



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**



**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ULTRASONIDO EN EL  
SECADO DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.), A BAJA  
TEMPERATURA**

**TESIS  
PRESENTADA POR:**

**ESMERALDA MARILU DIAZ FERNANDEZ**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

**PUNO – PERÚ**

**2020**



## DEDICATORIA

A Dios, por permitirme evolucionar como ser humano, por darme lecciones de vida de bondad y sabiduría.

A mis padres, por el esfuerzo, cariño y dedicación en mi crecimiento profesional y personal.

A mis hermanos por su cariño, apoyo en todo momento, siendo mi alegría,

A mi hija que me enseñó que es el amor incondicional, por todo ser vivo respetando la vida, animal y vegetal, siempre con humildad, dedicación y perseverancia.



## AGRADECIMIENTO

A Dios Supremo padre, madre divina, a mis maestros espirituales y a mis seres de devoción, por permitirme continuar con mi desarrollo profesional.

A mis padres gracias, por su dedicación y esfuerzo en mi desarrollo profesional.

A mi hija porque es y será siempre mi fuerza para seguir cumpliendo con mis proyectos de vida, en lo profesional, personal y espiritual.

A la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial y a todos los docentes por haberme proporcionado los conocimientos necesarios para mi formación profesional.

A mi director de tesis, Roenfi Guerra Lima por su orientación, por su asesoría con la elaboración del proyecto de esta tesis.

A mis jurados de tesis, D. Sc. Luis Jiménez Monrroy, D. Sc. Rosario E. Ortega, Ing. Whany Quispe Chambi por la coordinación, orientación, consejos y apoyo, siempre los tendré presente.

Al Sr. Rufino encargado del laboratorio de Ingeniería de Alimentos por poner a mi disposición todos los medios necesarios para la realización de la presente tesis.

A todos mis amigos y amigas por su cariño y apoyo en los momentos que lo necesite. A todos ustedes, mi mayor reconocimiento y gratitud



## INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	
INDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN .....	10
ABSTRACT.....	11
I. INTRODUCCIÓN .....	12
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	13
2.1. Generalidades del grano de quinua .....	13
2.1.1. Taxonomía de la Quinua.....	14
2.1.2. Composición química .....	15
2.2. Secado de Alimentos.....	15
2.2.1. Actividad de agua ( $a_w$ ) .....	16
2.2.2. Mecanismos del secado.....	17
2.2.3. Curvas de secado.....	18
2.2.4. Factores que influyen en la velocidad de secado .....	20
2.2.5. Tecnologías de secado por aire convectivo .....	21
2.2.6. Estudios realizados en secado de quinua .....	22
2.3. Secado de alimentos asistido por ultrasonido .....	23
2.3.1. Aplicación de ultrasonido en alimentos .....	23
2.3.2. Secador ultrasónico .....	26
2.3.3. Ultrasonidos de potencia (US) .....	27
2.3.4. Mecanismos para mejorar la transferencia de masa en alimentos con (US) .....	28
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	29
3.1. Materia prima .....	29
3.2. Materiales y equipos .....	29
3.3. Metodología .....	29
3.3.1. Determinación de humedad en función al tiempo .....	29
3.3.2. Composición de quinua secada.....	30
3.3.3. Metodología Experimental.....	32
3.3.4. Métodos de análisis.....	33
3.3.5. Factores de estudio.....	36
3.3.6. Diseño experimental .....	36



IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	37
4.1.	Efecto de los ultrasonidos en el secado de quinua .....	37
4.2.	Efecto de la altura del lecho en el secado de quinua.....	40
4.3.	Difusividad efectiva .....	46
4.4.	Composición química.....	47
V.	CONCLUSIONES .....	49
VI.	RECOMENDACIONES .....	50
VII.	BIBLIOGRAFIA .....	51
	ANEXOS .....	55

**Área : Ingeniería y Tecnología**

**Tema: Propiedades Físicas y estructurales**

**FECHA DE SUSTENTACION 15 DE SETIEMBRE DEL 2020**



## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Composición química de Quinua .....	15
<b>Tabla 2:</b> Difusividad efectiva del secado de quinua .....	46
<b>Tabla 3:</b> Resultados de Composición Química de quinua seca por 100 g de muestra ..	47



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Semillas de Quinoa ( <i>Chenopodium quinoa</i> Willd) .....	14
<b>Figura 2</b> Isotherma típico para alimentos secos (Singh y Heldman, 2009) .....	17
<b>Figura 3</b> Curvas típicas de secado (Colina, 2010) .....	19
<b>Figura 4:</b> Sistema de secado a bajas temperaturas asistido por ultrasonidos (Adaptado por Hanco y Mamani (2017). .....	27
<b>Figura 5:</b> Principal mecanismo de mejora de transferencia de masa en alimentos con US .....	28
<b>Figura 6:</b> Diagrama de flujo para el secado de quinua .....	33
<b>Figura 7:</b> Curvas de secado para 1.5 mm de espesor .....	37
<b>Figura 8:</b> Curvas para 3 mm de espesor.....	38
<b>Figura 9:</b> Curvas de secado para 1.5 mm de espesor .....	39
<b>Figura 10:</b> Curvas de secado para Frecuencias de 0 kHz .....	40
<b>Figura 11:</b> Curvas de secado para Frecuencias de 20 kHz .....	41
<b>Figura 12:</b> Curvas de secado para Frecuencias de 40 kHz .....	42
<b>Figura 13:</b> Curvas de secado para Frecuencias de 60 kHz .....	43



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

US	: Ultrasonido de potencia
kHz	: Kilo Hertz
mm	: milímetros
kg	: kilogramo
$a_w$	: Actividad de agua
Wc	: humedad crítica
Hbh	: humedad en base húmeda
Hbs	: humedad en base seca
TPC	: Contenido total de compuestos fenólicos
FC	: flavonoides
AA	: actividad antioxidante
t	: toneladas



## RESUMEN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) producto bandera de la región Puno, poseedora de una gran importancia nutricional y funcional que ofrece un sinnúmero de formas para su producción, transformación y consumo. Uno de los obstáculos en el proceso de transformación básica (envasado de quinua perlada), es en el secado la mayor parte de los productores, realizan el secado exponiendo la quinua al medio ambiente bajo el sol, pero es propensa a la contaminación del medio que lo rodea y como dependientes de las condiciones climáticas por ende requieren tiempos prolongados, una alternativa es aplicar el uso de tecnologías emergentes como el ultrasonido de potencia (US) combinando con el secado convectivo, así es probable reducir el tiempo de secado, evitar la contaminación y no depender de las condiciones climáticas. El trabajo de investigación se desarrolló en las instalaciones de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de los ultrasonidos en el secado de quinua a baja temperatura, para ello se utilizó un secador ultrasónico combinado con aire convectivo, las muestras se colocaron en un soporte cilíndrico con alturas de 1.5 mm, 3 mm y 4.5 mm de quinua lavada y fueron sometidas a 0 kHz (tratamiento sin US), 20 kHz, 40 kHz y 60 kHz, a una velocidad de flujo de aire de  $3 \pm 0.5$  m/s, a temperatura ambiente, las muestras fueron secadas hasta alcanzar 12 % de humedad en base húmeda en promedio, para graficar las curvas de secado se consideró la pérdida de humedad respecto al tiempo, para ello se determinó la humedad inicial considerando la pérdida de peso, el análisis experimental se realizó mediante el Diseño Completo al Azar prueba DUNCAN. El mejor tratamiento resultó a 40 kHz, 1.5 mm de espesor con un tiempo de secado de 1500 segundos con una reducción de hasta 46 % de tiempo, en comparación con el tratamiento sin US (0 kHz) el tiempo de secado fue 2760 segundos, la difusividad efectiva fue con  $5.17 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s y  $1.89 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s respectivamente. Concluyendo que los US permiten reducir significativamente ( $p < 0.01$ ) el tiempo de secado en todos los tratamientos, teniendo mayor efecto en la etapa decreciente.

Palabras Clave: *Quinua, Ultrasonido, secado, aire convectivo, coeficiente de difusividad.*



## ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) emblematic product of Puno region, holding great nutritional and functional importance that offers a large number of ways for its production, transformation and consumption. One of the obstacles in the basic transformation process (pearly quinoa packaging) is in the drying process, most of the producers do the drying process exposing outdoors the quinoa under the sun's daylight, but it is prone to be contaminated at the surrounding area, and depends on weather conditions; therefore, requires larger times; an alternative is to apply the use of innovative technologies such as powered ultrasound (US) combined with convective drying is probably to reduce drying time, pollution will be avoided and it does not depend on weather conditions. The research was carried out at Puno's National University of Altiplano laboratories. The objective of the present research was to evaluate the effect of ultrasound in the drying process of quinoa at a low temperatura, for this, an ultrasonic dryer combined with convective air were used, the samples were placed in a cylindrical support with 1.5 mm, 3 mm and 4.5 mm heights of washed quinoa and were exposed to 0 kHz (treatment without US), 20 kHz, 40 kHz and 60 kHz, at an air flow rate of  $3 \pm 0.5$  m/s, at indoors temperature, the samples were dried to reach on average 12% humidity in wet basis, to plot the drying curves the humidity loss was considered respect to time, so the initial humidity was determined considering the weight loss, the experimental analysis was carried out by the Duncan's Complete Random Design. The best treatment resulted at 40 kHz, 1.5 mm thickness with a drying time of 1500 seconds and a reduction up to 46% compared to the treatment without US (0 kHz), the drying time was 2760 seconds, the effective diffusivity was at  $5.17 * 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s and  $1.89 * 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s respectively. Concluding that the US treatment allows to considerably reduce ( $p < 0.05$ ) the dehydration time in all treatments, having a larger effect in the decreasing stage.

Key Words: *Quinoa, ultrasound, drying, convective air, diffusivity coefficient.*



## I. INTRODUCCIÓN

Según el informe de Ministerio de Agricultura y Riego, la producción de quinua a nivel mundial llegó a 157 643 t en el 2018, siendo el Perú primer productor mundial con un aporte del 53.3 % del volumen total producido, siguiendo Bolivia y Ecuador con 44% y 2,7% respectivamente. De los cuales el departamento de Puno es el mayor productor con 38 900 t, lo cual representó el 46,4% de la producción nacional (MINAGRI, 2018).

Sin embargo, para el proceso de transformación de la quinua trillada en quinua perlada, una de las deficiencias es en el proceso de secado, ya que la mayor parte de los productores exponen directamente al sol y el producto tiende a sufrir contaminación por el medio que lo rodea, además se genera dependencia directa de las condiciones climáticas. Con el propósito de mejorar la etapa del secado en el proceso de quinua perlada es aplicando tecnologías emergentes como el ultrasonido de potencia (US), al combinar con procesos de secado convectivo, se evitará la contaminación y la dependencia climática, a su vez el tiempo de secado se verá reducida del mismo modo el ahorro de energía se verá favorecida al no utilizar estufa (Robles & Ochoa, 2012).

La aplicación del US en alimentos según estudios realizados ha demostrado ser muy favorables al reducir los tiempos de proceso y mejorar los atributos de calidad. Además, es considerada una tecnología limpia y de gran potencial en procesos de secado, congelado, descongelado, extracción entre otros (Robles & Ochoa, 2012).

De modo que, se planteó determinar los parámetros de secado a bajas temperaturas asistido por ultrasonido para la quinua, a diferentes frecuencias ultrasónicas y alturas del lecho, evaluando el efecto en la cinética de secado, planteando los siguientes objetivos:

1. Evaluar el efecto de ultrasonido en el secado de Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) a temperatura ambiente.
2. Evaluar la influencia del espesor del lecho empacado sobre el tiempo de secado en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd).



## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Generalidades del grano de quinua

La región de los Andes, cuna de grandes civilizaciones como la Incaica y Tiahuanacota, es considerada centro de origen de numerosas especies nativas como la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), fue el principal alimento de las culturas antiguas de los Andes y que está distribuida en zonas fronterizas entre Perú y Bolivia (Rojas, Alandia, Irigoyen, Blajos, & Santivañez, 2011). Ocupó una posición especial en la vida agrícola y ceremonial del pueblo inca y se cultivó en Colombia, Perú, las áreas del sur de Bolivia, las áreas del norte de Argentina y las áreas centrales de Chile (Wrigley, Corke, Seetharaman, & Faubion, 2016). En la actualidad la quinua se encuentra en franco proceso de expansión porque representa un gran potencial para mejorar las condiciones de vida de la población de los Andes y del mundo moderno (Mujica & Jacobsen, 2000; Rojas, Alandia, Irigoyen, Blajos, & Santivañez, 2011).

El grano de quinua tiene un contenido de proteínas que oscila entre el 22,8%, un contenido de carbohidratos de hasta el 77,4%, un contenido de grasas de hasta el 9,5% (relativamente estable) y un contenido de fibra de hasta el 5,8%. El grano es más alto en proteínas, grasas y fibra, y más bajo en contenido de carbohidratos que la mayoría de los cereales comparables, debido principalmente al tamaño proporcional del embrión dentro del grano hasta el 30% del peso bruto del grano, en comparación con el 1% para la mayoría de cereales ( Wrigley, Corke, Seetharaman, & Faubion, 2016).

La proteína está localizada en el embrión, están compuestas principalmente por albúminas y globulinas, que están en concentraciones más altas que las que se encuentran normalmente en los principales cereales (trigo, arroz y maíz). El equilibrio de aminoácidos (mayor en histidina, lisina, isoleucina, metionina y cisteína) y el contenido mineral (calcio, magnesio, fósforo, potasio y hierro) del grano de quinua es superior a la mayoría de los cereales. Sin embargo, hay saponinas en la capa de semillas que tienen propiedades anti nutricionales (Wrigley *et al.*, 2016).

### 2.1.1. Taxonomía de la Quinoa.

Fuente: Montero, (2018)

Nombre científico: *Chenopodium quinoa* Willd

Reino: Vegetal

División: Fanarógamas

Clase: Dicotiledóneas

Subclase: Angiospermas

Orden: Centrospermales

Familia: Chenopodiaceae

Género: *Chenopodium*

Sección: Chenopodia

Subsección: Cellulata

Especie: *Chenopodium quinoa* Willd



**Figura 1** Semillas de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd)

### 2.1.2. Composición química

En la Tabla 1, se detalla la composición química de la quinua, según se establece en la Tabla Peruana de composición de los alimentos.

**Tabla 1:** Composición química de Quinua

Componente	Unidad	Contenido
Humedad	%	12.5
Proteína	%	10.0
Cenizas	%	3.5
Grasa	%	4.0
Fibra cruda	%	2.0

Fuente: NTP-205.062 (2014)

### 2.2. Secado de Alimentos

Según Castro (2011), el secado de los alimentos es el método más antiguo de conservación empleado por la humanidad. La utilización del sol para reducir el contenido de agua de un producto es el procedimiento más ancestral y menos costoso de conservación.

El secado al sol de cereales, granos y en esta investigación el de quinua ha sido ampliamente utilizado desde los albores de la Humanidad facilitando al hombre una posibilidad de sustento en épocas de escasez. Hoy en día la industria de alimentos que realizan secado constituye un sector muy importante dentro de la industria alimentaria extendido por todo el mundo. El tamaño de las instalaciones varía desde simples secadores solares hasta grandes y sofisticadas instalaciones de secado para lo cual se utiliza en la quinua el secador por bandejas y el secador solar tipo invernadero de dos capas circulación natural (Fito, Andrés, Barat, & Albors, 2016).

El secado se define como aquella operación unitaria mediante la cual se elimina la mayor parte del agua de los alimentos, al reducir el contenido de agua de un alimento hasta un nivel muy bajo se elimina la posibilidad de su deterioro biológico y se reducen apreciablemente las velocidades de otros mecanismos de deterioro. Además del efecto conservante, mediante el secado se reducen el peso y el volumen del alimento,

aumentando la eficacia de los procesos de transporte y almacenaje (Singh & Heldman, 2009).

La conservación se consigue debido a la reducción de la  $a_w$  a niveles en los cuales se disminuye y bloquea el crecimiento de microorganismos, inhibiendo de igual forma, la presencia de reacciones químicas y bioquímicas, por lo tanto, aumenta la estabilidad del alimento. El secado del alimento se puede realizar de forma parcial o total, dependiendo de su finalidad (Aguilar, 2012).

