de 1.5 – 2.4 y una distancia de fractura entre 0.6 y 0.9 mm; a esta temperatura, con los menores tiempos y temperaturas de freído se obtuvo un carácter crujiente y una fuerza de fractura cercanos a los del haba seca. A 50 °C algunos parámetros disminuyeron con relación al haba seca, el carácter crujiente se encontró entre 28 – 242.7 N/s, la fuerza de fractura entre 16- 27.5 N, mientras otros aumentaron como el número de rupturas que se encontró entre 1.13 – 3.80 y la distancia de fractura entre 0.58 – 1.27 mm; la corrida 9 presentó carácter crujiente y fuerza de fractura bajos (28 N/s, 16 N respectivamente) y una distancia alta (3.22 mm) ya que ésta tenía un alto contenido de humedad (16.87%); por el contrario, la corrida 8 muestra características texturales que describen una botana frita con un carácter crujiente alto (242.7 N/s), fuerza de fractura y distancia bajos (25 N, 1.05 mm respectivamente) y una baja humedad (1.66 %). Finalmente para 80 °C el carácter crujiente varió de 28.1 – 234.3 N/s, la fuerza de fractura de 9.4 – 24.6 N y el número de rupturas de 1 – 3.6 y distancia de fractura 0.6 – 2 mm; la corrida 17 muestra un carácter crujiente y fuerza de fractura bajos (28.11 N/s y 9.4N respectivamente) y distancia de fractura alta (2 mm) ya que tiene un alto contenido de humedad (15.6 %). Cabe destacar que la corrida que obtuvo el mayor número de rupturas fue la sometida a 50 °C por 50 minutos de remojo y 170 °C por 5 minutos de freído, lo cual es una característica deseable en un producto crujiente.

Cabe mencionar que los coeficientes de variación de los parámetros texturales fueron altos ya que las mediciones de las propiedades de fractura, no son fáciles de realizar debido a heterogeneidades propias presentes en la mayoría de los productos alimenticios y dado que el tamaño del alimento es a menudo pequeño en relación con el tamaño de las heterogeneidades (Luyten y col., 2004).

**Cuadro 3.10** Parámetros obtenidos en habas después del freído (entre paréntesis los coeficientes de variación)

Temperatura Remojo (°C)	Tiempo Remojo (minutos)	Temperatura Freído (°C)	Tiempo Freído (minutos)	Carácter crujiente (N/s)	Fuerza de Fractura (N)	Número de rupturas	Distancia de Fractura (mm)
Haba Seca				401.04 (39.05)	64.12 (36.79)	1 (0)	0.73 (18.25)
25	50	160	2	345.677 (33.07)	47.886 (34.32)	2.13 (65.97)	0.59 (25.95)
		160	3	388.428 (28.48)	54.704 (32.78)	1.53 (59.70)	0.90 (47.87)
	100	160	5	227.591 (15.25)	25.170 (25.71)	2.33 (57.65)	0.84 (53.87)
		170	3	235.228 (32.50)	24.652 (34.94)	1.93 (53.42)	0.68 (69.88)
	200	170	2	67.993 (69.55)	11.633 (32.56)	1.67 (37.03)	1.50 (62.23)
		170	5	227.054 (25.83)	23.053 (33.56)	2.40 (46.72)	0.80 (72.90)
50	50	170	2	161.532 (29.33)	27.501 (22.40)	2.27 (31.05)	1.05 (40.65)
		170	5	242.682 (26.92)	25.037 (39.55)	3.80 (84.52)	1.05 (73.87)
	100	160	2	28.048 (25.29)	16.086 (21.89)	1.13 (31.05)	3.22 (28.55)
		160	3	128.496 (30.78)	20.737 (30.81)	2.07 (49.97)	1.27 (65.50)
	200	160	5	184.107 (27.40)	19.473 (34.28)	2.56 (47.19)	0.58 (88.62)
		170	3	134.930 (21.48)	18.930 (16.53)	2.27 (48.52)	0.85 (50.29)
80	50	160	5	234.305 (30.35)	20.054 (33.67)	2.13 (46.43)	0.64 (70.32)
		170	3	195.948 (28.89)	24.625 (33.27)	3.60 (62.82)	1.19 (55.81)
	100	170	2	144.125 (27.44)	23.730 (29.42)	2.07 (34.05)	1.14 (40.34)
		170	5	199.724 (19.76)	19.122 (34.45)	3.00 (43.64)	1.17 (82.53)
	200	160	2	28.111 (51.13)	9.418 (35.31)	1.07 (24.21)	2.08 (40.74)
		160	3	61.866 (28.23)	10.119 (26.36)	1.33 (36.60)	1.29 (62.70)

En el Cuadro 3.11 se puede observar que para el carácter crujiente y fuerza de fractura las condiciones que más influyeron fueron la temperatura y tiempo de remojo donde el tiempo predominó con un 39.8 y 44.5 % respectivamente, por el contrario la temperatura y tiempo de freído tuvieron efecto significativo en el número de rupturas, mientras que para la distancia de fractura ninguna variable tuvo efecto significativo.

**Cuadro 3.11** Influencia de las condiciones de proceso en la textura de habas después del freído. Resultados del análisis estadístico

