

**APLICACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBA DE CALOR EN EL SECADO DE
ARRACACHA (*ARRACACIA XANTHORRHIZA*)**

Kevin S. Muñoz Botina

Daniela Vivas Ruiz

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
SANTIAGO DE CALI**

2015

**APLICACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBA DE CALOR EN EL SECADO DE
ARRACACHA (*ARRACACIA XANTHORRHIZA*)**

Kevin S. Muñoz Botina

Daniela Vivas Ruiz

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar por el Título de Ingeniero de
Alimentos**

DIRECTOR

Carlos A. Vélez Pasos, PhD.

Escuela de Ingeniería de Alimentos

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

SANTIAGO DE CALI

2015

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, por darnos las herramientas necesarias para realizar este proyecto de grado.

A nuestras familias, por el apoyo incondicional y el acompañamiento en todo el proceso.

A la Universidad del Valle particularmente a la Escuela de Ingeniería de Alimentos por la formación dada.

Al profesor Carlos Antonio Vélez por la orientación y el apoyo brindado durante el desarrollo de este estudio.

Al profesor Harold Acosta, Patricia Millán, Rigo Alberto Magón y Ester Inés Orozco por su colaboración y apoyo.

Por último, agradecemos a nuestros amigos y compañeros por su colaboración y consejos oportunos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
1. OBJETIVOS	12
1.1. Objetivo general	12
1.2. Objetivos específicos.....	12
2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. Características de la arracacha (<i>Arracacia xanthorrhiza</i>).....	13
2.1.1. Botánica de la arracacha	13
2.1.2. Variedades de arracacha y propiedades nutricionales.....	13
2.2. Propiedades fisicoquímicas de los alimentos.....	15
2.2.1. Actividad de agua	15
2.2.2. Humedad.....	16
2.2.3. Color.....	16
2.3. Secado de alimentos	17
2.4. Curva de velocidad de secado.....	18
2.4.1. Secado durante el periodo de velocidad constante.....	19
2.4.2. Secado durante el periodo de velocidad decreciente.....	20
2.5. Difusividad efectiva.....	20
2.6. Proceso de secado mediante bomba de calor	21
2.6.1. Funcionamiento y características de la bomba de calor.....	21
2.6.2. Clasificación de bombas de calor	22
2.6.3. Antecedentes de secado asistido con bomba de calor en operaciones de secado.....	23
3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	24
3.1. Diseño experimental.....	24
3.2. Hipótesis.....	26
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
4.1. Materiales.....	26
4.2. Metodología.....	27
4.2.1. Selección de materia prima	27
4.2.2. Adecuación de materia prima	27
4.2.3. Descripción del proceso de secado por bomba de calor.....	27
4.2.4. Descripción del proceso de extracción de almidón	28

4.2.5.	Determinación de actividad de agua.....	29
4.2.6.	Determinación de humedad.....	29
4.2.7.	Determinación de color.....	30
4.2.8.	Determinación de cinética de secado y curva de velocidad de secado.	31
4.2.9.	Determinación de índice de absorción, índice de solubilidad y poder de hinchamiento	31
4.2.10.	Determinación de viscosidad aparente.....	32
4.2.11.	Microscopia del almidón.....	32
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	33
5.1.	Parámetros de calidad.....	33
5.1.1.	Actividad de agua.....	33
5.1.2.	Relación entre el tiempo y las condiciones de secado	34
5.1.3.	Extracción de almidón	35
5.1.4.	Color.....	37
5.2.	Parámetros de secado.....	39
5.2.1.	Funcionamiento del equipo de bomba de calor (Dártico)	39
5.2.2.	Cinéticas de secado	40
5.2.3.	Velocidad de secado	42
5.2.4.	Coeficientes de difusividad efectiva	43
5.3.	Parámetros característicos de la harina de arracacha	43
5.3.1.	Índice de absorción, índice de solubilidad y poder de hinchamiento	43
5.3.2.	Viscosidad aparente	45
5.3.3.	Microscopía	46
6.	CONCLUSIONES.....	48
	BIBLIOGRAFÍA.....	49
	ANEXOS.....	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composicion química de tres variedades de arracacha comparadas con yuca y papa amarilla por cada 100 g de producto.....	14
Tabla 2. Factores y niveles del diseño experimental.....	24
Tabla 3. Combinaciones de diseño experimental.....	24
Tabla 4. Características de bolas de molienda.....	28
Tabla 5. Tamaño y clasificación de tamices.....	29
Tabla 6. Índices de solubilidad, absorción y poder de hinchamiento en harina de arracacha.....	44
Tabla A1. Cinética bomba de calor.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva típica de velocidad de secado.....	19
Figura 2. Relación entre el contenido de humedad y la difusividad.....	21
Figura 3. Efecto del espesor y temperatura en la actividad de agua.....	34
Figura 4. Efecto del espesor y temperatura en el tiempo de secado.....	35
Figura 5. Efecto del espesor y temperatura en la extracción de almidón.....	36
Figura 6. Efecto del espesor y temperatura en el cambio total de color ΔE , antes y después del proceso de secado.....	38
Figura 7. Efecto del espesor y temperatura en el cambio total de color ΔE , antes del proceso de secado y después de molienda.....	38
Figura 8. Efecto del pre tratamiento con ácido cítrico en el cambio total de color ΔE	39
Figura 9. Propiedades psicométricas del aire de secado.....	40
Figura 10. Cinéticas de secado para espesor de muestra 4mm.....	41
Figura 11. Cinéticas de secado para espesor de muestra 3mm.....	41
Figura 12. Cinéticas de secado para espesor de muestra 2mm.....	41
Figura 13. Curva velocidad de secado en arracacha.....	42
Figura 14. Viscosidad aparente de harina de arracacha cocida a diversas temperaturas.....	46
Figura 15. Relación entre la velocidad y el esfuerzo de corte de harina de arracacha cocida a diversas temperas.....	46
Figura 16. Micrografías del almidón de arracacha (40x).....	47
Figura A1. Prueba ANOVA para actividad de agua con interacción Espesor*Temperatura.....	56
Figura A2. Prueba Tukey para actividad de agua con interacción Espesor*Temperatura.....	56
Figura A3. Prueba ANOVA para tiempo de secado con interacción Espesor*Temperatura.....	57
Figura A4. Prueba Tukey para tiempo de secado con interacción Espesor*Temperatura.....	57

Figura A5. Prueba ANOVA para extracción de almidón con interacción	
Espesor*Temperatura.....	57
Figura A6. Prueba Tukey para extracción de almidón con interacción	
Espesor*Temperatura.....	58
Figura A7. Prueba ANOVA para determinación de color con interacción	
Espesor*Temperatura.....	58
Figura A8. Prueba Tukey para determinación color con interacción	
Espesor*Temperatura.....	58
Figura A9. Equipo de bomba de calor (Dártico).....	59
Figura A10. Esquema del sistema de bomba de calor.....	59

RESUMEN

El secado asistido por bomba de calor es un sistema energéticamente viable que garantiza la disminución del uso de energía y eliminación eficiente de la humedad, reduciendo los costos de operación en la industria de secado, manteniendo en gran parte la calidad del producto alimenticio. La arracacha es un producto de la zona andina de sur América de alta calidad nutricional, de mínima industrialización, altamente perecedero, del cual se han realizado pocos estudios de conservación. En el presente trabajo se estudió el efecto del secado asistido mediante bomba de calor sobre algunas propiedades nutricionales y características organolépticas de rodajas de arracacha, estableciendo las condiciones adecuadas de secado, determinando el coeficiente de difusividad efectiva para la humedad y la cinética de secado. Se evaluó la influencia de la temperatura del aire de secado (50°C, 55°C, 60°C), la humedad del aire de secado (10%, 12.5%, 15%) y del espesor de la muestra (2 mm, 3 mm, 4 mm), en la actividad de agua, el tiempo de secado con respecto a la humedad, el rendimiento en la extracción de almidón por método de vía seca y el cambio total de color. Los mejores resultados se obtuvieron con rodajas de 2 mm de espesor, temperatura de secado de 50°C y humedad relativa de 15%. El valor de difusividad efectiva en el periodo de velocidad decreciente fue de $1,9071 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Finalmente, se realizó una caracterización mediante pruebas reológicas de la harina de arracacha obtenida en la extracción de almidón, mostrando cambios mínimos en la funcionalidad del almidón de arracacha posterior a tratamientos termomecánicos.

Palabras clave: Secado, bomba de calor, arracacha, *Arracacia xanthorrhiza*, almidón, actividad de agua, humedad, color.

INTRODUCCIÓN

La arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) es un tubérculo que se produce en los valles interandinos del país, siendo importante en la alimentación por la fácil digestión de sus almidones y por ser rica en calcio, fósforo, hierro, niacina, vitamina A, piridoxina-B6, riboflavina-B2, ácido ascórbico, proteínas, fibras y carbohidratos; características que le otorgan un potencial alimentario y económico (Adarve & Mejía, 2012). Presenta un promedio de 25 gramos de carbohidratos por cada 100 gramos de raíz (Albano *et al.*, 2014), y entre las nueve especies de raíces menores y tubérculos andinos, la arracacha se considera el más prometedor de los cultivos (Morillo *et al.*, 2004).

La arracacha se caracteriza por un alto contenido de carbohidratos (86.30% del total de materia seca) de los cuales 72.18% es almidón y 3.72% son azúcares totales (Reinoso, 2001). Este alimento se puede colocar en un puesto privilegiado, ya que es de bajo costo y de una calidad nutricional comparable con la de la papa y la yuca (Serrano, 1983). Teniendo en cuenta lo anterior, es importante buscar alternativas eficientes para su conservación, extendiendo su vida de anaquel sin que el producto pierda propiedades fisicoquímicas en gran proporción, debido a que su consumo es muy popular en las tierras frías de Colombia y en la zona andina de sur América, pero poco conocido en zonas urbanas gracias a su alta perecibilidad después de ser cosechado. Solo en Colombia las pérdidas postcosecha de productos frescos se encuentran en alrededor de 35% de la producción total (Rojas *et al.*, 2004).

Son muy pocos los trabajos en el campo alimenticio sobre la arracacha. Debido a su condición de producto altamente perecedero, tiene una corta vida útil (máximo 6 días), lo cual dificulta su almacenamiento por un tiempo prolongado en condiciones ambientales (Nunes *et al.*, 2011) y presenta daños por conservación a bajas temperaturas (Cantwell *et al.*, 2002).

Una de las formas de prolongar la vida útil de este tubérculo es el secado, el cual, además de proporcionar un ambiente difícil para el crecimiento microbiano, reduce el costo de transporte y almacenamiento por la disminución del peso y volumen de los productos; sin embargo, es importante considerar la influencia que el secado tiene sobre la calidad de los alimentos, debido a que puede tener efectos negativos sobre su valor nutricional, textura, color y sabor (Orrego, 2003).