### 2.2.1. Actividad de agua ( $a_w$ )

El agua contenida en un alimento está más o menos "disponible" para participar en las reacciones físicas, químicas y microbiológicas. Esta "disponibilidad" varía de un producto a otro según su composición, algunas estructuras o moléculas retienen más agua que otras; varía incluso para un mismo producto, un fruto maduro no se comporta de la misma forma que un fruto verde. La mejor forma de expresar esta "disponibilidad", es decir el "grado de libertad" del agua de un producto, es la relación entre la presión parcial de agua en el alimento ( $P$ ) y la presión de vapor del agua pura ( $P_0$ ) a la misma temperatura (Casp & Abril, 2003).

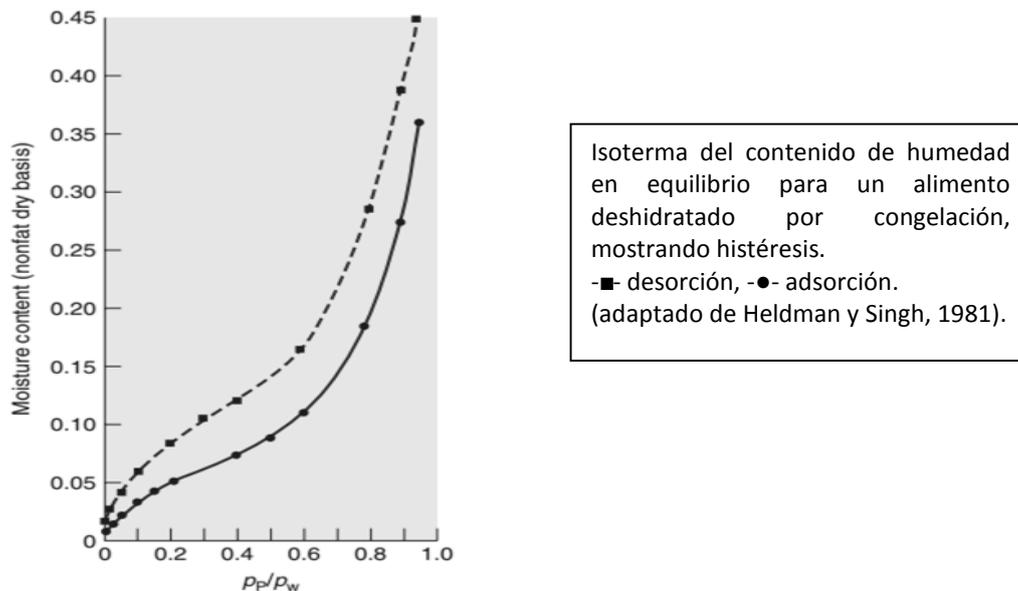
$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{\% HRE}{100}$$

La relación define la ( $a_w$ ), en el producto y su relación con la humedad relativa de equilibrio (% HRE) del medio.

La ( $a_w$ ), de un producto es siempre inferior a 1, esto significa que los componentes del producto fijan parcialmente el agua disminuyendo así su capacidad de vaporizarse. Se habla entonces de agua ligada, más o menos fijada al producto por adsorción. Un producto alimentario contiene en general simultáneamente varias formas de agua: agua libre, agua débilmente ligada y agua fuertemente ligada, estas últimas están retenidas a las moléculas de materia seca por fuerzas relativamente importantes. La proporción de agua más o menos adsorbida depende de cada producto. Según Casp & Abril (2003) los productos más hidratados tales como la mayoría de las frutas y hortalizas, una parte importante del agua está bajo forma de agua libre y de agua débilmente adsorbida, retenida por capilaridad en los tejidos del producto. En los productos más secos, como la mayoría de los cereales alcanza un equilibrio de adsorción oscila entre 0.60 - 0.85, según su textura

y su composición química, una parte importante del agua estará fuertemente adsorbida por el producto (Casp & Abril, 2003).

En la Figura 2, se muestra la relación existente entre la humedad y la actividad de agua para la mayoría de los alimentos, la forma sigmoïdal de la isoterma es típica en los alimentos secos (Singh & Heldman, 2009).



**Figura 2** Isoterma típico para alimentos secos (Singh y Heldman, 2009)

### 2.2.2. Mecanismos del secado

Al pasar el aire caliente sobre un alimento húmedo, el vapor del agua difunde a través de una capa límite de aire que rodea el alimento, que posteriormente es arrastrado por la corriente de aire. Se establece un gradiente de presión de vapor desde el interior del alimento húmedo hasta el aire seco. Este gradiente constituye la fuerza impulsora para la eliminación del agua del alimento. La capa límite actúa como barrera tanto a la transmisión de calor como a la eliminación del vapor de agua durante el secado. El espesor de esta capa límite viene determinado principalmente por la velocidad del aire, a baja velocidad mayor espesor y a mayor velocidad, menor es el espesor de la capa límite que permite eliminar el agua con mayor facilidad (Colina, 2010; Fellows, 2000).

Se logrará secar el alimento cuando se coloca un producto sólido húmedo. Las características necesarias para llevar a cabo un buen secado es colocar el alimento húmedo en contacto con una corriente de aire caliente con velocidad elevada y se mantiene constante la temperatura, humedad moderadamente baja (Colina, 2010; Fellows, 2000).

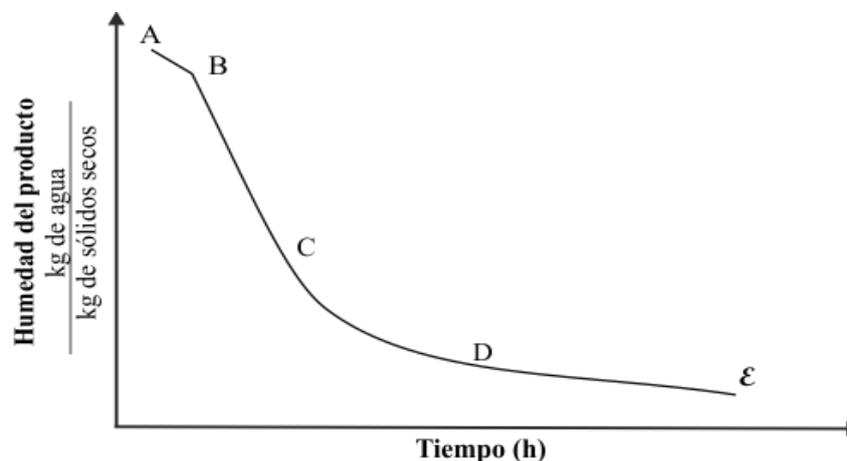
### 2.2.3. Curvas de secado

#### A. Periodo de velocidad constante

Transcurre el periodo inicial de estabilización al final de cual la superficie del alimento alcanza la temperatura de bulbo húmedo (A-B en la Figura 3). Seguidamente la desecación comienza y el agua migra a la superficie del alimento a la misma velocidad que se produce la evaporación aquella permanece húmeda. Este periodo se denomina periodo de velocidad constante se mantiene hasta que se alcanza la humedad crítica (B-C en la Figura 3). Sin embargo, en la práctica, las distintas partes del alimento no se deshidratan a la misma velocidad, por lo que la velocidad se reduce gradualmente (Fellows, 2000).

#### B. Periodo de velocidad decreciente

Es cuando el contenido de agua del alimento desciende por debajo de la humedad crítica, la velocidad en el secado se hace paulatinamente más lenta, acercándose a cero al alcanzarse el contenido de agua en equilibrio. Es decir, el alimento se equilibra con el aire. Los alimentos no higroscópicos poseen un solo periodo de velocidad decreciente (etapa C-D), mientras que en los higroscópicos poseen dos (etapa D-E) o más (Fellows, 2000). El primer periodo el frente de la deshidratación se desplaza hacia el interior del alimento ya que el agua difunde hacia el aire circundante a través de una capa de alimento desecado. Este periodo finaliza cuando el frente de evaporación alcanza el centro del alimento y la presión parcial de vapor desciende por debajo de la presión de vapor de saturación (Fellows, 2000).



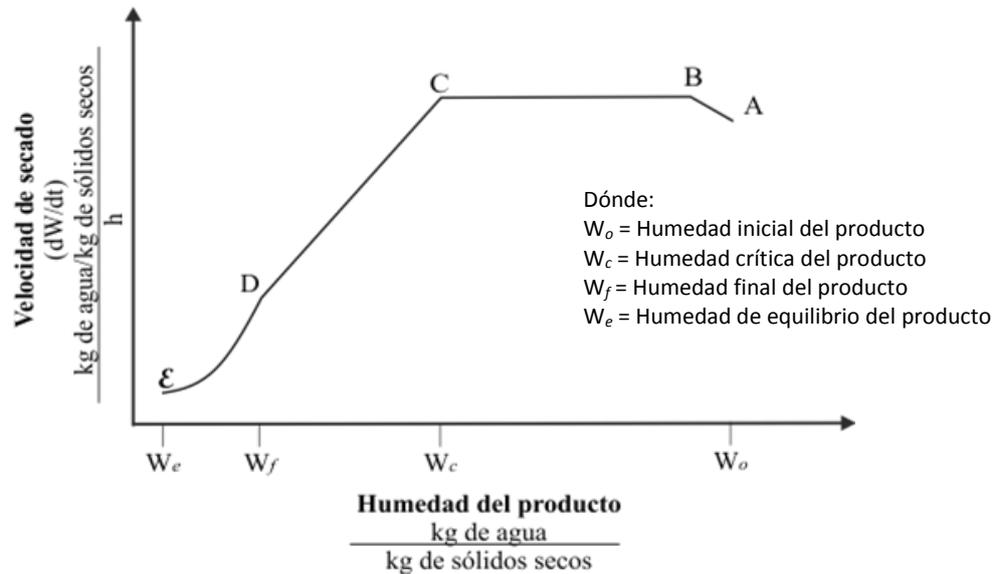


Figura 3 Curvas típicas de secado (Colina, 2010)

### C. Humedad crítica ( $W_c$ )

La  $W_c$  no es una propiedad del alimento, sino que depende del tamaño de partícula y de las condiciones del aire de secado. En el periodo de velocidad constante, el principal mecanismo de transporte de masa es el flujo capilar de agua líquida, aunque puede existir alguna difusión de líquido. El mecanismo interno de flujo de la humedad no afecta a la velocidad de secado en este periodo, es el entorno secante, el aire, el que impone la velocidad de secado, que se incrementa al hacerlo la temperatura. Lo mismo ocurre con la velocidad del aire desecado, cuando mayor es esta mayor es la velocidad del secado (Casp & Abril, 2003).

### D. Coeficiente de difusividad efectiva

La transferencia de materia incluye tanto transporte por difusión de materia a escala molecular como transporte neto por convección. El proceso de difusión puede describirse matemáticamente utilizando la ley de Fick, la cual propone que el flujo de materia de un componente por unidad de área es proporcional al gradiente de su concentración (Singh & Heldman, 2009).

$$\frac{m_B}{A} = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$



Dónde:

$m_B$	:	Es el flujo másico del componente B (kg/s)
$c$	:	Concentración del componente B (kg/m <sup>3</sup> ) o (kg-mol/m <sup>3</sup> )
$D$	:	Coefficiente de difusión (m <sup>2</sup> /s)
$A$	:	Es el área (m <sup>2</sup> )

La determinación del coeficiente de difusión del agua o difusividad efectiva es importante para analizar o modelizar un sistema de deshidratación, con el fin de cuantificar, analizar y controlar las operaciones de transferencia de materia que tienen lugar en el secado (Clemente, 2003).

#### 2.2.4. Factores que influyen en la velocidad de secado

Existen diversos factores que influyen en el proceso de deshidratación, entre ellos predominan:

- a. **Temperatura del aire:** Cuando se emplea aire a altas temperaturas se incrementa la velocidad de transferencia de calor, lo cual trae como consecuencia mayor velocidad de evaporación. Por otra parte, la humedad relativa del aire decrece conforme aumenta la temperatura del mismo, lo cual aumenta el gradiente de la humedad entre el aire y la superficie del producto y acelera la remoción del agua del producto. Así mismo la difusión interna del agua del producto se incrementa a altas temperaturas debido a que las moléculas de agua migran con mayor rapidez conforme aumenta la temperatura, por lo que la velocidad de secado tanto en el periodo de velocidad constante y decreciente se ven favorecidas, por las altas temperaturas del proceso (Colina, 2010).
- b. **Velocidad del aire:** Un incremento en la velocidad del aire, y su consecuente aumento en la turbulencia de la corriente, aumenta la velocidad de la transferencia de masa por convección y, por consiguiente, aumenta la velocidad de secado (Colina, 2010).
- c. **Humedad relativa del aire:** El gradiente de humedad entre el aire de secado y la superficie del producto es la fuerza impulsora para transferencia externa de masa, en este caso la remoción del agua del producto. Cuanto menor sea la



humedad relativa del aire mayor será dicho gradiente y, por ende, mayor la velocidad de deshidratación. Tiene mayor efecto en el periodo de velocidad constante porque es controlado por la resistencia superficial a la evaporación, la cual se reduce cuando se emplea un aire con una baja humedad relativa. La humedad relativa del aire al final del proceso también determina la humedad de equilibrio del producto, una vez alcanzada el equilibrio el alimento no puede deshidratarse más (Colina, 2010).

### **2.2.5. Tecnologías de secado por aire convectivo**

Se realiza a la presión atmosférica normal, aplicando la transferencia de calor por conducción, se emplea una superficie de contacto caliente o convección. Los equipos deshidratadores que se utilizan para provocar este secado artificial son: secadores solares (naturales o semiartificiales) y secadores por gas caliente (de horno, de bandeja, de túnel, por arrastre neumático y por atomización) (Aguilar, 2012).

Para Fito *et al* (2016), el secado por aire convectivo es cuando un producto se somete a la acción de una corriente de aire caliente, el líquido que contiene se evapora aumentando su contenido en el aire. Se produce así una desecación. Es el método más utilizado, también llamado deshidratación por aire caliente.

#### **a. Consumo de energía en la deshidratación de alimentos y productos agrícolas**

Frente a otros procedimientos de preservación de alimentos, la deshidratación presenta algunas ventajas importantes tal y como se ha comentado anteriormente (fácil embalaje y almacenamiento; ahorros considerables en el transporte, facilidad de utilización con otros métodos combinados en la producción de alimentos de humedad intermedia). Estas ventajas son especialmente interesantes en países en vías de desarrollo. Sin embargo, los consumos de energía utilizada en los actuales procesos de deshidratación son muy importantes (Fito *et al.*, 2016).

El proceso de secado de alimentos es una de las operaciones unitarias más utilizadas para aumentar la vida útil de los alimentos al reducir la actividad del agua. Debido a que el secado por convección de aire caliente es el método más utilizado, se han estudiado varias tecnologías para reducir la temperatura y / o el tiempo del proceso, evitando los efectos térmicos en los alimentos. Por ejemplo, el ultrasonido ha obtenido resultados exitosos en la mejora del proceso de secado. Sin embargo, debido a que el secado es una operación gaseosa, la eficiencia del ultrasonido es baja. De



hecho, el efecto del ultrasonido es mayor en las operaciones con sólidos líquidos que en las operaciones con sólidos debido a la diferencia en las impedancias acústicas de los medios (Mason *et al.*, 2005). Por esa razón, es deseable mejorar la eficiencia del ultrasonido durante el secado asistido (Bermudez Aguirre, 2017).

#### 2.2.6. Estudios realizados en secado de quinua

Valencia & Sarco (2009), estudiaron el secado de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) con velocidades de 0.5 m/s (V1) y 1 m/s (V2) a temperaturas de 40 °C (T1) y 50 °C (T2). Obtuvieron como mejor tratamiento a una temperatura de 50 °C y flujos de aire de 1 m/s con un tiempo de secado de 30 minutos, observaron que elimina con mayor rapidez la humedad adherida que a 40 °C.