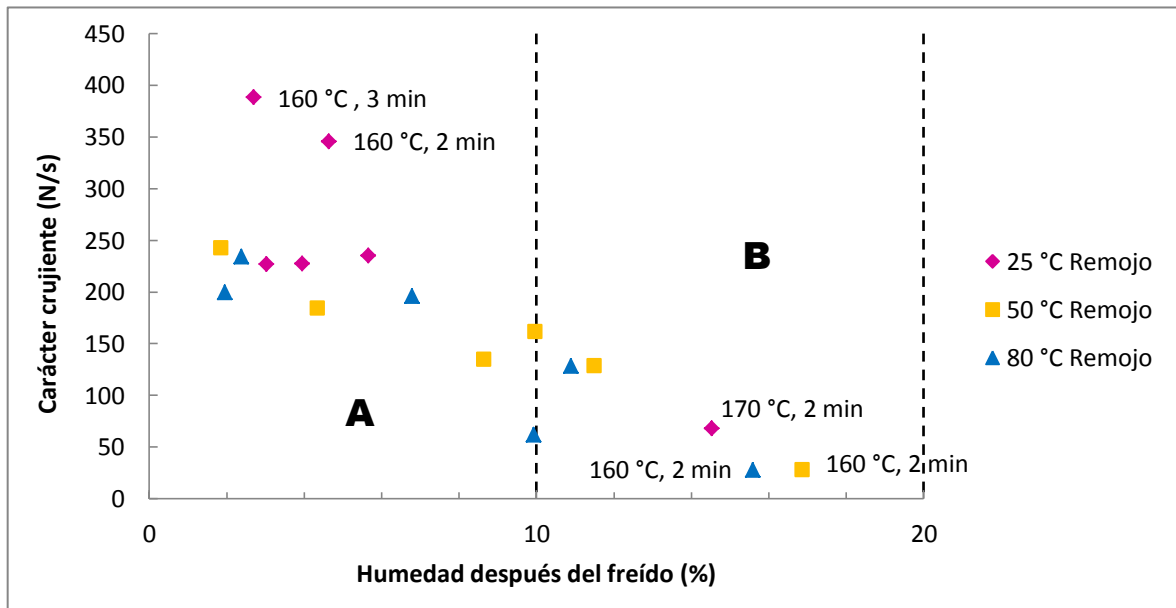
Variable	Nivel	Carácter crujiente (N/s)		Fuerza de fractura (N)		Distancia de fractura (mm)		Número de rupturas	
		Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)
Temperatura de remojo (°C)	25	248.7 <sup>a</sup>	<b>25.9</b>	30.8 <sup>a</sup>	<b>24.3</b>	0.9 <sup>a</sup>	10.42	2 <sup>a</sup>	4
	50	146.6 <sup>b</sup>		21.3 <sup>a,b</sup>		1.3 <sup>a</sup>		2.3 <sup>a</sup>	
	80	144.0 <sup>b</sup>		17.8 <sup>b</sup>		1.2 <sup>a</sup>		2.2 <sup>a</sup>	
Tiempo de remojo (min)	50	261.4 <sup>a</sup>	<b>39.8</b>	33.3 <sup>a</sup>	<b>44.5</b>	0.9 <sup>a</sup>	10.06	2.6 <sup>a</sup>	16.2
	100	160.5 <sup>b</sup>		21.2 <sup>a,b</sup>		1.4 <sup>a</sup>		2.1 <sup>a</sup>	
	200	117.3 <sup>b</sup>		15.4 <sup>b</sup>		1.2 <sup>a</sup>		1.9 <sup>a</sup>	
Temperatura de freído (°C)	160	180.7 <sup>a</sup>	0.01	24.6 <sup>a</sup>	1.3	1.3 <sup>a</sup>	3	1.8 <sup>a</sup>	<b>26.8</b>
	170	178.8 <sup>a</sup>		22 <sup>a</sup>		1.04 <sup>a</sup>		2.6 <sup>b</sup>	
Tiempo de freído (min)	2	129.2 <sup>a</sup>	<b>15.4</b>	22.7 <sup>a</sup>	2.3	1.6 <sup>a</sup>	27.2	1.7 <sup>a</sup>	<b>31.1</b>
	3	190.8 <sup>a,b</sup>		25.6 <sup>a</sup>		1.03 <sup>a</sup>		2.1 <sup>a,b</sup>	
	5	219.2 <sup>b</sup>		21.6 <sup>a</sup>		0.8 <sup>a</sup>		2.1 <sup>b</sup>	

Los valores con el mismo superíndice fueron estadísticamente iguales con  $\alpha$ : 0.05, al realizar la prueba de Tukey. Los porcentajes de influencia en negritas tuvieron efecto significativo.

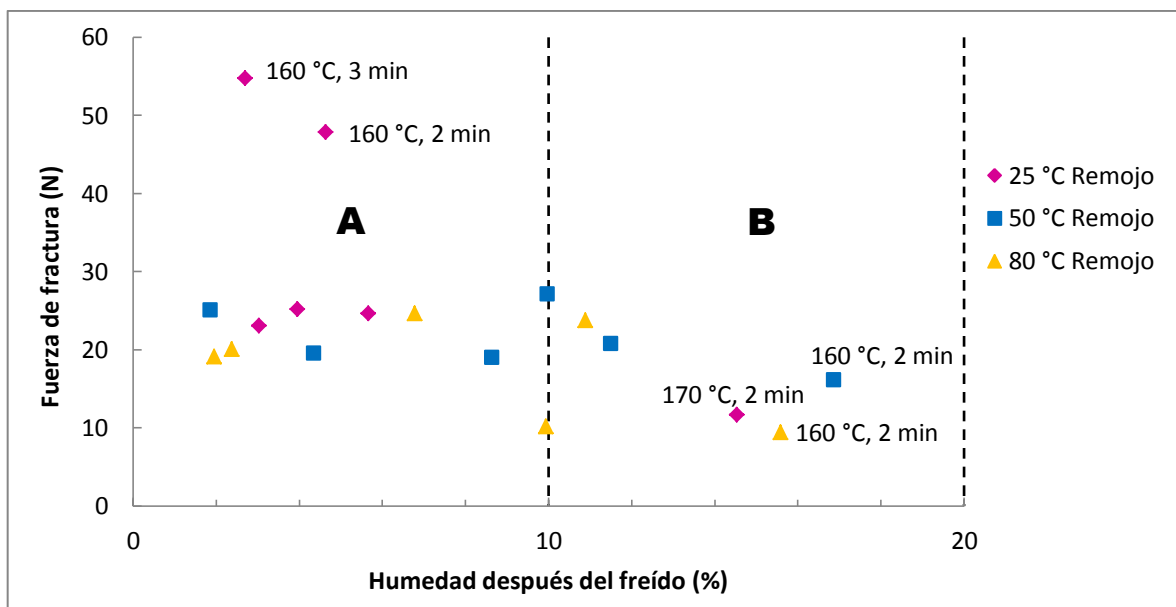
La Figura 3.9 muestra que conforme aumenta la humedad después del freído el carácter crujiente disminuye notoriamente; los valores más altos (zona A) fueron los obtenidos en habas sometidas a temperaturas y tiempos de remojo bajos (25 °C, 50 minutos) resultando en una baja absorción de agua y fuerza de fractura muy alta (Cuadro 3.10); la mayoría de las corridas se mantuvieron en un intervalo de 1.9 – 8.6 % de humedad y carácter crujiente de 134.9 – 242.7 N/s; por arriba del 10% de humedad el carácter crujiente disminuyó drásticamente, con los valores más bajos (zona B) correspondiendo a las humedades altas.