El mecanismo de secado es un fenómeno complejo que implica la transferencia combinada de calor y masa. Es un proceso de alto consumo energético, porque debe suministrarse calor latente al material para evaporar la humedad (Chua *et al.*, 2002). Mediante el secado se busca eliminar parcialmente el contenido de agua en el alimento de interés; desde la antigüedad se ha conocido que los alimentos con mayor contenido de humedad son los más perecederos (Fito *et al.*, 2001). La utilización del secado por aire caliente como tratamiento térmico único, en todas sus variantes, permite procesar cualquier producto alimenticio para la obtención de un producto final estable (Rocca, 2010).

El secado por bomba de calor es un proceso en el que la humedad se retira de un sólido, utilizando para esto energía en forma de calor (López *et al.*, 1993). Las bombas de calor son conocidas por ser energéticamente eficientes cuando se usan en conjunción con operaciones de secado. Las principales ventajas de este sistema aplicado al secado surgen de la capacidad para recuperar la energía de los gases de calefacción y controlar de forma independiente la temperatura del aire de secado y la humedad (Chua *et al.*, 2002). Esta capacidad de producir condiciones de secado bien controlados es particularmente importante para el secado de productos de calidad de alto valor (Gungor *et al.*, 2011).

Una bomba de calor es esencialmente una máquina termodinámica formada por un circuito frigorífico clásico (compresor, condensador, sistema de expansión y evaporador) del que se aprovecha la energía calorífica cedida por el condensador y la que se absorbe en el evaporador del aire (Rey & Velasco, 2005). Jin *et al.* (2011) reportó un ahorro de energía de cerca del 40% en el uso de secadores de bomba de calor en comparación con los secadores convencionales de resistencia. Según Hepbasli & Colak (2009) los sistemas de bomba de calor mejoran la eficiencia energética con un menor consumo de combustible fósil, contribuyendo al desarrollo de procesos sostenibles y obteniendo productos de buena calidad. Para cada producto es necesario establecer las condiciones adecuadas de secado con el fin de extender su vida útil.

Se han realizado pocos estudios con sistemas de bomba de calor en secado de alimentos en comparación con otros secadores convencionales (Erbay & Hepbasli, 2014). Por otra parte, otros métodos de conservación convencionales no mantienen las propiedades fisicoquímicas de la arracacha. Con el presente trabajo se busca aplicar el sistema de bomba de calor en el secado de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*), con el fin de contribuir a la disminución de las pérdidas de este producto después de su cosecha, conservando sus propiedades nutricionales y características organolépticas.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

- Establecer las condiciones adecuadas para el secado de rodajas de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) mediante el sistema de bomba de calor.

1.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del secado mediante bomba de calor sobre algunas características de calidad (actividad de agua, humedad, extracción de almidón y color) de la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*).
- Determinar el coeficiente de difusividad para la humedad y la cinética de secado de rodajas de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) utilizando un sistema de bomba de calor.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Características de la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*)

2.1.1. Botánica de la arracacha

Según Jiménez (2005) la clasificación botánica de la arracacha es de la división angiospermas, clase dicotiledóneas, sub-clase *archichlamydeae*, orden *ubelliflorae*, familia *apiáceae*, sub-familia *apiodae*, género *arracacia*, especie *xanthorrhiza bancroft* (variedad amarilla) y *esculenta* (variedad blanca).

La arracacha es una planta herbácea caulescente ramificada con 0.5 a 1.20 m de altura (Jiménez, 2005). Lleva en la parte superior numerosos brotes que presentan hojas de pecíolos largos, divididas en 3-7 folíolos, muy recortados. Follaje de color verde o bronceado, según la variedad. Las raíces son de dos tipos, unas finas y largas y otras tuberosas, estas últimas nacen de la parte inferior del tallo (corona), varían su número de 3-24 ramificaciones, de forma ovoide, cónica o fusiforme, de color blanco, amarillo o morado. Estas raíces están formadas principalmente de floema, cuyo parénquima contiene el almidón. Su xilema está también formado por parénquima con mucho almidón. El color externo de la raíz varía desde blanco, crema, amarillo, grisáceo, violáceos o moteados rosados (Salazar, 1997).

2.1.2. Variedades de arracacha y propiedades nutricionales

El valor comercial de las raíces de arracacha está dado por su contenido de carbohidratos (especialmente de almidón), su color amarillo intenso y su aroma característico. Sin embargo, las raíces tienen otras características que tradicionalmente no han sido valoradas y que le brindan ventajas nutricionales para un uso más extendido en la alimentación humana y animal y para su industrialización (Rodríguez *et al.*, 2000).

Existen diversas variedades de raíces y cepas de arracacha, de las cuales las más representativas son: La variedad amarilla que es de follaje verde y produce raíces amarillas. La variedad blanca produce raíces blancas y follaje verde, y la variedad morada tiene el follaje color carmín y las raíces moradas (Jiménez, 2005).

La arracacha es considerada como un alimento esencialmente energético pues en su composición se destacan los carbohidratos (almidón y azúcares totales) con relación a los demás nutrientes y considerables niveles de calcio, fósforo, hierro, vitamina A y niacina. Las proteínas de la arracacha, como todos los tubérculos, son incompletas porque presentan deficiencia en la mayoría de sus aminoácidos esenciales (Burgos *et al.*, 2006). Además Rea (1984) afirma que la arracacha de mejor sabor es la que tiene menos cantidad de fibra.

El almidón existe en entidades discretas, semicristalinas, las cuales reciben el nombre de gránulos. El tamaño, la forma y la estructura de los gránulos difieren sustancialmente entre fuentes botánicas. El almidón está compuesto por dos biopolímeros: la amilosa y la amilopectina. La estructura de la amilosa consta de unidades de D-glucosa unidas linealmente por enlaces glucosídicos $\alpha(1\rightarrow4)$; la amilopectina es la molécula predominante del almidón, y es un polisacárido ramificado compuesto por segmentos lineales de D-glucosa unidos por enlaces $\alpha(1\rightarrow4)$ conectados por ramificaciones de enlaces $\alpha(1\rightarrow6)$ (Buléon *et al.*, 1998). El contenido de amilasa de almidones en la arracacha es de 4% lo que corresponde a un almidón de alto contenido de amilopectina, siendo una alternativa interesante a los almidones modificados (Santacruz, 2005).

2.1.2.1. Valor nutritivo

El almidón de la arracacha se caracteriza por ser muy fino, uniforme y de alta calidad (Jiménez, 2005). Por otra parte, la importancia de la fibra alimentaria y sus propiedades fisicoquímicas en la dieta humana son un factor determinante gracias a sus efectos fisiológicos en el organismo. El tipo y cantidad de fibra en el alimento inciden en la absorción de nutrientes en el organismo y en otros parámetros relacionados con la digestibilidad de los alimentos (Heredia *et al.*, 2003).

En la Tabla 1, se muestra el comparativo químico proximal entre arracacha amarilla, morada, blanca, yuca y papa amarilla, en la cual se observa que la arracacha amarilla supera el contenido de varios nutrientes tanto de papa como de yuca; así mismo, supera en contenido de fibra a sus semejantes blanca y morada. Aunque la variedad amarilla contiene menor cantidad de carbohidratos, existe mayor disponibilidad de esta en la región andina colombiana.

Tabla 1. Composición química de la arracacha comparada con yuca y papa amarilla por cada 100 g de producto (Jiménez, 2005)

Componentes	Arracacha			Yuca	Papa
	Amarilla	Morada	Blanca		
Valor energético (Cal)	97.00	102.00	104.00	161.00	103.00
Humedad (%)	75.10	73.40	73.00	59.00	73.20
Proteína (g)	0.70	0.80	0.80	0.60	2.00
Grasa (g)	0.30	0.20	0.20	0.20	0.40
Carbohidratos (g)	22.90	24.40	24.90	39.10	23.30
Fibra (g)	1.10	1.00	0.60	0.90	0.70
Calcio (mg)	27.00	26.00	29.00	35.00	6.00
Fósforo(mg)	50.00	52.00	58.00	62.00	52.00
Hierro (mg)	1.10	0.90	1.20	0.40	0.40
Tiamina (mg)	0.09	0.07	0.06	0.03	0.07
Riboflavina (mg)	0.08	0.06	0.04	0.04	0.06
Niacina (mg)	2.84	2.80	3.40	0.66	1.85
Ac. Ascórbico (mg)	27.10	23.00	28.00	36.30	9.00

2.1.2.2. Propiedades funcionales del almidón de arracacha

La industria se halla en la búsqueda de almidones nativos que presenten cierta tolerancia a diferentes tratamientos que deterioran la estructura del gel de almidón. Una de las características importantes de la arracacha son las propiedades funcionales de su almidón, las cuales le brindan la posibilidad de utilizarse en la elaboración de productos industriales. De acuerdo Rodríguez *et al.* (2001) y Rodríguez *et al.* (2005), la temperatura media a la cual el almidón de arracacha forma gel está entre 49°C y 60°C, más baja que la de los almidones de cereales, lo que permite que el almidón requiera menor energía para su cocción.

2.1.2.3. Usos en la alimentación

Las raíces de arracacha son recomendadas en dietas para niños, ancianos y personas convalecientes, principalmente por su contenido de calcio, fósforo y niacina. Otro factor determinante para ser utilizado en dietas especiales son las características de su almidón, pues contiene alrededor de 23% de gránulos redondos que varían de 5 a 27 μm , haciéndolos altamente digeribles. La mayor parte de esta hortaliza se consume poco tiempo después de la cosecha. La sepa o corona de las raíces se utiliza en alimentación de ganado lechero; del tallo, las hojas y el follaje desecado se pueden elaborar harinas y productos, igualmente para alimentación animal (INIAP, 1999).

2.2. Propiedades fisicoquímicas de los alimentos

2.2.1. Actividad de agua

Los procesos de deshidratación se emplean prioritariamente para reducir el contenido de agua, incrementando la concentración de solutos y disminuyendo la alterabilidad de los alimentos, sin embargo, se ha observado que diversos alimentos con el mismo contenido de humedad difieren significativamente en su susceptibilidad a la alteración debido a la actividad de agua. En consecuencia, el contenido de agua por sí solo no es un indicador real de la estabilidad. Esta situación se atribuye, en parte, a diferencias en la intensidad con que el agua se asocia con los constituyentes no acuosos; el agua implicada en asociaciones fuertes es menos susceptible o propensa para las actividades degradativas, tales como el crecimiento de microorganismos y las reacciones químicas de hidrólisis, que el agua débilmente asociada (Fennema, 2010).