Canahuire & Vilcanqui (2010), estudiaron el secado de los granos de quinua de la variedad Blanca de Juli, en un prototipo de lecho fluidizado, con 30, 40 y 50 g por tiempo de 315 segundos, a temperaturas de 25 y 35 °C, el flujo de aire 12.15 y 17m/s durante el proceso de secado de los granos de quinua. Obtuvieron valores de las propiedades físicas de los granos de quinua de 1.6mm de diámetro, 625Kg/m<sup>3</sup> de densidad, 0.28 de porosidad y 0.90 de esfericidad; la hidrodinámica presenta un valor máximo de la velocidad mínima de fluidización de 6.05m/s a velocidad de flujo de aire de 12m/s y a 25 °C, con una porosidad mínima de fluidización de 0.72 constante para todos los tratamientos presentando un flujo de transición, como el mejor resultado de velocidad de secado fue para el tratamiento de 50g de lecho a 35 °C y velocidad de flujo de aire de 17m/s con un valor de 25.44% de humedad removida y; el mayor valor de difusividad efectiva se dio en el tratamiento para 30g de lecho a 35 °C y velocidad de flujo de aire de 17m/s con un valor de 1.48489e-12m/s<sup>2</sup>. Concluyendo que a mayor velocidad de flujo de aire y temperatura la velocidad mínima de fluidización será menor y la cantidad de lecho a fluidizar y la temperatura influyen directamente sobre el secado.

Huamán, Yupanqui, Allcca, & Allcca (2016), evaluó el efecto del contenido de humedad y temperatura sobre la difusividad de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) y cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen). Utilizaron el método propuesto por Gupta, el cual hace uso de las curvas de penetración de calor en un equipo especialmente armado para este fin. Los resultados obtenidos indican que los valores varían entre 7,5 y 8,9 x 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s. La evaluación de los datos indica que existe una fuerte influencia del tipo de grano, la humedad y la temperatura en esta propiedad térmica.



Miranda *et al* (2010), estudiaron la deshidratación de quinua entre 40 y 80 °C con el fin de evaluar el efecto de la temperatura de secado del aire sobre los atributos de calidad. Al comparar el fresco con las muestras de quinua deshidratadas correspondientes, se demostró que la operación de secado condujo a reducciones de 10% en proteínas, 12% en grasa y 27% en fibras y cenizas. En la quinua fresca, se encontró que el potasio y el cobre son los minerales más y menos abundantes, respectivamente. La sacarosa fue el azúcar predominante, seguido de fructosa y glucosa. La actividad antioxidante general se vio afectada por las temperaturas de secado. La degradación térmica, especialmente a 60, 70 y 80 °C, resultó en una reducción notable en el contenido total de compuestos fenólicos (TPC). Sin embargo, la vitamina E mostró un aumento importante a 70 y 80 °C. La capacidad antioxidante presentó valores similares a 40, 50 y 80 °C debido a procesos equivalentes de temperatura sobre tiempo de secado.

Multari, Marsol, Keskitalo, Yang, & Suomela (2018), estudiaron los efectos de diferentes temperaturas de secado sobre el contenido de compuestos fenólicos y carotenoides en las semillas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) de Finlandia. Se aplicaron cinco temperaturas de secado para alcanzar un contenido de materia seca de 94-95% *p / p*, a temperatura ambiente, 40, 50, 60 y 70 °C. El proceso realizado a 70 °C permitió la mayor recuperación de los compuestos fenólicos totales,  $994 \pm 28 \text{ mg kg}^{-1}$ . El ácido ferúlico y la quercetina fueron los principales fenólicos identificados. El proceso de secado realizado a 60 °C permitió la mayor recuperación de carotenoides acumulativos,  $2.39 \pm 0.05 \text{ mg kg}^{-1}$ . Los carotenoides identificados fueron xantofilas, por ejemplo, luteína, zeaxantina y neocromo. El uso de calor impactó positivamente en la composición fitoquímica de la quinua. La concentración de fenólicos y carotenoides aumentó constantemente con el aumento de la temperatura de secado. Los resultados obtenidos proporcionan conocimiento científico que los productores pueden usar para aumentar la disponibilidad de tales fitoquímicos en las semillas de quinua.

## **2.3. Secado de alimentos asistido por ultrasonido**

### **2.3.1. Aplicación de ultrasonido en alimentos**

La incidencia de las ondas ultrasónicas en la superficie del alimento genera una fuerza, si ésta es perpendicular a la superficie, se produce una onda de compresión que se mueve a través del alimento, mientras que, si la fuerza es paralela a la superficie, se produce una onda cortante. Ambos tipos de onda se atenúan conforme se propagan en el



interior del alimento. El ultrasonido produce cambios rápidos y localizados de presión y temperatura que provocan rupturas, cavitación de las moléculas de agua dentro de la matriz sólida favoreciendo la eliminación de humedad, adelgazamiento de las membranas celulares, calentamiento localizado y generación de radicales libres, los cuales tienen un efecto letal sobre los microorganismos (Fellows, 2000; Robles & Ochoa, 2012).

Al atravesar un material, la onda ultrasónica, induce una serie de compresiones y descompresiones alternas en el alimento que facilitan la salida del agua al reducir la resistencia interna al transporte de materia, este fenómeno es conocido como “efecto esponja”; así mismo, disminuye la resistencia externa a la transferencia de materia, la cual controla el movimiento del agua entre la superficie del sólido y el aire, dependiendo del espesor de la capa límite de convección; para ello, la onda ultrasónica, provoca variaciones de presión en la superficie sólido-gas y crean micro corrientes y cambios en la turbulencia del aire (Awad, Moharram, Shaltout, Asker, & Youssef, 2012).

Carcía, Cárcel, Benedito, & Mulet (2007), estudiaron la cinética de secado por convección en asistida con ultrasonido de potencia (US), en caqui (*Diospyros kaki var Rojo Brillante*), zanahoria (*Daucus Carota var. Nantesa*) y cáscara de limón (*Citrus limon var. Fino*) las muestras fueron sometidas a 21,8 kHz, 75 W a velocidades de aire que oscilan entre 0.5 m/s a 12 m/s, los resultados muestran que la velocidad del aire y las características de las materias primas juegan un papel importante en la cinética de secado de convección asistida por ultrasonidos de potencia, puesto que, estos aumentan la difusividad efectiva donde, en deshidratado de zanahorias a velocidades de 2.5 m/s obtuvieron un valor para difusividad efectiva de  $1.90E-10$  m<sup>2</sup>/s para tratamientos con aplicación de ultrasonido y  $1.61E-10$  m<sup>2</sup>/s para tratamientos sin ultrasonido. Adicionalmente, para el caso de la cáscara de limón, el ultrasonido también mejoró la tasa de secado a altas velocidades del aire.

Contreras-Ruiz (2014), estudió la influencia de la aplicación de ultrasonido de potencia (US), en el secado de manzana. Las muestras fueron expuestas a 2 m/s, con 10 °C y -10 °C, a distintas potencias (0, 25, 50 y 75 W) con 21.9 kHz. Donde evaluaron la capacidad de rehidratación y textura de las muestras rehidratadas, así como el contenido en compuestos fenólicos total y la capacidad antioxidante. La aplicación de US aceleró el proceso de secado reduciendo el tiempo de secado hasta 81.5% para el tratamiento 75 W y -10 °C, y 42.2% para 25 W y 10 °C, comparada con los tratamientos 0 W (sin



ultrasonido). A mayor potencia de US, mayor fue la velocidad de secado, además a menor temperatura la rehidratación fue mejor, adquiriendo una textura más blanda.

Rodríguez *et al* (2014), evaluaron el efecto de la aplicación de temperatura de aire de secado y US sobre las curvas de secado de manzanas y sobre la calidad (TPC, FC, AA y microestructura) a 30 °C, 50 °C y 70 °C; sin ultrasonido (SUS), 18.5 kW / m<sup>3</sup> y 30.8 kW / m<sup>3</sup>. La aplicación de US redujo significativamente el tiempo de secado ( $p < 0.05$ ) a medida que estas dos variables operativas aumentaron. Tanto en la difusión como en los coeficientes de transferencia de masa externa, permitió la simulación precisa de las curvas de secado (MRE =  $5.8 \pm 2.1\%$ ). TPC y FC se vieron afectados por la temperatura de secado y la aplicación en US. La aplicación de US implicó menores pérdidas de TPC y FC en comparación con las muestras de SUS solo a 30 °C. El uso de US provocó cambios notorios en la microestructura de muestras de manzana, en comparación con las muestras secadas SUS, a todas las temperaturas consideradas, debido al estrés desarrollado por las ondas ultrasónicas.

Claudio, Ibarz, Esteves, & Augusto (2016), estudiaron los mecanismos de US (efectos directos e indirectos), mejoran los fenómenos de transferencia de masa en el procesamiento de alimentos, evaluaron la hidratación del grano de sorgo y la entrada de un pigmento en los cilindros de melón. Los diferentes tratamientos nos permitieron evaluar y discriminar los efectos directos (flujo inercial y " efecto esponja ") e indirectos (formación de micro canales), pretratamientos y tratamientos alternos utilizando un baño ultrasónico (20 kHz de frecuencia y 28 W / L de potencia volumétrica) y un baño de agua tradicional. Se demostró que tanto los efectos de la tecnología de US son más efectivos en alimentos con mayor actividad de agua, que los micro canales solo se forman en alimentos húmedos. La mejora en la transferencia de masa debido a los efectos directos e indirectos fue discriminada y descrita en primer lugar. Se demostró que ambos fenómenos son importantes para la transferencia de masa en alimentos húmedos, mientras que solo los efectos directos son importantes para los alimentos secos. En base a estos resultados, se puede obtener un mejor procesamiento utilizando la tecnología de ultrasonido.

Hanco & Mamani (2017), estudiaron la cinética de secado de oca (*Oxalis tuberosa* Mol), variedad keni rosada, a bajas temperaturas asistido por ultrasonidos, los tratamientos de deshidratación, se realizaron en rodajas de oca con dimensiones 0.008215 m de radio y 0.002 m de espesor, con una velocidad de flujo de aire de  $3 \pm 0.5$  m/s, con

temperaturas de 15 °C, 10 °C, 5 °C, y frecuencias de ultrasonido de 75 kHz, 50 kHz, 25 kHz y 0 kHz. La aplicación del ultrasonido de potencia permitió reducir significativamente ( $p < 0.05$ ) el tiempo de secado en todos los tratamientos, siendo de 4h 56m para el tratamiento de 15 °C con 0 kHz (sin ultrasonido) y 3h 8m para los tratamientos de 15 °C con 50 kHz de frecuencia ultrasónica, lo que representa una reducción del 36% en comparación con el tratamiento sin ultrasonido (0 kHz).

Mir, Riar, & Singh (2019), estudiaron el efecto de ultrasonido sobre las propiedades fisicoquímicas, moleculares y térmicas en proteínas aisladas de semillas de álbum (*Chenopodium quinoa* Willd). Los cambios en el patten SDS-PAGE, la hidrofobicidad de la superficie y la pérdida de peso aumentaron posteriormente la solubilidad junto con la mejora de las propiedades térmicas y otras propiedades funcionales de los aislados de proteínas del álbum.

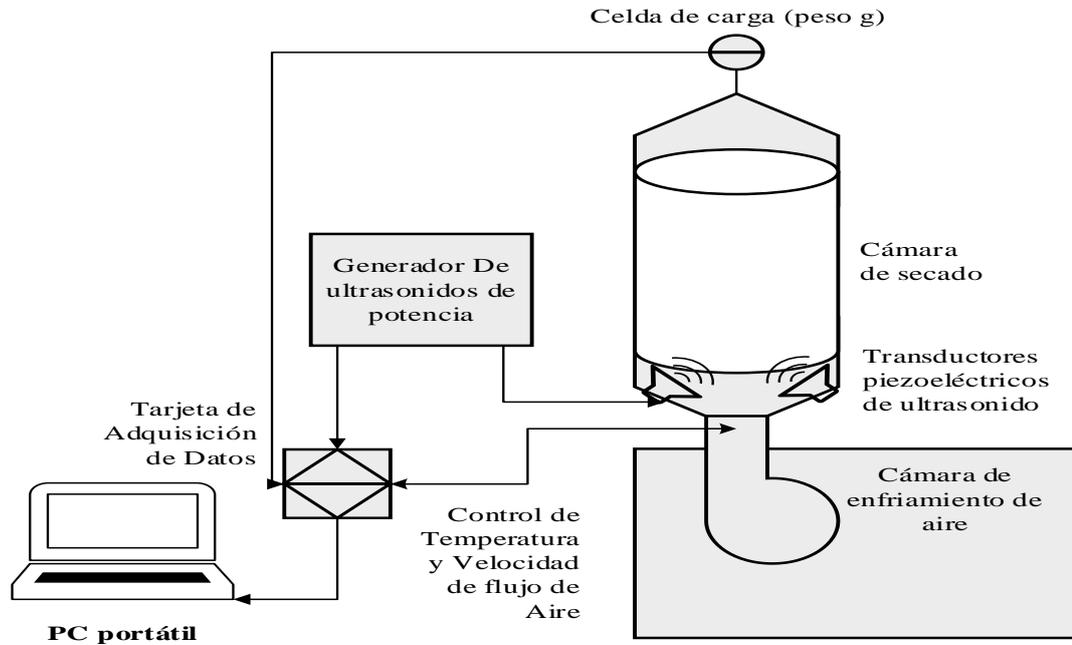
Navarro *et al* (2018), Estudiaron la extracción de saponina utilizando ultrasonidos en semillas de quinua (*Chenopodium quinoa*), soja (*Glycine max*), lentejas (*Lens culinaris*), lupino (*Lupinus albus*) y alhova (*Trigonella foenum-graecum*) utilizando etanol, etano-agua y agua, el mayor rendimiento se obtuvo con etanol en alhova y lentejas de hasta 12% y 10% respectivamente, las muestras con agua mostraron bio-accesibilidad variable del 13% para alhova y 83% para lentejas, pero se alcanzó una bio-accesibilidad cercana al 100% para todos los extractos de etanol. Concluyeron que la extracción asistida por ultrasonido se muestra como un método eficiente para obtener extractos ricos en saponina de semillas comestibles. Además, un equilibrio adecuado entre saponinas y lípidos ha demostrado ser relevante en tal efecto.

### **2.3.2. Secador ultrasónico**

Para el secado de quinua se utilizará el sistema de secado a bajas temperaturas asistido por ultrasonido de potencia ensamblado por Hanco y Mamani (2017), que se basa principalmente en el modelo empleado por García y Carcel (2007), el cual consta de una cámara de secado y/o secado de forma cilíndrica, transductores piezoeléctricos los cuales actúan como emisores de ultrasonido de potencia, además de un sistema de flujo de aire que es enfriado. El sistema cuenta también con un sensor de peso (celda de carga) ubicado en la parte superior de la cámara de secado, las muestras a deshidratar son colocadas en las bandejas, éstas a su vez están dispuestas en un soporte el cual queda suspendido sobre el sensor de peso. Para efectuar las lecturas del sensor de peso, es

necesario detener el flujo de aire, así como de las ondas ultrasónicas, de manera momentánea mientras se realizan las lecturas, con el fin de evitar interferencias en el proceso de lectura (Hanco & Mamani, 2017).

En la Figura 4, se muestra el esquema del sistema de secado ensamblado y empleado en la presente investigación.