El efecto de la humedad después del freído en la fuerza de fractura mostró una tendencia similar a la observada para el carácter crujiente (Figura 3.10), ésta disminuyó conforme aumentaba la humedad después del freído; habas sometidas a condiciones de remojo bajas (25 °C, 50 min) muestran una fuerza de fractura alta (zona A) ya que no absorbieron suficiente agua; por el contrario las habas sometidas a temperaturas y/o tiempos de remojo altos presentaron los valores de fuerza de fractura más bajos (zona B) ya que durante el freído no se logró evaporar suficiente agua absorbida durante el remojo; la mayoría de las corridas se mantuvieron en un intervalo de fuerza de fractura de 18.9 – 27.5 N. Tendencias

similares fueron encontrados por Phule y Annapure (2013) en green gram y garbanzos.



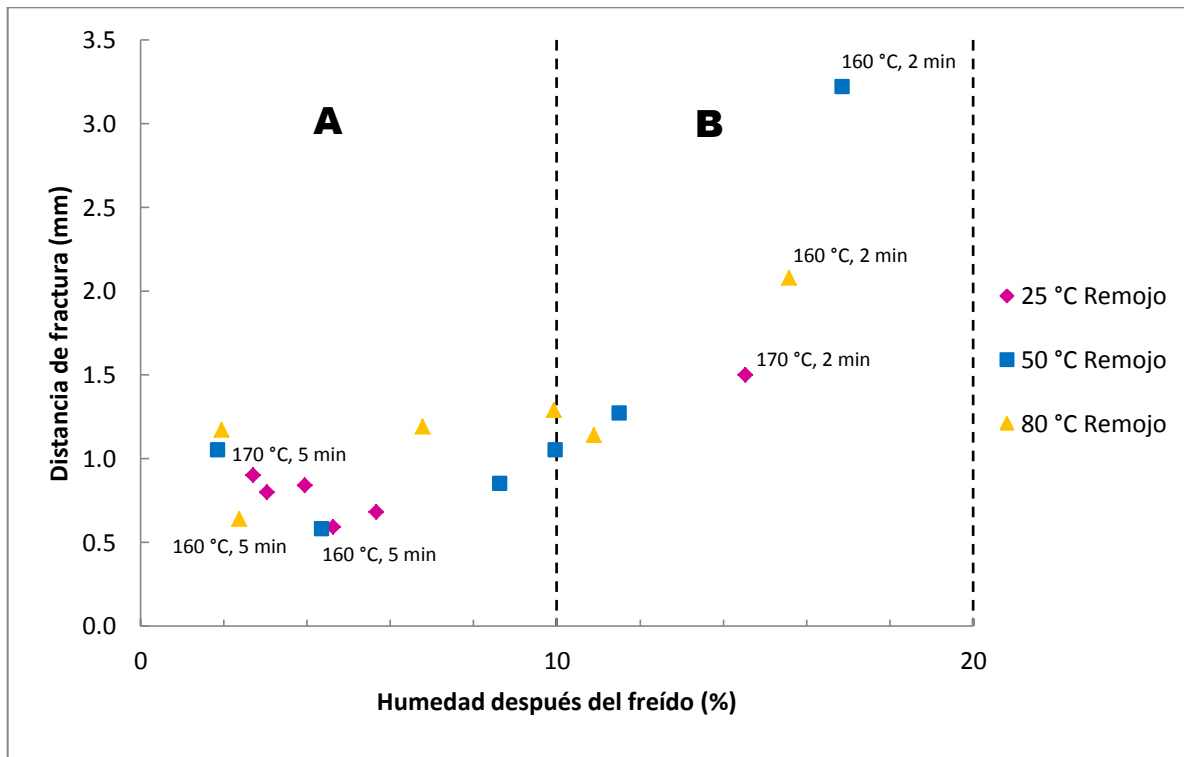
**Figura 3.9** Carácter crujiente (pendiente) con respecto a la humedad después del freído



**Figura 3.10** Fuerza de fractura con respecto a la humedad después del freído



En la Figura 3.11 se muestra una clara tendencia del incremento de la distancia de fractura con respecto a la humedad después del freído; las corridas sometidas a tiempos de freído bajos (2 minutos) muestran una distancia de fractura alta (zona B) lo cual indica que el tiempo no fue suficiente para evaporar el agua contenida en el haba; mientras que las corridas sometidas a tiempos de freído altos (5 min), coinciden con el comportamiento de una botana frita al mostrar una baja distancia de fractura (zona A) (0.58 – 1.05 mm) y un bajo contenido de humedad (1.9 – 4.4 %).



**Figura 3.11** Distancia de fractura con respecto a la humedad después del freído

### 3.6 COLOR DESPUÉS DEL REMOJO Y DESPUÉS DEL FREÍDO

#### Remojo

Los parámetros de color L\*, a\* y b\* obtenidos del haba seca y después del remojo a diferentes temperaturas y tiempos se muestran en el Cuadro 3.12.

Para las temperaturas de remojo de 25 °C y 50 °C se obtuvieron una L\* 71.4 - 77.6, a\* de -3.1 a -5.9 y b\* de 43.4 - 63, los cuales indican un color amarillo verdoso, comportamiento similar al del haba seca; la temperatura de remojo de 80 °C, muestra una ligera disminución para todos los parámetros con una L\* de 63.1 - 70.7, a\* de -0.1 a -4.7, b\* de 37.1 - 43.2.

**Cuadro 3.12** Valores tri-estimulo L\*a\*b en habas después del remojo

Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	L	a	b
Haba seca		70.26	-2.06	45.4
25	50	75.07	-3.16	49.64
	100	75.72	-4.78	44.39
	200	75.50	-5.39	46.95
50	50	75.38	-4.39	43.36
	100	77.59	-5.95	44.95
	200	71.42	-4.88	63.07
80	50	70.69	-4.74	42.15
	100	63.15	-0.10	43.21
	200	65.02	-3.93	37.11

En el Cuadro 3.13 se puede observar que delta b, el cual indica la tendencia al color amarillo no fue afectado en forma significativa por ninguna de las condiciones de proceso al igual que delta E, sin embargo para delta a, la temperatura de remojo tuvo efectos significativos.

**Cuadro 3.13** Influencia de las condiciones de proceso en la diferencia de color de habas después del remojo. Resultados del análisis estadístico

Variable	Nivel	Delta b		Delta a		Delta E	
		Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)
Temperatura de remojo (°C)	25	13.9 <sup>a</sup>	8.4	3.9 <sup>a</sup>	28.0	27.4 <sup>a</sup>	8.6
	50	21.2 <sup>a</sup>		4.6 <sup>b</sup>		24.3 <sup>a</sup>	
	80	18.9 <sup>a</sup>		3.2 <sup>a, b</sup>		21.7 <sup>a</sup>	
Tiempo de remojo (min)	50	16.8 <sup>a</sup>	45.1	3.5 <sup>a</sup>	7.9	20.5 <sup>a</sup>	30.9
	100	10 <sup>a</sup>		4 <sup>a</sup>		30.6 <sup>a</sup>	
	200	27.3 <sup>a</sup>		4.2 <sup>a</sup>		22.4 <sup>a</sup>	

(Los valores con el mismo superíndice fueron estadísticamente iguales con  $\alpha$ : 0.05, al realizar la prueba de Tukey). Los porcentajes de efectos significativos están marcadas con negritas.