Badui (2006), expone que la actividad de agua es una medida del agua libre o ligada, la primera disponible para crecimiento de microorganismos, reacciones químicas, hidrolíticas y enzimáticas, puesto que la segunda está unida a superficies sólidas y no interviene en estos procesos de degradación.

Entre menor sea la actividad acuosa, menor será el deterioro del alimento extendiendo su vida útil (García *et al.*, 2010). Según Mendoza *et al.* (2014), valores de a_w debajo de 0.6 se consideran por lo general microbiológicamente estables y de 0.2 a 0.4 aseguran la estabilidad del producto frente a reacciones de oscurecimiento, de oxidación de lípidos, auto-oxidación y actividad enzimática.

La noción de actividad de agua procede rigurosamente de las leyes de equilibrio termodinámico que puede verse expresado en la siguiente ecuación:

$$a_w = \frac{f}{f_o} = \frac{P}{P_o} = \frac{Ma}{Ma+Ms} \quad (1)$$

Donde, f es la fugacidad del solvente de la solución, f_o es la fugacidad del solvente puro, P es la presión de vapor de agua del alimento, P_o es la presión de vapor de agua pura, Ma son las moles del soluto y Ms son las moles de agua (Cano & Viveros, 2009).

2.2.2. Humedad

El contenido de humedad de un alimento es el agua total que contiene, sin considerar que en la mayoría de los alimentos existen zonas o regiones microscópicas que, debido a su composición química, no permiten la presencia del agua, lo cual provoca una distribución heterogénea a través del producto. El agua no solo contribuye a las propiedades reológicas y de textura de un alimento, sino que a través de sus interacciones con los diferentes componentes determina el tipo de reacciones químicas que se pueden suscitar en el alimento (Herrera *et al.*, 2003). La importancia que tiene la determinación de humedad en los alimentos es identificar las condiciones del proceso, almacenamiento y calidad del producto alimenticio (Madriñan, 1988).

La eliminación de agua es una importante operación en procesos de alimentos para estabilizarlos y disminuir su actividad de agua, sin embargo, los procesos de deshidratación disminuyen la calidad del producto, produciendo una textura dura, rehidratación lenta o incompleta, pérdida de sabor y color desfavorable. El contenido de humedad de un alimento puede representarse de dos formas: en base a la masa húmeda (b.h) que se define como la proporción entre la masa de agua y la masa inicial del producto; o en base a la masa seca del producto (b.s), descrita como la relación entre la masa de agua y la masa de materia seca. Esta última, entendida como la diferencia entre la masa del producto húmedo y la masa de agua (Sharma *et al.*, 2003).

2.2.3. Color

La medición del color es un parámetro objetivo que se puede utilizar como índice de calidad, la cual cambia durante el proceso de secado o procesos mecánicos, debido a la evaporación del agua y reacciones enzimáticas y no enzimáticas (Rojas & Duran, 2011).

Los procesos tecnológicos de conservación y almacenamiento prolongado a los que se someten las materias primas alimenticias, pueden ocasionar modificaciones o alteraciones del color. Por ello, la industria alimentaria ha encontrado la necesidad de mantener la estabilidad del color, el cual es una cualidad organoléptica de los alimentos que suele ser considerada como un factor de aceptación y un criterio para elegir un alimento, además, en productos de origen vegetal se relaciona con su grado de maduración (Bello, 2000).

Desafortunadamente, muchos pigmentos alimentarios son inestables durante el procesado y almacenamiento, y prevenir los cambios no deseados es difícil. Dependiendo del pigmento, su estabilidad se verá alterada por factores como la presencia de luz, el oxígeno, la temperatura, la actividad de agua y el pH (Fennema, 2000). Por esta razón, es necesario controlar la variación del color en productos sometidos a procesos de secado.

Con el fin de llevar a cabo un análisis objetivo del color, se utilizan métodos instrumentales de medida, basados en las teorías físicas del color que permiten reproducir, interpretar, definir y comparar entre sí los diferentes colores. Entre los métodos más utilizados se encuentran los basados en medidas espectrofotométricas y posterior tratamiento matemático de los distintos parámetros indicativos de color. En la actualidad, los espacios de color y los valores numéricos se utilizan para crear, representar y visualizar los colores en dos y tres dimensiones espaciales (Trusell *et al.*, 2005).

2.3. Secado de alimentos

El secado de alimentos se usa como técnica de preservación. Los microorganismos que provocan la descomposición de alimentos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce al 10%. Además, muchas enzimas que causan cambios químicos en alimentos no pueden funcionar sin agua (Geankoplis, 1998). El primer objetivo del secado en cuanto a la estabilidad del producto se define en términos de la actividad de agua y no en términos del contenido de humedad (Fito *et al.*, 2001).

Los procesos de secado son muy utilizados en la industria agroalimentaria para disminuir la actividad de agua de los productos y aumentar la vida útil. Para productos de alta humedad se presentan dos periodos de secado: un periodo inicial de velocidad de secado constante y un periodo de velocidad de secado decreciente donde la eliminación de humedad es controlada por resistencias internas. Durante el periodo de velocidad constante, la superficie del producto está saturada de agua; y el secado ocurre a la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado. En el período de velocidad decreciente el flujo de agua hacia la superficie está limitado por las características físicas del producto (composición y porosidad) que definen la velocidad de difusión. Para estimar la cinética de secado durante el periodo de velocidad decreciente, la segunda ley de Fick de difusión se ha usado por diversos autores (López *et al.*, 1993).

Los alimentos vegetales se componen de agua, hidratos de carbono, fracciones de lípidos y proteínas, que son fácilmente modificables en secado a alta temperatura y resultan en la

degradación de la calidad de los alimentos. Por lo tanto, el uso de temperatura apropiada juega un papel importante en el secado. Durante el proceso, se pueden observar cambios significativos en las propiedades estructurales cuando se elimina agua del material. La contracción se debe a que los polímeros de los alimentos no soportan su peso y, por lo tanto, colapsan bajo la fuerza de gravedad en ausencia de humedad. El colapso de la estructura y los cambios resultantes en la porosidad, incluyendo textura, son propiedades organolépticas claves percibidas por los consumidores (Hawlder *et al.*, 2006).

2.4. Curva de velocidad de secado

Se calcula la humedad en cada tiempo durante el secado empleando la Ecuación 2.

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \quad (2)$$

Donde, X_t es la humedad en el tiempo t , W_s es el peso total del sólido (kg) y W se expresa como contenido de humedad del producto (kg).

Se determina el contenido de humedad en equilibrio X^* . Se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre X en kg de agua libre/ kg de sólido seco para cada valor de X_t .

$$X = X_t - X^* \quad (3)$$

Al sustituir los datos calculados en la Ecuación 3, se gráfica el contenido de humedad libre en función del tiempo y se obtiene una curva de velocidad de secado. Luego se miden las pendientes de las tangentes a la curva lo cual proporciona los valores $\frac{dX}{dt}$ para diferentes valores de t . La velocidad de secado está dada por la Ecuación 4.

$$R = - \frac{L_s}{A} \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (4)$$

Donde, R es la velocidad de secado dada en $\frac{kg \text{ agua}}{h \text{ m}^2}$, L_s masa de sólido seco (kg) y A es el área superficial expuesta al secado en m^2 .

En la Figura 1 se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante y decreciente. Empezando en el tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación va en aumento. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al principio de la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en el punto A. Este periodo inicial de ajuste en estado no estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado (Geankoplis, 1998).

La curva es recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. En el punto C, la velocidad de secado comienza a disminuir en el periodo de velocidad decreciente, hasta llegar al punto D (Geankoplis, 1998).

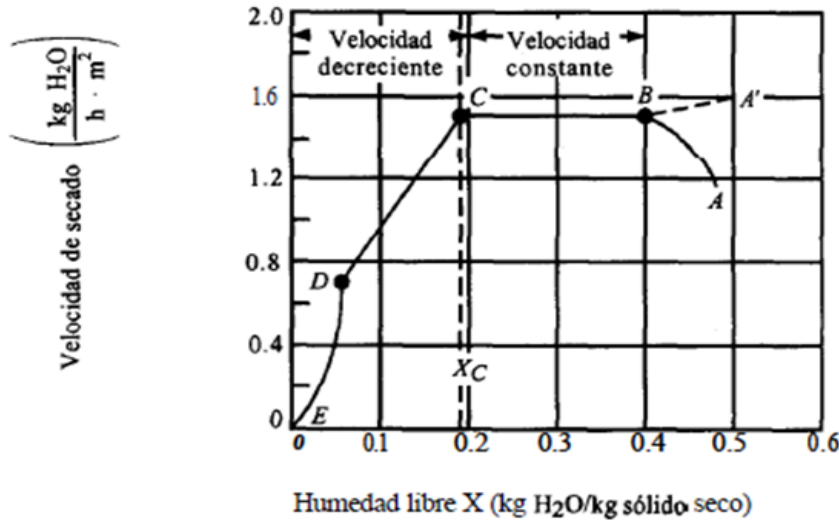


Figura 1. Curva típica de velocidad de secado (Geankoplis, 1998)

2.4.1. Secado durante el periodo de velocidad constante

Para estimar el tiempo de secado de determinado material, el mejor método consiste en obtener datos experimentales bajo condiciones de alimentación, área superficial relativa expuesta, velocidad del aire, temperatura y humedad, que sean, en esencia, las mismas que tendrá el secador que se usará en la práctica. De esta manera, el tiempo requerido para el periodo de velocidad constante se determina directamente con la curva de secado de contenido de humedad libre en función del tiempo, empleando la Ecuación 5.

$$tc = \int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{L_s}{A} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dX}{R} \quad (5)$$

Si el secado se verifica dentro del periodo de velocidad constante, de manera que tanto x_1 como x_2 sean mayores que el contenido de humedad crítica X_c , integrando la ecuación se determina el tiempo constante como se observa en la Ecuación 6.

$$tc = \frac{L_s}{AR_c} (X_o - X_c) \quad (6)$$

Donde, tc es el tiempo de velocidad constante (s), X_o y X_c son el contenido de humedad (b.s) inicial y crítico, respectivamente.

2.4.2. Secado durante el periodo de velocidad decreciente

Cuando la velocidad es decreciente se integra para obtener la Ecuación 7, durante el periodo de velocidad decreciente R varía en el tiempo. En este caso la Ecuación 8 se integra gráficamente para cualquier forma de la curva de secado de velocidad decreciente, trazando $1/R$ en función de X y determinando el área bajo la curva.

$$t_d = \frac{L_s}{A} \int_{X_c}^{X_f} \frac{dX}{R} \quad (7)$$

$$t_d = \frac{L_s}{A R_c} (X_c - X_f) \quad (8)$$

Donde, t_d es el tiempo de velocidad decreciente (s) y X_f contenido de humedad final (b.s).