**Figura 4:** Sistema de secado a bajas temperaturas asistido por ultrasonidos (Adaptado por Hanco y Mamani (2017)).

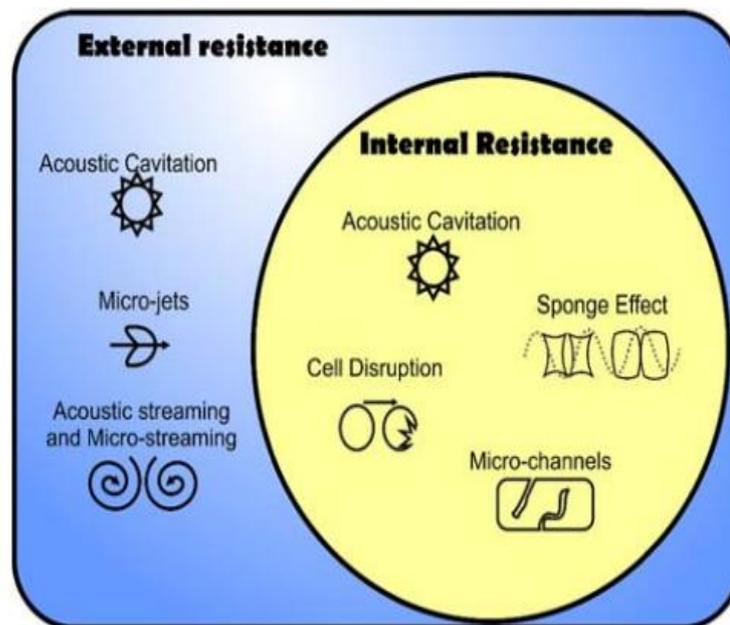
### 2.3.3. Ultrasonidos de potencia (US)

El ultrasonido (US), es una forma de energía que viajan en ondas de sonido iguales o mayores a 20000 vibraciones por segundo (20 kHz). Las aplicaciones de las ondas ultrasónicas se dividen por lo general en dos grupos: baja y alta intensidad. Las aplicaciones de US de baja intensidad ( $< 1 \text{ Watt/cm}^2$ ), que comprenden frecuencias entre 100 kHz y 1 MHz, son aquellas cuya función principal es la de obtener información acerca del alimento (medio de propagación) sin producir cambio alguno en su estado. Por otro lado, las aplicaciones de alta intensidad ( $> 1 \text{ Watt/cm}^2$ ), que comprenden frecuencias entre 20 kHz y 100 kHz se utilizan para producir cambios permanentes en el medio tratado, mediante la energía ultrasónica (Robles Ozuna & Ochoa Martínez, 2012).

### 2.3.4. Mecanismos para mejorar la transferencia de masa en alimentos con (US)

La transferencia de masa en los diferentes procesos es una función de la resistencia externa y / o interna. Dependiendo de la operación de la unidad y las condiciones del proceso, una o ambas de esas resistencias se pueden depreciar. Por ejemplo, la resistencia interna es mucho más importante en el proceso de hidratación que la resistencia externa.

Figura 5, muestra el mecanismo principal de mejora de la transferencia de masa por ultrasonido en relación con las resistencias de transferencia de masa (Bermudez, 2017).



**Figura 5:** Principal mecanismo de mejora de transferencia de masa en alimentos con US

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

La parte experimental se llevó a cabo en laboratorio Ingeniería EPIAI UNA Puno.

#### 3.1. Materia prima

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) se adquirió del Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA) Puno, variedad blanca de Juli.

#### 3.2. Materiales y equipos

- Recipientes para lavado de material plástico.
- Campana de desecación con silica-gel: de capacidad de 6 lunas de reloj.
- Equipo secador por aire convectivo con ultrasonido con velocidad de aire de  $3\text{m/s} \pm 0.5$ , con rangos de control de temperatura de  $5\text{ }^\circ\text{C}$  a  $15\text{ }^\circ\text{C}$ , con rangos de generación ultrasónica de frecuencias entre 20 kHz a 75 kHz y potencia nominal de 20W.
- Estufa de bandejas: Laboratorio de Ingeniería EPIAI UNA Puno, máxima temperatura de operación hasta  $65\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Balanza analítica: METTLER TOLEDO® PB3002-S, precisión de 0.01g, con capacidad máxima de 1000.00g.

#### 3.3. Metodología

##### 3.3.1. Determinación de humedad en función al tiempo

La determinación de la humedad en base seca se realizó a partir de la humedad en base húmeda del producto, a través de la ecuación 1 y 2 (Singh & Heldman, 2009).

$$\%hbh = \frac{P_i - P_{i+x}}{P_i} * 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$hbs = \frac{P_i - P_{i+x}}{P_{i+x}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde: %hbh : Porcentaje de humedad en base húmeda.

hbs : Humedad en base seca.

$P_i$  : Peso inicial



$P_{i+x}$  : Peso inicial +  $x$

### 3.3.2. Composición de quinua secada.

Se caracterizó las muestras por los métodos recomendados por la AOAC, según se describe a continuación:

**A) Determinación de humedad:** La determinación de humedad se realizará por el método estufa a 60 °C por 24 horas, método N° 945.15 (A.O.A.C., 2012), para el cálculo del contenido porcentual de humedad se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso total} - \text{Peso final}}{\text{Peso muestra}} * 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:       Peso total = peso luna + peso muestra húmeda

              Peso final = Peso luna + peso muestra seca

**B) Determinación de Proteína:** Se determinará por el método micro Kjeldahl, usando el factor 6.25, para llevar el nitrógeno a proteína total. El proceso comprende tres fases: digestión, destilación y titulación. Método N° 992.23 (A.O.A.C., 2012), el cálculo de contenido porcentual de proteína se realiza utilizando las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ Nitrogeno} = \frac{\text{ml de HCl} * \text{Normalidad} * \text{meq}}{\text{gramos de muestra}} * 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\% \text{ Proteína} = 6.25 * \% \text{ Nitrogeno}$$

Dónde:   ml de HCl       :       gasto de HCl en la titulación.

          Normalidad   :       normalidad del HCl.

          meq           :       miliequivalente del Nitrógeno.

**C) Determinación de Cenizas:** Se determinará por el método de calcinación en mufla a una temperatura de 650°C por 4 horas, para quemar todo el material



orgánico. Método N° 992.03 - ISO 2175 (A.O.A.C., 2012), el cálculo del contenido porcentual de ceniza se efectúa con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{\text{Peso del crisol y la ceniza} - \text{Peso del crisol}}{\text{Peso muestra}} \quad (\text{Ec. 5})$$

\* 100

**D) Determinación de Grasa:** Mediante el método Soxhlet, Método N° 945.38 (A.O.A.C., 2012), para lo cual se pesa dos gramos de muestra, se empaqueta en un papel filtro Whatman N° 2, se coloca el paquete en el cuerpo del aparato Soxhlet, previamente tratado libre de humedad, luego se agrega el hexano, seguidamente se conecta una fuente de calor, al calentarse el hexano, se evapora y ascenderá a la parte superior del cuerpo Soxhlet, allí se condensa por refrigeración y cae nuevamente sobre la muestra, regresando al balón por sifón. Se evapora, el hexano remanente en el balón en una estufa a 60 °C para luego enfriar en una campana de desecación. Los cálculos se realizan con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Grasa} = \frac{(\text{Peso del balón} + \text{grasa}) - (\text{Peso del balón vacío})}{\text{Peso muestra}} \quad (\text{Ec.6})$$

\* 100

**E) Fibra cruda:** Se procederá de la siguiente manera:

**Digestión ácida.** Se pesa 3g de muestra (exenta de grasa), en un vaso de 600ml, se deja hervir por 30 minutos con 200ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 1.25%, luego se filtra y lava con agua destilada caliente hasta neutralizar la acidez (A.O.A.C., 2012).

**Digestión alcalina.** Se añade 200ml de NaOH 1.25% y se hierve por 30 minutos, se filtra al vacío en una cápsula de cerámica porosa, lavando con agua destilada caliente, posteriormente se coloca en la estufa por 2 horas para luego pesar, éste peso se denomina Peso<sub>1</sub>, seguidamente se coloca a la mufla para eliminar la materia orgánica y obtener las cenizas, se pesa nuevamente denominándose como



Peso2. Método N° 945.38 (A.O.A.C., 2012), el cálculo para el contenido de fibra bruta se efectúa con las siguientes fórmulas:

$$Fibra\ neta = Peso1 - Peso2 \quad (Ec. 7)$$

$$\% Fibra\ bruta = \frac{Peso1 - Peso2}{Peso\ muestra} * 100 \quad (Ec. 8)$$

**F) Carbohidratos totales:** Se calcula por diferencia (A.O.A.C., 2012), restando de 100, los porcentajes de humedad, proteína, grasa, fibra y cenizas, como se muestra en la fórmula siguiente:

$$\% Carbohidratos = 100 - (\% humedad + \% proteína + \% cenizas + \% grasa + \% fibra) \quad (Ec.9)$$

### 3.3.3. Metodología Experimental

#### Diagrama de flujo

En la Figura 6, se muestra el diagrama de flujo para el secado de quinua y se describe a continuación:

- **Recepción de la materia prima.** La materia prima que se utilizará será la variedad blanca de Juli.
- **Selección y limpieza.** Consiste en eliminar las impurezas.
- **Escarificado.** Consiste en eliminar la saponina.
- **Remojo.** Esta operación se realiza después del escarificado, se remoja por un tiempo de 5 a 10 minutos aproximadamente, logrando así eliminar restos o trazas de saponina.
- **Lavado.** Este proceso se realizará con el fin de eliminar la saponina restante, se lavará tantas veces sea necesaria hasta que no quede restos de espuma.
- **Secado.** Se colocará las muestras en un lecho empacado con

diferentes espesores en el secador ultrasónico por el tiempo necesario hasta que llegue a la humedad indicada 11%.



Figura 6: Diagrama de flujo para el secado de quinua

### 3.3.4. Métodos de análisis

El tiempo de secado se calculará por pérdida de peso, teniendo en cuenta la humedad inicia y final de la quinua, la humedad final se tomará en cuenta mediante las isotermas de sorción calculados en estudios realizados por otros autores.

- **Curva de secado (Humedad base seca – Tiempo)**

La Humedad en Base Seca se define con la relación entre la cantidad de agua del alimento y la cantidad de sólidos secos, y se calculará mediante la siguiente ecuación (Colina, 2010).

$$W = \frac{P_i - P_s}{P_s} \frac{kg H_2O}{kg solido seco} \quad (Ec. 11)$$



Donde:  $W$  : Humedad en Base Seca (KgH<sub>2</sub>O/Kg s.s.).

$P_i$  : Peso Inicial de la Muestra (Kg.).

$P_s$  : Peso de sólidos secos (Kg.).

- **Velocidad de secado - humedad en base seca**

La velocidad de secado se define como la pérdida de humedad del sólido húmedo en una unidad de tiempo, más exactamente por el cociente diferencial ( $-dW/dt$ ) operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire cuyas condiciones (temperatura, presión, humedad y velocidad permanecen constantes con el tiempo. Analíticamente la velocidad de secado se refiere a la unidad de área de superficie de secado de acuerdo con la siguiente ecuación (Colina, 2010).

$$R = \frac{ms}{A} \left( -\frac{dW}{dt} \right) \quad (\text{Ec. 11})$$

$$A = 2\pi r (l + r) \quad (\text{Ec. 12})$$

Dónde:  $ms$  : Peso de sólidos secos (kg)

$A$  : Área de la superficie expuesta (m<sup>2</sup>)

$dW$  : Diferencial de las humedades medias.

$dt$  : Diferencial del tiempo (segundos)

$R$  : Velocidad de secado (KgH<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>. s)

$l$  : Espesor de la muestra (m)

$r$  : Radio de la muestra (m)

- a) **Coefficiente de difusividad efectiva**

Se determinó por el método de la pendiente de la curva, consiste en calcular la difusividad efectiva a partir de la representación del logaritmo neperiano de la humedad media adimensional frente al tiempo. Esta representación se ajusta a una línea recta y la difusividad se calcula a partir de la pendiente de la misma (Singh & Heldman, 2009).

A partir de la ecuación:

$$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[ -\frac{\pi^2 De t}{4d_c^2} \right] \quad (\text{Ec. 13})$$

Se tiene:

$$\ln(\psi) = \ln \left( \frac{8}{\pi^2} * \frac{W - W_e}{W_c - W_e} \right) = -\frac{\pi^2 De}{4d_c^2} t \quad (\text{Ec. 14})$$

- Dónde:
- $W$  : Humedad media (kg agua/kg ss.)
  - $W_c$  : Humedad crítica (kg agua/kg ss.)
  - $W_e$  : Humedad media de equilibrio (kg agua/kg ss.)
  - $De$  : difusividad másica efectiva (m<sup>2</sup>/s)
  - $t$  : tiempo (s)
  - $d_c$  : Dimensión característica (m).

### b) Estimación del tiempo de secado

Para estimar el tiempo de secado para el periodo de velocidad constante se utilizó las siguientes ecuaciones (Singh & Heldman, 2009).

$$t_c = \frac{ms}{A} \frac{W_i - W_c}{W_c} \quad (\text{Ec. 15})$$

- Dónde:
- $W_i$  : Humedad inicial (kg agua/kg ss.)
  - $A$  : Área expuesta (m<sup>2</sup>)

Por tanto, la expresión para el tiempo de secado para el periodo de velocidad decreciente ( $t_d$ ) es:

$$t_d = \frac{4d_c^2}{\pi^2 De} \ln \left[ \frac{8}{\pi^2} \left( \frac{W_c - W_e}{W - W_e} \right) \right] \quad (\text{Ec. 16})$$

Siendo el tiempo total ( $t_T$ ):  $t_T = t_d + t_c$  (Ec. 17)

### 3.3.5. Factores de estudio

#### A) Variables estudio (factores)

- Factor A : Frecuencia de ultrasonido (0, 20, 40 y 60 kHz)
- Factor B : Espesor del lecho empacado (1.5, 3.0 y 4.5 mm)

#### B) Variables respuesta

- Tiempo de secado
- Coeficiente de difusividad efectiva

### 3.3.6. Diseño experimental

Para el análisis estadístico se utilizó el software STATGRAPHICS Centurión, utilizando el experimento Factorial bajo el Diseño Completo al Azar (DCA), con arreglo Factorial 4Ax3B con 3 repeticiones, con un total de 12 tratamientos y 36 unidades experimentales. El modelo lineal es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \left\{ \begin{array}{l} i = 0, 20, 40 \text{ y } 60; a (F \text{ KHz, Factor A}) \\ j = 1.5, 3 \text{ y } 4.5; \beta (mm, \text{Factor B}) \\ k = 1, 2, 3; r (\text{repeticiones}) \end{array} \right\}$$

- Dónde:
- $Y_{ijk}$  : Es la variable respuesta de la k-ésima observación bajo el j-ésimo nivel de factor B, sujeto al i-ésimo nivel de factor A.
  - $\mu$  : Constante, media de la población a la cual pertenecen las observaciones.
  - $\alpha_i$  : Efecto del i-ésimo nivel del factor A.
  - $\beta_j$  : Efecto del j-ésimo nivel del factor B.
  - $\alpha\beta_{ij}$  : Efecto de la interacción del i-ésimo nivel del factor A, con el j-ésimo nivel factor B.
  - $\varepsilon_{ijk}$  : Efecto del error experimental.