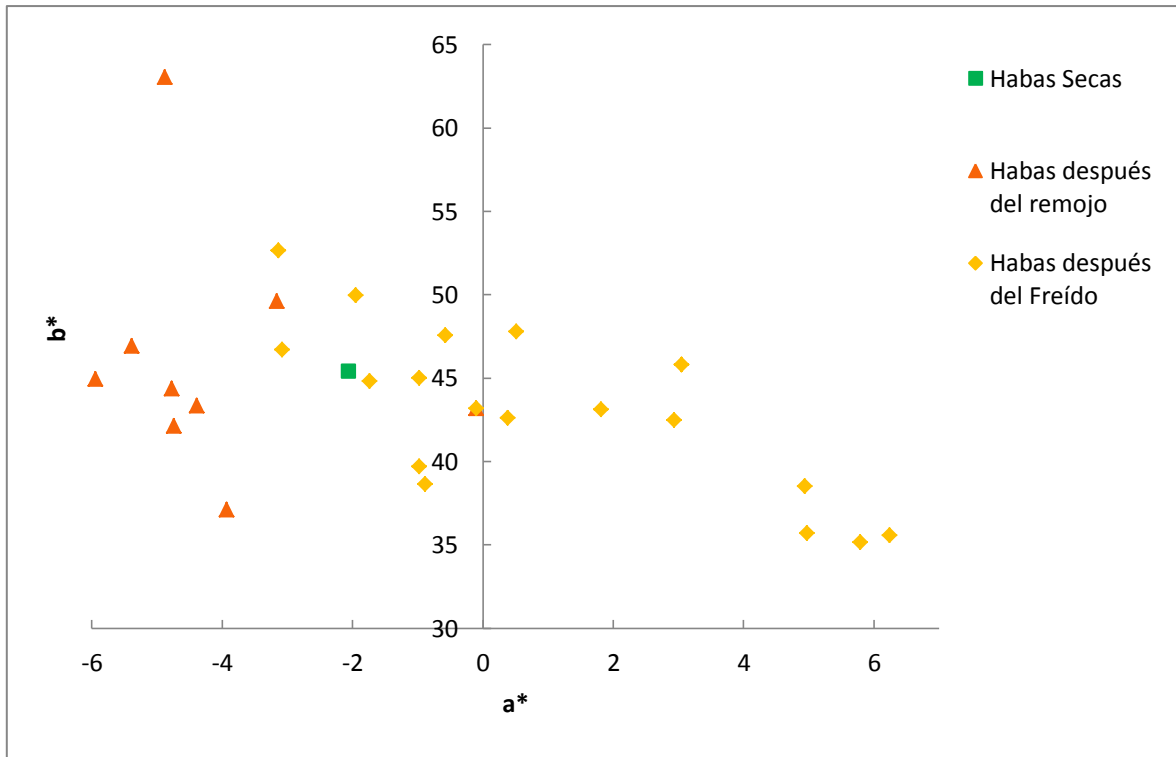
### Freído

Los parámetros obtenidos del haba después del freído a diferentes tiempos y temperaturas de remojo y freído se muestran en el Cuadro 3.14, donde se puede observar que las temperaturas de remojo de 25 °C y 50 °C, tuvieron una L\* de 59.9 – 71, a\* de -3.14 a 6.24 y b\* de 35.6 – 52.7 mientras que la condición de remojo de 80 °C obtuvo los parámetros más bajos con L\* de 51.5 – 63.5, a\* de -0.89 a 5.8 y b\* de 35.2 – 43.2. Para todas las corridas, L\* no tuvo cambio significativo en comparación con el haba seca, mientras que a\* y b\* fueron afectadas principalmente por el tiempo de freído, ya que a tiempos de freído altos (5 min) en la mayoría de los casos se obtienen valores de a\* positivos los cuales indican una ligera tendencia al rojo, por el contrario las habas sometidas a tiempos de freído bajos (2 min) mostraron valores de a\* negativos en la mayoría de los casos que tienden al color verde.

**Cuadro 3.14** Valores tri-estimulo L\*a\*b en habas después del freído

Temperatura Remojo (°C)	Tiempo Remojo (minutos)	Temperatura Freído (°C)	Tiempo Freído (minutos)	L	a	b
Haba seca				70.26	-2.06	45.4
25	50	160	2	71	-3.08	46.70
		160	3	69.97	-1.74	44.84
	100	160	5	66.49	-0.98	45.03
		170	3	66.95	-0.58	47.57
	200	170	2	68.86	-3.14	52.68
		170	5	63.75	3.05	45.81
50	50	170	2	64.30	0.38	42.63
		170	5	59.85	4.94	38.54
	100	160	2	68.27	-1.95	49.97
		160	3	62.62	0.51	47.79
	200	160	5	57.96	6.24	35.58
		170	3	63.86	2.93	42.48
80	50	160	5	56.56	4.97	35.71
		170	3	63.54	1.81	43.14
	100	170	2	63.15	-0.10	43.21
		170	5	51.54	5.79	35.17
	200	160	2	62.04	-0.89	38.65
		160	3	60.83	-0.98	39.71

