



## **UNIVERSIDAD DE CHILE**

Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas

Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química

Laboratorio de Inocuidad y Seguridad Alimentaria

Pontificia Universidad Católica de Chile.

### **“MITIGACIÓN DE LA FORMACIÓN DE ACRILAMIDA EN HOJUELAS DE PAPAS MEDIANTE EL USO DE FRITURA AL VACÍO”**

Memoria para optar al título de Ingeniero en Alimentos

#### **CAMILA BELÉN MUÑOZ GONZÁLEZ**

##### **PROFESOR PATROCINANTE**

**Eduardo Castro Montero.**

Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química.

Universidad de Chile.

##### **DIRECTORES DE MEMORIA**

**Eduardo Castro Montero.**

Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química.

Universidad de Chile.

**María Salome Mariotti Celis.**

Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos.

Pontificia Universidad Católica de Chile.

**Franco Pedreschi Plasencia.**

Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos.

Pontificia Universidad Católica de Chile.

**Santiago, Chile.**

**2015**

La presente memoria es parte del  
Proyecto FONDEF D10I1109 titulado  
“MINIMIZACIÓN DE LA FORMACIÓN DE ACRILAMIDA  
EN ALIMENTOS DE CONSUMO MASIVO EN CHILE”

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente le doy las gracias a la Universidad de Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile por permitirme realizar esta memoria de título, a Franco Pedreschi por dejarme ser parte del Proyecto FONDEF D10I1109 y trabajar en su laboratorio.

A mi directora de tesis María Salome Mariotti por su incalculable ayuda y contribución en esta memoria, gracias por creer en mí, darme la oportunidad de trabajar contigo y sobre todo por permitirme conocerte personalmente. A mi profesor patrocinante y director de tesis Eduardo Castro no solo por su ayuda en mi memoria sino también por todas las habilidades que desarrollé a lo largo de los años en sus clases.

A Juan Pablo Gómez y Nicolás Carvajal infinitas gracias por el aporte de sus conocimientos, el compromiso y la ayuda, sin duda no habría sido lo mismo sin ustedes, pero sobre todo gracias por su alegría y por su amistad. A Carolina Plaza y Veronica Dueik por su buena disposición y valiosa ayuda.

A mis padres Lastenia y René y a mi hermano Carlos, gracias por darme la oportunidad de convertirme en profesional, conozco muy bien todo el esfuerzo y el sacrificio que realizaron para permitirme hoy tener este gran logro. Les agradezco todo el amor y el apoyo que me han dado no solo en esta etapa, sino a lo largo de toda mi vida.

A mi amiga de toda la vida María José González por su cariño y apoyo incondicional, gracias por creer en mí y siempre motivarme a seguir adelante, gracias infinitas por tu amistad. A Eduardo Garrido por su amor y su apoyo durante todos estos años.

A los amigos que encontré en la universidad Estefanía Genskowsky y Francisco Contreras, gracias porque sin duda no estaría aquí sin su compromiso, responsabilidad y más importante su cariño y amistad.

Finalmente le doy gracias a Dios por esta etapa vivida, por todas las personas que cruzaron mi camino y formaron parte de este gran logro.

Muchas gracias a todos.

# ÍNDICE

ABSTRACT .....	II
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	2
2.1. MATERIA PRIMA .....	2
2.1.1 Descripción .....	2
2.1.2 Composición y Variedades .....	2
2.2. ACRILAMIDA .....	3
2.2.1. Descripción .....	3
2.2.2. Mecanismo de Formación de acrilamida en Alimentos .....	4
2.2.3. Toxicología y Peligro Potencial .....	7
2.2.4 Cuantificación de la acrilamida en matrices alimentarias .....	8
2.2.5 Tecnicas para la mitigación de acrilamida en alimentos .....	9
2.3 PROCESO DE FRITURA .....	11
2.3.1 Fritura Atmosférica .....	11
2.3.2 Fritura al Vacío .....	13
2.3.3 Fuerza Motriz Térmica Equivalente .....	13
3. HIPOTESIS DE TRABAJO .....	15
4. OBJETIVOS .....	16
4.1. OBJETIVO GENERAL .....	16
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
5. MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS .....	17
5.1. LUGAR DE TRABAJO .....	17
5.2. MATERIALES .....	17
5.2.1 Materia Prima .....	17
5.2.2 Reactivos e Insumos Principales .....	17
5.3. EQUIPOS .....	18
5.3.1 Realización de Muestras .....	18
5.3.2 Determinación Acrilamida .....	18
5.3.3 Determinación de Textura, Humedad y Contenido de Aceite .....	18
5.4 METODOLOGÍA .....	19
5.4.1 Diagrama de Bloques .....	19
5.4.2 Procedimiento .....	20

5.4.3	Análisis .....	23
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
6.1	Desarrollo de la técnica de cuantificación de acrilamida en hojuelas de papa.....	27
6.1.1	Evaluación del desempeño analítico para la técnica de extracción de acrilamida en hojuelas de papa.....	28
6.2	Tiempo para alcanzar “Punto de término de burbuja” en cada condición de fritura.....	30
6.3	Efecto de la fuerza motriz equivalente en la formación de Acrilamida .....	31
6.4	Efecto de la fuerza motriz equivalente sobre los atributos de calidad .....	34
6.4.1	Efecto de la fuerza motriz sobre el contenido de aceite.....	34
6.4.2	Efecto de la fuerza motriz sobre la textura .....	37
7.	CONCLUSIONES .....	40
8.	BIBLIOGRAFÍA .....	41
9.	ANEXOS .....	45
9.1	Análisis estadísticos para los procesos de fritura al vacío y atmosférico.....	45
9.1.1	Efecto de la presión de fritura en el contenido de acrilamida y los atributos sensoriales en hojuelas de papa. ....	45
9.1.2	Efecto de la fuerza motriz equivalente en la formación de Acrilamida y los atributos de calidad para fritura atmosférica y fritura al vacío.....	48
9.2	Conversión de unidades para la concentración de acrilamida. ....	54
9.3	Catálogo bomba para alto vacío en dos etapas .....	55

## RESÚMEN

La acrilamida es un compuesto catalogado como probable cancerígeno para humanos por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y se encuentra presente en alimentos amiláceos procesados a altas temperaturas, tales como las hojuelas de papa fritas a condiciones atmosféricas. Se han concentrado esfuerzos para su mitigación en alimentos, con el fin de disminuir la exposición al contaminante y preservando las características sensoriales del producto final. En este sentido, uno de los procesos con mayor viabilidad en productos fritos, es la fritura al vacío.

El objetivo general de esta tesis, fue el estudio del efecto de la fritura al vacío sobre la formación de acrilamida en hojuelas de papas y su influencia en el contenido de aceite y textura. Para lograr esto, se trabajó con el concepto de fuerza motriz térmica equivalente (FMTE) la cual permite una comparación efectiva entre los procesos de fritura atmosférica y fritura al vacío, se emplearon fuerzas motrices de 50°C, 60°C y 70°C, donde la fritura al vacío empleó una presión de 3 pulgadas de Hg y temperaturas de aceite de 96°C, 106°C y 116°C respectivamente. Mientras que, para la fritura atmosférica las temperaturas de aceite fueron 150°C, 160°C y 170°C. Los resultados obtenidos mostraron que la fritura al vacío es un proceso efectivo en la mitigación de la acrilamida en hojuelas de papa, ya que reduce el contenido del contaminante hasta en un 57%. Además, el contenido de aceite se redujo hasta en un 28% y no afectó significativamente ( $p \text{ value} \leq 0,05$ ) el parámetro de textura. La influencia de la FMTE en la fritura al vacío se reflejó en el contenido de acrilamida y de aceite, ya que, para ambos parámetros existieron diferencias significativas ( $p \text{ value} \leq 0,05$ ) entre la fuerza motriz 70°C y las fuerzas motrices de 60°C y 50°C, mas entre estas dos últimas no hubo diferencias significativas ( $p \text{ value} \leq 0,05$ ). Este resultado se debió principalmente a la influencia de la temperatura y la pérdida de humedad a medida que se incrementan las temperaturas de trabajo.

Finalmente se comprobó que la fritura al vacío logró mitigar de manera efectiva el contenido de acrilamida en hojuelas de papas fritas en todas las fuerzas motrices estudiadas, siendo la fuerza motriz de 50°C la que obtuvo la menor concentración del contaminante, el contenido más bajo de aceite y además preservó la textura.

## ABSTRACT

### **Mitigation of acrylamide formation in potato chips using vacuum frying**

Acrylamide is a compound classified as a probable human carcinogen by the International Agency for Research on Cancer (IARC) and is present in starchy foods processed at high temperatures, such as potato chips fried at atmospheric conditions. Efforts have been made to mitigate its presence in food and preserving the sensory characteristics of the final product. In this regard, one of the processes with increased viability in fried products is vacuum frying.

The overall objective of this thesis was to study the effect of vacuum frying on the formation of acrylamide in potato chips and its influence on oil content and texture. To achieve this, the concept of equivalent thermal driving force (ETDF) was introduced, this condition allows an effective comparison between atmospheric and vacuum frying. In the study driving forces of 50°C, 60°C and 70°C were used, where vacuum frying employed a pressure of 3 inches Hg and oil temperatures of 96°C, 106°C and 116°C respectively. While, for atmospheric frying oil temperatures were 150°C, 160°C and 170 °C.

The results showed that vacuum frying is an effective mitigation process of acrylamide in potato chips because it reduces the contaminant content up to 57%. Furthermore, the oil content was reduced to 28% and not significantly ( $p$  value  $\leq 0.05$ ) affected the texture parameter. The influence of ETDF in vacuum frying was reflected in the content of acrylamide and oil, since for both parameters were significant differences ( $p$  value  $\leq 0.05$ ) between the driving force 70°C and the driving forces of 60°C and 50°C. Among these last two there were no significant differences ( $p$  value  $\leq 0.05$ ). This result was mainly due to the influence of temperature and moisture loss as operating temperatures increase.

Finally, the use of low pressure in the vacuum frying managed effectively mitigate acrylamide content in potato chips, being the driving force of 50°C the one with lowest concentration of the contaminant, the lowest oil content and preserved the texture.



# 1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento térmico es una operación unitaria ampliamente utilizada en la industria de los alimentos, ya que, al aplicar altas temperaturas es posible generar alimentos inocuos, estables en el tiempo y con atributos de calidad deseables por el consumidor, como son: el aroma, el sabor, el color y la textura. Sin embargo, las mismas reacciones químicas asociadas a la generación de estas características positivas, también son las responsables de la pérdida de nutrientes termo-sensibles, lo que disminuye el valor nutricional de los alimentos y junto a ello, las altas temperaturas de proceso, facilitan la generación de neo-contaminantes los cuales pueden ser un riesgo potencial en la salud de los consumidores. Tal es el caso de la reacción de Maillard, la cual es responsable no sólo, de la generación de olores y sabores deseables en los alimentos fritos por inmersión, sino también, es la vía mayormente aceptada para la formación de acrilamida, un compuesto neurotóxico generado a temperaturas superiores a 120°C por la reacción de azúcares reductores con el aminoácido asparagina y que ha sido catalogada por la Agencia International para la Investigación del Cáncer (IARC) como un compuesto probablemente cancerígeno en humanos. Estudios realizados por la FDA en el 2006 en alimentos de consumo masivo, indicaron que las hojuelas de papas fritas poseen un alto contenido de acrilamida, por lo que mitigar el contaminante en este producto sin afectar las características deseadas por el consumidor, se hace primordial con el fin de disminuir su exposición, y por ende el posible riesgo a la salud.

La presente tesis tiene como objetivo general el estudio del efecto de la fritura al vacío sobre la formación de acrilamida en hojuelas de papas, con el fin de generar un producto con características similares a los de la fritura atmosférica pero con menores niveles de acrilamida y aceite absorbido.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. MATERIA PRIMA

#### 2.1.1 Descripción

La papa (*Solanum tuberosum*) es una planta dicotiledónea, herbácea anual que pertenece a la familia de las solanáceas. El fruto es una baya pequeña, oval y carnosa en cuyo interior se encuentran las semillas sexuales, su color varía dependiendo de la variedad de ésta (Sumba, 2008).

#### 2.1.2 Composición y Variedades

La papa es un tubérculo rico en carbohidratos, muy popular a nivel mundial y preparado en una variedad de formas. Recién cosechadas, estas contiene aproximadamente un 80% de agua y 20% de materia seca, donde alrededor del 60% de la materia seca es almidón (FAO, 2008). Posee un contenido de grasa de 0,1% además de minerales como Hierro, Calcio, Fósforo y Potasio como se observa en la **Tabla 1** (De La Fuente et al, 2010).