2.5. Difusividad efectiva

La transferencia de masa es análoga a la transferencia de calor en muchos aspectos y existe una cercana semejanza entre las relaciones de ambas. La transferencia de masa requiere la presencia de dos regiones con composiciones químicas diferentes y se refiere al movimiento de especies químicas desde una región de alta concentración hacia una de concentración menor. La fuerza impulsora primaria para el flujo de fluidos es la diferencia de presión, en tanto que, para la transferencia de masa, es la diferencia de concentración (Cengel, 2007).

La relación entre difusividad y la humedad se representa en la Figura 2. La región A-B representa la adsorción monomolecular en la superficie del sólido que consiste en el movimiento del agua por difusión de la fase vapor. La región B-C cubre la desorción multimolecular donde la humedad empieza el movimiento en la fase líquida. En la región C-D juega un papel importante la microcapilaridad, donde la humedad emigra hacia el exterior fácilmente en los poros llenos de agua. En la región D-E la humedad ejerce su máxima presión de vapor y la migración de la humedad es debida primordialmente a la capilaridad (Ibarz & Barbosa, 2011).

El coeficiente de difusión efectivo se determina a partir de la Ecuación 9 y la Ecuación 10.

$$\left(\frac{M - M_i^j}{M_{o^j} - M_{\infty^j}} \right) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left\{ - (2n+1)^2 \frac{\pi^2 Fo}{4} \right\} \quad (9)$$

La Ecuación 9 se simplifica usando únicamente el primer término de la serie.

$$\left(\frac{M - M_i^j}{M_{o^j} - M_{\infty^j}} \right) = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left\{ - \frac{\pi^2 Fo}{4} \right\} \quad (10)$$

Donde el número de Fourier (Fo) está dado por:

$$Fo = \frac{De^j t}{l^2} \quad (11)$$

Donde, l es la longitud característica (m), De es la difusividad efectiva (m^2/s) y t el tiempo (s).

Se despeja el valor de Fo calculado en la Ecuación 10, el cual se reemplaza en la Ecuación 11 para así calcular De (Barat, 1998).

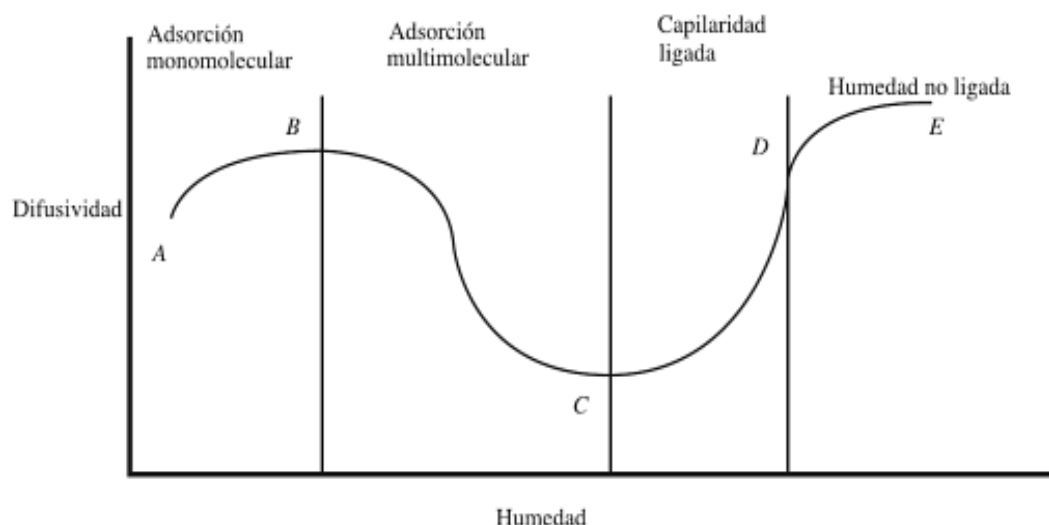


Figura 2. Relación entre el contenido de humedad y la difusividad (Ibarz & Barbosa, 2011)

2.6. Proceso de secado mediante bomba de calor

2.6.1. Funcionamiento y características de la bomba de calor

El secado asistido con bomba de calor es un método de secado alternativo que puede mejorar la eficiencia energética y controlar los parámetros de operación de secado (Deng *et al.*, 2014). Los sistemas de bomba de calor causan menos consumo de combustibles fósiles, por lo que son apropiados para el concepto de desarrollo sostenible (Colak & Hepbasli, 2009). Este sistema de secado ofrece productos de mejor calidad con un consumo reducido de energía. Es muy utilizado en productos que requieren atmósfera de secado controlada (temperatura y humedad), también productos alimenticios sensibles al calor, que requieren temperaturas bajas de secado para no deteriorar características de calidad, como el color, aroma, textura y propiedades nutricionales (Chua *et al.*, 2002). Esta tecnología también tiene bajos requisitos de mantenimiento y atrae a los investigadores por ser un sistema amigable con el medio ambiente (Erbay & Hepbasli, 2014).

Un sistema de secado de bomba de calor se compone principalmente de dos subsistemas; un sistema bomba de calor y una cámara de secado. Las bombas de calor pueden transferir calor de fuentes naturales de los alrededores, como el aire, el suelo, el agua, de reacciones químicas y desechos industriales. La cámara de secado se puede adecuar como secador de bandejas, en lecho fluido, giratorio o transportador de banda. Los principales componentes de la unidad general de la bomba de calor son un evaporador, un condensador, un compresor y una válvula de expansión (Colak & Hepbasli, 2009).

La bomba de calor funciona con dos circuitos, un circuito cerrado de aire para el secado de alimentos, y un circuito cerrado de refrigerante que sirve para calentar y enfriar el aire usado en el proceso. El fluido de trabajo (refrigerante) a baja presión se vaporiza en el evaporador por el calor extraído del aire de escape del secador. El compresor eleva la entalpía del refrigerante y lo descarga como vapor sobrecalentado a alta presión. El calor se elimina del fluido de trabajo y se devuelve al aire de proceso en el condensador. El sistema permite que el aire caliente a la salida del condensador pase a través de la cámara de secado. El fluido de trabajo procedente del condensador es entonces estrangulado a la línea de baja presión (uso de una válvula de expansión) y entra en el evaporador para completar el ciclo. El aire húmedo a la salida del secador, pasa a través del evaporador, donde se condensa la humedad del aire si su temperatura disminuye por debajo del punto de rocío (Colak & Hepbasli, 2009).

2.6.2. Clasificación de bombas de calor

Según (Colak & Hepbasli, 2009) existen diferentes tipos de bombas de calor que están disponibles para aplicaciones de secado.

- Sistemas de secado de bombas de calor de fuente de aire

El secador de bomba de calor de fuente de aire utiliza un evaporador como deshumidificador y un condensador como calentador (Jin *et al.*, 2011). Estos sistemas ofrecen ventajas sobre los secadores convencionales de aire caliente para el secado de productos alimenticios, incluyendo mayor eficiencia energética, mejor calidad del producto, capacidad de operar independientemente de las condiciones climáticas.

- Sistemas de secado de bombas de calor geotérmicas

Este sistema consiste principalmente de tres subsistemas: Intercambiador de calor geotérmico, sistema de bomba de calor y cámara de secado. En este sistema el calor es extraído de la tierra por el intercambiador de calor geotérmico, donde se circula una solución de agua y anticongelante. El calor se transfiere al refrigerante en el evaporador y se suministra a la cámara de secado (Hepbasli & Colak, 2009).

- **Sistemas de secado de bomba de calor químico**

La bomba de calor química es tecnología potencialmente importante para el uso eficaz de la energía en el secado. Puede almacenar energía térmica, tal como el calor residual de escape de la secadora, la energía solar, energía geotérmica etc., en forma de energía química a través de una reacción endotérmica en un reactor y liberar la energía durante el periodo de demanda de calor por reacciones exotérmicas (Hepbasli & Colak, 2009).

- **Sistemas de secado de bomba de calor híbrido**

Algunas de las bombas de calor incluyen fuentes híbridas, como la solar, de microondas, infrarroja o energía convencional. Los rendimientos energéticos de los sistemas híbridos son comparables con el secado conectivo convencional (Hepbasli & Colak, 2009).

2.6.3. Antecedentes de secado asistido con bomba de calor en operaciones de secado

- **Revisión de la bomba de calor, sistemas, modelos y estudios**

Durante un proceso de secado, ocurre la degradación de color, sabor y textura. Los estudios de la comparación de degradación de la calidad entre bomba de calor y métodos de secado convencionales, llegan a la conclusión de que el secado mediante bomba de calor ofrece productos de mejor calidad con menor consumo de energía. De acuerdo con Van Blarcom y Mason (1988), cuando la macadamia se secó mediante bomba de calor a 50°C de temperatura del aire, no se produjo problema en el tostado. Hawlader *et al.* (2006) encontraron que el secado de rodajas de cebolla llevó a un ahorro de energía aproximado de 30% con mejor calidad del producto (conservación de color, compuestos volátiles y nutricionales) en comparación con secadores convencionales (Colak & Hepbasli, 2009).

- **Revisión de los sistemas de bomba de calor para aplicaciones de secado**

Mediante el sistema de bomba de calor se puede controlar la humedad relativa. El desarrollo del sistema mejora mediante la reducción del consumo de combustibles fósiles y la entrada de energía requerida. Se ha secado haba verde con tasas de flujo de masa de 0.5, 1.0 y 1.5 m/s, humedad relativa de 9.4 a 14.6% y temperaturas de 45, 50, 55°C, aumentando la velocidad de secado y reduciendo el costo de energía hasta un 40% en comparación con secadores eléctricos convencionales. Además, se han realizado estudios de secado mediante bomba de calor para kiwi, plátano y aguacate, utilizando una velocidad del aire de 0.37 m/s y una temperatura de aire de secado de 40°C, mostrando mejoras en la conservación del color en comparación con secadores eléctricos (Jin *et al.*, 2011).

- **Secado con bomba de calor para la deshidratación de productos alimenticios**

El secado con bomba de calor para la deshidratación de frutas, permite mantener la calidad del fruto deshidratado debido a que utiliza temperaturas bajas (10-60°C) y humedades controladas del aire (5-20% humedad relativa). El producto obtenido puede almacenarse hasta por un periodo de 6 meses. Mediante el análisis de los resultados obtenidos, se establecieron las condiciones de secado (Temperatura de 60°C y humedad relativa entre 11.9 y 13.31%) que proporcionan un producto alimenticio deshidratado de calidad para un secador de gabinete con bomba de calor (Ortiz, 2003).