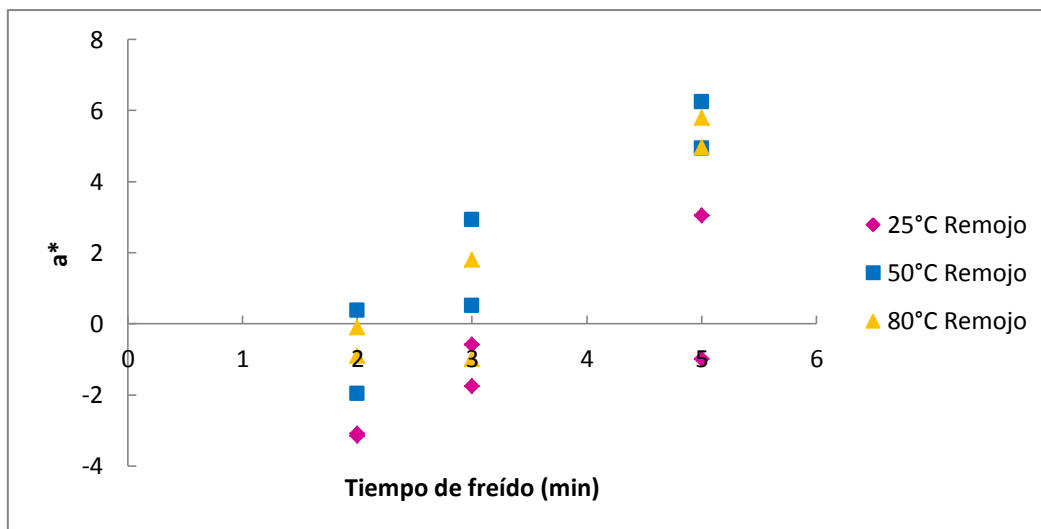
La Figura 3.12 muestra que el haba seca obtuvo valores de a\* negativos (color verde) y b\* positivos (amarillo) lo que lo ubica en un color amarillo verdoso, mientras que para las habas después del remojo, la mayoría obtuvo valores de a\* negativa con mayor tendencia al verde que la haba seca, por último las habas después del freído muestran un amplio intervalo de a\* que va de -3.14 a 6.24, donde a\* positiva indica una tendencia al rojo.



**Figura 3.12** Valores de  $a^*$  y  $b^*$  en las diferentes etapas de proceso del haba frita

Como se muestra en la Figura 3.13, el parámetro  $a^*$  aumenta de manera importante conforme incrementa el tiempo de freído, independientemente de la temperatura de remojo, indicando una tendencia a volverse más rojo a tiempos de freído altos (5 min) y valores negativos (verde) con tiempos de freído bajos (2 min). Phule y Annapure (2013) encontraron que durante el freído de green gram y garbanzos también se desarrollaba un color rojizo con el aumento de la temperatura y tiempo de freído.

Así mismo Bravo y colaboradores (2007) mencionan que el color amarillo-rojizo (marrón) es un atributo característico muy significativo de la calidad de un producto frito y determinante en la aceptación del mismo por parte de los consumidores.



**Figura 3.13** Valores de a\* en función del tiempo de freído

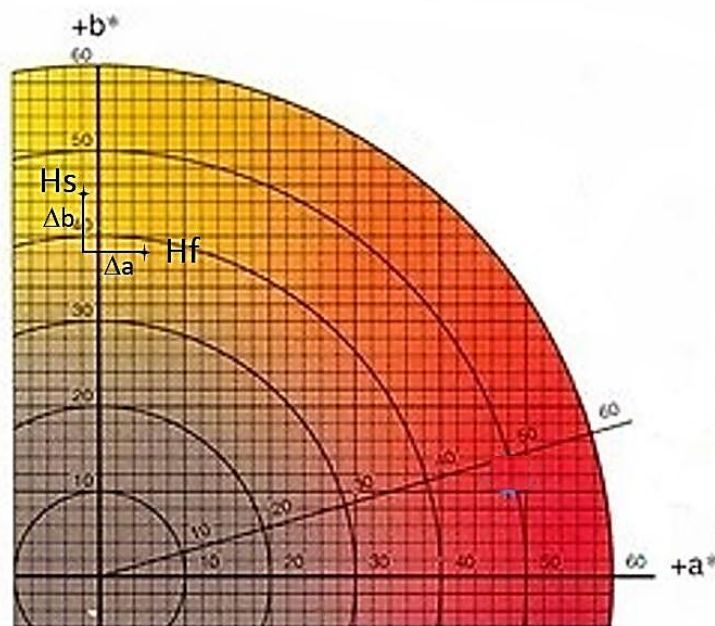
Los datos indicados en el Cuadro 3.15 muestran la influencia de las condiciones de proceso en el color después del freído, donde para delta a el tiempo de freído seguido de la temperatura de remojo tuvieron efectos significativos con un 55.4 y 7.6 % de influencia respectivamente, por otro lado para delta E la temperatura de remojo predominó con 42.3 % seguido del tiempo de freído con 41.7 % de influencia. Delta b no fue influenciada por ninguna de las condiciones de remojo y freído.

**Cuadro 3.15** Influencia de las condiciones de proceso en el color de habas después del freído. Resultados del análisis estadístico

Variable	Nivel	Delta b		Delta a		Delta E	
		Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)	Media	Influencia (%)
Temperatura de remojo (°C)	25	11.8 <sup>a</sup>	33.3	2 <sup>a</sup>	7.6	2.7 <sup>a</sup>	42.3
	50	19.9 <sup>a</sup>		2.8 <sup>b</sup>		7.1 <sup>b</sup>	
	80	21.8 <sup>a</sup>		2.8 <sup>c</sup>		9.7 <sup>b</sup>	
Tiempo de remojo (min)	50	16.6 <sup>a</sup>	6.2	2.6 <sup>a</sup>	1.2	6 <sup>a</sup>	1.1
	100	16.4 <sup>a</sup>		2.3 <sup>a</sup>		6.4 <sup>a</sup>	
	200	20.5 <sup>a</sup>		2.7 <sup>a</sup>		7.1 <sup>a</sup>	
Temperatura de freído (°C)	160	18 <sup>a</sup>	0.03	2.4 <sup>a</sup>	0.4	6 <sup>a</sup>	1.4
	170	17.7 <sup>a</sup>		2.6 <sup>a</sup>		7 <sup>a</sup>	
Tiempo de freído (min)	2	18.6 <sup>a</sup>	9.2	1.9 <sup>a</sup>	55.4	4 <sup>a</sup>	41.7
	3	14.7 <sup>a</sup>		1.6 <sup>a</sup>		5 <sup>a</sup>	
	5	20.1 <sup>a</sup>		4.1 <sup>b</sup>		10.5 <sup>b</sup>	

(Los valores con el mismo superíndice fueron estadísticamente iguales con  $\alpha$ : 0.05, al realizar la prueba de Tukey). Los porcentajes de efectos significativos están marcadas con negritas.

En la Figura 3.14 se ubican las coordenadas de  $a^*$  y  $b^*$  para el haba seca (Hs) y el haba frita (Hf) obtenida con remojo a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 50 min y freído a  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 5 min. Puede observarse que el haba seca tiene un pequeño valor negativo de  $a^*$  y alto de  $b^*$ , lo que la ubica como amarillo verdoso, mientras que al freírse,  $a^*$  pasa al lado positivo (rojo) y  $b^*$  disminuye ligeramente dando un color amarillo rojizo, característico de un producto frito. Cabe aclarar que la comparación se hace para un mismo valor de L, que no necesariamente corresponde al valor de L de las habas que se comparan.