**Tabla 1.** Información Nutricional de la papa Yagana INIA (De La Fuente et al, 2010).

<b>Información Nutricional</b>		
Porción: 1 papa (120g)		
Porción por envase 5kg: 40 aprox.		
	100 g	1 porción
<b>Energía (kcal)</b>	74,4	89,3
<b>Proteína (g)</b>	2,1	2,5
<b>Grasa total (g)</b>	0,1	0,1
<b>Hidratos de Carbono disponibles (g)</b>	16,4	19,7
<b>Azucares (g)</b>	0,7	0,9
<b>Almidón (g)</b>	15,7	18,8
<b>Sodio (mg)</b>	14,0	16,8
<b>Potasio (mg)</b>	481,4	577,7
		(*)
<b>Calcio (mg)</b>	1,6	1,9 (0,2%)
<b>Hierro (mg)</b>	0,3	0,3(2,1%)
<b>Fósforo (mg)</b>	44,0	52,7(6,6%)
(*) % en relación a la Dosis Recomendada		

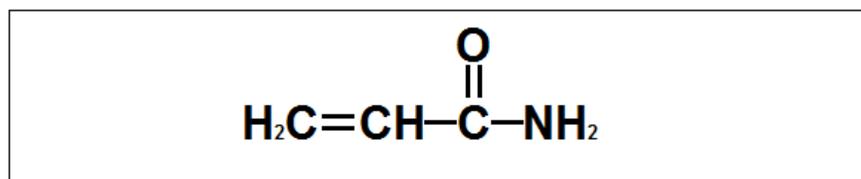
Para determinar el uso o calidad de la papa, el color de la cáscara o el número de ojos no son importantes; pero si lo son la cantidad de agua y materia seca que ésta contiene. Estas particularidades no resultan evidentes a la vista ni al tacto, pero es posible asociarla con la variedad de papa seleccionada. Considerando esto la ODEPA recomienda como variedades más idóneas para el proceso de fritura la Yagana-Inia, Cardinal, Asterix-Inia, Desireé y Karu-Inia (Barrios, 2009).

## 2.2. ACRILAMIDA

### 2.2.1. Descripción

La acrilamida o 2-propenamida (CAS No. 79-06-1) es un sólido cristalino incoloro, inodoro y altamente soluble en agua. Este químico ha sido producido comercialmente desde 1954 y se obtiene mediante la hidratación catalítica del acetonitrilo, sus principales usos son industriales, como floculante en la clarificación de agua, elaboración de pegamentos, estabilizante de suelo, etc. Es una amida insaturada muy reactiva, ya que contiene un doble enlace activado, y es usado alrededor del mundo para sintetizar poliacrilamida (**Figura 1**). La acrilamida es estable a temperatura ambiente pero polimeriza en la fusión o expuesta a radiación ultravioleta. Posee un punto de fusión de 84.5°C y un punto de ebullición de 136°C (Hedegaard, 2007).

**Figura 1.** Molécula de Acrilamida (Mottram et al, 2002).



## **2.2.2. Mecanismo de Formación de acrilamida en Alimentos**

La formación de acrilamida en alimentos es el resultado de la contribución de diferentes vías, como es la reacción de Maillard y la Oxidación Lipídica entre otras, donde, la predominancia de una de éstas, dependerá principalmente de la presencia de los precursores en el alimento (Hedegaard, 2007). Para el caso particular de productos a base de papa tratados térmicamente, investigaciones como las de Mottram et al (2002) y Stadler et al (2002) indican que la reacción de Maillard en presencia del aminoácido asparagina, son la principal causa del alto contenido del contaminante.

### **I. Reacción de Maillard**

La reacción de Maillard fue descubierta por el químico francés Louis Maillard, sin embargo no fue hasta 1953 cuando el químico norteamericano John Hodge presentó el primer esquema coherente de la reacción y que es todavía utilizado (Hodge, 1953).

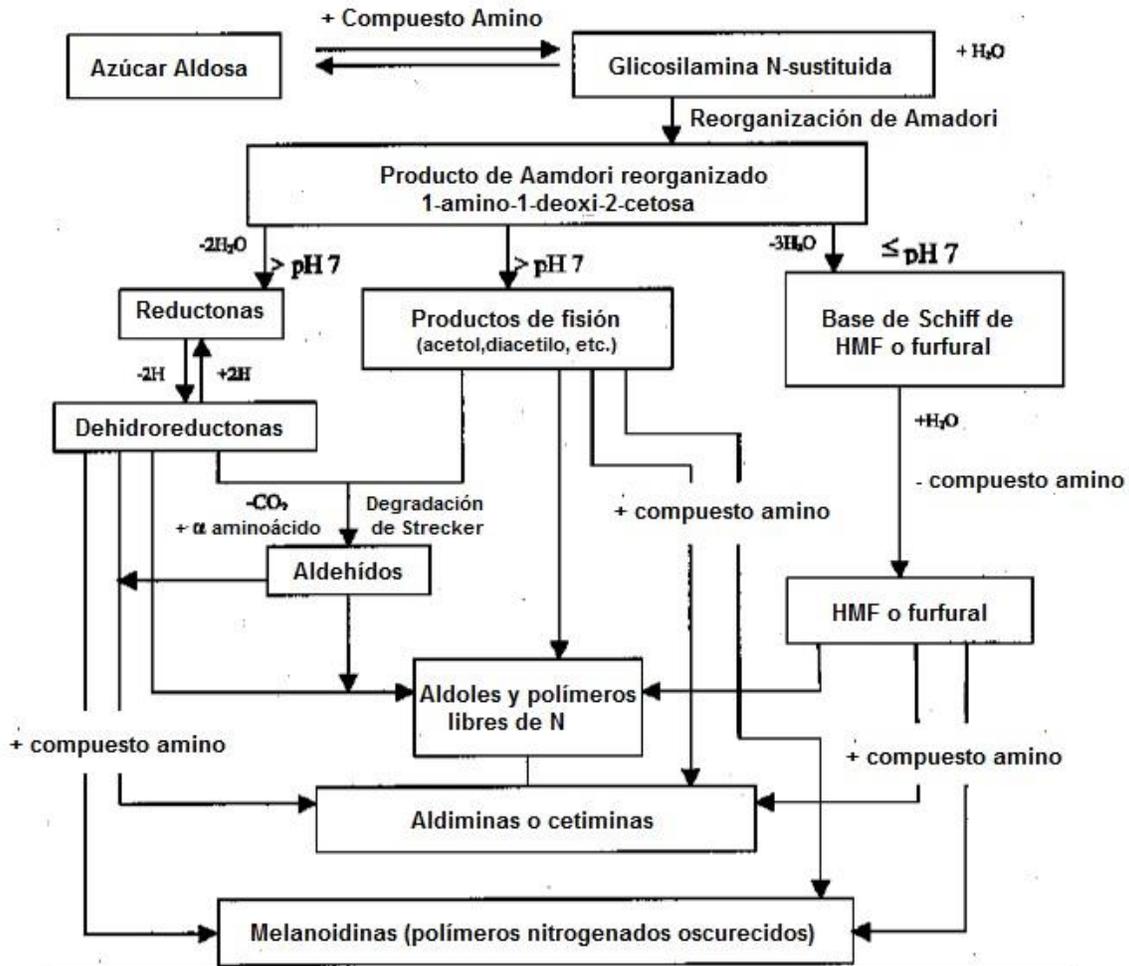
Desde que los alimentos han sido cocinados a través de la historia, la reacción de Maillard ha tenido un rol fundamental en la mejora de características sensoriales. La industria de alimentos la ha considerado su principal aliada por ser capaz de generar aromas, sabor, color y texturas en procesos como el tostado de granos de café y cacao, el horneado y fritura de productos de panadería y pastelería, además de la cocción de cereales y el asado de las carnes, entre otros. Por otra parte durante la reacción de Maillard ocurre la formación de un amplio rango de productos los cuales presentan un riesgo potencial para la salud tales como la acrilamida (Hedegaard, 2007).

Se ha demostrado que la vía principal de formación de acrilamida en alimentos es a través de la reacción de Maillard en presencia de asparagina. Estudios con isótopos demostraron que la columna vertebral de la molécula de acrilamida proviene de este aminoácido (Zyzak et al, 2003). Sin embargo para alimentos a base de papa procesados a altas temperaturas, el nivel del contaminante dependerá principalmente de los azúcares reductores presentes en la materia prima.

Según la variedad, temporada de cosecha y almacenamiento de la papa los niveles de azúcares varían considerablemente, lo que afectará el contenido final de acrilamida en el producto (Pedreschi et al, 2014).

La formación de la acrilamida es termo-dependiente, puesto que numerosos estudios demuestran que se necesitan temperaturas sobre los 120°C para su generación (Becalski et al, 2003; Mottram et al, 2002; Stadler et al, 2002). Para alimentos derivados de origen vegetal como papas y cereales, ésta comienza con la reacción del compuesto carbonilo (azúcar reductor) y el aminoácido asparagina. De dicha reacción resulta la formación de la conjugación correspondiente N-glicosil y la posterior formación de una base de Schiff por la deshidratación a altas temperaturas. Luego de la descarboxilación, la base de Schiff puede generar acrilamida por medio de su descomposición, o bien luego de una posterior hidrólisis derivar a aminopropiamida, que forma acrilamida por la eliminación de su grupo amino (**Figura 2**). La característica más importante para la formación de acrilamida a través de la reacción de Maillard es la presencia de los precursores necesarios en la materia cruda tales como azúcares reductores (glucosa y fructosa) y aminoácidos en la forma de asparagina libre además de una combinación del tiempo y la temperatura de proceso (Pedreschi et al, 2014).

**Figura 2.** Formación de Acrilamida a través de la Reacción de Maillard (Pedreschi et al, 2014).



## II. Oxidación Lipídica

Si bien, es aceptado que la formación de acrilamida se debe principalmente a la reacción de Maillard, algunos estudios han propuesto una contribución efectiva de la oxidación de lípidos en la formación de ésta (Zamora & Hidalgo, 2008). Esta reacción tiene un gran impacto en la calidad final de los alimentos y se ha demostrado que compuestos carbonilos derivados compiten de forma efectiva para la formación del contaminante (Capuano, 2010).

Aunque químicamente las estructuras de lípidos y carbohidratos son diferentes, los productos derivados de la oxidación lipídica pueden reaccionar con la asparagina libre a través de un mecanismo de radicales, en donde lípidos oxidados con grupos altamente reactivos (carbonilos con grupos  $\alpha,\beta,\gamma,\delta$  di-insaturados e hiperperóxidos con grupos diinsaturados) compiten por la reacción amino-carbonil y los mismos productos intermedios son frecuentemente producidos por vías de reacción idénticas o muy similares a la de los carbohidratos (Capuano, 2010).

Además, ciertos lípidos secundarios de la oxidación lipídica podrían convertir aminoácidos en sus respectivos aldehídos Strecker, dependiendo de la presencia de oxígeno en la reacción, por lo tanto se sugiere una ruta potencial que contribuye a la formación de acrilamida en alimentos tratados térmicamente (Zamora & Hidalgo, 2008).

### **2.2.3. Toxicología y Peligro Potencial**

La acrilamida ha sido clasificada por la Agencia Internacional de la Investigación del Cáncer (IARC) como “Probable cancerígeno en humanos” y reconocido por el comité científico en alimentos (SCF) de la Unión Europea (EU) como un cancerígeno genotóxico (Pedreschi et al, 2014).

La acrilamida es metabolizada in vivo a glicidamida, un reactivo químico epóxido, que da cuenta de sus efectos genotóxicos, algunos ejemplos de éstos incluyen la inducción de mutaciones genéticas y anomalías cromosomales en células cultivadas in vitro, roedores machos con fertilidad reducida y efectos adversos en el conteo de sus espermatozoides (Friedman et al, 1995; Johnson et al, 1986).

En dos estudios a largo plazo realizado en ratas, se encontró que la acrilamida aumenta la incidencia de un sin número de tumores benignos y malignos en una variedad de órganos, además de inducir tumores en pulmones y en la piel en ratones (Hedegaard, 2007; Bull et al, 1984).

La neurotoxicidad asociada a la acrilamida en humanos se debe principalmente a una exposición ocupacional y accidental, ya que aún no se ha establecido una dosis

mínima asociada al consumo de alimentos. La acrilamida ha sido detectada en alimentos preparados por cocción doméstica e industrial, donde se han observado altos niveles de ésta en algunas categorías. La FDA encontró ocho categorías de alimentos principales (papa fritas/bastones, papas fritas/hojuelas, papas horneadas, cereales de desayuno, tostadas, galletas, pan blando y café) que representan más del 80% de la ingesta de acrilamida para el público general en EE.UU. La exposición varía entre individuos debido a sus hábitos alimenticios y las diferentes prácticas de cocción en los alimentos, pero se hace preocupante para la comunidad científica que sean los niños, los que están expuestos a niveles de acrilamida de 2 a 3 veces mayor que los consumidores adultos, puesto que la exposición está expresada en base al peso corporal del individuo (Hedegaard, 2007).

#### **2.2.4 Cuantificación de la acrilamida en matrices alimentarias**

Desde que distintos investigadores en varios países informaran la existencia de acrilamida en un amplio rango de alimentos tratados térmicamente, el estudio de este contaminante se ha diversificado y generado un interés público por conocer el riesgo asociado al consumo de dichos alimentos. Si bien el 2003 la U.S Food and Drugs Administration (FDA) publicó una metodología para entregar a otros investigadores una base en la cuantificación del contenido de acrilamida, en la actualidad aún no existe una metodología oficial.