- **Efecto del secado asistido con bomba de calor sobre las características fisicoquímicas del kiwi**

Entre los estudios realizados de secado por bomba de calor se encuentran principalmente frutas como manzana, plátano, papaya y mango. En el caso del kiwi, el secado por bomba de calor mostró una buena alternativa de conservación, por presentar valores de actividad de agua inferiores a 0.6 y no afectar significativamente el color. Una desventaja de esta técnica es el tiempo de secado, debido a que son necesarios tiempos largos para obtener una humedad debajo del 10% (España & Valencia, 2014).

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental factorial aleatorio 3^2 por triplicado, para estudiar las interacciones entre los factores de temperatura del aire de secado y el espesor de la muestra, sobre los parámetros de calidad (actividad de agua, relación del tiempo y las condiciones de secado, el rendimiento en la extracción de almidón como indicador de gelatinización y el cambio total de color). En la Tabla 2 se muestra el diseño experimental para el secado asistido mediante bomba de calor. En la Tabla 3, obtenida mediante el software Minitab 17, se presentan los diferentes experimentos y el orden de ejecución.

Tabla 2. Diseño experimental

Factores	Niveles
Temperatura – Humedad Relativa	50°C – 15%
	55°C – 12.5%
	60°C – 10%
Espesor	2 mm
	3 mm
	4 mm

Tabla 3. Combinaciones del diseño experimental

Orden estándar de datos	Orden recopilación de datos	Temperatura (°C) – Humedad relativa (%)	Espesor (mm)
20	1	50 – 15	3
26	2	60 – 10	3
22	3	55 – 12.5	2
19	4	50 – 15	2
25	5	60 – 10	2
24	6	55 – 12.5	4
27	7	60 – 10	4
23	8	55 – 12.5	3
21	9	50 – 15	4
7	10	60 – 10	2
5	11	55 – 12.5	3
3	12	50 – 15	4
8	13	60 – 10	3
6	14	55 – 12.5	4
9	15	60 – 10	4
2	16	50 – 15	3
1	17	50 – 15	2
4	18	55 – 12.5	2
17	19	60 – 10	3
14	20	55 – 12.5	3
13	21	55 – 12.5	2
12	22	50 – 15	4
11	23	50 – 15	3
18	24	60 – 10	4
16	25	60 – 10	2
15	26	55 – 12.5	4
10	27	50 – 15	2

Se asume que las propiedades nutricionales y las características organolépticas de la arracacha tienen condiciones similares según el periodo del año de la cosecha, debido a que provienen de la misma zona de cultivo. Con estas condiciones establecidas se plantea el siguiente modelo del diseño:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \alpha_j + (\tau\alpha)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (12)$$

Donde, y_{ij} es el cambio del parámetro de calidad a la i- ésima temperatura y la j- ésimo espesor, μ es la media general del parámetro de calidad, τ_i es el efecto debido a la i- ésima temperatura, α_j es el efecto debido a la j- ésimo espesor, $(\tau\alpha)_{ij}$ es el efecto debido a la interacción entre la i- ésimo temperatura y la j- ésimo espesor, sobre el cambio del parámetro de calidad, y ε_{ijk} es el error experimental debido a condiciones no medidas o no medibles (Torres, 2012).

Para el análisis de varianza ANOVA se deben tener en cuenta las hipótesis nula y alterna, la cual evalúa la interacción de los factores, o la influencia de los factores individuales sobre el experimento.

$$H_0: (\tau\alpha)_{ij} = 0$$

$$H_a: (\tau\alpha)_{ij} \neq 0$$

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_a: \tau_1 \neq \tau_2 \neq \dots \neq \tau_a \neq 0$$

3.2. Hipótesis

Las hipótesis para este experimento son las siguientes:

H_0 : Hipótesis nula. No existen diferencias significativas en las propiedades nutricionales y características organolépticas de la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) sometida al proceso de secado mediante bomba de calor, con diferentes condiciones de temperatura del aire y espesor de la muestra.

H_a : Hipótesis alterna. Las propiedades nutricionales y características organolépticas de la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) varían significativamente al ser sometidas a secado mediante bomba de calor con diferentes condiciones temperaturas del aire y espesor de la muestra.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

Equipos: Bomba de calor (Dártico), estufa de secado (Binder), molino de bolas, equipo de tamizado (RO-TAP W. S. Tyler), equipo de medición de actividad de agua (Aqualab), equipo de medición de color (Colorímetro Hunter Lab), balanza de precisión (OHAUS), balanza analítica (Mettler AE 200), centrífuga (SIGMA), baño térmico (Lab Companion), compresor de aire (Electromecanic), cortadora de vegetales (ESSEN), viscosímetro (Brookfield DV-III) y microscopio digital (LEICA II).

Instrumentos: Anemómetro, termopar, desecador, sacabocado, pie de rey digital y tamices (No. 60, 100, 120, 140, 270, 325, fondo).

Materia prima: Arracacha (variedad amarilla), ácido cítrico.

4.2. Metodología

4.2.1. Selección de materia prima

Para el desarrollo de este proyecto se tuvieron en cuenta las características iniciales de la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) de variedad amarilla, cultivada en Cajamarca Tolima, comprada en el supermercado MERCA MIO S.A. El estado inicial de la materia prima es de suma importancia para la calidad final del producto, por lo cual, se escogieron tubérculos con la menor madurez posible, utilizando como parámetro el tiempo de cosecha aproximado de 24 a 48 horas, y con mínimos daños físicos y microbiológicos, teniendo en cuenta que el tubérculo no presentara hongos, cortes o magulladuras en su corteza.

4.2.2. Adecuación de materia prima

Los tubérculos de arracacha fueron sometidos a un remojo en agua durante 20 minutos, con el fin de ablandar y provocar la sedimentación de tierra e impurezas adheridas a la corteza, para posteriormente facilitar el lavado manual con una solución jabonosa y no deteriorar la piel del alimento.

Después, se procedió al corte en rodajas de 0.2, 0.3 y 0.4 cm de espesor, según se requiriera en el experimento, con un diámetro de 3 cm aproximadamente, utilizando una tajadora y un sacabocados respectivamente.

Para cada experimento se utilizaron 500 g de materia prima adecuada previamente, correspondiente a la parte pulpa del tubérculo, la cual posee el almidón.

4.2.3. Descripción del proceso de secado por bomba de calor

Se realizaron pruebas de secado por triplicado con temperaturas de 50, 55 y 60°C aproximadamente, una humedad relativa asociada del aire de 15, 12.5 y 10% respectivamente y una velocidad de aire de 2 m/s.

Las temperaturas de los diversos experimentos fueron elegidas de acuerdo con el rango de temperatura de gelatinización del almidón, el cual se encuentra entre 49 y 60°C de acuerdo con Rodríguez *et al.* (2001) y Rodríguez *et al.* (2005), con el objetivo de verificar las mejores condiciones de secado, conservando las características nativas del almidón de arracacha y evaluando la mayor eficiencia en el secado.

El equipo de bomba de calor posee una cámara de secado con rejillas en las cuales se coloca el producto. De acuerdo con el diseño del equipo, se utilizaron los primeros tres niveles de la cámara de secado, con el propósito de garantizar el flujo paralelo del aire con respecto a las rodajas de arracacha. La toma del peso de las muestras se realizó

mediante una balanza incorporada al equipo en la parte inferior de la cámara (Figura A10, Anexos).

Las temperaturas del aire de secado registradas por el termómetro digital incorporado al equipo, fueron corroboradas utilizando un termopar, y las velocidades promedio del aire de secado fueron tomadas con un anemómetro. Los tiempos de secado se establecieron con respecto al contenido de humedad de la muestra, la cual debe variar en un rango de $10 \pm 2\%$ de humedad final.

4.2.4. Descripción del proceso de extracción de almidón

Se realizó la extracción de almidón por método de vía seca como alternativa de solución al problema de contaminación que genera la extracción de almidón por vía húmeda, siguiendo la metodología de extracción de almidón de yuca por vía seca de Cobana & Antezana (2007), con algunas modificaciones. Esta metodología se ajusta a las características del almidón de arracacha, debido la similitud de la clasificación botánica y el tamaño de partícula con respecto a la yuca. La técnica integra las operaciones de lavado, corte, secado hasta 10% de humedad, molido por 30 minutos y tamizado.

4.2.4.1. Descripción del proceso de molienda

Para la extracción de almidón se llevó a cabo inicialmente la molienda de las rodajas de arracacha deshidratada en un molino de bolas, Se utilizó un molino de cerámica con bolas de acero inoxidable; durante los primeros 15 minutos de molienda se utilizaron 7 bolas grandes y 18 medianas, en la segunda fase del proceso se utilizaron 4 bolas grandes, 18 medianas y 24 pequeñas, con el objetivo de disminuir más el tamaño de partícula de la harina. Durante la operación se estableció una relación de muestra/bolas de 1/25 en peso y una velocidad de 60 rpm, para garantizar mayor eficiencia en la molienda. Según Morales (2005), las mejores condiciones de molienda se consiguen con una relación en peso igual o superior de 25/1 de las bolas del molino con respecto al material a moliturar. En la Tabla 4 se presentan las características de las bolas utilizadas en la molienda.

Tabla 4. Características de bolas de molienda

Tamaño	Peso (g)	Diámetro (mm)
Grande	260.9	40
Mediana	110.0	30
Pequeña	32.6	20

4.2.4.2. Descripción del proceso de tamizado

La harina se tamizó en un Ro-Tap con un juego de tamices presentados en la Tabla 5. La harina obtenida de la molienda se debe clasificar de acuerdo al tamaño de su gránulo, para lograr homogeneidad en su presentación (Rodríguez *et al.*, 2000).

Los tamices fueron seleccionados de acuerdo a la metodología modificada de extracción por vía seca presentada por Cobana & Antezana (2007) y al tamaño de partícula del almidón de arracacha. Se tomó como tamiz referencia el No. 140, el cual tiene una abertura de malla de 106 μm , lo que permite restringir el paso de fibra y algunos gránulos de almidón gelatinizado. El producto obtenido en los tamices con aberturas de malla inferiores a 106 μm , se considera harina con alto porcentaje de almidón.

Tabla 5. Tamaño y clasificación de tamices

No. Tamiz	Abertura malla (μm)
60	250
100	150
120	125
140	106
270	53
325	45
Fondo	-

4.2.5. Determinación de actividad de agua

La metodología para la determinación de actividad de agua se basa en la técnica del punto de rocío. El medidor de actividad de agua Aqualab equilibra la muestra dentro de una cámara sellada que contiene un espejo que detecta la condensación. En el punto de equilibrio, la humedad relativa del aire en la cámara es la misma que la actividad de agua de la muestra. La temperatura del espejo es controlada por un termopar y la detección del punto exacto de la condensación se observa con una célula fotoeléctrica. Un haz de luz es dirigido sobre el espejo y reflejado en un foto detector, el cual registra el cambio en la reflectancia cuando se produce condensación en el espejo (Decagon Devices Inc., 2014).