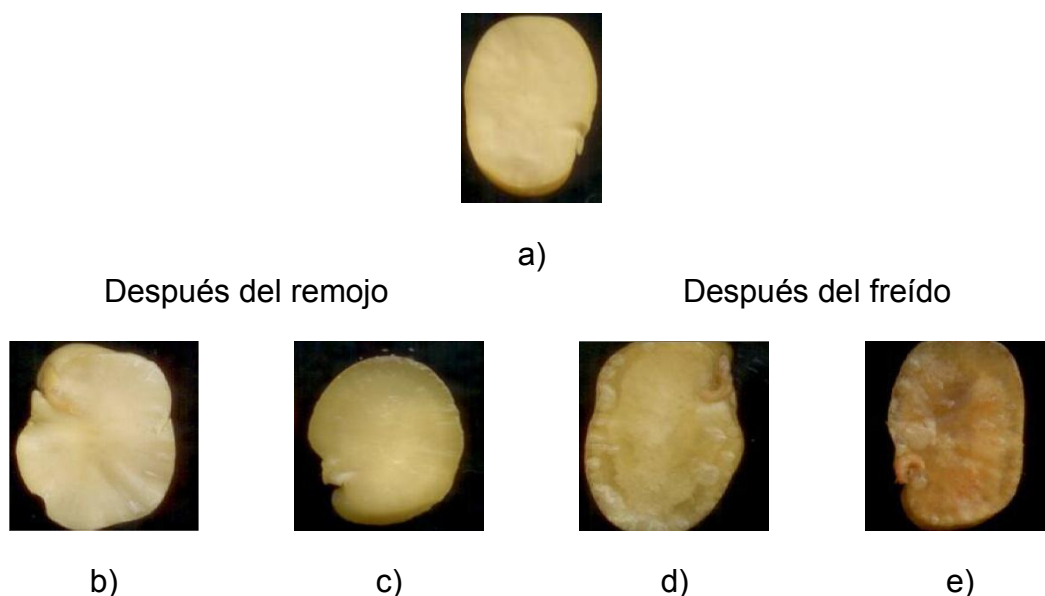
**Figura 3.14** Ubicación de los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  para haba seca (Hs) y haba frita (Hf), obtenida con remojo a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 50 min y freído a  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 5 min

### 3.7 APARIENCIA DE LAS HABAS EN LAS DIFERENTES ETAPAS DEL PROCESO

En la Figura 3.15 se muestran imágenes de la superficie de habas a diferentes condiciones de proceso donde se puede observar que entre a) y b) hubo un pequeño cambio de color con tendencia al blanco sin embargo en c), el cual tuvo

condiciones de remojo altas, hay una tendencia hacia el color verde y empieza a mostrar en la orilla de la semilla un aspecto transparente, debido a la gelatinización del almidón.

Con el freído posterior se puede observar que entre d) y e), lo que más afectó en el color y superficie de la semilla fueron las temperaturas y tiempos de freído altos (170 °C y 5 minutos) ya que hubo un cambio del color amarillo-verde a un color amarillo-rojizo (marrón), además de que e) presenta una apariencia transparente y la presencia de numerosas celdas de aire.



**Figura 3.15** Imágenes de la superficie de habas en las diferentes etapas de proceso donde a) haba seca, b) 25 °C, 50 minutos, c) 80 °C, 200 minutos, d) 80 °C, 200 minutos (remojo) y 160 °C, 3 minutos (freído), e) 80 °C y 100 minutos (remojo) 170 °C, 5 minutos (freído).

Romani y colaboradores en 2009 describen que dentro de la apariencia característica de los productos fritos, el color es uno de los más importantes estrictamente relacionados con la percepción de los consumidores, sin embargo la impresión global del color en productos fritos se basa no sólo en el propio color,



sino también en la cantidad, distribución, forma y entrelazado de los pequeños elementos distribuidos por toda la muestra. Por lo tanto, el aspecto del color resultante, también depende de la cantidad y distribución de las regiones de color marrón desarrollados durante la fritura, así como el aceite remanente absorbido en la superficie después de la fritura, que producen las zonas grasas con apariencia transparente.

Otro aspecto importante característico de los productos fritos es la porosidad, ya que durante el freído se producen cambios estructurales en la superficie del producto desarrollando un medio poroso.

Ziaifar y colaboradores (2010) indicaron que durante la fritura, el agua se mueve desde el interior del producto a la zona de evaporación antes de dejar el producto a través de la superficie en forma de vapor. Parte de este vapor puede, sin embargo, permanecer atrapado dentro de los poros. Este vapor se expande y se convierte en sobrecalentado. Se distorsionan las paredes de los poros y contribuye al desarrollo de porosidad.

La determinación de tamaños de poro y los efectos de las variables de fritura sobre la estructura porosa de los alimentos fritos puede contribuir a la comprensión de los cambios complejos que ocurren durante la fritura. Además, puede proporcionar información valiosa relacionada con la comprensión y modelización de calor y transferencia de masa dentro del alimento frito y de los mecanismos y fenómenos relacionados a la absorción de aceite (Kalogianni y col., 2014).

En este trabajo no se midieron ni contaron los poros desarrollados con el freído, pero puede notarse (Cuadro 3.10 y Figura 3.15 e), que las habas freídas a 160 ó 170 °C por 5 minutos, mostraron el desarrollo de celdas de aire, y fueron las que presentaron en las pruebas de textura, el mayor número de picos, que corresponden a fracturas de las celdas de aire.

A continuación se destacan las conclusiones más relevantes del trabajo.

## IV. CONCLUSIONES

Hubo grandes variaciones entre las características físicas, especialmente en el color y apariencia de la semilla durante el proceso de remojo y freído.

La hidratación de las habas fue fuertemente influenciada por la temperatura de remojo, ya que a temperaturas altas (80 °C) se favorece la velocidad de absorción, por el contrario bajas temperaturas de remojo (25 °C) resultan en una capacidad de absorción mayor.

Las cinéticas de absorción de agua mostraron un buen ajuste a los modelos de Haladjian y Peleg, sin embargo en el modelo de Haladjian la humedad de equilibrio (Ms) fue más cercana a los valores experimentales y sugiere que es adecuado para describir la absorción de agua durante el remojo de habas, ya que presenta  $R^2$  más próximas a 1.

El pre-tratamiento (temperatura y tiempo de remojo) tuvo un efecto significativo en el porcentaje de absorción de aceite, ya que temperaturas y tiempos altos de remojo (80 °C, 200 minutos) resultaron en un alto porcentaje de absorción de aceite, atribuible a la alta humedad absorbida durante el remojo.