Considerando que los alimentos como matrices de estudio son muy complejas y la acrilamida es un contaminante “traza” del producto, la limpieza de las muestras es un proceso fundamental y particularmente difícil, ya que al eliminar interferentes como proteínas, lípidos y carbohidratos se puede indirectamente afectar el contenido de acrilamida. Estudios realizados por FDA (2003), Pedreschi et al (2011) y Ciesarova et al (2006), entre otros, presentan como una metodología efectiva la utilización de la extracción en fase sólida para la limpieza de las muestras homogeneizadas. La extracción en fase sólida se define como la tecnología que utiliza partículas sólidas para separar químicamente diferentes compuestos de la muestra. La retención o elusión de un compuesto de interés dependerá de la

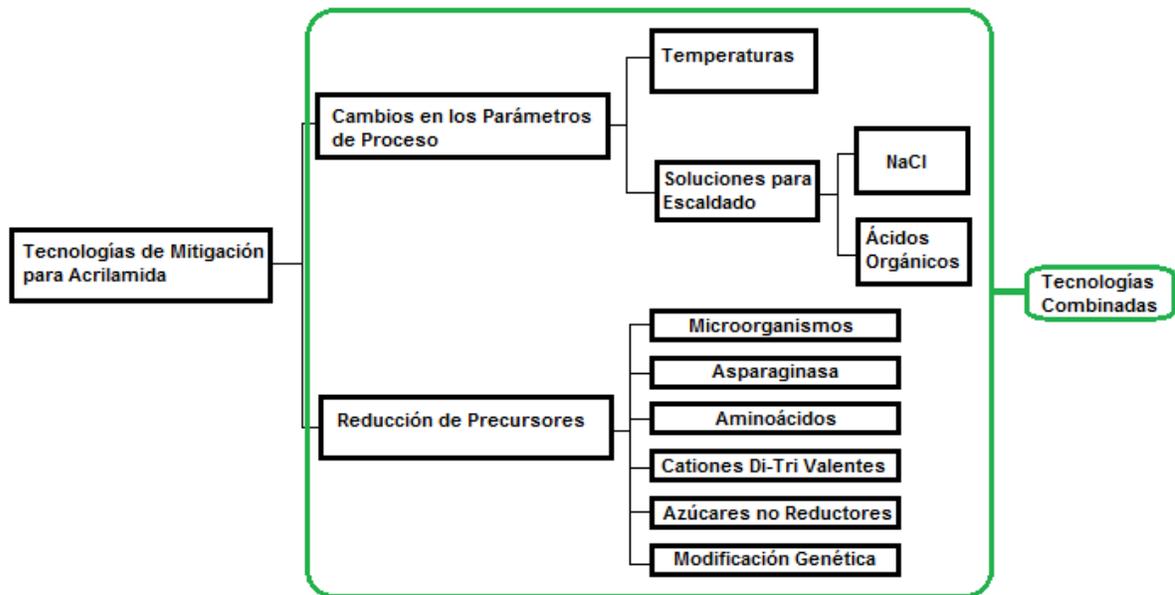
afinidad entre la muestra líquida, el sólido empacado y el eluyente en la columna, donde por adsorción o penetración ciertos compuestos son atraídos hacia el empaque o eluidos fuera de la columna. Si bien la teoría detrás de la extracción en fase sólida es simple, ofrece buenos resultados a la hora de eliminar interferentes en las muestras (Simpson, 2010).

Los equipos utilizados frecuentemente para la cuantificación de la acrilamida son cromatógrafos asociados a espectrógrafos de masa, donde la acción conjunta de ambas tecnologías puede separar e identificar el compuesto de interés. Dentro de los métodos más utilizados, destacan la cromatografía líquida la cual, es usada en la cuantificación de compuestos no volátiles y solubles en agua. Para la determinación de la acrilamida normalmente se utiliza la cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC). También para ensayos cuantitativos se utiliza la cromatografía gaseosa asociada a un espectrógrafo de masa con o sin un proceso de derivatización, ya que, esta técnica tiene como ventaja la separación simultánea del aislado de interés desde la matriz del alimento. Existen métodos aún en desarrollo para la cuantificación de acrilamida, como son: la electroforesis capilar y los métodos bio-analíticos, los cuales surgen como respuesta al alto consumo de tiempo que requieren los procedimientos convencionales, en especial la etapa de preparación y limpieza de las muestras (Oracz et al, 2011).

### **2.2.5 Técnicas para la mitigación de acrilamida en alimentos**

Durante la última década, se han concentrado esfuerzos en reducir los niveles de acrilamida en alimentos procesados térmicamente. Durante sus estudios y considerando el mecanismo de formación del contaminante, destacan dentro las técnicas de mitigación: la reducción de precursores en la materia prima (azúcares reductores y asparagina), cambios de los parámetros en los procesos térmicos y la combinación de ambas técnicas (**Figura 3**) (Mariotti, 2011).

**Figura 3.** Tecnologías de Mitigación de Acrilamida (Mariotti, 2011).



Dentro de los métodos patentados, para reducir los precursores de acrilamida se encuentran: la utilización de microorganismos por su interacción con los azúcares reductores y la asparagina, el consumo de asparagina mediante la enzima asparaginasa, la adición de aminoácidos como lisina y cisteína para generar competitividad por el compuesto carbonilo, el reemplazo de azúcares reductores por azúcares no reductores, la adición de cationes di y tri-valentes (NaCl y CaCl<sub>2</sub>) como supresores de la reacción de Maillard en su etapa inicial, además de la modificación genética de la materia prima, para producir menores cantidades de azúcares reductores y asparagina (Mariotti, 2011).

Otras tecnologías patentadas se centran en la mitigación mediante cambios en los parámetros del proceso, siendo el escaldado de la materia prima en soluciones con distintos compuestos (cationes di o tri-valentes, aminoácidos, alterador de pH solución) la más utilizada no sólo por su fácil implementación, sino también, porque puede disminuir los niveles de acrilamida en el producto final entre un 50% a un 80% (Mariotti, 2011).

El desarrollo de acrilamida en los procesos térmicos puede estar determinado por diferentes parámetros, siendo para la fritura los más relevantes: temperatura, tiempo de proceso, humedad y actividad de agua, entre otros (Mariotti, 2011). Estudios realizados por Mottram et al (2002) y Stadler et al (2002) confirmaron la dependencia térmica de la formación de acrilamida en los alimentos por lo tanto, tecnologías basadas en la disminución de este parámetro en el proceso de fritura podrían ser efectivos en la mitigación del contaminante, siendo una opción viable la utilización de bajas presiones.

## **2.3 PROCESO DE FRITURA**

### **2.3.1 Fritura Atmosférica**

La fritura, es uno de los más antiguos y más utilizados procesos en la preparación de alimentos. Sin duda, los productos fritos tienen una gran importancia para la industria, ya que poseen gran popularidad entre los consumidores. El problema fundamental con este proceso, es la gran cantidad de aceite absorbido por el producto final, el cual puede tener valores cercanos al 40% de su peso total (Bouchon, 2009).

La fritura por inmersión, se define como el proceso donde un alimento es cocinado en aceite comestible calentado sobre el punto de ebullición del agua. El proceso es tradicionalmente llevado a cabo bajo condiciones atmosféricas y las temperaturas de fritura se mueven en un rango de 130°C a 190°C, donde las temperaturas más comúnmente utilizadas se encuentran entre los 170°C y 190°C. Es una operación unitaria compleja que involucra altas temperaturas, significativos cambios microestructurales tanto en la superficie como en el cuerpo de la hojuela de papa, y un simultáneo intercambio de calor y masa, resultando en flujos opuestos de vapor de agua (burbujas) y aceite en la superficie del alimento (Mariscal & Bouchon, 2008).

El proceso de fritura se define en 4 etapas: la primera, llamada calentamiento inicial es el periodo de tiempo donde la superficie del producto es calentado desde la temperatura inicial, hasta el punto de ebullición del agua a la presión de trabajo. Este periodo se caracteriza por ser breve, ya que una parte insignificante de agua

es eliminada desde el alimento. En la segunda etapa, ocurre la ebullición del agua desde la superficie del producto. Esta etapa se caracteriza por la pérdida rápida de humedad y el comienzo de la formación de la corteza característica. El tercer período es el decrecimiento, y se caracteriza por ser el de mayor pérdida de humedad, además de ser la etapa de mayor duración. Por último, la etapa final se denomina como punto de término de burbuja donde finaliza la pérdida de agua desde el alimento para obtener un producto con humedad final cercana al 2% (Dueik & Bouchon, 2011).

### **2.3.1.1 Absorción de Aceite**

Para obtener productos con un bajo contenido de aceite, es esencial entender el mecanismo involucrado durante el proceso de fritura. Luego de años de investigación, hoy se sabe que la absorción de aceite en los productos fritos ocurre mayoritariamente en la etapa de enfriamiento. Diferentes investigadores han estudiado las razones detrás de este fenómeno y a continuación se presentan algunos de los resultados publicados. Ufheil & Escher (1996) propusieron que la absorción de aceite, es un fenómeno de superficie que involucra un equilibrio entre la adhesión y el drenaje de aceite, cuando el producto es retirado del medio de fritura. Moreira et al (1997) proponen que la absorción del aceite ocurre en la etapa de enfriamiento, por la diferencia entre la temperatura del producto y del ambiente, esto genera un aumento en la presión capilar y por ende aumenta la tensión superficial en el poro, lo que causa que el aceite fluya al interior del espacio vacío. Gamble et al (1987) proponen que la mayor cantidad de aceite es absorbida, cuando el producto es removido del aceite por el efecto de vacío que se genera al interior del poro con la condensación del vapor de agua en su interior.

En la actualidad, distintas investigaciones han logrado caracterizar la cinética de absorción del aceite e incluso modelar ecuaciones para predecir la absorción de éste. Bouchon & Pyle (2005) fueron capaces de explicar como ocurre la absorción de aceite en la etapa de enfriamiento en función de la presión capilar y la presión de vapor. La presión al interior del poro disminuye en la etapa de enfriamiento debido a la condensación del vapor, la diferencia de presión existente obliga al

aceite a penetrar hacia el interior de la estructura por ende el aceite presente en la superficie del producto es determinante en el contenido final de aceite.

### **2.3.2 Fritura al Vacío**

La fritura al vacío se define como el proceso de fritura que se realiza a presiones muy por debajo de los niveles atmosféricos, preferiblemente bajo 6,65 kPa (50 Torr). A bajas presiones, el punto de ebullición del agua en los alimentos es más bajo, por lo tanto, la freidora al vacío puede operar a temperaturas menores ( $< 100^{\circ}\text{C}$ ) y aun así conseguir productos crocantes, bajos en aceite y con un buen color (Pandey & Moreira, 2012). Por otra parte la ausencia de aire durante la fritura, puede inhibir reacciones de oxidación (Troncoso et al, 2009).

La fritura al vacío es una buena opción a la fritura convencional, ya que puede generar snacks más saludables, a base de frutas y hortalizas, con un menor contenido de aceite y atributos de calidad deseables. En la literatura, sólo algunos trabajos han sido encontrados en relación con este tema ya que la investigación en esta área está comenzando. A la fecha, la fritura al vacío ha demostrado tener ventajas que incluyen: reducción del contenido de aceite en el producto frito, preservación del color, sabor y aroma, reducción de los efectos adversos en la calidad del aceite y posiblemente, disminuir el contenido de acrilamida en papas fritas. En general, todos los beneficios asociados al proceso, derivan principalmente de las bajas temperaturas empleadas y la mínima exposición al oxígeno (Mariscal & Bouchon, 2008)

### **2.3.3 Fuerza Motriz Térmica Equivalente**

Con el objetivo de evaluar de forma efectiva los procesos de fritura atmosférica y fritura al vacío, se emplea el concepto de fuerza motriz térmica equivalente, la cual se define como la diferencia entre la temperatura del aceite y la temperatura de ebullición del agua a la presión de trabajo. Este parámetro dependiente de la temperatura que logra homologar las condiciones de trabajo y mantener una diferencia constante entre los procesos de fritura y por ende hacer los resultados obtenidos comparables (Mariscal & Bouchon, 2008).

**Figura 4.** Formula de la fuerza motriz térmica equivalente a la presión de trabajo (Mariscal & Bouchon, 2008).

$$\Delta T = T_{aceite} - T_{ebullición\ agua}$$

### **3. HIPOTESIS DE TRABAJO**

Es factible mitigar la formación de acrilamida en hojuelas de papas sin afectar considerablemente sus atributos de calidad mediante el uso de la fritura al vacío.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

- Estudiar el efecto de la fritura al vacío sobre la formación de acrilamida en hojuelas de papa con el fin de reducir su presencia y sin afectar considerablemente sus atributos de calidad.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar una técnica de cuantificación de acrilamida para hojuelas de papas compatible con un equipo GC-MS.
- Estudiar el efecto de la fuerza motriz térmica equivalente sobre la formación de acrilamida de hojuelas de papas fritas en condiciones de vacío.
- Estudiar el efecto de la fuerza motriz térmica equivalente sobre los atributos de calidad: (i) textura y (ii) contenido de aceite de hojuelas de papas fritas en condiciones de vacío.

## **5. MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS**

Se estudiará la fritura al vacío para hojuelas de papas fritas con el fin de obtener un producto final con bajo contenido de acrilamida sin afectar considerablemente sus atributos de calidad. Para cumplir dicho objetivo se describen a continuación los materiales y método necesarios para el desarrollo de las actividades asociadas al cumplimiento de cada objetivo específico.

### **5.1. LUGAR DE TRABAJO**

Todo el desarrollo experimental y analítico de la presente memoria se realizó en el Laboratorio de Inocuidad y Seguridad Alimentaria, ubicado en el Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

### **5.2. MATERIALES**

#### **5.2.1 Materia Prima**

- Papas variedad Yagana.
- Aceite 100% maravilla alto oleico, marca Camilo Ferron.