La calibración del equipo se lleva a cabo con soluciones estándar con actividades de agua de 0.25, 0.5, 0.76 y finalmente agua destilada. Una vez calibrado el equipo se procede a introducir la muestra al interior de la cámara, automáticamente el equipo inicia la medición de la actividad de agua después de sellar la cámara; este proceso toma entre 5 y 10 minutos aproximadamente. Finalmente se obtiene, la actividad de agua de la muestra y la temperatura de condensación.

La actividad de agua se determinó antes, después del proceso de secado por bomba de calor y después del proceso de molienda, con el objetivo de establecer la a_w inicial del tubérculo y la disminución de ésta durante el proceso de secado.

4.2.6. Determinación de humedad

Se pesaron cajas Petri vacías, se añadió la muestra tomando nuevamente el peso y se introdujo en una estufa de aire a 105°C durante 24 horas, finalmente se colocaron las muestras en un desecador por 30 minutos y se pesó la muestra seca.

La humedad del producto es expresada en porcentaje (b.h), utilizando la diferencia de pesos en la siguiente ecuación:

$$\%Humedad = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \times 100 \quad (13)$$

Donde, m_1 es el peso de la muestra húmeda y m_2 el peso de la muestra seca (Armijo, 2011).

Al igual que en la determinación de la actividad de agua, se registraron valores de humedad por triplicado, antes y después del proceso de secado por bomba de calor, y después de la homogenización de la muestra por medio de molienda.

4.2.7. Determinación de color

Para la evaluación del color se utilizó el sistema CIELab que es uno de los métodos de más amplio uso en alimentos, basándose en la determinación de valores triestímulo, a partir de los cuales se calcula la espectrofotometría de la muestra en el espectro visible, que define la medida objetiva del color a partir de unas coordenadas denominadas luminosidad (L^*), saturación (C^*) y tonalidad (H^*) que se calculan a partir de los valores de (a^*) y (b^*) que denotan los valores de rojo/verde y azul/amarillo respectivamente. Establecidos los valores para L^* , a^* y b^* la diferencia total del color puede ser expresado con un valor único conocido como ΔE^* , que cuantifica numéricamente la diferencia de percepción de color entre dos muestras (Casassa & Sari, 2006).

La coordenada CIELab ΔE^* según (Casassa & Sari, 2006) se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad (14)$$

Se utilizó el colorímetro HunterLab el cual requiere una estandarización con tres placas de color negro, blanco y verde respectivamente, las cuales calibran el equipo para la posterior medición del color en muestras. La muestra se coloca sobre una caja Petri y se tapa con la placa de color negro, en seguida se activa un haz de luz del equipo que examina la muestra, y finalmente se registran los valores L^* , a^* y b^* .

Previo a la ejecución del diseño experimental, se realizaron pruebas preliminares sumergiendo rodajas de arracacha en una dilución de ácido cítrico al 1% durante 10 minutos, con el fin de verificar la viabilidad del pretratamiento en cuanto a la reducción del cambio de color. La evaluación de color se realizó por triplicado en diferentes etapas del proceso, antes y después del proceso de secado, y después del proceso de molienda, con el objetivo de realizar un seguimiento y evaluar el efecto de las operaciones unitarias en el cambio de color de la muestra.

4.2.8. Determinación de cinética de secado y curva de velocidad de secado.

La cinética de secado se realizó para determinar la humedad de equilibrio de la arracacha a condiciones de 50°C, 15% de humedad relativa y rodajas de 2 mm de espesor, en un periodo de 12 horas, se determinó la humedad y actividad de agua al inicio, a los 15, 30 minutos y después de cada hora hasta obtener la humedad de equilibrio.

Para la determinación de curva de secado, se calculó la humedad libre en cada uno de los tiempos empleando la Ecuación 3. La velocidad de secado R se determinó graficando la humedad libre en función del tiempo, realizando un ajuste bajo la curva, mediante línea de tendencia central polinómica de segundo grado, derivando la ecuación y reemplazando cada tiempo en la Ecuación 4.

Se graficó la velocidad de secado R en función de la humedad libre, para así obtener la curva de velocidad de secado en rodajas de arracacha durante un periodo de 4 horas.

4.2.9. Determinación de índice de absorción, índice de solubilidad y poder de hinchamiento

Los índices de solubilidad y absorción de agua se pueden utilizar como un indicativo del grado de modificación de los almidones por tratamientos termomecánicos (Rodríguez *et al.*, 2006). El método que se siguió en la determinación de almidón del índice de absorción (IAA), índice de solubilidad (ISA) y poder de hinchamiento (PH) fue tomado de Anderson *et al.* (1969) con algunas modificaciones. Se pesó 1 g (b.s) de muestra homogenizada pasada por un tamiz de 106 µm y se adicionaron 20 ml de agua destilada, manteniendo una relación harina/agua de 1/20 en peso. Las muestras se incubaron en un baño térmico con agitación imantada constante durante 30 minutos a 30, 40, 60 y 70°C. Posteriormente las muestras se centrifugaron a 5000 rpm durante 30 minutos, luego el sobrenadante de los tubos de centrifuga se decantó y se secó a 70°C durante 24 horas, y el gel retenido en los tubos se pesó (Rodríguez *et al.*, 2012). El resultado fue el promedio de tres repeticiones a cada temperatura.

El IAA, ISA y PH se determinaron de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$IAA = \frac{PG}{PM} \quad (16)$$

$$ISA(\%) = \frac{PSS}{PM} \times 100 \quad (17)$$

$$PH = \frac{PG}{PM - PSS} \quad (18)$$

Donde, PG es el peso del gel (g), PM es el peso de la muestra inicial en base seca (g) y PSS es el peso seco del sobrenadante (g) (Rodríguez *et al.*, 2012).

4.2.10. Determinación de viscosidad aparente

La viscosidad se define como la fricción interna de un fluido o su tendencia a resistir el flujo (Bourne, 2002). Existen dos tipos de comportamientos reológicos en fluidos. Los fluidos newtonianos en los cuales la velocidad de corte es directamente proporcional al esfuerzo de corte y fluidos no newtonianos con una relación velocidad-esfuerzo no lineal, o con un comportamiento dependiente del tiempo. (Steffe, 1996)

Los almidones que han tenido previamente un tratamiento hidrotérmico tienen la capacidad de absorber agua e hincharse en suspensiones acuosas a temperatura ambiente. La viscosidad que se desarrolla en suspensiones con este tipo de materiales se conoce como viscosidad aparente (relación entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte), que es un parámetro utilizado para determinar el comportamiento reológico de las suspensiones de las harinas, y así evaluar la influencia que tienen diferentes condiciones de proceso en las características de los materiales producidos (Rodríguez *et al.*, 2006).

Para la determinación de la viscosidad aparente se utilizó el método de Rodríguez *et al.* (2006) con algunas modificaciones. Se prepararon 20 g de suspensión en agua destilada, con una concentración de 20% (p/p) de harina homogenizada pasada por un tamiz de 106 μm , se calentaron las muestras en baño térmico a 30, 40, 60 y 70°C durante 30 minutos. Posteriormente se dejaron enfriar las muestras hasta una temperatura promedio de 25°C y se midió la viscosidad en un viscosímetro Brookfield DV-III con la aguja No. 29 a diferentes velocidades. Los ensayos se efectuaron por triplicado.

4.2.11. Microscopia del almidón

El tamaño y la naturaleza de los gránulos de almidón nativo influyen en su funcionalidad. Como todo material, las propiedades físico-químicas y funcionales del almidón y sus productos dependen su naturaleza, morfología y estructura. Por lo tanto, resulta relevante caracterizar morfológicamente los almidones, para la evaluación de esta macromolécula como materia prima en la industria (Medina & Salas, 2007).

Para la caracterización microscópica se empleó un microscopio LEICA II DM750 P con cámara digital y el software LAS EZ. Se empleó el método de Medina & Salas (2007) con algunas modificaciones. Se probaron concentraciones harina/agua de 1/20, 1/50, 1/75, 1/100, 1/150 en peso y se agitaron durante 15 minutos con un mezclador magnético a 300 rpm aproximadamente, a temperatura ambiente de 27°C. Finalmente se optó por analizar las concentraciones de 1/100 y 1/150 en peso debido a la mejor distribución y visualización, y se utilizó una solución de yodo para teñir los gránulos de almidón. Las imágenes se tomaron con un aumento de 40x.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados se presentan de manera secuencial de acuerdo con los objetivos. Se muestran los parámetros de calidad utilizados para evaluar el efecto que tiene sobre ellos la temperatura del aire de secado y el espesor de la muestra. De acuerdo a los resultados de los parámetros de calidad, se evaluaron los parámetros de secado para el mejor de los experimentos, y se determinaron parámetros característicos de la harina de arracacha, con el fin de complementar la información del producto procesado.

5.1. Parámetros de calidad

Los resultados experimentales realizados por triplicado se analizaron mediante análisis de varianza ANOVA, el método Tukey con un nivel de confianza del 95% y diagramas de barras con desviación estándar.

Las pruebas Tukey muestran valores de mayor a menor, en actividad de agua, tiempo de secado con relación a la humedad del producto, porcentaje de extracción de almidón y cambio total de color, representados por las letras de la (A) a la (F).

5.1.1. Actividad de agua

La Figura A1 presentada en ANEXOS, muestra el análisis de varianza de los resultados, se observa que el valor-P asociado a la interacción Espesor*Temperatura es mayor al nivel de significancia del 5%, lo cual indica que no hay un efecto por parte de la interacción, sin embargo, si existe un efecto significativo individual por parte del espesor y la temperatura sobre la variable respuesta actividad de agua.

La Figura A2 muestra estadísticamente que hubo diferencias significativas entre los diferentes experimentos con actividad de agua inferior a 0.42, teniendo como mejor combinación (Espesor 2 mm, Temperatura 50°C – HR 15%), con un valor 0.31 de actividad de agua. De acuerdo con estas condiciones, se puede decir que el producto es estable microbiológicamente y frente a reacciones de pardeamiento.

La Figura 3 muestra una influencia de los factores en la disminución de actividad de agua; a menor temperatura y espesor, se alcanzan actividades de agua más bajas, esto se explica debido a que a mayores temperaturas existe una irregularidad en el secado de las rodajas, eliminando agua de manera no uniforme causada por la gelatinización de almidón; por otro lado, el espesor influye directamente, ya que si existe menor contacto de área superficial, esto contribuye a disminuir la eficiencia en la transferencia de masa durante el secado. Observaciones similares reportaron Cano & Viveros (2009) en guayaba y naranja, y Vallejo (2010) en pitahaya, los cuales indican que a menor espesor, más rápida es la difusión de la humedad durante el proceso de secado, mejorando la disminución de actividad de agua, no obstante, a mayores temperaturas se reportan menores actividades de agua debido a un gradiente de temperatura mayor.