En cuanto a las condiciones de proceso de freído (temperatura y tiempo), la temperatura no tuvo influencia en cuanto a las propiedades físicas y texturales del haba frita, sin embargo el tiempo fue un factor determinante en cuanto al color y textura.

Las mejores características se produjeron con temperatura de remojo de 50 °C por 50 minutos y temperatura de freído de 170 °C por 5 minutos, ya que bajo estas condiciones se obtuvieron baja humedad (1.86 %), baja absorción de aceite (12.04 %), un carácter crujiente alto (242.7 N/s), el mayor número de picos de fractura (3.80), fuerza y distancia de fractura bajas (25 N y 1.05 mm), características típicas de una botana frita.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Ghannam, N., McKenna, B. 1997. The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.), *Journal of Food Engineering*, 32, 391 – 401.
- Abu-Ghannam, N. 1998. Modelling textural changes during the hydration process of red beans. *Journal of Food Engineering*, 38, 341 – 352.
- Aguilar, C.N., Anzaldúa, A., Talamás, R., Gastélum. 1997. Low-temperature blanch improves textural quality of french-fries, *Journal of Food Science*, 62, 568 – 571.
- Aguilera, J. M., Stanley, D. W. 1999. 2<sup>a</sup> ed. *Microstructural principles of food processing and engineering*. Aspen. Estados Unidos de América.
- Aldana, L.F. 2010. Producción comercial de semilla de haba (*Vicia fava* L.). *PROETTAPA*.
- Annapure, U.S., Singhal, R.S., Kulkarni, P. 1998. Studies on deep-fat fried snacks from some cereals and legumes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76, 377 – 382.
- Arroyo, A. D. y col. 1999. Elaboración de una botana extrudida de harina de plátano. Tesis de licenciatura de Ingeniería en Alimentos. Universidad Autónoma Metropolitana, D.F, México.
- Bawa, A.S., Sidhu, J.S. 2003. Snacks foods/Range on the market. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 5322–5332.
- Bravo, J., Ruales, J., Clemente, G., Sanjuán, N. 2007. Diseño de un equipo de laboratorio para fritura al vacío. *Alimentos Ciencia e Ingeniería*, 16, 33-34.
- Castro, E. M., Primo, C., Meinders, M. B. J., Hamer, R. J., Van Vliet, T. 2009. Relationship between water activity, deformation speed, and crispness characterization, *Journal of Texture Studies*, 40, 127 – 156.
- Chen, L., Umezuruike, L. O. 2103a. Texture measurement approaches in fresh and processed foods – A review. *Journal of Food Engineering*, 51, 823-835.
- Chen, L., Umezuruike, L. O. 2103b. Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods – A review. *Journal of Food Engineering*, 119, 497-507.

- Corn Quality Assurance Manual. The Snack Food Association. Alexandria, Virginia.
- Delgado, C. I., Zazueta, J. J., Gallegos, J. A., Aguilar, E., Ordorica, C. A., Jacobo, N., Camacho, I. L., Rocha, N. E., Cervantes, V. 2013. Contenido de compuestos fenólicos y actividad antioxidante de alimentos botana de tercera generación obtenidos por extrusión. *Congreso del Noroeste*, 8, 276-283.
- Duizer, L.M. 2013. Measurement of the texture of dry crisp products. *Instrumental Assessment of Food Sensory Quality*, 403-419.
- Falguera, V., Quintero, J.P., Jiménez, A., Aldemar, J., Ibarz, A. 2011. Edible films and coatings: structures, active functions and trends in their use. *Food Science and Technology*, 22, 292 – 303.
- Farkas, B.E., Singh, R.P., Rumsey, T.R. 1995. Modeling heat and mass transfer in inmersión frying. I, Model development. *Journal of Food Engineering*, 29, 211 – 226.
- Fellows, P. 2007. 2ª ed. *Tecnología del procesado de los alimentos: principios y práctica*. Acribia. Zaragoza, España.
- Fennema, O. 1993. 2ª ed. *Química de los alimentos*. Acribia. Zaragoza, España.
- Fermín, N., Venero, P., Conchado, D., García, J., Álvarez, C. 2009. Entrenamiento sensorial para la evaluación de la calidad de un jamón endiablado. *Revista UDO Agrícola*, 3, 640 – 652.
- García, M.A., Ferrero, C., Bértola, N., Martino, M., Zaritzky, N. 2002. Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fries products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 3, 391 – 397.
- Gowen, A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., Oliveira, J. 2007. Modelling the water absorption process in chickpeas (*Cicer arietinum* L.)—The effect of blanching pre-treatment on water intake and texture kinetics. *Journal of Food Engineering*, 78, 810 - 819.
- Haladjian, N., Fayad, R., Toufeili, I., Shadarevian, S., Sidahmed, M., Baydoun, E. 2003. pH, temperature and hydration kinetics of faba beans (*Vicia faba* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 27, 9 - 20.

- Hayakawa, F., Kazami, Y., Nishinari, K., Ioku, K., Akuzawa, S., Yamano, Y., Baba, Y., Kohyama, K. 2012. Classification of Japanese texture terms. *Journal of Texture Studies*, 44, 140-159.
- Kalogianni, E., Papastergiadis, E. 2014. Crust pore characteristics and their development during frying of french-fries. *Journal of Food Engineering*, 120, 175 - 182.
- Konica Minolta Sensing Americas, Inc. 2006. Comunicación precisa de los colores Konica Minolta Sensing Americas, Inc. [en línea]. [Fecha de consulta: 5 Enero 2015]. Disponible en: <http://sensing.konicaminolta.com.mx/learning-center/color-measurement/colorbasics.pdf>
- Konica Minolta Sensing Americas, Inc. 2013. Chroma Meter CR-400, Manual de instrucciones. Japón.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. 2000a. Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *Journal of Food Engineering*, 43, 147-154.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. 2000b. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*, 44, 39-46.
- Limsangouan, N., Takenaka, M., Sotome, I., Nanayama, K., Charunuch, c., Isobe, S. 2010. Functional properties of cereal and legume based extruded snack foods fortified with by-products from herbs and vegetables. *National Food Research Institute*, 44, 271 – 279.
- Lindbloom, B.J. 2008. Color Difference Calculator. [En línea]. [Fecha de consulta: 20 Julio 2015]. Disponible en: <http://www.brucelindbloom.com/index.html?ColorDifferenceCalc.html>
- López, M., Guadarrama, M.E., Medina, B.I., Villavicencio, M. 2007. Usos alternativos del cultivo de haba. Grupo Produce. [En línea]. [Fecha de consulta: 7 Agosto 2014]. Disponible en: [portal2.edomex.gob.mx/.../haba/.../icamex\\_arc\\_revha](portal2.edomex.gob.mx/.../haba/.../icamex_arc_revha).
- Luyten, H., Plijter, J.J., Van Vliet, T. 2004. Crispy/ crunchy crusts of cellular solid foods: a literature review with discussion. *Journal of Texture Studies*, 35, 445-492.