#### **5.2.2 Reactivos e Insumos Principales**

- Metanol Grado Analítico Merck
- Acetonitrilo Grado Analítico Merck
- Éter de Petróleo, Grado Analítico Merck
- Acrilamida Merck 99,9% for electrophoresis special quality for molecular biology.
- Acrilamida d-3 SIGMA-ALDRICH standar solution
- Catridge LiCholut RP- 18 (40-63 um) 500 mg 3 ml Standard Meck

#### **5.2.3 Insumos Secundarios**

- Tubos de centrifuga falcon 50 ml.
- Jeringa hamilton de 50 uL.
- Jeringa hamilton de 1000 uL.
- Jeringas descartables de 3 ml y filtros de jeringa 0,2 um Merck
- Viales 2 ml.
- Material de vidrio de laboratorio.

## **5.3. EQUIPOS**

### **5.3.1 Realización de Muestras**

- Fiambrera marca Fac, modelo modelo F250-E
- Sacabocado acero inoxidable 3,8 cm de diámetro.
- Freidora para vacío marca Dueik.
- Condensador marca Dueik
- Bomba para vacío de dos etapas marca Dosivac, modelo DVR 140

### **5.3.2 Determinación Acrilamida**

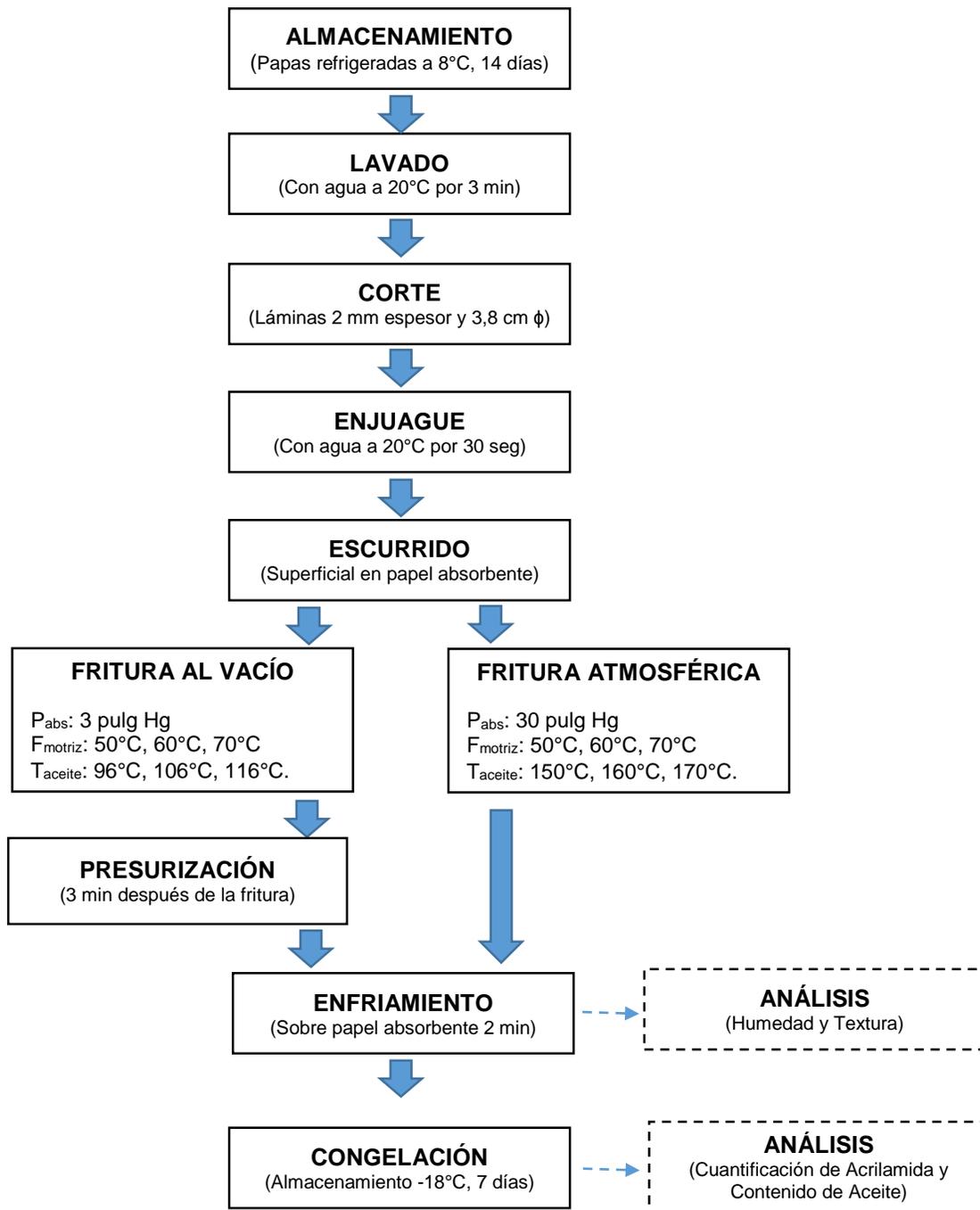
- Sonicador marca VWR, modelo 970493-966.
- Centrifuga marca Hettich, modelo MIKRO 220R.
- Rotavapor marca Heidolph, modelo Hei-VAP advantage.
- Bomba marca Vacuubrand, modelo MZ 2C NT + AK + EK.
- Balanza Analítica marca A&D Company, modelo GR-200.
- CTC PAL ALS marca Agilent, modelo GC sampler 80.
- GC/MS marca Agilent, modelo 7890A GC System con Agilent 597C XL EI/CI MSD.
- Procesadora de alimentos marca Philips, modelo HR1617 650W.
- Vortex marca Heidolph, modelo REAX top
- Columna GC marca Agilent, modelo DB-FFAP 122-3232, 30 m, 0,25 mm ID, 25 micras.

### **5.3.3 Determinación de Textura, Humedad y Contenido de Aceite**

- Texturómetro marca Stable Micro System, modelo TAX-XT2 plus.
- Estufa marca Binder.
- Balanza Analítica GR-200 A&D Company (a 0,0001g)

## 5.4 METODOLOGÍA

### 5.4.1 Diagrama de Bloques



#### **5.4.2 Procedimiento**

- Almacenamiento

Las papas de variedad Yagana, luego de ser compradas a un proveedor en la Vega Central fueron almacenadas en refrigeración a 8°C. Previo a su utilización éstas fueron puestas a temperatura ambiente por 8 horas y descartadas si se encontraban almacenadas por un periodo mayor a 14 días.

- Lavado

Las papas se lavaron con abundante agua fría para extraer la tierra de la superficie y posteriormente se secaron con papel absorbente.

- Corte

Las papas se cortaron con una laminadora en forma longitudinal para obtener láminas de 2,0 mm de espesor. Con un sacabocado se cortaron láminas circulares de 3,8 cm de diámetro.

- Enjuague

Las papas estandarizadas se enjuagaron con agua de la red de agua potable disponible, durante 30 segundos, para remover el exceso de almidón en la superficie.

- Escurrido

Las papas se colocaron sobre papel absorbente para secar el agua remanente en la superficie y evitar que ésta entre en contacto con el aceite.

- Fritura al Vacío

El experimento se llevó a cabo utilizando 3 condiciones experimentales a una presión de 3 pulgadas de Hg. Bajo dicha condición el punto de ebullición del agua es de 46°C y por ende las temperaturas del aceite a utilizar fueron 96°C, 106°C, 116°C para fuerzas motrices equivalente de 50°C, 60°C, 70°C respectivamente.

La freidora con 3,5 L de aceite se calentó con agitación durante media hora a la temperatura a utilizar, con el fin de obtener un calentamiento uniforme. Las papas estandarizadas se colocaron en el canasto en lotes de 4 unidades cada uno, donde se les puso una rejilla cóncava que permitió que éstas floten sin salir del canastillo. Una vez situadas las papas, la freidora se tapó y cerró con pernos de forma manual, procurando que existiera un cierre estanco. Luego de esto, la bomba para alto vacío en dos etapas (**Anexo 9.3**) fue encendida y se abrieron las llaves de paso, tanto en ésta como en la freidora para permitir que se realizara la reducción de la presión a 3 pulgadas de Hg. Una vez alcanzado los parámetros establecidos de temperatura y presión, el canasto se sumergió en el aceite durante el tiempo necesario hasta que se alcanzó el punto de término de burbuja, el cual se caracteriza por la obtención de hojuelas de papa con un porcentaje de humedad cercano al 2%.

- Presurización

Luego de transcurrido el tiempo establecido por la fritura al vacío, el canasto se sacó del aceite y escurrió por 3 minutos, posteriormente, el equipo se presurizó y abrió para sacar las muestras.

- Fritura Atmosférica

El proceso de fritura utilizó 3 condiciones experimentales a presión atmosférica. Bajo dicha condición el punto de ebullición del agua se asume 100°C y por ende las temperaturas del aceite a utilizadas fueron 150°C, 160°C, 170°C para fuerzas motrices equivalente de 50°C, 60°C, 70°C respectivamente. La freidora con 3,5 L de aceite se calentó con agitación durante media hora, con el fin de lograr un calentamiento uniforme. Las papas estandarizadas se colocaron en el canasto en lotes de 4 unidades cada uno, donde se puso sobre éstas una rejilla cóncava que permitió que flotaran sin salir del canastillo. Una vez situadas las papas, la freidora se tapó dejando abierto el sistema a través de un tapón que permitió que existiese presión atmosférica en el sistema. Una vez alcanzada la temperatura, el canasto se sumergió en el aceite durante el tiempo necesario, hasta que se alcanzó el término de punto burbuja, el cual se caracteriza por la obtención de chips con un 2% de

humedad. Luego de que transcurriera el tiempo establecido el canasto se sacó del aceite y el equipo se abrió para sacar las muestras.

- Enfriamiento

Las hojuelas de papas tanto para el proceso al vacío como para el atmosférico, se enfriaron sobre papel absorbente durante 2 minutos para eliminar el exceso de aceite en la superficie.

- Análisis de Humedad y Textura

Por las características de los parámetros analizados se consideró apropiado realizar dichas pruebas de manera inmediata luego de la preparación de las hojuelas.

- Congelación

Las hojuelas son almacenadas molidas en bolsas herméticas de polietileno de baja densidad en congelación a  $-18^{\circ}\text{C}$  hasta ser utilizadas en los diferentes análisis.

- Análisis de Contenido de Aceite y Concentración de Acrilamida

Las hojuelas de papas son descongeladas y analizadas en su contenido de aceite y acrilamida.

### **5.4.3 Análisis**

#### **5.4.3.1 Contenido de Aceite**

El contenido total de aceite en los chips de papas se determinó gravimétricamente mediante una extracción Soxhlet con éter de petróleo (AOAC, 1995).

#### **5.4.3.2 Humedad**

La pérdida de humedad se calculó por la diferencia de pesos luego de la extracción de aceite por el método Soxhlet. Esta se expresó en base húmeda. (AOAC, 1995).

#### **5.4.3.3 Análisis de Textura**

El parámetro de textura se expresa como la fuerza máxima de deformación, la cual representa el valor más alto en la curva de fuerza (N) versus distancia (mm). Los valores se obtuvieron luego de un análisis de quiebre de tres puntos (flexión) según el procedimiento descrito por Da Silva & Moreira (2008). La muestra se puso entre dos barras paralelas para aplicar la carga de forma central en el equipo TA.XT2 Texture Analyzer, posteriormente una cuchilla de acero de 2,5 mm de ancho con borde plano se utilizó para fracturar la muestra a una velocidad de 10 mms<sup>-1</sup>.

#### **5.4.3.4 Cuantificación de Acrilamida**

La medición de acrilamida en hojuelas de papa se realizó a través de Cromatografía Gaseosa/ Espectrometría de Masa (GC/MS), según Ciesarova et al (2006) con algunas modificaciones que incluyen; cambio de solvente a metanol y utilización de cartridge RP-18 en reemplazo de las columnas de sílica.

### **I. Preparación de la solución estándar interno (SI) de trabajo Acrilamida d-3 20 mg/L**

En un matraz aforado de 10 ml se adicionaron 400  $\mu$ L de estándar interno (SI) de Acrilamida d-3 y se aforó con metanol p.a. Luego de utilizada, la solución se almacenó en condiciones de refrigeración a 4°C y el SI en congelación a -18°C. La solución de trabajo no tiene caducidad si se mantiene refrigerada.

### **II. Preparación de la solución estándar de trabajo Acrilamida 10 mg/L**

En un matraz aforado de 10 ml se pesaron 10 mg de Acrilamida y se aforó con metanol p.a. De esta solución se extrajeron 100  $\mu$ L y se llevaron a un matraz de 10 ml, aforando con metanol. Luego de utilizar, la solución se almacenó en condiciones de refrigeración a 4°C. La solución de trabajo no tiene caducidad si se mantiene refrigerada.

### **III. Preparación de las muestras**

Se pesó 2 g de muestra homogeneizada en un tubo de centrifuga y se adicionó 40  $\mu$ L de la solución estándar interno (SI) de trabajo acrilamida d-3 y 10 ml de metanol. Las muestras se agitaron por 30 segundos en vortex y se dejaron en ultrasonido a 60°C por 20 minutos. Se centrifugaron las muestras a -4°C y 6000 rpm. Se extrajeron 5 ml de sobrenadante y se hicieron pasar por un catridge de fase reversa C18 con la ayuda de un manifold con vacío para recuperar el extracto. Posteriormente se pasaron 5 ml de metanol y se adicionó al volumen de extracto obtenido anteriormente en un balón esmerilado de 100 ml. Se evaporó a 40°C el solvente en un rotavapor hasta sequedad. Se adicionó 1 ml de metanol y se extrajo la mayor cantidad del reconstituido. Se filtró el reconstituido a través de una jeringa de 3 ml y un filtro de 0,2  $\mu$ m para disponer en viales de 2 ml.