En los proceso deshidratación, entre mayor temperatura de secado, mayor debería ser la extracción de agua libre, sin embargo, los resultados presentados contrarían esta afirmación, puesto que al haber reacciones y procesos de gelatinización del almidón, el agua libre con mayor fugacidad refleja una tendencia a reorganizarse y formar enlaces más fuertes, lo que aumenta el grado de interacción del agua con constituyentes sólidos, además, las bajas temperaturas de secado en los experimentos, no permiten la degradación de las estructuras moleculares del almidón para facilitar la extracción del agua ligada.

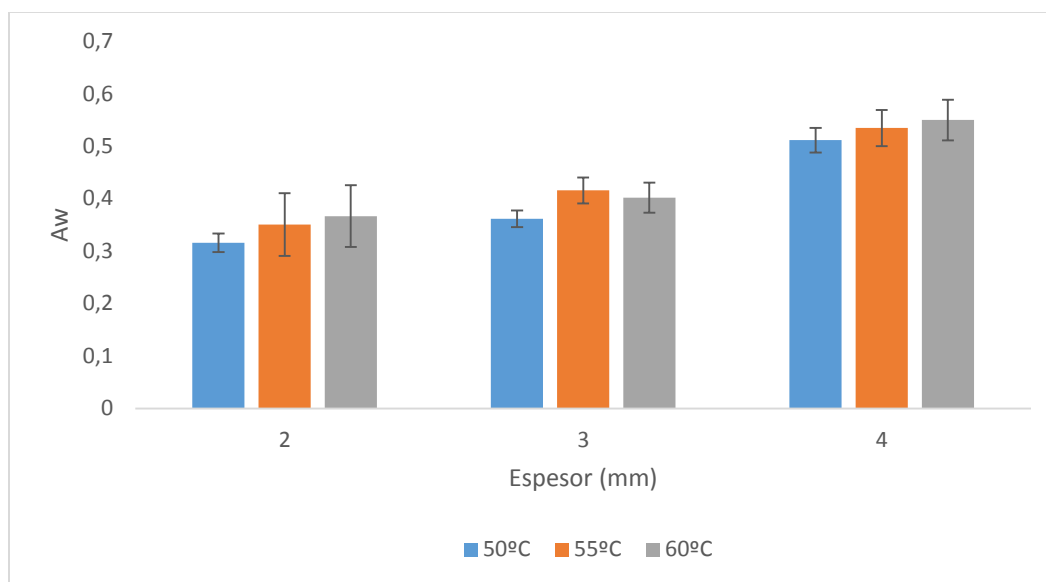


Figura 3. Efecto del espesor y temperatura en la actividad de agua

5.1.2. Relación entre el tiempo y las condiciones de secado

Se determinó la humedad inicial del producto antes de llevar a cabo el proceso de secado mediante bomba de calor, dando un valor promedio de $74 \pm 2\%$. Este valor es cercano al presentado por Jiménez (2005), que reporta un 75.1% de humedad inicial en arracacha; siendo coherente con los valores obtenidos experimentalmente. El proceso de secado mediante bomba de calor se realizó hasta alcanzar una humedad final del producto entre 8 y 12%, de acuerdo con la NTC 267.

De acuerdo con la Figura A3 que muestra el análisis de varianza de los resultados, se observa que el valor-P asociado a la interacción Espesor*Temperatura es inferior al nivel de significancia del 5%, lo cual indica que hay un efecto por parte de la interacción en la variable respuesta del tiempo de secado con respecto a la humedad requerida $10 \pm 2\%$.

La Figura A4 muestra la información agrupada por el método Tukey, la cual indica que estadísticamente hubo diferencias significativas entre los experimentos, obteniendo como mejor combinación (Espesor 2 mm, Temperatura 60°C – HR 10%) con un tiempo de secado aproximado de 2.3 horas y con una humedad dentro del rango requerido.

En la Figura 4 se muestra el tiempo de secado dependiendo del espesor en cada una de las temperaturas, a menor temperatura se necesitó mayor tiempo de secado para obtener una humedad del producto entre 8 y 12%, de igual manera, cuanto mayor sea el espesor, mayor tiempo de secado se requiere, debido a que la velocidad de difusión de la humedad hacia la superficie es menor (Cano & Viveros, 2009). Por otra parte, en alimentos ricos en almidón, ocurre gelatinización a temperaturas cercanas a 60°C, provocando la absorción de agua, ligándose a la estructura (Pineda *et. al.*, 2010). Al disminuir la temperatura después del secado, las moléculas de agua quedan atrapadas por las moléculas de almidón (Madriñan, 1988), provocando en las rodajas de arracacha una textura gelatinosa con dificultad para la extracción de almidón.

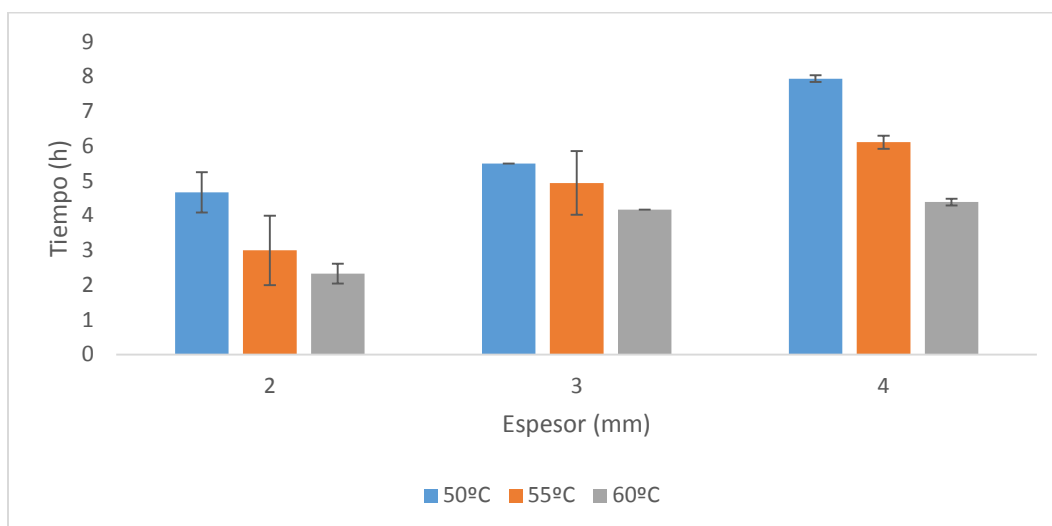


Figura 4. Efecto del espesor y temperatura en el tiempo de secado

De acuerdo con lo anterior, teóricamente las condiciones adecuadas para la extracción de almidón son el menor espesor (2 mm), la menor temperatura (50°C) y humedad relativa del 15%. Esta combinación presentó 4 horas de secado, ubicándose en la media de todas las combinaciones empleadas en los experimentos con respecto al tiempo de secado.

5.1.3. Extracción de almidón

Según la Figura A5 que muestra el análisis de varianza de los resultados, se observa que el valor-P asociado a la interacción Espesor*Temperatura es inferior al nivel de significancia del 5%, lo cual indica que hay un efecto de esta interacción sobre la variable respuesta de extracción de almidón.

En la Figura A6 se muestra la información agrupada por el método Tukey, en el cual las medias que no comparten las mismas letras son significativamente diferentes. En este caso se muestra estadísticamente que no hubo diferencias representativas entre 2 diferentes experimentos con porcentaje alto de extracción de almidón: (Espesor 2 mm, Temperatura 50°C – HR 15%) y (Espesor 3 mm, Temperatura 50°C – HR 15%). Sin embargo, matemáticamente existe una diferencia relevante la cual se muestra en la

Figura 5, donde los promedios de extracción de almidón fueron 80.3% y 72.6% respectivamente, dando como resultado que la mejor combinación de factores es (Espesor 2 mm, Temperatura 50°C – HR 15%).

En la Figura 5 se observa el efecto directo de los factores, a menor temperatura y menor espesor, mayor es el rendimiento de extracción de almidón, esto se debe a que la temperatura de gelatinización del almidón entre 49°C y 60°C reportada por Rodríguez *et al.* (2001) y Rodríguez *et al.* (2005), influye directamente en el rendimiento del secado y el tamaño de partícula postmolienda. Según Martín & López (2009) los pretratamientos termomecánicos realizados al almidón afectan la estructura del gránulo debido a la gelatinización y al tamaño de los polímeros que lo constituyen, dando como resultado la aglomeración de partículas irregulares de mayor tamaño, lo que afecta de forma directa la extracción de almidón y el paso por la luz de los tamices menores a 106µm.

La extracción de almidón vía seca se utilizó como parámetro de calidad para establecer un aproximado de la cantidad y el tamaño de partícula de la harina de arracacha con almidón no gelatinizado, y la eficiencia del secado con respecto a la incidencia de los factores del experimento.

De acuerdo con Cobana & Antezana (2007), el producto obtenido tiene mínimas diferencias con respecto al almidón obtenido por vía húmeda y puede considerarse como un almidón parcialmente modificado, debido al elevado contenido de azúcares, por lo que se puede concluir que durante el proceso de extracción existe hidrólisis parcial del almidón, debido al efecto de los tratamientos mecánicos y térmicos al que es sometido el producto.

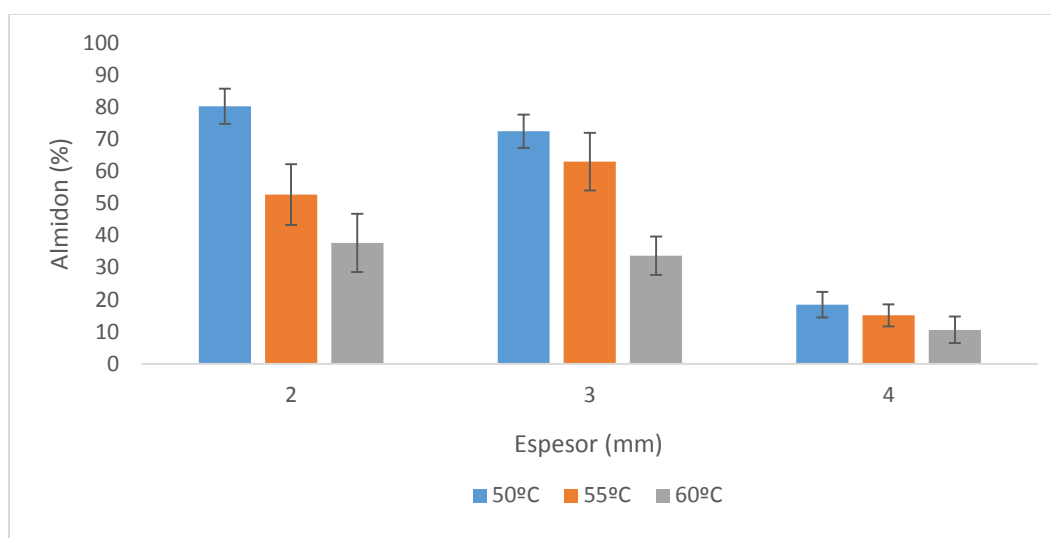


Figura 5. Efecto del espesor y temperatura en la extracción de almidón

Con respecto a los valores presentados por los parámetros de actividad de agua, relación del tiempo y las condiciones de secado, y la extracción de almidón, se determinó que el experimento con temperatura de 50°C, humedad relativa del aire de 15% y espesor de 2

mm, representan la mejor combinación con respecto a la estabilidad microbiológica y conservación de las propiedades nutricionales del producto.