- Luyten, H., Van Vliet, T. 2006. Acoustic emission, fracture behavior and morphology of dry crispy foods: a discussion article. *Journal of Texture Studies*, 37, 221–240.
- Mahadevamma, S., Tharanathan, R.N. 2004. Processing of legumes: resistant starch and dietary fiber contents. *Journal of Food Quality*, 27, 289 – 303.
- Mohamed, A.A.A., Jowitt, R., Brennan, J.G. 1982. Instrumental and sensory evaluation of crispness: In friable foods. *Journal of Food Engineering*, 1, 55 – 75.
- Moreira, R.G. 2014. Vacuum frying versus conventional frying – An overview. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 116, 723-734.
- Nimkar, P.M., Chattopadhyay, P.K. 2001. Some physical properties of green gram. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80, 183 - 189.
- Ohaus Corporation. 2011. Manual de instrucciones, Analizador de Humedad MB45. Parsippany, E.U.A.
- Paredes, E., Quiroz, M., Quispe, K., Reyes, B., Velásquez, L., Zavaleta, N., Sanchez, J. 2012. Aplicación del modelo de Peleg para estudiar el efecto de la temperatura y dureza del agua durante la rehidratación de frijol caballero (*Phaseolus vulgaris*), Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Pedreschi, F., Moyano, P. 2004. Oil uptake and texture development in fried potato slices. *Journal of Food Engineering*, 70, 557 – 563.
- Phule, A.S., Annapure, U.S. 2013. Effect of coating of hydrocolloids on chickpea (*Cicer arietinum* L.) and green gram (*Vigna radiata*) splits during deep fat frying. *International Food Research Journal*, 20, 565-573.
- Rimac-Brcic, S., Letas, V., Rade, D., Simundic, B. 2003. Decreasing of oil absorption in potato strips during Deep fat frying. *Journal of Food Engineering*, 64, 237 – 241.
- Romani, S., Rocculi, P., Mendoza, F., Rosa, M. D. 2009. Image characterization of potato chip appearance during frying, *Journal of Food Engineering*, 93, 487 – 494.

- Roudaut, G., Dacremont, C., Pamies, B., Colas, B., Le Meste, M. 2002. Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. *Food Science and Technology*, 13, 217-227.
- Sala, R., Barroeta, A. 2003. *Manual de microscopía de piensos*. Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona, España.
- Sayar, S., Turhan, M., Sundaram, G. 2001. Analysis of chickpea soaking by simultaneous water transfer and water–starch reaction. *Journal of Food Engineering*, 50, 91-98.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2015. Producción agrícola-Ciclo: Primavera-Verano 2013. [En línea]. [Fecha de consulta: 6 Mayo 2015]. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>
- Serna, S. 1996. *Química, almacenamiento e industrialización de los cereales*. AGT Editor. D.F, México.
- Shafaei, S.M., Masoumi, A. A., Roshan, H. 2014. Analysis of water absorption of bean and chickpea during soaking using Peleg model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, disponible en línea el 6 de septiembre de 2014.
- Stier, R.F. 2000. Chemistry of frying and optimization of deep-fat fried food flavour- An introductory review. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102, 507-514.
- Stone, H., Sidel, J. 2004. Introduction to Sensory Evaluation. *Food Science and Technology*, 3, 1 – 19.
- Suquilanda, M. 2011. Producción orgánica de cultivos andinos. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). [en línea], [fecha de consulta: 14 Enero 2015]. Disponible en: [http://teca.fao.org/sites/default/files/technology\\_files/produccion\\_organica\\_de\\_cultivos\\_andinos.pdf](http://teca.fao.org/sites/default/files/technology_files/produccion_organica_de_cultivos_andinos.pdf)
- Szczesniak, A.S. 2002. Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 13, 215-225.
- Texturolab S.A. de C.V. s.f. Analizador de texturas TA.XT plus. Stable Micro Systems. [En línea], [fecha de consulta: 14 Enero 2015]. Disponible en:

<http://www.tecnologiaweb.info/texturolab/productos/8-texturolab-productos/6-ta-xtplus-texture-analyzer>

- Tirado, D., Acevedo, D., Guzman, L.E. 2012. Freído por inmersión de los alimentos. Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia.
- Turhan, M., Sayar, S., Gunasekaran, S. 2002. Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. *Journal of Food Engineering*, 53, 153 – 159.
- Varela, P., Chen, J., Fiszman, S., Povey, M.J.W. 2006. Crispness assessment of roasted almonds by an integrated approach to texture description: texture, acoustics, sensory and structure. *Journal of Chemometrics*, 20, 311 – 320.
- Varela, P., Salvador, A., Fiszman, S. 2009. On the assessment of fracture in brittle foods II. Biting or chewing?, *Food Research International*, 42, 1468–1474.
- Varela, P., Fiszman, S.M. 2011. Hydrocolloids in fried foods. A review. *Food Hydrocolloids*, 25, 1801 – 1812.
- Vance, G., Nolen, K. 2012. Sensory evaluation techniques — Make “good for you” taste “good”. *Physiology and Behavior*, 107, 598 – 605.
- Van Vliet, T., Visser, J. E., Luyten, H. 2007. On the mechanism by which oil uptake decreases crispy/crunchy behaviour of fried products. *Food Research International*, 40, 1122-1128.
- Vázquez, M.J., Chenlo, F., Moreira, R., Da Riva, P. 2007. Rehidratación de zanahorias previamente secadas con aire y deshidratadas osmóticamente. *Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 26 – 28.
- Vickers, Z. M. 1984. Crispness and crunchiness – A difference in pitch?. *Journal of Texture Studies*, 15, 157 – 163.
- Vincent, F.V. 2004. Application of fracture mechanics to the texture of food. *Engineering Failure Analysis*, 11, 695 – 704.
- Vitrac, O., Trystram, G., Raoult-Wack, A. 2000. Deep fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102, 529-538.



- Yildiz,A., Palazoglu,K., Erdogdu,F. 2007. Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 11 – 17.
- Ziaifar, M.A., Achir, N., Courtois, F., Trezzani, G.T. 2008. Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science Technology*, 43, 1410–1423.
- Ziaifar, M.A., Courtois, F., Trystam, G. 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering*, 33, 191- 212.