#### **IV. Preparación de la curva de calibración**

De la solución estándar de trabajo de acrilamida 10 mg/L se extrajeron 25, 150, 300, 450, 600, 750, 875, 1000 uL respectivamente en 8 matraces de 10 ml. Se adicionó a cada uno de los matraces, 200 uL de la solución estándar interno (SI) de trabajo acrilamida d-3 y se aforaron con metanol. Los matraces se refrigeraron a 4 °C.

#### **V. Condiciones del equipo GC/MS**

Las muestras se analizaron en el equipo Agilent 7890A GC System con Agilent 597C XL EI/CI MSD y una columna Agilent DB-FFAP 122-3232 de 30 m x 0.25 mm ID, 25 micras. Las condiciones fueron:

CTC CombiPal:

Velocidad de llenado: 5 uL/seg. Relleno Strokes: 3, Inyectado a: GCInj2, Velocidad inyección: 50 uL/seg. Volumen inyección: 2 uL., Tiempo Pre-inyección: 500 ms, Tiempo post-inyección: 500 ms.

Condiciones Cromatógrafo:

Inicio: 60°C por 1 min., 10°C/min to 190°C por 0 min., luego 50°C/min a 240°C por 0 min, Duración: 15 min. Flujo en columna: 43,8 mL/ min helio (flujo constante). Temperatura de entrada 200°C, Ahorro gas: apagado. Bajo estas condiciones el tiempo de retención de Acrilamida y Acrilamida-d3 fue aproximadamente de 13 min.

Parámetros MS:

Temperatura Fuente: 245°C, Temperatura cuadrípulo: 150°C y línea transferencia: 270°C, m/z 70, 73 Dwell 50 mseg.

#### **VI. Expresión de los resultados**

Para determinar la cantidad de acrilamida en muestras alimentarias se calculó el área de acrilamida (m/z 70) y acrilamida d-3 (m/z73) y la relación que existe entre ellas (m/z 70 / m/z 73). Las distintas concentraciones de la curva de calibración 25, 25, 150, 300, 450, 600, 750, 875 y 1000 pg/uL de acrilamida dispuestas en el eje de ordenadas y las relaciones de área para cada concentración en el eje de abscisas,

entregan una ecuación de la recta, en la cual es posible interpolar la relación de área de la muestra analizada y obtener su concentración (ug/L) de acrilamida despejándola de la ecuación (**Figura 5**). Considerando que la concentración obtenida se encuentra en (ug/L) la conversión a (ug/Kg) se adjuntó en el **Anexo 9.2**.

**Figura 5.** Fórmula para la concentración de acrilamida en la muestra a partir de la ecuación obtenida en la curva de calibración.

$$\text{Concentración } \left( \frac{\text{pg}}{\text{uL}} \right) \text{ Acrilamida} = \frac{\text{Relación Area } \frac{AA}{AA \text{ d3}} \text{ muestra } \pm \text{Intercepto}}{\text{pendiente}}$$

#### 5.4.3.5 Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando el programa StatGraphics Centurion XVI.I, StatPoint Technologies, 2007.

- **Análisis de Varianza**

Para los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza ANOVA de un factor, utilizando un nivel de confianza del 95% para determinar la existencia de diferencias significativas. Los atributos que presentaron diferencias significativas se analizaron por el test de diferencias múltiples de Tukey (HSD).

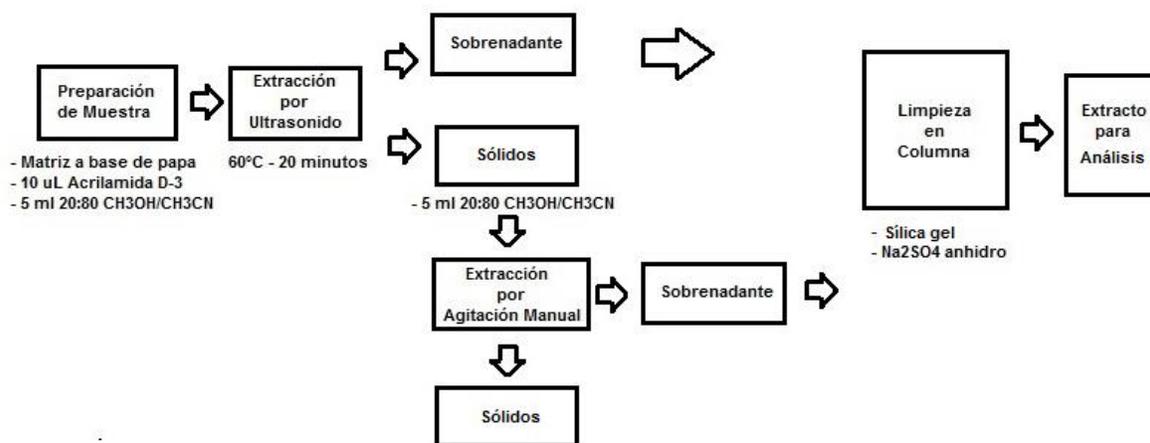
## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Desarrollo de la técnica de cuantificación de acrilamida en hojuelas de papa.

La composición química de los alimentos es compleja, lo que dificulta su análisis como matrices de estudios. La acrilamida al ser un contaminante de proceso se encontrará siempre en una baja proporción en el producto final en comparación a los macronutrientes, por ende la implementación de una técnica de extracción eficaz desde su matriz es muy importante.

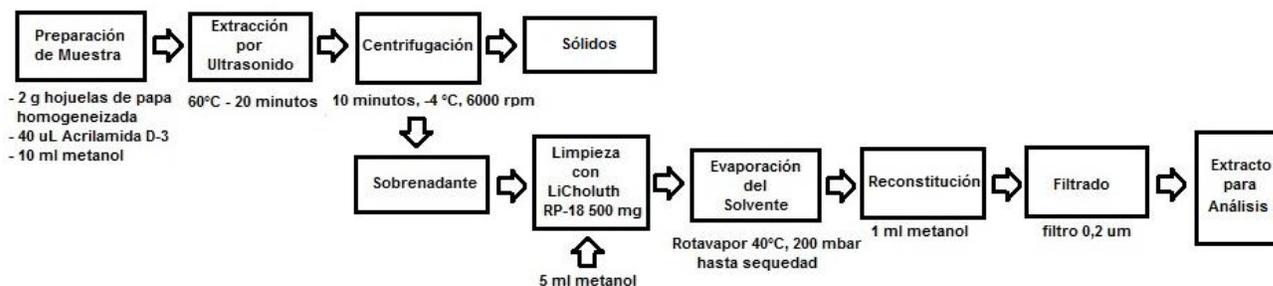
Para implementar una técnica de cuantificación de acrilamida en el equipo GC/MS se tomó como referencia al trabajo de Ciesarova et al (2006), que estudió la formación del contaminante en sistemas modelos a base de papa.

**Figura 6.** Técnica de extracción de acrilamida (Ciesarova et al, 2006).



Considerando que las hojuelas de papa poseen gran cantidad de aceite, se realizaron cambios en la técnica presentada en la **Figura 6**, con el fin de eliminar la mayor cantidad de este interferente sin afectar la recuperación de la acrilamida. Múltiples pruebas fueron realizadas hasta llegar a la técnica en la **Figura 7**, donde se varió de forma independiente mezclas de solventes, columnas de limpieza y métodos de extracción, hasta utilizar metanol como único solvente de extracción y catridges de RP-18 de fase reversa para una mejor retención del aceite.

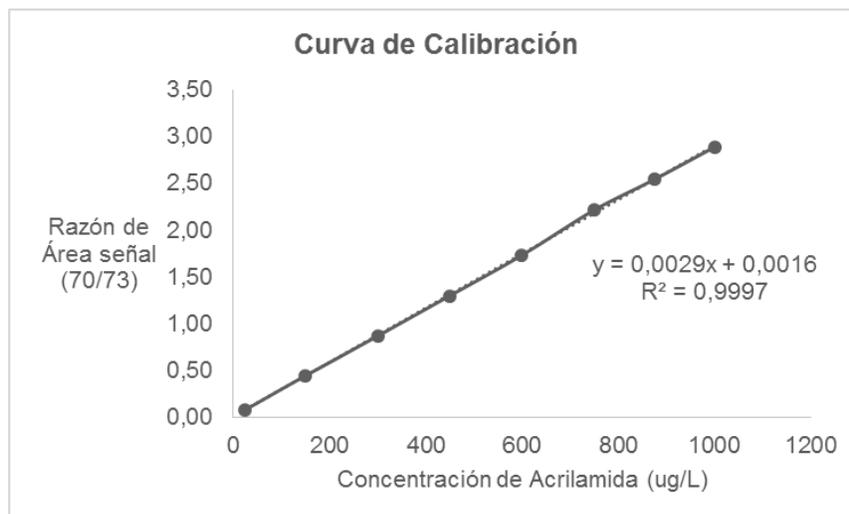
**Figura 7.** Técnica desarrollada para el análisis de hojuelas de papa.



### 6.1.1 Evaluación del desempeño analítico para la técnica de extracción de acrilamida en hojuelas de papa.

Con el fin de evaluar la técnica de extracción de acrilamida desarrollada, se analizó los parámetros de linealidad de la curva, límites de detección y cuantificación, además de calcular el porcentaje de recuperación de la acrilamida.

**Figura 8.** Curva de calibración utilizada para muestras de hojuelas de papa.



Se midió el contenido de acrilamida en triplicado a una muestra de hojuela de papa considerada blanco y a otra enriquecida con 500 ug/L de solución estándar de trabajo Acrilamida 10 mg/L. Ambas concentraciones se interpolaron en la curva de calibración la cual posee un ajuste de linealidad  $R^2$  mayor al 0,99 (**Figura 8**).

El equipo GC/MS posee un límite de detección 1,344 ug/Kg y un límite de cuantificación de 4,347 ug/Kg. Ambos límites se encuentran muy por debajo de los niveles de acrilamida presentes en las hojuelas de papas analizadas, por ende el análisis de acrilamida puede ser realizado de forma viable en el equipo e incluso utilizar muestras menores a 2 g.

**Tabla 2.** Porcentaje de recuperación de acrilamida para la metodología desarrollada.

<b>Muestras</b>	<b>Concentración Promedio Acrilamida (ug/kg)</b>	<b>Coefficiente Variación (%)</b>	<b>Recuperación (%)</b>
Blanco	564	8	
Enriquecida	965	2	80,2

De acuerdo a (Cofepris, 2011) el criterio de aceptación para la recuperación de residuos y contaminantes en alimentos, debe encontrarse entre un 70% a un 110% para concentraciones de analito entre 0,1 a 100 mg/Kg. Para las muestras de hojuelas de papa, el porcentaje de recuperación es superior al 80% (**Tabla 2**), por ende se puede afirmar que el método desarrollado es capaz de cuantificar acrilamida en hojuelas de papas de forma eficaz.

## 6.2 Tiempo para alcanzar “Punto de término de burbuja” en cada condición de fritura.

**Tabla 3.** Contenido de humedad y tiempo de fritura para las hojuelas de papa a las diferentes condiciones de temperatura y presión de trabajo.

<b>Presión Absoluta</b>	<b>Fuerza Motriz (°C)</b>	<b>Punto Ebullición Agua (°C)</b>	<b>Temperatura Aceite (°C)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Humedad (%b.h)</b>
<b>Atmosférica (30 pulg Hg)</b>	50	100	150	265	1,62
	60		160	225	1,27
	70		170	180	0,76
<b>Vacío (3 pulg Hg)</b>	50	46	96	390	2,46
	60		106	300	1,93
	70		116	170	2,68

La **Tabla 3** muestra los tiempos requeridos para que las hojuelas de papas fritas alcancen el “Punto de Término de Burbuja”, donde la humedad final de las hojuelas de papa alcanza un valor en base húmeda cercano al 2%.

Como es posible observar para las condiciones de fritura al vacío se requieran tiempos mayores de proceso en comparación con su contraparte atmosférica debido a las bajas temperatura de aceite utilizadas (96°, 106° y 116°C para la fuerza motriz 50°C, 60°C y 70°C respectivamente) las cuales en comparación con su contraparte atmosférica, tiene una diferencia de 54°C.