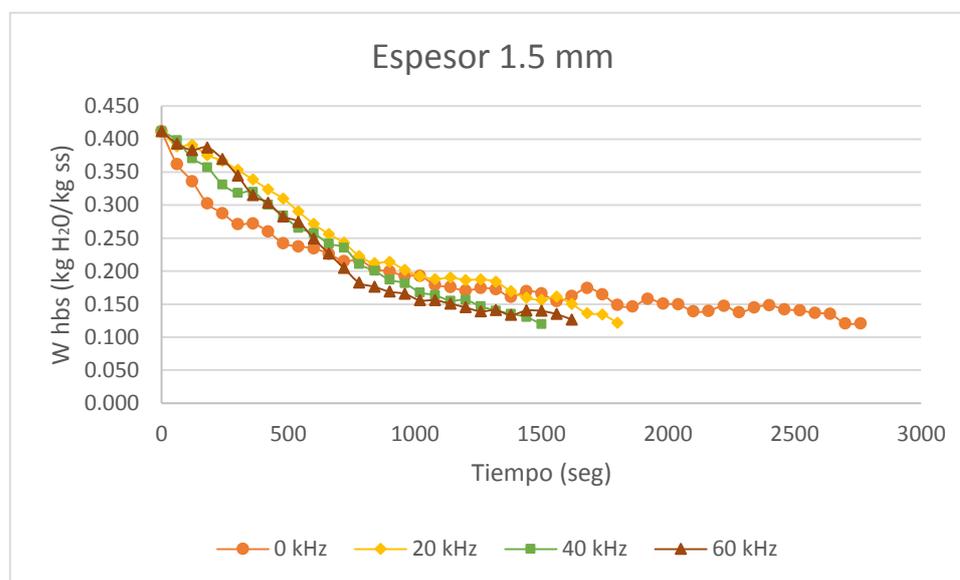
Fuente: Ibáñez (2009)

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Efecto de los ultrasonidos en el secado de quinua

La humedad inicial de la quinua para el secado fue de 0.412 kg de H<sub>2</sub>O/kg de sólidos secos equivalente a 29.17 % cuyos cálculos se detallan en el Anexo E, Tabla E. 1, el secado se realizó hasta alcanzar 0.13 kg de H<sub>2</sub>O/kg de sólidos secos equivalente a 12 % en base húmeda a continuación, se muestran los resultados del efecto de ultrasonido en el secado de quinua en los gráficos siguientes:

**Figura 7:** Curvas de secado para 1.5 mm de espesor

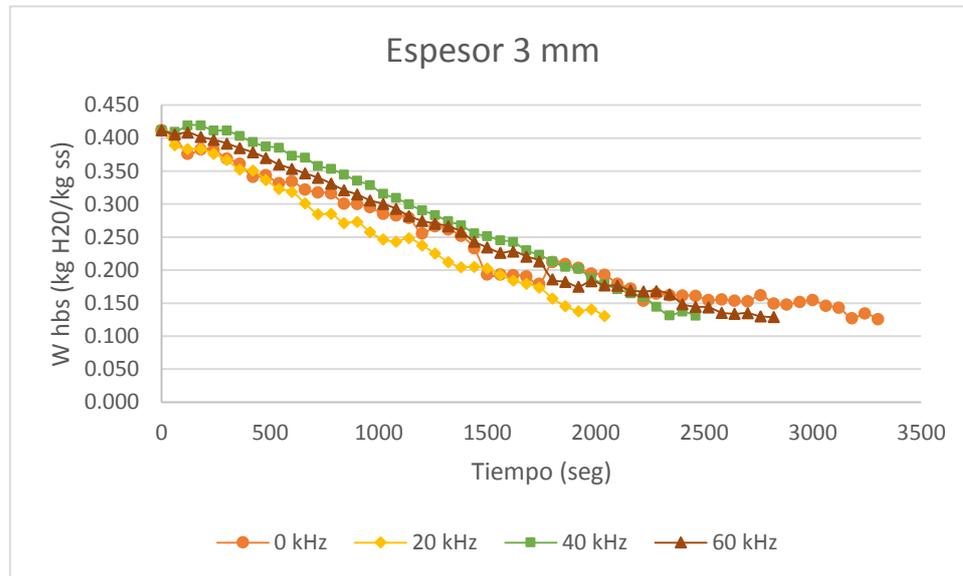


En la Figura 7, se muestra las curvas de secado para el espesor del lecho 1.5 mm, donde se observa los tiempos de secado para los tratamientos con y sin aplicación de ultrasonido, el tiempo obtenido para 0 kHz (SU) fue de 2760 segundos, para 20 kHz fue de 1800 segundos lo que muestra una reducción del 35 % respecto al tratamiento sin ultrasonido, para 40 kHz fue 1400 segundos lo que muestra una reducción del 46 % respecto al tratamiento sin ultrasonido, y para 60 kHz fue 1620 segundos lo que muestra una reducción del 41 % respecto al tratamiento sin ultrasonido.

Además en la Figura 7, se observa que los tratamientos con ultrasonido (20, 40 y 60 kHz) la mayor remoción de agua se da en la etapa de velocidad constante esto porque según Colina (2010), en esta etapa se elimina con facilidad el agua libre, por otro lado según Awad *et al* (2012), el ultrasonido produce cambios rápidos y localizados de presión y temperatura provocando rupturas, cavitación de las moléculas de agua en el interior de

la matriz sólida favoreciendo la eliminación de humedad. Según Fellows (2000), la velocidad constante en la práctica es distinta debido a que las partes del alimento no se deshidratan a la misma velocidad, por lo que la velocidad se reduce gradualmente .

**Figura 8:** Curvas para 3 mm de espesor



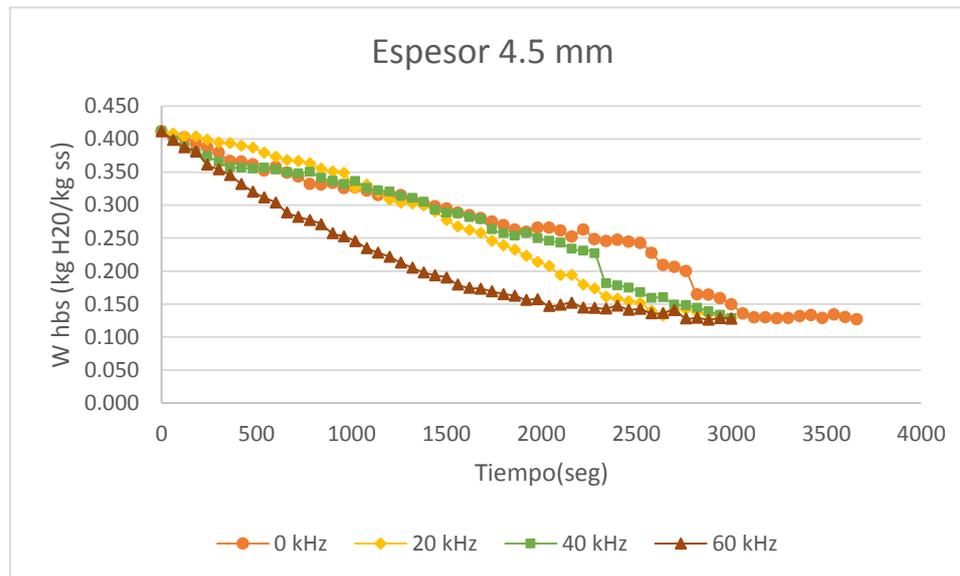
En la Figura 8, se muestran las curvas de secado para el espesor de 3 mm, donde se observan que el menor tiempo de secado se registra para el tratamiento con 20 KHz 2440 segundos y seguido por el tratamiento 40 kHz el tiempo de secado fue 2460 segundos con una reducción de tiempo de 26 % y 25 % respectivamente en comparación con el tratamiento sin ultrasonido (0 kHz), que fue de 3300 segundos.

El menor tiempo de secado es para 20 KHz aunque la diferencia es mínima respecto a 40 kHz, en el estudio realizado por Contreras-Ruiz (2014), en secado de manzanas, la aplicación de US acelero el proceso de secado con una reducción de hasta 81.5 % a bajas temperaturas (-10°C, 75 W y 21.9 KHz), en este caso a mayor potencia de US mayor es el efecto.

En otro estudio realizado por; Rodríguez *et al* (2014), en la evaluación del efecto del ultrasonido en el secado de manzana a 30 – 70 °C, con US de 18.5 – 30.8 kW, se redujo significativamente el tiempo de secado, a medida que los parámetros se aumentan menor tiempo de secado. Al igual que Cárcel *et al* (2012); Carcía *et al* (2007), encontraron efectos significativos en el secado de alimentos con aplicación de ultrasonido. Por otro, Bermudez Aguirre (2017), analizo la aplicación del ultrasonido en diferentes estudios

tales como microestructura, efectos en la calidad del alimento, en congelación, secado y otros. Y todos muestran efectos favorables.

**Figura 9:** Curvas de secado para 1.5 mm de espesor



En la Figura 9, se muestran las curvas de secado para el espesor de 4.5 mm, donde se observan los tiempos de secado para los tratamientos con y sin aplicación de ultrasonido, el tiempo obtenido para 0 kHz (sin ultrasonido), fue de 3660 segundos, los tratamientos con US de 20 kHz, 40 kHz y 60 kHz fue de 3000 segundos lo que muestra una reducción del 18 % respecto al tratamiento sin US.

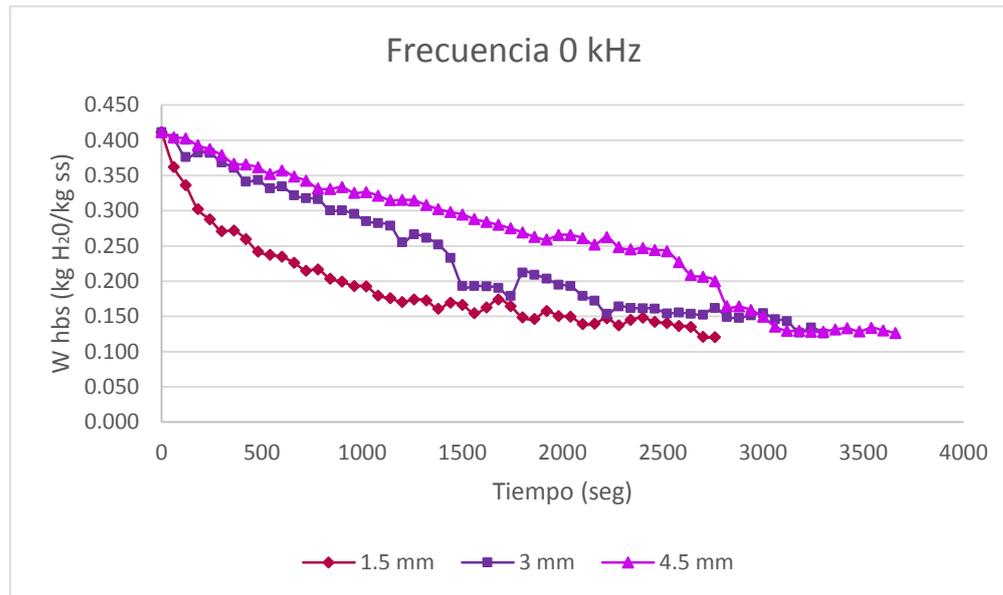
Se observa que a un espesor de 4.5 mm no se encuentran diferencias entre los tratamientos con US, pero si hubo una reducción del tiempo frente al tratamiento sin US, lo que indica que a mayor espesor la frecuencia de US es indiferente, como indica Carcía - Perez *et al* (2007), la influencia de US depende de las características de la materia prima, mientras más alta sea la porosidad del producto la frecuencia de US es indiferente. También indica que a mayor velocidad del flujo de aire el efecto US no es significativo debido a que la velocidad del flujo del aire interrumpe el campo ultrasónico, en el experimento la velocidad del flujo de aire fue de 3 m/s. Por el otro lado las curvas de secado que más estable fue de 60 KHz y más endeble fue el tratamiento sin US.

En general el mejor tratamiento fue 40 y 20 kHz, ya que los tiempos de secado fueron menores, según Hanco & Mamani (2017), en el secado de oca (*Oxalis tuberosa* Mol) presentaron como mejor tratamiento 50 kHz a 15 °C con una reducción del tiempo del 36 % comparación con el tratamiento sin US (0 kHz).

## 4.2. Efecto de la altura del lecho en el secado de quinua

Otro de los factores que influyen en el secado es la altura del lecho los cuales se presentan a continuación en los siguientes gráficos.

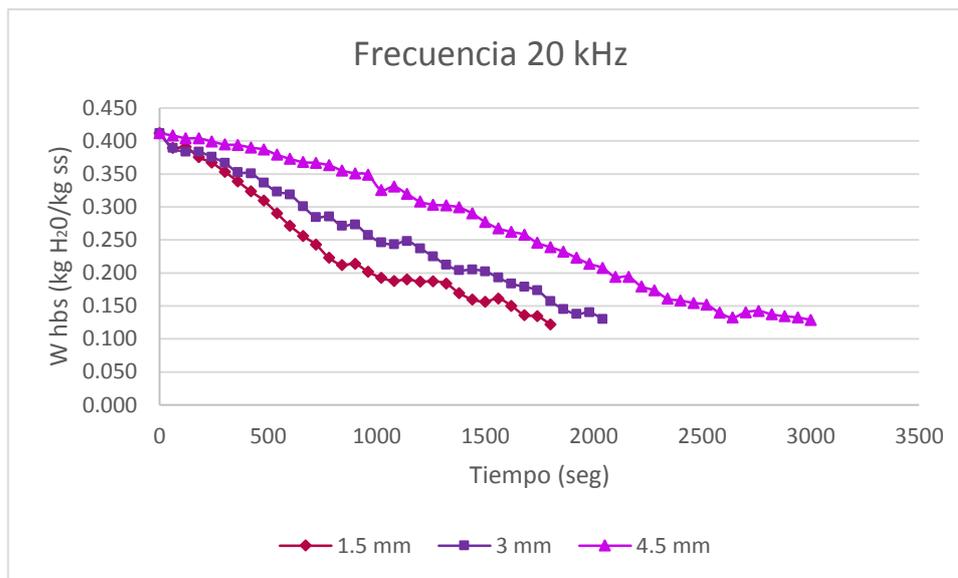
**Figura 10:** Curvas de secado para Frecuencias de 0 kHz



En la Figura 10, se muestran las curvas de secado para el tratamiento sin US (0 kHz), se observa que el menor tiempo de secado se presenta para el espesor del lecho 1.5 mm, seguido por 3 mm y finalmente 4.5 mm, cuyo tiempo de secado fue de 2760, 3300 y 3660 segundos respectivamente.

Los resultados evidencian que a menor espesor el tiempo de secado es menor, pero la diferencia no es muy significativa sin embargo la mayor remoción de agua en la etapa decreciente se observa para el tratamiento 1.5 mm, los tratamientos de 3 mm y 4.5 mm la mayor remoción de humedad se da en la etapa constante. El tiempo de secado según Valencia & Sarco (2009), de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) a 50 °C y flujos de aire de 1 m/s fue 30 minutos equivalente a 1800 segundos, esto debido a la diferencia de temperaturas, en el experimento realizado fue de 15 °C.

**Figura 11:** Curvas de secado para Frecuencias de 20 kHz

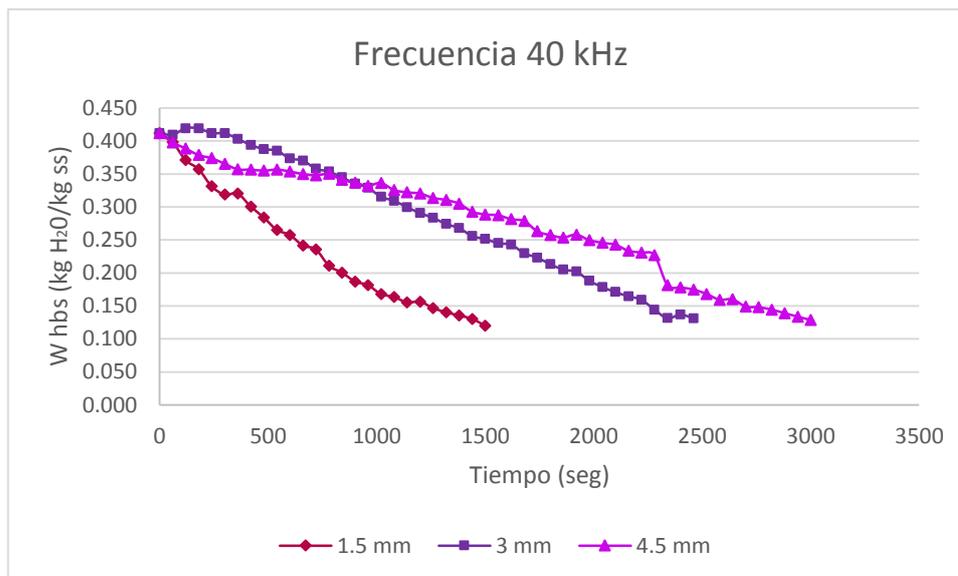


En la Figura 11, se muestran las curvas de secado para el tratamiento con ultrasonido a 20 kHz, evidentemente se observa que el menor tiempo de secado se presenta para el espesor del lecho 1.5 mm, seguido por 3 mm y finalmente 4.5 mm, cuyo tiempo de secado fue de 1800, 2440 y 3000 segundos respectivamente.

Los resultados evidencian que a menor espesor el tiempo de secado es menor, la diferencia no es muy significativa en los tratamientos de 1.5 mm y 3 mm, se observa una mayor remoción de agua en la etapa decreciente, en cambio en tratamiento de 4.5 mm las curvas de secado muestran una pausada eliminación de agua en la etapa decreciente. Por otro lado Canahuire & Vilcanqui (2010), estudiaron el secado de los granos de quinua de la variedad Blanca de Juli, donde el tiempo de secado fue de 315 segundos a 35 °C con una velocidad de flujo de aire de hasta 17 m/s, la diferencia es muy alta respecto al experimento realizado debido a la gran diferencia de velocidad de aire (3 m/s) y temperatura (15 °C).