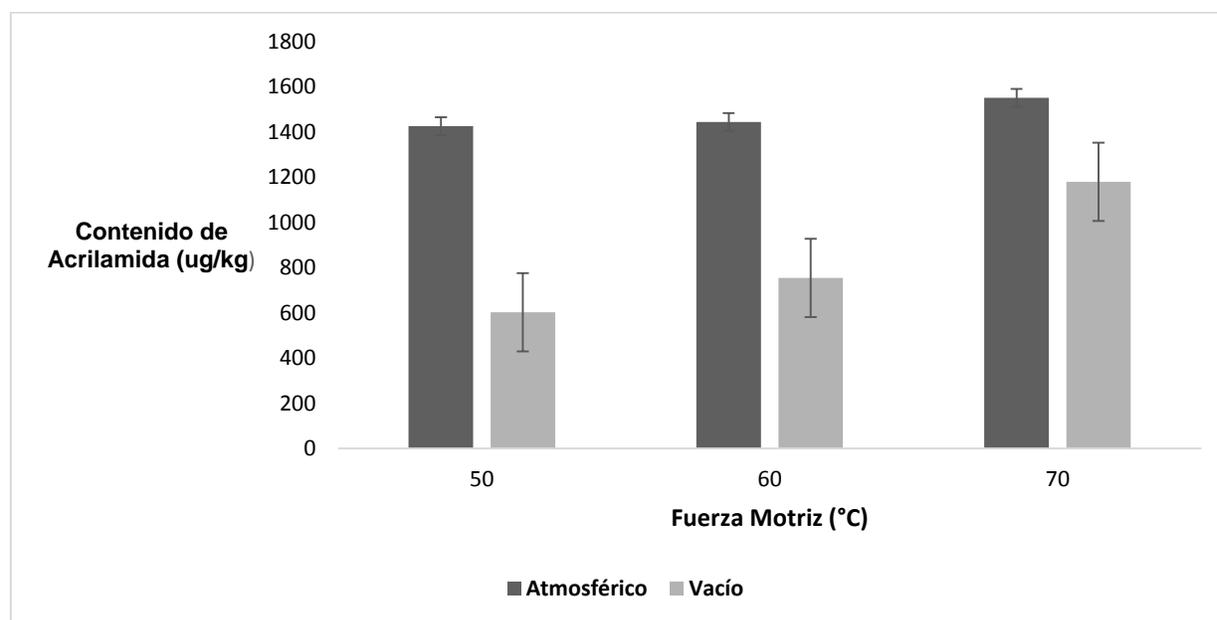
### 6.3 Efecto de la fuerza motriz equivalente en la formación de Acrilamida

**Tabla 4.** Contenido de Acrilamida en hojuelas de papas a distintas condiciones de temperatura y presión de trabajo.

Fuerza Motriz	Fritura al Vacío		Fritura Atmosférica		Porcentaje Reducción (%)
	Concentración Acrilamida (ug/kg) (b.h)	Coefficiente Variación (%)	Concentración Acrilamida (ug/kg) (b.h)	Coefficiente Variación (%)	
50	603 <sup>ac</sup>	18	1426 <sup>be</sup>	6	57,7
60	755 <sup>ac</sup>	10	1445 <sup>be</sup>	18	47,8
70	1180 <sup>ad</sup>	15	1552 <sup>be</sup>	14	24,0

\*Diferentes Letras Indican P Value  $\leq 0,05$  (**Anexo 9.1**)

**Figura 9.** Relación entre la fuerza motriz y la concentración de acrilamida en hojuelas de papa expresado en ug/kg en base húmeda, para los tratamientos de fritura al vacío y atmosférica.



En la **Tabla 4** se presentó el contenido de acrilamida en hojuelas de papas a las distintas condiciones de trabajo. Se observó para ambas condiciones de fritura, un incremento del contenido de acrilamida a medida que aumenta la temperatura de trabajo. La misma tendencia fue reportada por Granda (2004) y Pedreschi et al (2005).

En el estudio de Becalski et al (2003) se reportó que se precisan temperaturas de trabajo por sobre los 100°C para la formación de acrilamida en alimentos. Los estudios de Mottram et al (2002) y Stadler et al (2002) respaldan lo anterior, afirmando que la reacción de Maillard en presencia del precursor asparagina en alimentos tratados térmicamente, depende del aumento de la temperatura para la formación de acrilamida. Gracias al aporte de estos estudios se estableció como límite inferior la temperatura de proceso de 120°C para la generación del contaminante en alimentos.

Entonces, la tendencia que siguen los resultados en la **Tabla 4**, se explican por la dependencia térmica de la formación de acrilamida a medida que aumenta la temperatura del aceite.

Se encontraron diferencias significativas ( $P \text{ value} \leq 0,05$ ) entre las concentraciones de acrilamida para la fritura atmosférica y la fritura al vacío. Es posible observar que para todas las fuerzas motrices utilizadas (70°C, 60°C y 50°C), el proceso de fritura al vacío presentó una reducción importante del contaminante en comparación con su contraparte atmosférica. La menor fuerza motriz utilizada (50°C) presentó el mayor porcentaje de reducción (57,7%) en la concentración de acrilamida, versus la misma condición realizada a fritura atmosférica.

Se presentaron diferencias significativas ( $P \text{ value} \leq 0,05$ ) entre las fuerzas motrices en el proceso de fritura al vacío. La fuerza motriz de 70°C presentó diferencias significativas ( $P \text{ value} \leq 0,05$ ) con las fuerzas motrices de 50°C y 60°C, mientras que, entre estas dos últimas no se encontraron diferencias significativas ( $P \text{ value} \leq 0,05$ ).

Para las fuerzas motrices de 50°C, 60°C y 70°C se utilizaron temperaturas de aceite de 96°C, 106°C y 116°C respectivamente. Tomando en cuenta que la fuerza motriz es un parámetro que depende de la temperatura del aceite, y a su vez, la temperatura del aceite es determinante en la formación del contaminante, se pueden entonces atribuir las diferencias significativas ( $P \text{ value} \leq 0,05$ ) encontradas a que la fuerza motriz 70°C es la única temperatura de aceite que se encuentra más cercana al límite inferior de temperatura para la formación del contaminante (120°C). Por lo tanto, su concentración de acrilamida es significativamente mayor en comparación con las fuerzas motrices 60°C y 50°C en el proceso de fritura al vacío.

No se presentaron diferencias significativas entre las fuerzas motrices en el proceso de fritura atmosférica.

Cabe destacar que investigaciones previas han reportado valores distintos de acrilamida para el mismo tipo de producto, como es el caso de Granda (2004) e incluso la Administración de Alimentos y Drogas de los Estados Unidos (U.S FDA). En el 2006 este organismo gubernamental publicó una base de datos donde se puede encontrar gran variedad de alimentos y su respectivo contenido de acrilamida. En este documento se informa que, las hojuelas de papas fritas tienen una concentración de 346 ug/kg del contaminante. Si bien, existe una gran diferencia con los valores informados en la presente memoria, en la actualidad no existe una metodología establecida de detección para la acrilamida, sólo se encuentra disponible una metodología guía para los investigadores realizada por la U.S FDA en el año 2003. Por lo tanto, el proceso de generación y limpieza de las muestras, además del equipo de detección utilizado, es distinto según el grupo de investigación que se estudie. Todos estos factores pueden afectar la expresión del resultado final, ya que la precisión del método y del equipo empleado determinan el contenido de acrilamida, sin embargo no desacreditan la veracidad del estudio puesto que, dentro de la investigación realizada en esta tesis se busca evidenciar tendencias en la formación del contaminante a las distintas condiciones de trabajo y la influencia de la fuerza motriz sobre éste.

También, se debe mencionar que el contenido de acrilamida que generan los alimentos de origen vegetal tratados térmicamente, tienen muchas variables que pueden afectar el contenido de sus precursores (asparagina y azúcares reductores) según factores como: clima, suelo, tiempo de cosecha, variedad de la materia prima, procedencia, etc. Por lo que las muestras analizadas por la FDA no son necesariamente representativas con las muestras generadas para la presente memoria, y por ende es válido que se informen valores diferentes.

## 6.4 Efecto de la fuerza motriz equivalente sobre los atributos de calidad

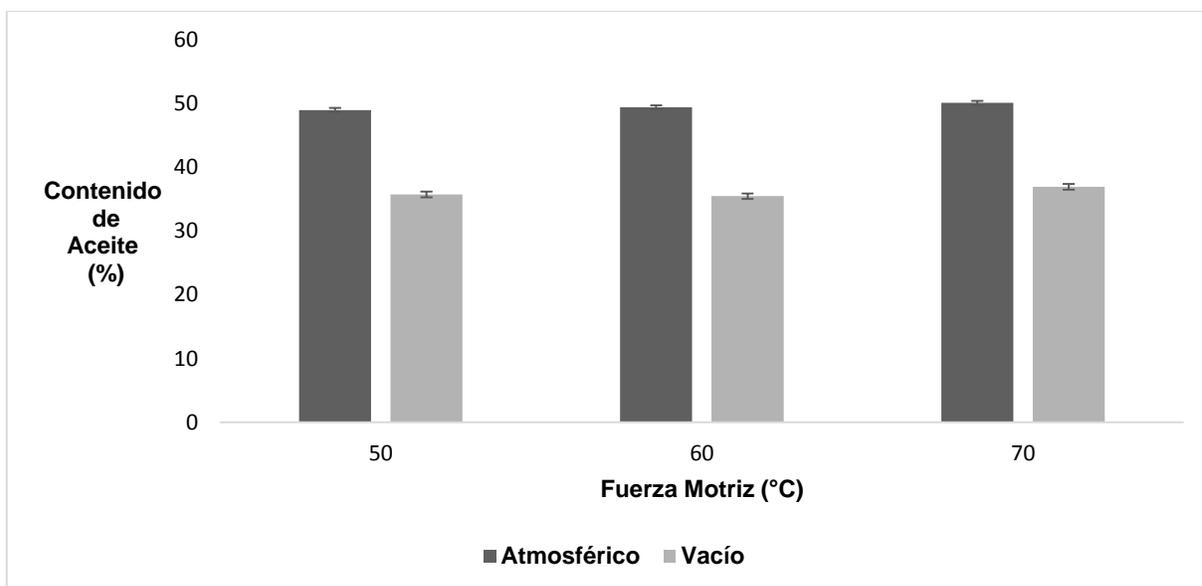
### 6.4.1 Efecto de la fuerza motriz sobre el contenido de aceite

**Tabla 5.** Contenido de aceite en hojuelas de papas a distintas condiciones de temperatura y presión de trabajo.

<b>Fuerza Motriz</b>	<b>Fritura al Vacío</b>		<b>Fritura Atmosférica</b>		<b>Porcentaje Reducción (%)</b>
	Contenido de Aceite (%)	Coefficiente Variación (%)	Contenido de Aceite (%)	Coefficiente Variación (%)	
<b>50</b>	35,76 <sup>ac</sup>	1,00	49,00 <sup>be</sup>	2,00	27,02
<b>60</b>	35,48 <sup>ac</sup>	2,00	49,43 <sup>be</sup>	1,00	28,22
<b>70</b>	36,94 <sup>ad</sup>	1,00	50,11 <sup>be</sup>	2,00	26,28

\*Diferentes Letras Indican P Value  $\leq 0,05$  (**Anexo 9.1**)

**Figura 10.** Relación entre la fuerza motriz y el contenido de aceite en hojuelas de papa expresado en porcentaje (%) para los tratamientos de fritura al vacío y atmosférica.



En la **Tabla 5** se presenta el contenido de aceite de las hojuelas de papas fritas en las distintas condiciones de trabajo. Es posible observar que existen diferencias significativas ( $p \text{ value} \leq 0,05$ ) en el contenido de aceite entre los procesos de fritura atmosférica y al vacío, existiendo en este último una reducción de hasta un 28% en comparación con su contraparte atmosférica. Tendencias similares fueron presentados por Garayo & Moreira (2002), Mariscal & Bouchon (2008) y Dueik & Bouchon (2011) en productos fritos al vacío.

De acuerdo a lo observado por Garayo & Moreira, (2002) el proceso de absorción de aceite en hojuelas fritas al vacío se divide en tres etapas: la primera, se caracteriza por una disminución de la temperatura de ebullición lo que genera una evaporación rápida del agua. En esta etapa la presión (entre el aceite y el gas) es despreciable por lo que no se absorbe aceite, pero si existe un desarrollo de la corteza apenas la hojuela se sumerge en el medio de fritura. La segunda etapa, es la de presurización, la cual comienza cuando los chips son removidos desde el aceite y son mantenidos a presión de vacío. En esta etapa mientras la freidora es abierta la presión al interior del poro aumentará hasta alcanzar la presión

atmosférica y mientras eso ocurre el aire y el aceite superficial en la hojuela entrarán al espacio vacío del poro, pero debido a la acción de la baja presión, el aire entrará con mayor rapidez hacia el interior de éste y obstruirá el paso del aceite. La tercera etapa, es la de enfriamiento la cual comienza cuando los chips son removidos de la freidora. En esta etapa el aceite adherido a la superficie continuará penetrado hacia el interior de los poros hasta alcanzar un equilibrio. Debido a que menos aceite se adhiere a la superficie de la hojuela, en la fritura al vacío, menos aceite es absorbido por el chip.

Se encontraron diferencias significativas ( $P \text{ value} \leq 0,05$ ) en el contenido de aceite entre los procesos de fritura atmosférica y al vacío. En el tratamiento al vacío, la fuerza motriz de  $70^{\circ}\text{C}$  presentó diferencias al ser comparada con las fuerzas motrices de  $50^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$ , sin embargo no se encontraron diferencia entre éstas dos últimas.

La investigación realizada por Garayo & Moreira (2002) concluyó que la velocidad de absorción de aceite, durante la fritura al vacío en hojuelas de papas, está relacionado con la velocidad de pérdida de agua. Los resultados mostraron que mientras mayor es velocidad de pérdida de agua, mayor es la velocidad de adhesión de aceite en la superficie de la hojuela y por ende mayor es la absorción de éste. Se encontró también que la mayor velocidad de absorción de aceite fue obtenida a la mayor temperatura de trabajo ( $T_{\text{aceite}}=144^{\circ}\text{C}$ ) bajo una presión de vacío de 3,115 kPa.

Considerando que la condiciones de fritura al vacío para la fuerza motriz de  $70^{\circ}\text{C}$  no son comparables con las condiciones utilizadas por Garayo & Moreira (2002) si se puede pensar que existe una relación entre el aumento de la temperatura, la pérdida de agua y la absorción de aceite. Al utilizar la fuerza motriz de  $70^{\circ}\text{C}$  temperatura de aceite más alta, es posible atribuir las diferencias significativas encontradas a que, al utilizar una mayor temperatura de trabajo, se favorece la velocidad de eliminación de agua y por ende también se favorece la velocidad de absorción de aceite.