Para Carcía *et al* (2007), el tiempo de secado con aplicación de ultrasonido se ve influenciado por las características del alimento, a menor área de exposición mejores fueron los efectos en cuanto al tiempo de secado. Para Claudio *et al* (2016), los efectos directos de US son importantes para los alimentos secos, entonces para el secado de quinua los efectos del US fueron directos, por ello a menor espesor los efectos fueron mayores.

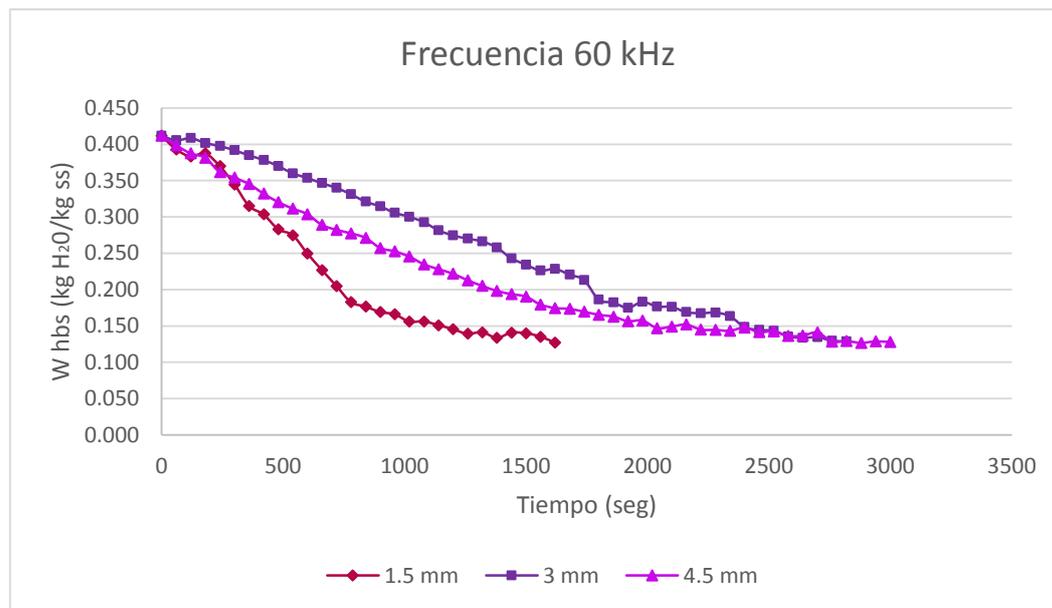
**Figura 12:** Curvas de secado para Frecuencias de 40 kHz



En la Figura 12, se muestran las curvas de secado para el tratamiento con ultrasonido a 40 kHz, evidentemente se observa que el menor tiempo de secado se presenta para el espesor del lecho 1.5 mm, seguido por 3 mm y finalmente 4.5 mm, cuyo tiempo de secado fue de 1500, 2460 y 3000 segundos respectivamente. La diferencia es mínima entre los dos últimos tratamientos.

Los resultados evidencian que a menor espesor el tiempo de secado es menor, pero la diferencia no es muy significativa entre los tratamientos 3 mm y 4.5 mm. En comparación con el estudio realizado por Valencia & Sarco (2009), secado de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) a 50 °C y flujos de aire de 1 m/s fue 30 minutos equivalente a 1800 segundos, el mejor tiempo obtenido en el experimento realizado fue de 1500 segundos, es decir 300 segundos menos, una vez más queda demostrada que es factible utilizar US a bajas temperaturas lo que conlleva a un ahorro de energía.

**Figura 13:** Curvas de secado para Frecuencias de 60 kHz



En la Figura 13, se muestran las curvas de secado para el tratamiento con ultrasonido a 60 kHz, evidentemente se observa que el menor tiempo de secado se presenta para el espesor del lecho 1.5 mm, seguido por 3 mm y finalmente 4.5 mm, cuyo tiempo de secado fue de 1620, 2820 y 3000 segundos respectivamente, también se observa una diferencia mínima entre los dos últimos tratamientos.

Los resultados evidencian que a menor espesor el tiempo de secado es menor, pero la diferencia no es muy significativa entre los tratamientos 3 mm y 4.5 mm. En general se encontraron efectos del espesor en el secado de quinua a bajas temperaturas.

En los resultados estadístico se utilizó el software STATGRAPHICS Centurión, utilizando el experimento Factorial bajo el Diseño Completo al Azar (DCA), con arreglo Factorial 4Ax3B con 3 repeticiones, con un total de 12 tratamientos y 36 unidades experimentales, obteniendo los siguientes resultados:

- Según Tabla A.1 el análisis estadístico realizado por el método Factorial bajo el Diseño Completamente al Azar (DCA), permitió analizar simultáneamente dos factores frecuencia y espesor quienes intervinieron en el secado de la quinua a temperatura ambiente, a su vez con este método se comparó los niveles de cada factor entre sí y las interacciones entre sus factores frecuencia y espesor, dándonos así una información más completa sobre los tratamientos. El resumen del análisis de varianza (ANVA) para el tiempo de secado en segundos, se muestra en la Tabla A.1.

La tabla ANVA descompone la variabilidad de Tiempo en contribuciones de los factores frecuencia y espesor, es decir las variables de estudio, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P menores a 0.01 prueban la significancia estadística de cada uno de los factores frecuencia y espesor, esto indica que tanto la frecuencia como también el espesor tienen un efecto altamente significativo sobre el tiempo de secado. Además, la interacción (frecuencia x espesor) cuyos valores-P son menores que 0.01 representa un efecto altamente significativo, esto indica que la interacción de los factores frecuencia y espesor tienen un efecto estadístico altamente significativo sobre Tiempo de secado con un nivel de confianza del 99.0%.

En conclusión, esto revela que tanto los niveles de frecuencia como el espesor influyen de manera significativa en el tiempo de secado de la quinua, debido a la aplicación de diferentes frecuencias ultrasónicas y la variación del espesor. Para un análisis detallado se realizó un análisis de varianza de efectos simples para la interacción que se muestra en la Tabla A.2, en el Anexo C, Figura C. 1 se muestra el gráfico de Interacciones Frecuencia por Espesor.

- Según Tabla A.2 ANVA de efectos simples para el factor Frecuencia dentro 1.5mm se encontraron diferencias significativas entre los niveles de 0, 20, 40 y 60 kHz bajo los niveles 1.5 mm, es decir hay diferencia altamente significativa entre frecuencia con espesor respecto al tiempo de secado, de igual forma para los efectos de frecuencia dentro de 3 mm y 4.5 mm. Para el factor espesor dentro 20 kHz existe diferencia significativa entre los niveles de 1.5, 3 y 4.5 mm bajo los niveles de 20 kHz, es decir hay diferencia significativa entre frecuencia con espesor en el tiempo de secado, al igual para los efectos de espesor dentro de 40 y 60 kHz. Para una comparación específica entre medias de tratamientos se realizó una prueba de comparación múltiple de Duncan, este efectúa una comparación múltiple donde se comparó todos los tratamientos contra todos a fin de establecer un orden de méritos.
- Según Tabla A.3 en la prueba múltiple de comparación Duncan para efectos simples de tiempo por frecuencia se han identificado 3 grupos homogéneos según el orden alfabético. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan un mismo grupo alfabético. Se observa que los tratamientos de 2 grupos son similares el primero en las frecuencias 40 y 20 kHz

son homogéneos a su vez son superiores, es decir no existen diferencias significativas entre estos tratamientos y son los mejores tratamientos con menores tiempos de secado, y el segundo grupo homogéneo presentan los tratamientos con frecuencia 20 y 60 kHz con resultados intermedios donde también no existen diferencias significativas entre estos tratamientos y por último en la parte inferior se encuentra el tratamiento sin ultrasonido 0 kHz, explica que es diferente en comparación con los tratamientos con ultrasonido por lo indica que los ultrasonidos influyen de manera significativa en el tiempo de secado de la quinua porque existe diferencias significativas entre los tratamientos 40, 60 y 0 kHz.

- Según Tabla A.4 en la prueba múltiple de comparación Duncan para efectos simples de tiempo por frecuencia aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. El asterisco que se encuentra al lado de los 4 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza, es decir existe diferencia significativa en los pares de 0 kHz – 20 kHz, 0 kHz – 40 kHz, 0 kHz – 60 kHz y 40 kHz - 60 kHz. También se observa que presentan mayor diferencia entre los tratamientos sin ultrasonido (0 kHz) y los tratamientos con ultrasonido 40 kHz y 20 kHz cuyos valores son 920 y 826.667 segundos de diferencia respectivamente, lo que indica que estos tratamientos requieren menores tiempos de secado por lo tanto son los mejores tratamientos para el secado de quinua.
- Según Tabla A.5 se muestra la prueba múltiple de comparación Duncan para efectos simples de tiempo por espesor. En las Pruebas de Múltiple de comparación DUNCAN para Tiempo por Espesor se han identificado 3 grupos homogéneos según el orden alfabético. En la parte superior se encuentra el tratamiento 1.5 mm de espesor, en la parte media el tratamiento 3 mm y en la parte inferior el tratamiento 4.5 mm de espesor. No existen diferencias estadísticamente significativas entre estos grupos, también se aprecia que menor espesor menor es el tiempo de secado. En el Anexo C se muestran las medias y gráficos con un 95.0 % intervalos de confianza.
- Según Tabla A.6 aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias

estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza, es decir existe diferencia significativa en los pares de 1.5 mm – 3 mm, 1.5 mm – 4.5 mm y 3 mm – 4.5 mm. Esta diferencia se debe a la variación del espesor, se aprecia que entre los tratamientos de menor espesor que es 1.5 mm y el mayor espesor 4.5 mm presenta mayor diferencia en el tiempo de secado de quinua con 1245 segundos de diferencia, la segunda diferencia está presentado por los tratamientos 1.5 mm y 3 mm de espesor con 835 segundos de diferencia y por último los tratamientos 3 mm y 4.5 mm de espesor con una diferencia de 410 segundos. Esto indica que a menor espesor menor es el tiempo de secado de la quinua puesto que las diferencias disminuyen conforme se compara entre sus niveles sucesivos, es decir a medida que el espesor aumenta la diferencia de tiempo en segundos disminuye significativamente entre todos los tratamientos de 1.5, 3 y 4.5 mm.

#### 4.3. Difusividad efectiva

En Tabla 2, se detalla los resultados de difusividad efectiva del secado de quinua a bajas temperaturas con aplicación de ultrasonido, la mayor difusividad se presenta para el tratamiento de 40 KHZ, 1.5 mm con  $5.17 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s y la menor difusividad efectiva es para el tratamiento 0 kHz, 4.5 mm con  $9.18 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s, más detalles (ver Anexo F, Tabla F. 2)

Según Huamán *et al* (2016), evaluaron la difusividad en quinua cuyos resultados variaron entre  $7,5$  y  $8,9 \cdot 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, es menor en comparación con el experimento realizado, esto se debe a la diferencia de la temperatura ya que utilizaron 25 y 35 °C.

**Tabla 2:** Difusividad efectiva del secado de quinua

Tratamientos	0 kHz	20 kHz	40 kHz	60 kHz
1.5 mm	1.89E-10	3.91E-10	5.17E-10	4.78E-10
3 mm	2.14E-10	3.33E-10	3.01E-10	2.77E-10
4.5 mm	9.18E-11	2.71E-10	2.23E-10	2.45E-10

#### 4.4. Composición química

En Tabla 3, se presenta los resultados de la composición química de quinua seca, para más detalles ver Anexo D.

**Tabla 3:** Resultados de Composición Química de quinua seca por 100 g de muestra

Componente	Unidad	Contenido
Humedad	%	11.45
Cenizas	%	1.86
Proteína	%	12.65
Grasa	%	5.75
Fibra	%	1.78
Carbohidrato	%	66.51
Energía	Rcal/100gr	368.39

Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Análisis de alimentos de la EPIAI, 2019)

Los resultados muestran el contenido de humedad 11.45 %, ceniza 1.86 %, proteína 12.65 %, grasa 5.75 %, fibra 1.78% y carbohidrato 66.51 %. Los datos encontrados no difieren significativamente con los resultados según las Normas Técnicas Peruanas NTP-205.062 (2014).

Para Miranda *et al* (2010), en un estudio realizado en secado de quinua a mayor temperatura represento mayor pérdida de los compuestos de la quinua, sobre todo los compuestos volátiles, además la actividad antioxidante disminuyo, en el experimento se utilizó temperatura ambiente los resultados no muestran pérdidas significativas.

La importancia de las proteínas de la quinua se basa en el hecho de que su contenido de lisina es alto, la grasa de la quinua es rica en ácidos grasos, el ácido graso esencial es el ácido linolénico proporciona 10% de energía, la mayor concentración está localizada en el embrión, están compuestas principalmente por albúminas y globulinas (Berghofer & Schonelechner,2002; Brinegar & Goundan, 1993).

El carbohidrato principal de la quinua es el almidón. El almidón de quinua está localizado principalmente en el perispermo y está presente en forma de pequeños gránulos individuales y grandes gránulos compuestos por cientos de gránulos individuales, estos son poligonales, el almidón de la quinua tiene un bajo contenido de amilosa comparado



con almidones comunes (11-12.2%), el almidón también es rico en amilopectina, la cual se gelatiniza a bajas temperaturas relativas (57-71 °C), el almidón tiene una excelente estabilidad ante la congelación y descongelación el cual está relacionado al hecho de que es rico en amilopectina (Berghofer & Schonelechner,2002).

La fibra en quinua es similar al de los cereales comunes. Existe una diferencia entre variedades de quinua, eso es común en granos; algunas de estas variaciones pueden relacionarse a condiciones medioambientales, como el suelo, agua; eliminar las sustancias amargas, saponina decrece el contenido de fibra (Mujica, 2000).

Los minerales de quinua estan concentradas en las capas externas del grano, como en los cereales. La quinua es rica en calcio, magnesio, hierro y fosforo. La disponibilidad de estos minerales puede ser afectada por algunos componentes de quinua, principalmente por la saponina y el acido fitico (Berghofer & Schonelechner,2002).



## V. CONCLUSIONES

- La aplicación de ultrasonido de potencia redujo el tiempo de secado de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), de manera significativa, donde los factores de frecuencia y espesor, indica que tiene un efecto altamente significativo sobre el tiempo de secado. Comparando con el tratamiento sin ultrasonido (0kHz – 1.5mm), que fue 2760 segundo que representa el 100% de tiempo de secado y con la aplicación de US para el tratamiento de 40 kHz – 1.5mm el tiempo de secado fue 1500 segundos que representa 54%, la diferencia porcentual con US y sin US fue de 46% del tiempo.
- El espesor del lecho en el secado de quinua (*Chenopodium quinoa* Wild) influyo de manera significativa, encontrando que a menor espesor menor tiempo de secado, existe una relación directa entre el espesor del lecho y el tiempo de secado.



## VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios similares de los efectos del ultrasonido de potencia en la aplicación de alimentos a nivel estructural.
- Luego del proceso de secado con US realizar estudios de los efectos del ultrasonido en la estructura y microestructura de la quinua.
- Realizar estudio de secado con ultrasonido considerando el nivel de madurez de los almidones de la quinua.