Si bien en la presente memoria no se realizó un estudio de absorción de aceite y sólo es posible atribuir los resultados encontrados a fenómenos estudiados por investigaciones previas, se puede mencionar que la tendencia encontrada coincide con los resultados publicados por (Dueik & Bouchon, 2011) en hojuelas de papas fritas al vacío.

Dentro del proceso de fritura atmosférico no se encontraron diferencias significativas entre las fuerzas motrices. Esto se debe a que al utilizar fritura atmosférica, los chips de papa han mostrado tener similares contenidos de aceite final, cuando se utilizan temperaturas entre los 150°C y los 180°C. Ya que la absorción de aceite tiende a comportarse de manera similar en dicho rango (Moreira, 2014).

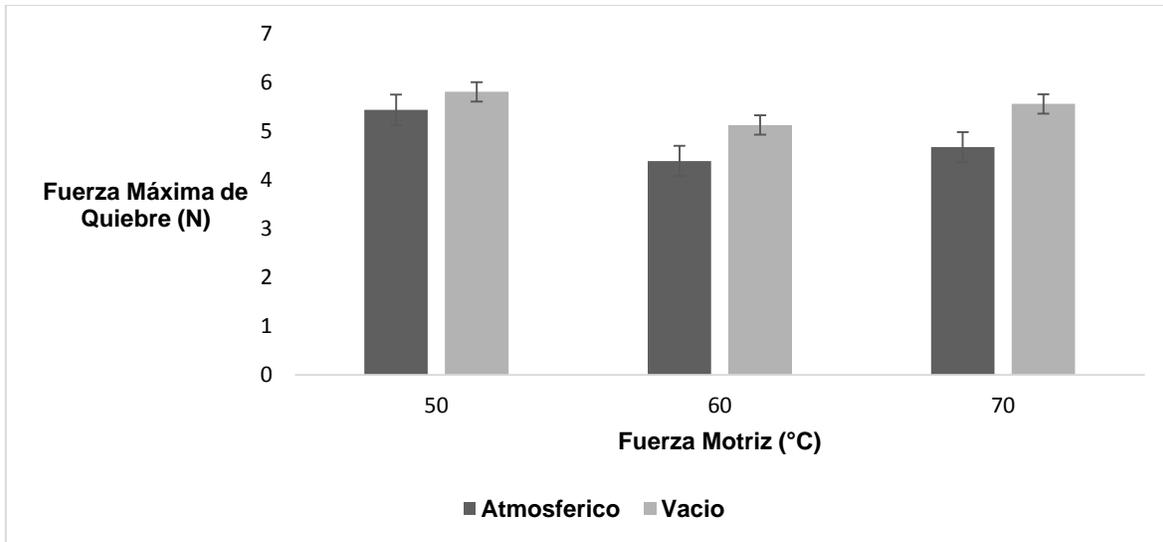
#### 6.4.2 Efecto de la fuerza motriz sobre la textura

**Tabla 6.** Fuerza máxima de quiebre en hojuelas de papas a distintas condiciones de temperatura y presión de trabajo.

Fuerza Motriz	Fritura al vacío		Fritura atmosférica		Porcentaje Reducción (%)
	Textura (N)	Coefficiente variación (%)	Textura (N)	Coefficiente variación (%)	
50	5,81 <sup>ac</sup>	25,87	5,44 <sup>bd</sup>	28,83	6,37
60	5,12 <sup>ac</sup>	33,40	4,39 <sup>be</sup>	34,84	14,35
70	5,56 <sup>ac</sup>	29,61	4,67 <sup>be</sup>	26,79	16,00

\*Diferentes Letras Indican P Value  $\leq$  0,05 (**Anexo 9.1**)

**Figura 11.** Relación entre la fuerza motriz y la textura de las hojuelas de papa expresadas como fuerza máxima de quiebre (N), para los tratamientos de fritura al vacío y atmosférico.



En la **Tabla 6** se presentan los valores de textura expresados como fuerza máxima de quiebre para las distintas condiciones de trabajo. En el parámetro de textura no existen diferencias significativas ( $p \text{ value} \leq 0,05$ ) entre los procesos de fritura atmosférica y al vacío. Una tendencia similar fue informada por Garayo & Moreira (2002) al comparar el mismo parámetro de fuerza máxima de quiebre o firmeza, donde tampoco se encontraron diferencias significativas ( $p \text{ value} < 0,05$ ) entre hojuelas fritas al vacío y hojuelas fritas atmosféricamente.

Es posible observar que los resultados de fuerza máxima de quiebre para la fritura al vacío, son levemente más altos que los de fritura atmosférica. Esto es atribuible principalmente a la relación que existe entre la velocidad de deshidratación de la papa bajo condiciones de vacío y la formación de corteza del producto. Como ha sido presentado anteriormente en el estudio realizado por Garayo & Moreira (2002) cuando se utilizan presiones bajas, el punto de ebullición del agua disminuye y el tiempo necesario para que se alcance esta temperatura es menor. Cuando comienza la pérdida de agua desde el producto, comienza también la formación de la corteza, por esta razón los chip fritos al vacío tienen un mayor tiempo de formación en comparación con los chip atmosféricos y por ende ofrece mayor

resistencia al quiebre. Garayo & Moreira (2002) también concluyeron que la temperatura del aceite y la presión de vacío no modifican de forma significativa el parámetro de textura.

## 7. CONCLUSIONES

- El efecto de las bajas presiones en la fritura al vacío logró mitigar de manera exitosa el contenido de acrilamida en hojuelas de papas, donde la presencia del contaminante se redujo hasta en un 57% sin afectar los atributos de calidad deseados.
- Se implementó una técnica eficaz de cuantificación de acrilamida para hojuelas de papa en un equipo GC/MS, donde la recuperación del contaminante fue de un 80%.
- Se estudió el efecto de la fuerza motriz equivalente para la fritura al vacío sobre la formación de acrilamida en hojuelas de papa y se observó que la fuerza motriz de 70°C presentó diferencias significativas con las fuerzas motrices 60°C y 50°C, principalmente por la temperatura de trabajo empleada en dicha condición.
- Se estudió el efecto de la fuerza motriz equivalente para la fritura al vacío sobre los atributos de calidad y se encontró que la fuerza motriz de 70°C presentó diferencias significativas en el contenido de aceite mas no hubo diferencias significativas en la textura.
- La fuerza motriz óptima utilizada en la fritura al vacío fue de 50°C ya que generó hojuelas de papa con la menor concentración de acrilamida y el menor contenido de aceite sin afectar la textura. Sin embargo, en los resultados no se encontraron diferencias significativas entre las fuerzas motrices de 50°C y 60°C. En base a lo anterior, se recomienda utilizar fuerzas motrices iguales o menores a 60°C para obtener hojuelas de papa con un reducido contenido de acrilamida y aceite.
- Se podrían generar snack más saludables utilizando la fritura al vacío ya que se comprobó que reduce significativamente el contenido de acrilamida y aceite en las hojuelas de papas y por ende se podría aplicar a otros vegetales. Adicionalmente, la implementación de esta tecnología podría ser propuesta a la industria de alimentos debido a los beneficios que ofrece al producto final.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

AOAC. (1995). "Official methods of analysis." 16th ed., Washington: Association of Official Analytical Chemists.

Barrios, B. (2009). "La Papa Boletín de los Consumidores Gobierno de Chile." Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.

Becalski, A., B. P. Lau, D. Lewis and S. W. Seaman. (2003). "Acrylamide in Foods: Occurrence, Sources, and Modeling." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(3): 802-808.

Bouchon, P. and Pyle, D.L. (2005). "Modelling oil absorption during post-frying cooling. I Model development." *Trans. Inst. Chem. Eng. C Food Bioprocess Process.* 83: 261 – 272.

Bouchon, P. (2009). "Chapter 5 Understanding Oil Absorption During Deep-Fat Frying. *Advances in Food and Nutrition Research.*" L. T. Steve, Academic Press. Volume 57: 209-234.

Bull, R.J., M. Robinson and J. A. Stober. (1984). "Carcinogenic activity of acrylamide in the skin and lung of Swiss-ICR mice." *Cancer Letters* 24(2): 209 – 212.

Capuano, E. (2010). "Lipid oxidation promotes acrylamide formation in fat-rich model systems." *Food Research International* 43(4): 1021-1026.

Ciesarova, Z., E. Kiss and P.Boegl. (2006). "Impact of L-asparaginase on acrylamide content in potato products." *Journal of Food and Nutrition Research* 45(4): 141-146.

Cofepris. (2011). "Criterios para la validación de métodos fisicoquímicos." Comisión federal para la protección contra riesgos sanitarios, Secretaría de Salud, Mexico.

Da Silva, P. F. & R. G. Moreira. (2008). "Vacuum frying of high-quality fruit and vegetable-based snacks." *LWT- Food Science and Technology* 41(10):1758-1767.

De La Fuente, L., I. Ellenberg, J. Sáez, J. Varas, G. Bahamonde, H. Barría, L. Almonacid, A. Figueroa and R. Angulo. (2010). "Etiquetado Nutricional de Variedades de Papa (*Solanum tuberosum* L)." Departamento de Acuicultura y Recursos Agroindustriales, Universidad de Los Lagos, Osorno, Chile.

Dueik, V. and P. Bouchon. (2011). "Development of healthy low fat snack: Understanding oil absorption and quality attributes preservation during vacuum frying." Department of Chemical and Bioprocess Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

FAO. (2008). "Potatoes, nutrition and diet: International Year of the Potato." [en línea] <http://www.fao.org/potato-2008/en/potato/IYP-6en.pdf>

FDA. (2003). "Detection and Quantitation of Acrylamide in Foods." [en línea] <http://www.fda.gov/Food/FoodborneIllnessContaminants/ChemicalContaminants/ucm053537.htm>

Friedman, M. A., L. H. Dulak and M. A. Stedham. (1995). "A lifetime oncogenicity study in rats with acrylamide." *Toxicological Sciences* 27 (1): 95-105.

Gamble, M. H., P. Rice and J. D. Selman. (1987). "Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c. v. Record U.K. tubers." *International Journal of Food Science and Technology* 22(3): 233-241.

Garayo, J. and R. Moreira. (2002). "Vacuum frying of potato chips." *Journal of Food Engineering* 55(2): 181-191.

Granda, C. (2004). "Reduction of Acrylamide Formation in Potato Chips by Low-temperature Vacuum Frying." *Journal of Food Science* 69(8): E405-E411.

Hedegaard, R. V. (2007). "Kinetic and mechanistic aspects in the formation of acrylamide." Faculty of Life Sciences, Department of Food Science, Food Chemistry, University of Copenhagen, Denmark.

Hodge, J. E. (1953). "Dehydrated Foods, Chemistry of Browning Reactions in Model Systems." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 1(15): 928-943.

Johnson, K. A., J. G. Stanley, K. M. Bodner, R. A. Campbell, C. H. Wolf, M. A. Friedman and R. W. Mast. (1986). "Chronic toxicity and oncogenicity study on acrylamide incorporated in the drinking water of Fischer 344 rats." *Toxicology and Applied Pharmacology* 85(2): 154 -168.

Mariotti, S. (2011). "Patented techniques for acrylamide mitigation in high-temperature processed foods." *Recent Patents On Food Nutrition and Agriculture* 3(3): 158-171

Mariscal, M. and P. Bouchon. (2008). "Comparison between atmospheric and vacuum frying of apple slices." *Food Chemistry* 107(4): 1561-1569

Mottram, D. S., B. L. Wedzicha and A. T. Dodson. (2002). "Food chemistry: Acrylamide is formed in the Maillard reaction." *Nature* 419(6906): 448-449.

Moreira, R. G. (2014). "Vacuum frying versus conventional frying – An overview." *European Journal of Lipid Science and Technology* 116(6): 723-734.

Moreira, R. G., X. Sun and Y. Chen. (1997). "Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep-fat frying." *Journal of Food Engineering* 31(4): 485-498.

Oracz, J., E. Nebesny and D. Żyżelewicz. (2011). "New trends in quantification of acrylamide in food products." *Talanta* 86(0): 23-34.

Pandey, A. and R. Moreira. (2012). "Batch Vacuum Frying System Analysis for potato chips " *Journal of Food Process Engineering* 35(2012): 863-873

Pedreschi, F., P. Moyano, K. Kaack and K. Granby. (2005). "Color changes and acrylamide formation in fried potato slices." *Food Research International* 38(1): 1-9.

Pedreschi, F., S. Mariotti, K. Granby and J. Risum. (2011). "Acrylamide reduction in potato chips by using commercial asparaginase in combination with conventional blanching." *Lwt-Food Science and Technology* 44(6): 1473-1476.

Pedreschi, F., M.S. Mariotti and K. Granby. (2014). "Current issues in dietary acrylamide: formation, mitigation and risk assessment." *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94(1): 9-20.

Simpson, N. (2010). "Solid-Phase Extraction: Principles, Techniques, and Applications", Marcel Dekker, Inc. New York, United States.

Stadler, R. H., I. Blank, N. Varga, F. Robert, J. Hau, P. A. Guy, M.-C. Robert and S. Riediker. (2002). "Food chemistry: Acrylamide from Maillard reaction products." *Nature* 419(6906): 449-450.