## VII. BIBLIOGRAFIA

- (NTP-205.062). (2014). *GRANOS ANDINOS. Quinoa. Requisitos.* ((Normas\_Técnicas\_Peruanas), Ed.). Lima, Perú: INACAL. Recuperado de [https://tiendavirtual.inacal.gob.pe/0/modulos/TIE/TIE\\_BuscarProductos.aspx?CRITERIO=1&TXT=67.060&TIPO=0](https://tiendavirtual.inacal.gob.pe/0/modulos/TIE/TIE_BuscarProductos.aspx?CRITERIO=1&TXT=67.060&TIPO=0)
- Aguilar, J. (2012). *Métodos de conservación de Alimentos* (Primera Ed). Tlalnepantla - México: Red Tercer Milenio.
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., & Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International, Volume 48, Pages 410-427.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>
- Bermudez Aguirre, D. (2017). *Ultrasound:Advances in FoodProcessing and Preservation.* (A. Gerhard Wolf, Ed.), Elsevier Inc. (1.<sup>a</sup> ed.). London - Reino Unido: Elsevier Inc., Academic Press. Recuperado de <https://www.elsevier.com/books-and-journals%0APublisher>:
- Berghofer, E. and Schonelechner, R. (2002). Grain Amaranth. In: Pseudocereals and Less Common Cereals. Grain Properties and Utilization Potential. Belton, P. and Taylor, J. (eds). Spronger, Germany.
- Canahuire, L., & Vilcanqui, Y. (2010). *Evaluación del secado de quinua (chenopodium quinoa willd) en un prototipo de lecho fluidizado.* ([www.repositorio.unap.pe](http://www.repositorio.unap.pe)). Universidad Nacional del Altiplano.
- Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V., Benedito, J., & Mulet, A. (2012). Food process innovation through new technologies : Use of ultrasound. *Journal of Food Engineering, 110, 200-207.* <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.038>
- Carcía, J. A., Cárcel, J. A., Benedito, J., & Mulet, A. (2007). Power Ultrasound Mass Transfer Enhancement in Food Drying. *Food and Bioproducts Processing, 85(3), 247-254.* <https://doi.org/10.1205/fbp07010>
- Casp, A., & Abril, J. (2003). *Procesos de conservación de alimentos.* (A. (Ediciones M. P. Madrid, Ed.) (2.<sup>a</sup> ed.). Cuauhtémoc - México.
- Castro, K. (2011). *Tecnología de alimentos* (Primera Ed). Bogotá - Colombia: Ediciones



- de la U.
- Claudio, A., Ibarz, A., Esteves, P., & Augusto, D. (2016). Ultrasonics Sonochemistry Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology : Describing the phenomena in two model cases. *ULTRASONICS SONOCHEMISTRY*, 29, 413-419. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.020>
- Clemente, G. (2003). *Efecto de la contracción en la cinética de secado de musculo de Jamón*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Colina, M. L. (2010). *Deshidratación de los Alimentos*. Mexico: Trillas Editorial.
- Contreras-Ruiz, M. (2014). Estudio de Parámetros de Calidad de Manzana Deshidratada mediante Secado a baja Temperatura Asistido con Ultrasonido, 54.
- Fellows, P. (2000). *Tecnología del procesado de los alimentos: principios y practica* (2da Edició). Zaragoza - España: Acribia S.A.
- Fito, P., Andrés, A. M., Barat, J., & Albors, A. (2016). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente* (1.ª ed.). Valencia, España: Universitat Politècnica de Valencia. Recuperado de [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es)
- García-Pérez, J. V., Cárcel, J. A., Benedito, J., & Mulet, A. (2007). Power Ultrasound Mass Transfer Enhancement in Food Drying. *Food and Bioproducts Processing*, 85(3), 247-254. <https://doi.org/10.1205/FBP07010>
- Hanco, J., & Mamani, N. (2017). *Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de oca (oxalis tuberosa mol) en el proceso de deshidratación a bajas temperaturas asistido por ultrasonido*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Perú. Recuperado de [www.repositorio.unap.pe](http://www.repositorio.unap.pe)
- Huamán, N., Yupanqui, G., Allcca, E., & Allcca, G. (2016). Efecto del Contenido de Humedad y Temperatuta sobre la Difusividad térmica en Granos Andinos. *Rev Soc Quím Perú*, 82(3).
- León, J. (2003). *Cultivo de la Quinua*. Universidad Nacional del Altiplano. Puno - Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- MINAGRI, (Ministerio de Agricultura y Riego). (2017). Análisis Económico de la Producción Nacional de la Quinua. *MINAGRI*, 1-11. Recuperado de [minagri.gob.pe](http://minagri.gob.pe)
- Mir, N. A., Riar, C. S., & Singh, S. (2019). Physicochemical , molecular and thermal



- properties of high-intensity ultrasound (HIUS) treated protein isolates from album (Chenopodium album) seed. *Food Hydrocolloids*, 96(February), 433-441. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.05.052>
- Miranda, M., Vega, A., Lopez, J., Parada, G., Sanders, M., Aranda, M., ... Di Scala, K. (2010). Impact of air - drying temperature on nutritional properties , total phenolic content and antioxidant capacity of quinoa seeds ( Chenopodium quinoa Willd). *Industrial Crops & Products*, 32(3), 258-263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.04.019>
- Montero, C. (2018). Nota Técnica de Granos Andinos, p. 10. Recuperado de [minagri.gob.pe](http://minagri.gob.pe)
- Mujica, A., & Jacobsen, S. . (2000). Potencial y Perspectivas futuras de la quinua (Chenopodium quínoa wild) en el Perú. *Revista Mosaico*.
- Multari, S., Marsol, A., Keskitalo, M., Yang, B., & Suomela, J. (2018). Effects of different drying temperatures on the content of phenolic compounds and carotenoids in quinoa seeds (Chenopodium quinoa) from Finland. *Journal of Food Composition and Analysis*, 72, 75-82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.06.008>
- Navarro, J., Herrera, T., García, M. R., Fornari, T., Reglero, G., & Martin, D. (2018). Ultrasound-assisted extraction and bioaccessibility of saponins from edible seeds : quinoa , lentil , fenugreek , soybean and lupin. *Food Research International*, 109(April), 440-447. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.058>
- Robles Ozuna, L. E., & Ochoa Martínez, L. A. (2012). Ultrasonido y sus Aplicaciones en el Procesamiento de Alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 13(2), 109-112. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81325441002>
- Rodríguez, Ó., Santacatalina, J., Simal, S., García, J. V., Femenia, A., & Rosselló, C. (2014). Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties. *Journal of Food Engineering*, 129(1), 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.01.001>
- Rojas, W., Alandia, G., Irigoyen, J., Blajos, J., & Santivañez, T. (2011). La Quinua: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. *Oficina Regional para America Latina y el Caribe, FAO*, 37, 66.



<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.03.010>

Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2009). *Introduction to Food Engineering*. Elsevier (Fourth Edi, Vol. 1). California - USA: Academic Press is an imprint of Elsevier Inc.

Valencia Yanqui, L., & Sarco Burgos, J. (2009). *Implementación de Control Adaptivo y Evaluación del Secador de Lecho Fijo con Recirculación de Aire*. ([www.repositorio.unap.pe](http://www.repositorio.unap.pe)). Universidad Nacional del Altiplano.

Wrigley, C., Corke, H., Seetharaman, K., & Faubion, J. (2016). *Encyclopedia of Food Grains*. ((The World of Food Grains), Ed.), Elsevier Inc. (Second Edi). Kidlington, UK: Elsevier Inc.



## ANEXOS

### ANEXO A: Análisis de Varianza de efectos simples y comparación DUNCAN

**Tabla A.1.** Análisis de varianza para el tiempo de secado

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>Significancia</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>						
A: Frecuencia	4.8288E6	3	1.6096E6	142.86	0.0000	**
B: Espesor	9.6614E6	2	4.8307E6	428.76	0.0000	**
<b>INTERACCIONES</b>						
AxB	573000.	6	95500.0	8.48	0.0001	**
RESIDUOS	270400.	24	11266.7			
TOTAL (corregido)	1.53336E7	35				

CV: 4.06 %

**Tabla A.2.** Análisis de Varianza de efectos simples para la interacción Frecuencia por Espesor

F. de V.	GL	SC	CM	Fc	Sig
Frecuencia dentro 1.5mm	3	2.7E+07	8852400.00	785.72	**
Frecuencia dentro 3 mm	3	4.8E+07	15911300.00	1412.25	**
Frecuencia dentro 4.5 mm	3	6.2E+07	20524500.00	1821.70	**
Espesor dentro 0 kHz	2	4.9E+07	24543000.00	2178.37	**
Espesor dentro 20 kHz	2	2.9E+07	14726800.00	1307.11	**
Espesor dentro 40 kHz	2	2.9E+07	14707800.00	1305.43	**
Espesor dentro 60 kHz	2	3.3E+07	16371000.00	1453.05	**
Error Exp	24	270400	11266.66667	176695.0703	

$F_{24,0.01}^3 = 4.72$ 
 $F_{24,0.01}^2 = 5.61$



**Tabla A.3.** Pruebas de Múltiple de comparación DUNCAN para Tiempo por Frecuencia

<i>Frecuencia</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
40	9	2320.0	35.3815	a
20	9	2413.33	35.3815	ab
60	9	2480.0	35.3815	b
0	9	3240.0	35.3815	c

**Tabla A.4.** Comparación múltiple de pares

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>
0 - 20	*	826.667
0 - 40	*	920.0
0 - 60	*	760.0
20 - 40		93.3333
20 - 60		-66.6667
40 - 60	*	-160.0

\* indica una diferencia significativa.

**Tabla A.5.** Pruebas de Múltiple de comparación DUNCAN para Tiempo por Espesor

<i>Espesor</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1.5	12	1920.0	30.6413	a
3	12	2755.0	30.6413	b
4.5	12	3165.0	30.6413	c

**Tabla A.6.** Comparación múltiple de pares

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>
1.5 - 3	*	-835.0
1.5 - 4.5	*	-1245.0
3 - 4.5	*	-410.0

\* indica una diferencia significativa.

**ANEXO B: Humedad en base seca para tratamientos****Tabla B. 1.** Humedad en base seca para tratamiento 40 kHz, 1.5 mm

<b>tiempo (s)</b>	<b>hbs1</b>	<b>hbs2</b>	<b>hbs3</b>	<b>promedio</b>
0.00	0.412	0.412	0.412	0.412
60.00	0.406	0.400	0.389	0.398
120.00	0.384	0.370	0.360	0.371
180.00	0.382	0.349	0.341	0.357
240.00	0.331	0.329	0.334	0.331
300.00	0.317	0.328	0.311	0.319
360.00	0.333	0.322	0.305	0.320
420.00	0.314	0.302	0.286	0.301
480.00	0.298	0.285	0.269	0.284
540.00	0.252	0.274	0.269	0.265
600.00	0.252	0.255	0.266	0.258
660.00	0.237	0.233	0.254	0.242
720.00		0.233	0.238	0.236
780.00	0.192	0.209	0.232	0.211
840.00	0.197	0.210	0.194	0.200
900	0.200	0.181	0.180	0.187
960	0.188		0.175	0.181
1020	0.164		0.172	0.168
1080		0.156	0.171	0.164
1140	0.141		0.169	0.155
1200			0.156	0.156
1260			0.147	0.147
1320		0.135	0.145	0.140



1380	0.125	0.135	0.145	0.135
1440	0.127	0.126	0.138	0.130

**Tabla B. 2.** Humedad en base seca para tratamiento 40 kHz, 3 mm

tiempo (s)	hbs1	hbs2	hbs3	promedio	Humedad en base húmeda
0	0.412	0.412	0.412	0.412	0.292
60	0.386	0.425	0.417	0.409	0.290
120	0.370	0.442	0.445	0.419	0.295
180	0.364	0.441	0.453	0.419	0.295
240	0.352	0.433	0.450	0.412	0.292
300	0.352	0.430	0.453	0.412	0.292
360	0.348	0.424	0.437	0.403	0.287
420	0.339	0.411	0.432	0.394	0.283
480	0.333	0.399	0.431	0.388	0.279
540	0.338	0.393	0.425	0.385	0.278
600	0.331	0.385	0.405	0.373	0.272
660	0.335	0.379	0.397	0.370	0.270
720	0.322	0.369	0.382	0.358	0.264
780	0.312	0.366	0.383	0.354	0.261
840	0.303	0.356	0.376	0.345	0.256
900	0.289	0.346	0.372	0.336	0.251
960	0.289	0.337	0.360	0.329	0.248
1020	0.271	0.329	0.346	0.315	0.240
1080	0.267	0.320	0.341	0.309	0.236
1140	0.258	0.314	0.328	0.300	0.231
1200	0.252	0.304	0.315	0.291	0.225
1260	0.240	0.294	0.316	0.283	0.221
1320	0.228	0.293	0.302	0.274	0.215
1380	0.227	0.279	0.299	0.268	0.211
1440	0.211	0.272	0.285	0.256	0.204
1500	0.209	0.263	0.283	0.251	0.201
1560	0.196	0.261	0.278	0.245	0.197
1620	0.201	0.253	0.274	0.243	0.195
1680	0.194	0.232	0.265	0.230	0.187
1740	0.183	0.229	0.257	0.223	0.182
1800	0.167	0.226	0.247	0.213	0.176



1860	0.152	0.216	0.247	0.205	0.170
1920	0.155	0.213	0.239	0.202	0.168
1980	0.133	0.207	0.225	0.188	0.158
2040	0.125	0.195	0.216	0.179	0.152
2100	0.120	0.182	0.211	0.171	0.146
2160	0.110	0.176	0.209	0.165	0.141
2220	0.109	0.169	0.200	0.159	0.138
2280	0.096	0.149	0.188	0.144	0.126
2340	0.087	0.149	0.158	0.132	0.116

**Tabla B. 3.** Reducción de humedad promedio respecto al tiempo

Frec	0 kHz			20 kHz			40 kHz			60 kHz		
	1.5 mm	3 mm	4.5 mm	1.5 mm	3 mm	4.5 mm	1.5 mm	3 mm	4.5 mm	1.5 mm	3 mm	4.5 mm
0	0.412	0.412	0.412	0.412	0.412	0.412	0.412	0.412	0.412	0.412	0.412	0.412
60	0.362	0.402	0.404	0.389	0.389	0.408	0.398	0.409	0.398	0.393	0.405	0.399
120	0.336	0.376	0.403	0.391	0.384	0.404	0.371	0.419	0.389	0.383	0.408	0.387
180	0.302	0.383	0.393	0.376	0.384	0.404	0.357	0.419	0.379	0.387	0.402	0.381
240	0.288	0.382	0.387	0.367	0.376	0.399	0.331	0.412	0.374	0.370	0.397	0.361
300	0.271	0.369	0.379	0.353	0.367	0.395	0.319	0.412	0.365	0.345	0.392	0.354
360	0.272	0.361	0.367	0.339	0.353	0.394	0.320	0.403	0.357	0.315	0.385	0.345
420	0.260	0.342	0.366	0.324	0.351	0.390	0.301	0.394	0.357	0.303	0.378	0.332
480	0.242	0.344	0.362	0.310	0.337	0.387	0.284	0.388	0.355	0.283	0.370	0.320
540	0.237	0.332	0.352	0.290	0.323	0.379	0.265	0.385	0.357	0.275	0.360	0.311
600	0.235	0.335	0.357	0.272	0.319	0.373	0.258	0.373	0.354	0.250	0.354	0.304
660	0.226	0.322	0.349	0.256	0.301	0.368	0.242	0.370	0.350	0.227	0.346	0.289
720	0.215	0.318	0.343	0.243	0.285	0.367	0.236	0.358	0.348	0.205	0.340	0.282
780	0.217	0.316	0.332	0.223	0.285	0.363	0.211	0.354	0.350	0.183	0.331	0.277
840	0.204	0.301	0.331	0.212	0.271	0.355	0.200	0.345	0.341	0.177	0.321	0.271
900	0.199	0.300	0.333	0.214	0.273	0.351	0.187	0.336	0.337	0.169	0.315	0.257
960	0.193	0.296	0.325	0.202	0.258	0.349	0.181	0.329	0.332	0.166	0.306	0.253
1020	0.193	0.285	0.327	0.193	0.246	0.326	0.168	0.315	0.336	0.156	0.300	0.245
1080	0.180	0.283	0.322	0.188	0.243	0.331	0.164	0.309	0.326	0.156	0.293	0.235
1140	0.176	0.279	0.315	0.190	0.248	0.320	0.155	0.300	0.322	0.151	0.282	0.228
1200	0.171	0.255	0.316	0.187	0.237	0.308	0.156	0.291	0.320	0.145	0.275	0.222
1260	0.174	0.267	0.315	0.187	0.225	0.303	0.147	0.283	0.314	0.139	0.270	0.213
1320	0.173	0.261	0.308	0.184	0.212	0.302	0.140	0.274	0.311	0.141	0.266	0.205
1380	0.161	0.252	0.303	0.169	0.204	0.299	0.135	0.268	0.305	0.134	0.258	0.198
1440	0.170	0.233	0.298	0.160	0.205	0.290	0.130	0.256	0.293	0.141	0.243	0.194
1500	0.166	0.193	0.295	0.156	0.203	0.277	0.120	0.251	0.289	0.140	0.234	0.190