Sumba, M. (2008). "Caracterización morfológica, agronómica y etnobotánica de cincuenta cultivares de papas nativas en cuatro localidades en la provincia de Cotapaxi." Departamento de Ciencias Agropecuarias, Ambientales y Veterinarias, Universidad Técnica de Cotapaxi, Mexico.

Troncoso, E., F. Pedreschi and R. N. Zuñiga. (2009). "Comparative Study of physical and sensory properties of pre-treated potato slices during vacuum and atmospheric frying " *Food Science and Technology* 42(2009): 187-195.

Ufheil, G. and F. Escher. (1996). "Dynamics of Oil Uptake during Deep-Fat Frying of Potato Slices." *LWT - Food Science and Technology* 29(7): 640-644.

Zamora, R. and F. J. Hidalgo. (2008). "Contribution of lipid oxidation products to acrylamide formation in model systems." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(15): 6075-6080.

Zyzak, D., R. A. Sanders, M. Stojanovic, D. Tallmadge, B. Eberhart, D. Ewald, D. Gruber, T. Morsch, M. Strothers, G. Rizzi and M. Villagran. (2003). "Acrylamide formation mechanism in heated foods." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 4782–4787.

## 9. ANEXOS

### 9.1 Análisis estadísticos para los procesos de fritura al vacío y atmosférico.

#### 9.1.1 Efecto de la presión de fritura en el contenido de acrilamida y los atributos sensoriales en hojuelas de papa.

##### 9.1.1.1 Efecto de la presión de trabajo en la formación de Acrilamida.

**Tabla 7.** Resumen estadístico para Acrilamida por presión de trabajo.

Presión	Muestras	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
3	3	846,0	299,07	35,3511%	603,0	1180,0	577,0
30	3	1474,33	67,9289	4,60743%	1426,0	1552,0	126,0
Total	6	1160,17	395,049	34,0511%	603,0	1552,0	949,0

Presión = 3 pulg de Hg (Fritura Vacío)

Presión = 30 pulg de Hg (Fritura Atmosférica)

**Tabla 8.** Tabla ANOVA para Acrilamida por presión de trabajo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	592204	1	592204	12,59	0,0238
Intra grupos	188115	4	47028,7		
Total (Corr.)	780319	5			

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Acrilamida entre un nivel de Presión y otro, con un nivel del 95,0% de confianza. Donde la presión de 3 pulg de Hg corresponde a la presión de trabajo de la fritura al vacío y la presión de 30 pulg de Hg corresponde a la presión de trabajo de la fritura atmosférica.

**Tabla 9.** Prueba de Múltiples Rangos para Acrilamida por presión de trabajo

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Presión	Casos	Media	Grupos Homogéneos
3	3	846,0	X
30	3	1474,33	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
3 - 30	*	-628,333	491,616

\* indica una diferencia significativa.

El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares de medias son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

### 9.1.1.2 Efecto de la presión de trabajo en el contenido de Aceite

**Tabla 10.** Resumen estadístico para el contenido de aceite por presión de trabajo.

Presión	Muestras	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
3	3	36,06	0,774855	2,14879%	35,48	36,94	1,46
30	3	49,5133	0,559673	1,13035%	49,0	50,11	1,11
Total	6	42,7867	7,39345	17,2798%	35,48	50,11	14,63

Presión = 3 pulg de Hg (Fritura Vacío)

Presión = 30 pulg de Hg (Fritura Atmosférica)

**Tabla 11.** Tabla ANOVA para Aceite por presión de trabajo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	271,488	1	271,488	594,30	0,0000
Intra grupos	1,82727	4	0,456817		
Total (Corr.)	273,316	5			

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Aceite entre un nivel de Presión y otro, con un nivel del 95,0% de confianza. Donde la presión de 3 pulg de Hg corresponde a la presión de trabajo de la fritura al vacío y la presión de 30 pulg de Hg corresponde a la presión de trabajo de la fritura atmosférica.

**Tabla 12.** Prueba de Múltiples Rangos para Aceite por presión de trabajo

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Presión	Casos	Media	Grupos Homogéneos
3	3	36,06	X
30	3	49,5133	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
3 - 30	*	-13,4533	1,5322

\* indica una diferencia significativa.

El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

### 9.1.1.3 Efecto de la presión de trabajo en la textura

**Tabla 13.** Resumen estadístico para la textura por presión de trabajo.

Presión	Muestras	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
3	3	5,2961	0,248154	4,68561%	5,0741	5,564	0,4899
30	3	4,83567	0,541899	11,2063%	4,393	5,44	1,047
Total	6	5,06588	0,453535	8,95272%	4,393	5,564	1,171

Presión = 3 pulg de Hg (Fritura Vacío)

Presión = 30 pulg de Hg (Fritura Atmosférica)

**Tabla 14.** Tabla ANOVA para Textura por presión de trabajo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,317998	1	0,317998	1,79	0,2519
Intra grupos	0,71047	4	0,177617		
Total (Corr.)	1,02847	5			

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Textura entre un nivel de Presión y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

### 9.1.2 Efecto de la fuerza motriz equivalente en la formación de Acrilamida y los atributos de calidad para fritura atmosférica y fritura al vacío.

#### 9.1.2.1 Efecto de la fuerza motriz equivalente en la formación de Acrilamida para fritura atmosférica.

**Tabla 15.** Resumen Estadístico para Acrilamida por Fuerza Motriz para fritura atmosférica

Fuerza Motriz	Muestras	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
50	3	1426,33	85,2897	5,97965%	1332,0	1498,0	166,0
60	3	1445,0	215,056	14,8828%	1310,0	1693,0	383,0
70	3	1551,67	118,382	7,62935%	1416,0	1634,0	218,0
Total	9	1474,33	142,526	9,66717%	1310,0	1693,0	383,0

**Tabla 16.** Tabla ANOVA para Acrilamida por Fuerza Motriz para fritura atmosférica

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	27434,7	2	13717,3	0,61	0,5742
Intra grupos	135075	6	22512,6		
Total (Corr.)	162510	8			

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Acrilamida entre un nivel de Fuerza Motriz y otro para fritura atmosférica, con un nivel del 95,0% de confianza.

#### 9.1.2.2 Efecto de la fuerza motriz equivalente sobre el contenido de aceite para fritura atmosférica.

**Tabla 17.** Resumen Estadístico para el Aceite por Fuerza Matriz para fritura atmosférica

Fuerza Motriz	Muestras	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
50	3	49,0033	0,77436	1,58022%	48,46	49,89	1,43
60	3	49,4333	0,447363	0,904982%	48,92	49,74	0,82
70	3	49,0033	0,77436	1,58022%	48,46	49,89	1,43
Total	9	49,1467	0,629345	1,28054%	48,46	49,89	1,43

**Tabla 18.** Tabla ANOVA para Contenido de Aceite Atmosférico por Fuerza Motriz

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,3698	2	0,1849	0,40	0,6891
Intra grupos	2,7988	6	0,466467		
Total (Corr.)	3,1686	8			

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Aceite entre un nivel de Fuerza Motriz y otro para fritura atmosférica, con un nivel del 95,0% de confianza.

### 9.1.2.3 Efecto de la fuerza motriz sobre la textura para la fritura atmosférica

**Tabla 19.** Resumen Estadístico para Textura por fuerza motriz para fritura atmosférica.

Fuerza Motriz	Muestras	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
50	30	5,44001	1,56844	28,8316%	3,0198	8,8534	5,8336
60	30	4,39331	1,53038	34,8344%	2,7761	9,2286	6,4525
70	30	4,67368	1,252	26,7882%	2,3963	7,3825	4,9862
Total	90	4,83567	1,50778	31,1804%	2,3963	9,2286	6,8323

**Tabla 20.** Tabla ANOVA para la textura por Fuerza Motriz.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	17,6145	2	8,80725	4,15	0,0190
Intra grupos	184,718	87	2,12319		
Total (Corr.)	202,332	89			

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Textura entre un nivel de Fuerza Motriz y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

**Tabla 21.** Prueba de Múltiples Rangos para Textura por Fuerza Motriz

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Fuerza Motriz	Casos	Media	Grupos Homogéneos
60	30	4,39331	X
70	30	4,67368	X
50	30	5,44001	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
50 - 60	*	1,0467	0,747792
50 - 70	*	0,76633	0,747792
60 - 70		-0,28037	0,747792

\* indica una diferencia significativa.

El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

#### 9.1.2.4 Efecto de la fuerza motriz equivalente en la formación de Acrilamida para fritura al Vacío.

**Tabla 22.** Resumen Estadístico para Acrilamida

Fuerza Motriz	Muestras	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
50	3	603,333	106,19	17,6006%	501,0	713,0	212,0
60	3	754,667	73,1733	9,69611%	708,0	839,0	131,0
70	3	1180,0	173,156	14,6742%	1029,0	1369,0	340,0
Total	9	846,0	280,531	33,1597%	501,0	1369,0	868,0

**Tabla 23.** Tabla ANOVA para la textura por Fuerza Motriz.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	536355	2	268177	17,26	0,0032
Intra grupos	93227,3	6	15537,9		
Total (Corr.)	629582	8			

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Acrilamida entre un nivel de Fuerza Motriz y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

**Tabla 24.** Prueba de Múltiples Rangos para Acrilamida por Fuerza Motriz

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Fuerza Motriz	Casos	Media	Grupos Homogéneos
50	3	603,333	X
60	3	754,667	X
70	3	1180,0	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
50 - 60		-151,333	249,04
50 - 70	*	-576,667	249,04
60 - 70	*	-425,333	249,04

\* indica una diferencia significativa.

El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

#### 9.1.2.5 Efecto de la fuerza motriz sobre el contenido de aceite para fritura al vacío.

**Tabla 25.** Resumen Estadístico para Aceite por fuerza motriz para fritura al vacío.

Fuerza Motriz	Muestras	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
50	2	35,76	0,226274	0,632758%	35,6	35,92	0,32
60	2	35,485	0,700036	1,97277%	34,99	35,98	0,99
70	3	36,94	0,346987	0,939326%	36,64	37,32	0,68
Total	7	36,1871	0,799306	2,20881%	34,99	37,32	2,33

**Tabla 26.** Tabla ANOVA para aceite por Fuerza Motriz para fritura al vacío.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3,05129	2	1,52565	7,80	0,0416
Intra grupos	0,78205	4	0,195512		
Total (Corr.)	3,83334	6			

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Aceite entre un nivel de Fuerza Motriz y otro para fritura al vacío, con un nivel del 95,0% de confianza.

**Tabla 27.** Prueba de Múltiples Rangos para Aceite por Fuerza Motriz para fritura al vacío

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Fuerza Motriz	Casos	Media	Grupos Homogéneos
60	2	35,485	X
50	2	35,76	X
70	3	36,94	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
50 - 60		0,275	1,22766
50 - 70	*	-1,18	1,12069
60 - 70	*	-1,455	1,12069

\* indica una diferencia significativa.

El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

### 9.1.2.6 Efecto de la fuerza motriz sobre la textura para fritura al vacío.

**Tabla 28.** Resumen Estadístico para Textura para fritura al vacío.

Fuerza Motriz	Muestras	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
50	29	5,07413	1,18064	23,2678%	3,0048	7,2525	4,2477
60	30	5,25021	1,34953	25,7043%	3,0143	7,821	4,8067
70	30	5,56358	1,64745	29,6113%	3,1535	9,2221	6,0686
Total	89	5,29847	1,40693	26,5535%	3,0048	9,2221	6,2173

**Tabla 29.** Tabla ANOVA para textura por Fuerza Motriz para fritura al vacío.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3,63793	2	1,81897	0,92	0,4035
Intra grupos	170,554	86	1,98318		
Total (Corr.)	174,191	88			

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Textura entre un nivel de Fuerza Motriz y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

## 9.2 Conversión de unidades para la concentración de acrilamida.

Considerando que de la curva de calibración es una solución, la unidad esta expresadas en partes por billón en volumen, su conversión a ppb en masa o en (ug/Kg) se calcula de la siguiente forma:

$$\text{ppb en volumen} = \text{pg/uL}$$

$$1 \text{ pg} \rightarrow 1 \text{ uL MeOH}$$

$$X \text{ pg} \rightarrow 1000 \text{ uL MeOH}$$

En 1000 uL habrá 1000 pg por ende:

$$\frac{\text{pg}}{\text{uL}} = \frac{1 \text{ ng}}{1000 \text{ pg}} = \frac{1000 \text{ uL}}{1 \text{ mL}} = \frac{\text{ng}}{\text{mL}}$$

Para la muestra en solución preparada con metanol, se llevaron a sequedad 5 ml del volumen total de muestra (10 ml)

$$A \text{ ng acrilamida} \rightarrow 5 \text{ ml}$$

$$X \text{ ng acrilamida} \rightarrow 10 \text{ ml}$$

$$X = 2 A \text{ ng de acrilamida}$$

Considerando que la muestra en solución contiene 2 g de chips homogenizados en 10 ml de metanol

$$2 A \text{ ng de acrilamida} \rightarrow 2 \text{ g de muestra}$$

$$X \text{ ng de acrilamida} \rightarrow 1000 \text{ g de muestra}$$

$$X = 1000 A \text{ ng de acrilamida} = A \text{ ug de acrilamida}$$

Hay A ug de acrilamida en 1 kg de muestra es decir ug/kg, por ende para el caso particular de este análisis se conserva la relación donde las ppb en volumen son iguales a ppb en masa.

### 9.3 Catálogo bomba para alto vacío en dos etapas

**Figura 12.** Bomba para vacío en dos etapas (rotativa de paletas en baño de aceite)  
DOSIVAC modelo DVR 140.