---

1560	0.155	0.193	0.288	0.161	0.193	0.268	0.245	0.287	0.135	0.226	0.179
1620	0.163	0.193	0.284	0.150	0.184	0.262	0.243	0.281	0.127	0.228	0.175
1680	0.174	0.191	0.280	0.136	0.179	0.258	0.230	0.279		0.221	0.173
1740	0.165	0.179	0.275	0.134	0.174	0.246	0.223	0.263		0.213	0.169
1800	0.149	0.212	0.269	0.122	0.157	0.239	0.213	0.257		0.186	0.165
1860	0.146	0.209	0.263		0.145	0.232	0.205	0.254		0.182	0.163
1920	0.158	0.204	0.259		0.138	0.223	0.202	0.258		0.175	0.156
1980	0.151	0.195	0.265		0.140	0.214	0.188	0.250		0.183	0.157
2040	0.150	0.193	0.266		0.130	0.208	0.179	0.246		0.177	0.147
2100	0.139	0.179	0.261			0.194	0.171	0.243		0.176	0.149
2160	0.140	0.172	0.252			0.194	0.165	0.234		0.169	0.152
2220	0.147	0.154	0.263			0.180	0.159	0.231		0.168	0.145
2280	0.138	0.164	0.248			0.174	0.144	0.227		0.168	0.144
2340	0.145	0.162	0.245			0.161	0.132	0.181		0.163	0.143
2400	0.148	0.161	0.247			0.158	0.137	0.178		0.148	0.148
2460	0.142	0.161	0.244			0.155	0.131	0.175		0.144	0.141
2520	0.141	0.154	0.243			0.152		0.168		0.143	0.143
2580	0.137	0.155	0.227			0.140		0.159		0.135	0.136
2640	0.135	0.154	0.209			0.132		0.160		0.134	0.137
2700	0.121	0.152	0.206			0.141		0.149		0.135	0.141
2760	0.121	0.162	0.200			0.143		0.148		0.130	0.128
2820		0.149	0.165			0.137		0.144		0.129	0.129
2880		0.148	0.164			0.134		0.139			0.127
2940		0.152	0.159			0.133		0.134			0.129
3000		0.155	0.150			0.129		0.129			0.128
3060		0.146	0.136								
3120		0.143	0.130								
3180		0.127	0.130								
3240		0.134	0.128								
3300		0.126	0.128								
3360			0.132								
3420			0.133								
3480			0.129								
3540			0.134								
3600			0.130								
3660			0.127								

---



## ANEXO C: Análisis de varianza

**Tabla C. 1.** Tabla de Medias por Mínimos Cuadrados para Tiempo con intervalos de confianza del 95.0%

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est.</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
MEDIA GLOBAL	36	2613.33			
Frecuencia					
0	9	3240.0	35.3815	3166.98	3313.02
20	9	2413.33	35.3815	2340.31	2486.36
40	9	2320.0	35.3815	2246.98	2393.02
60	9	2480.0	35.3815	2406.98	2553.02
Espesor					
1.5	12	1920.0	30.6413	1856.76	1983.24
3	12	2755.0	30.6413	2691.76	2818.24
4.5	12	3165.0	30.6413	3101.76	3228.24
Frecuencia por Espesor					
0,1.5	3	2760.0	61.2826	2633.52	2886.48
0,3	3	3300.0	61.2826	3173.52	3426.48
0,4.5	3	3660.0	61.2826	3533.52	3786.48
20,1.5	3	1800.0	61.2826	1673.52	1926.48
20,3	3	2440.0	61.2826	2313.52	2566.48
20,4.5	3	3000.0	61.2826	2873.52	3126.48
40,1.5	3	1500.0	61.2826	1373.52	1626.48
40,3	3	2460.0	61.2826	2333.52	2586.48
40,4.5	3	3000.0	61.2826	2873.52	3126.48
60,1.5	3	1620.0	61.2826	1493.52	1746.48
60,3	3	2820.0	61.2826	2693.52	2946.48
60,4.5	3	3000.0	61.2826	2873.52	3126.48

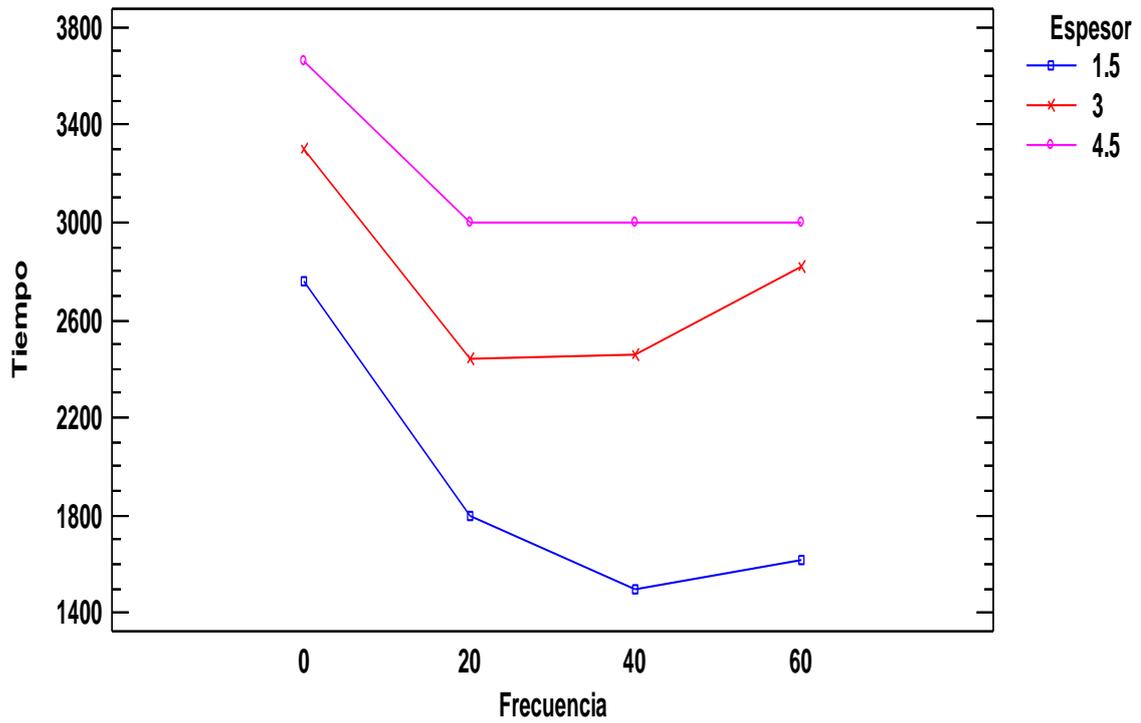


Figura C. 1. Gráfico de Interacciones Frecuencia por Espesor

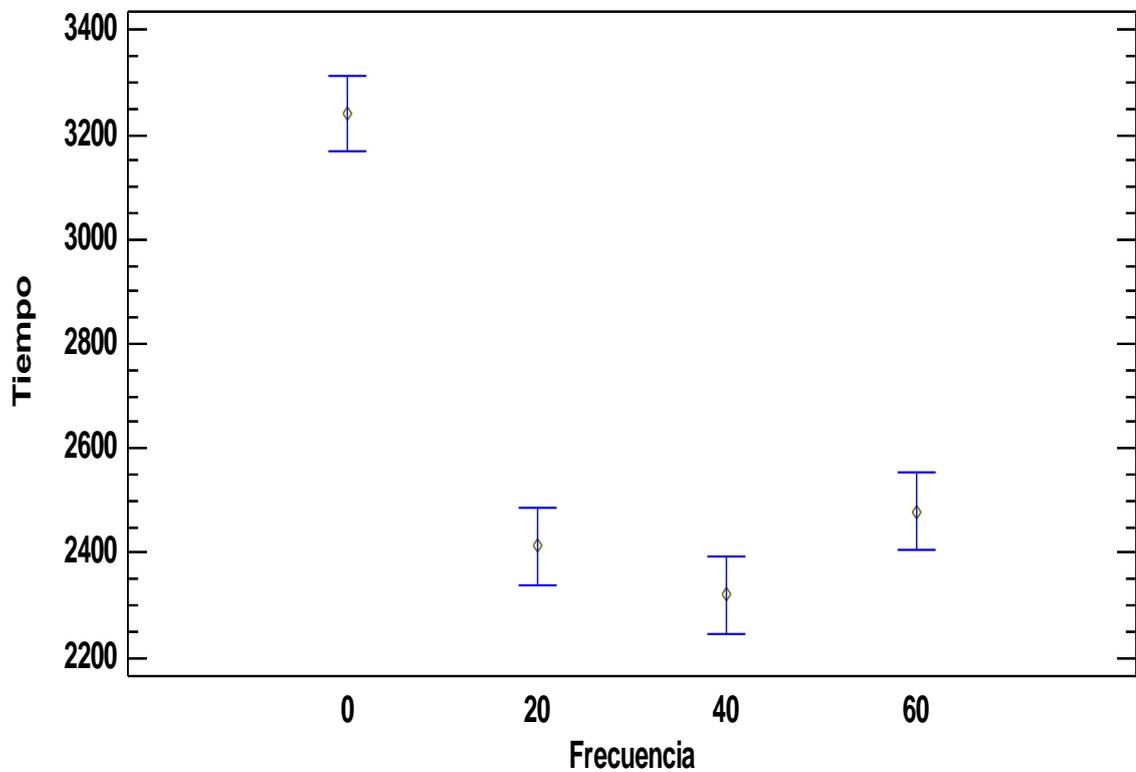
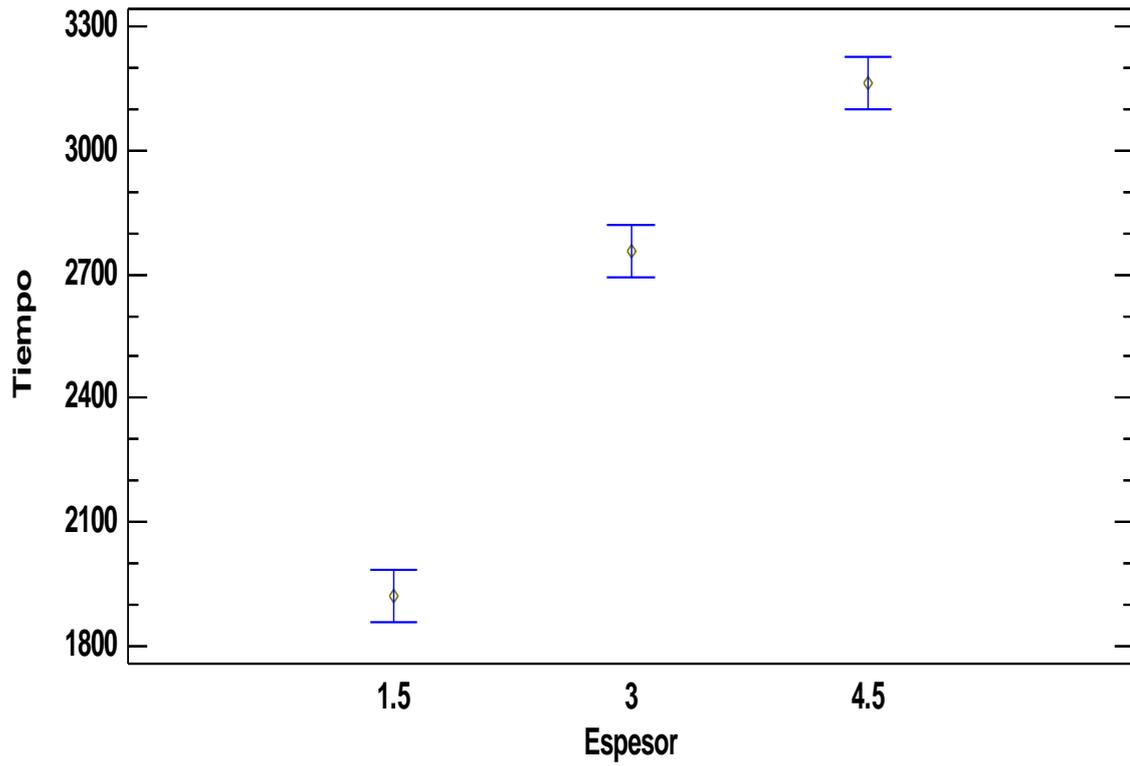


Figura C. 2. Medias e Intervalos de confianza al 95.0 % para frecuencia



**Figura C. 3.** Medias e Intervalos de confianza al 95.0 % para Espesor



## ANEXO D: Análisis de Composición Química



Universidad Nacional del Altiplano - Puno

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Av. Floral 1153, C.U. Telf. (051) 366080 IP 20102 Casilla 291 e-mail: fca-una@eudoramail.com



---

**LABORATORIO DE EVALUACIÓN NUTRICIONAL DE ALIMENTOS**

**INFORME DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS Nro. 0198-2019-LENA-EPIA**

SOLICITANTE	: ESMERALDA MARILÚ DÍAZ FERNÁNDEZ
PROCEDENCIA	: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL FCA-UNA-PUNO
TESIS	: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS ULTRASONIDOS EN EL SECADO DE QUINUA ( <i>Chenopodium quinoa willd</i> ) A BAJA TEMPERATURA.
PRODUCTOS	: QUINUA VARIEDAD BLANCA DE JULI
PRESENTACIÓN	: 100 gr.
ENSAYO SOLICITADO	: FÍSICO QUÍMICO
FECHA DE RECEPCIÓN	: 09 de Diciembre del 2019
FECHA DE ENSAYO	: 09 de Diciembre del 2019
FECHA DE EMISIÓN	: 12 de Diciembre del 2019

**RESULTADOS:**  
De acuerdo al Informe de los Análisis de Laboratorio que obra en los archivos los resultados son:

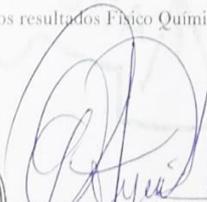
**RESULTADOS FÍSICO QUÍMICOS**

ENSAYOS	RESULTADOS
SOLIDOS TOTALES %	88.55
HUMEDAD %	11.45
CENIZAS %	1.86
PROTEÍNA %	12.65
GRASA %	5.57
FIBRA %	1.78
CARBOHIDRATO %	66.51
ENERGÍA KCAL/100g	368.39

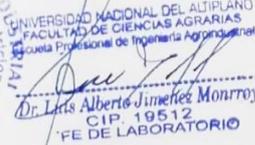
**MÉTODOS UTILIZADOS EN LABORATORIO:**  
- AOAC. 2002

**CONCLUSIÓN** : Los resultados Físico Químicos están conformes.

Puno, C.U. 12 de Diciembre del 2019

  
  
**Oswaldo Arpasi Alca**  
 INGENIERO AGROINDUSTRIAL  
 C.I.P. 186525

  
**JEFE TURNO**  
 Alimentos Instrumentación  
 FCA-UNA-PUNO

  
  
**Dr. Luis Alberto Jiménez Monroy**  
 C.I.P. 19512  
 JEFE DE LABORATORIO

**Anexo E:** Quinoa secada con ultrasonido 40 KHz



**Figura E. 1 .** Quinoa secada con ultrasonido 40 KHz

**ANEXO F:** Datos y cálculos realizados

**Tabla F. 1.** Cálculo de humedad inicial de quinoa

Muestras	luna de reloj	luna de reloj + quinoa húmeda	luna de reloj + quinoa seca	% Hbh	% Hbs	promedio
M1	13.64	15.64	15.08	28.000	0.389	
M2	13.08	15.08	14.5	29.000	0.408	<b>29.167 %</b>
M3	14.72	16.72	16.11	30.500	0.439	

**Tabla F. 2.** Característica físicas de la quinoa variedad Blanca de Juli

característica	Medida	Unidad de medida
radio	0.0008	m
Masa	1.79E-06	kg
Área expuesta	8.042E-06	m <sup>2</sup>
ms/A	0.2225682	ks/m <sup>2</sup>

$$\text{Área expuesta} = 4 * \pi * \text{radio}^2$$

### ANEXO G: Panel fotográfico