5.1.4. Color

Los datos procesados del cambio total de color ΔE presentados en las Figuras 6, 7 y 8, fueron obtenidos antes y después del proceso de secado en bomba de calor.

En la Figura A7 que muestra el análisis de varianza de los resultados, se observa que los valores de P son superiores al nivel de significancia del 5%, lo que permite deducir que tanto los factores individuales (espesor y temperatura) como su interacción, no tienen efecto significativo sobre la variable respuesta de color.

La Figura A8 muestra la información agrupada por el método Tukey, en el cual estadísticamente las medias de todos los experimentos fueron significativamente iguales. Matemáticamente existe una diferencia la cual se muestra en la Figura 6, donde la combinación (Espesor 4 mm, Temperatura 50°C – HR 15%) obtuvo el menor ΔE : 6.6; no obstante, cabe aclarar que los resultados fueron muy variables y tuvieron un error de desviación estándar considerable.

Según Rojas & Duran (2011), el secado por convección degrada en gran proporción los parámetros de L^* , a^* y b^* ; en este proceso, la potencia de temperatura de secado es un factor que influye directamente en la degradación del color, lo cual es debido también al tiempo de exposición en el secado. Sin embargo, basados en los resultados obtenidos, no se puede inferir que el comportamiento del color depende directamente de la temperatura de secado o del espesor de la muestra.

Además de determinar el cambio de color después del secado del producto, se evaluó el comportamiento del cambio total de color de la harina de arracacha después de pasar por el proceso de molienda. En los resultados presentados en la Figura 7 se observa que no existe una tendencia clara entre el cambio de color según los diferentes factores y niveles de temperatura y espesor, esto puede deberse a que el oscurecimiento se da en mayor parte en la zona superficial de las rodajas de arracacha, por lo tanto, al realizar un proceso de reducción de tamaño y homogenización de la muestra, ésta no muestra diferencias significativas en el color según los diversos experimentos.

En la Figura 8 se muestran las diferencias de color, del mejor experimento sin pretratamiento (Espesor 2 mm, Temperatura 50°C – HR 15%) y el experimento con pretratamiento en ácido cítrico. Los comparativos del color se hicieron antes y después del proceso de secado en rodajas de arracacha, y después de molienda en la harina de arracacha. Se observa que no existieron diferencias considerables entre los experimentos, dando como resultado que el pretratamiento fue inviable, ya que la dilución de ácido cítrico influye directamente en la acidez y el pH de los alimentos, modificando así las características funcionales del almidón.

Realizando un comparativo entre los experimentos con y sin pretratamiento con ácido cítrico, en el caso específico de la luminosidad L^* se obtuvieron valores diferentes en las rodajas postsecado, sin embargo no existió diferencia considerable del color de la harina de arracacha postmolienda; por otra parte, los resultados de a^* y b^* presentaron variaciones considerables, no logrando evidenciar una influencia directa del espesor ni de la temperatura.

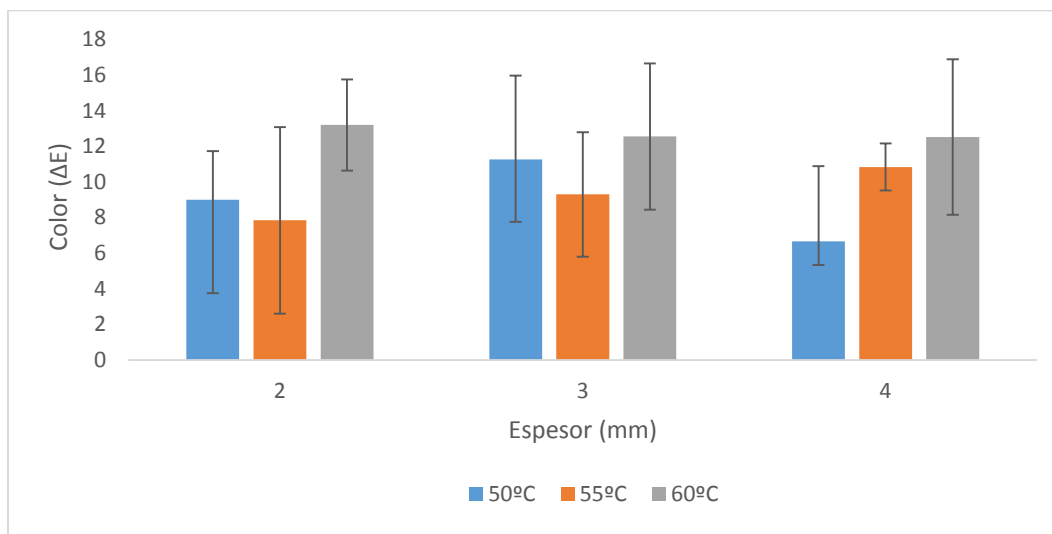


Figura 6. Efecto del espesor y temperatura en el cambio total de color ΔE , antes y después del proceso de secado

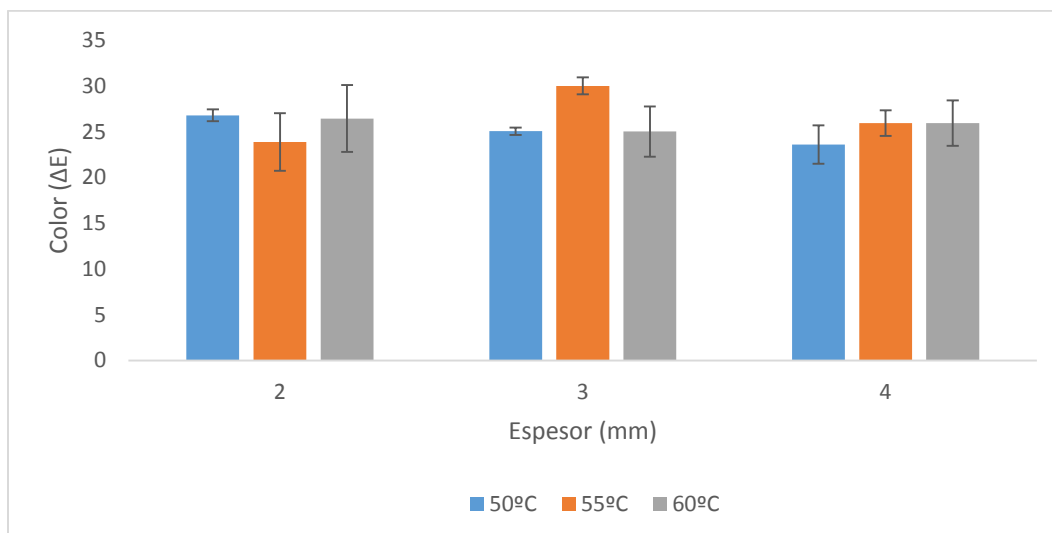


Figura 7. Efecto del espesor y temperatura en el cambio total de color ΔE , antes del proceso de secado y después de molienda

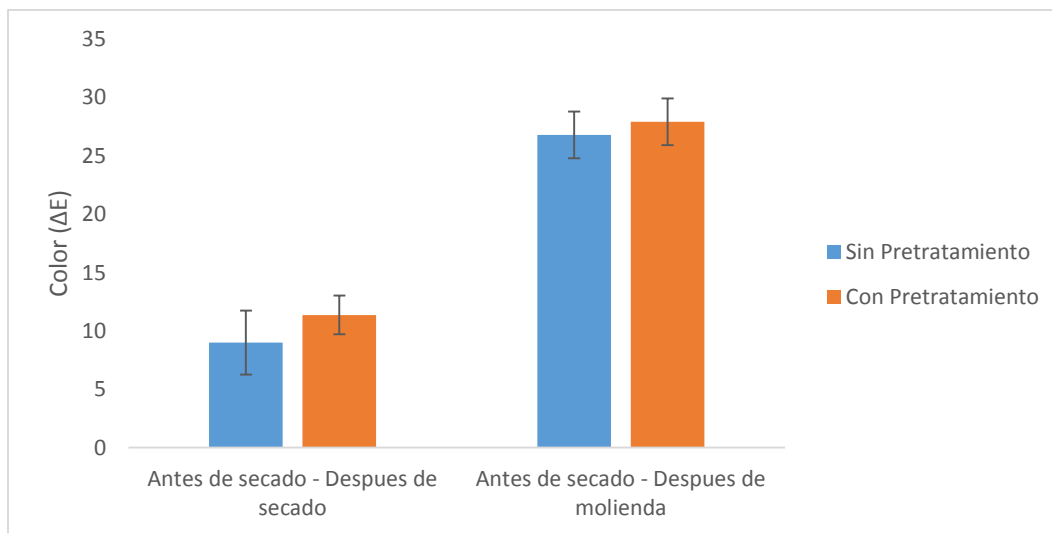


Figura 8. Efecto del pretratamiento con ácido cítrico en el cambio total de color ΔE

5.2. Parámetros de secado

Los parámetros de secado en bomba de calor se analizaron de acuerdo con los datos obtenidos en los parámetros de calidad de la arracacha.

5.2.1. Funcionamiento del equipo de bomba de calor (Dártico)

Durante el proceso de secado en bomba de calor, la extracción de humedad del aire de secado no es continua, el circuito del refrigerante entra en acción cuando el aire se satura y cambia sus condiciones iniciales (aumenta un $5 \pm 1\%$ su humedad relativa y desciende su temperatura en $5 \pm 1^\circ\text{C}$), posteriormente el aire vuelve a sus características iniciales debido a la extracción de humedad por medio del condensador. El circuito se activa inicialmente durante aproximadamente una hora ocasionado la extracción del 35% al 40% de la humedad total del producto, debido a que la transferencia de masa es más rápida y el aire se satura constantemente, no obstante, posterior a este punto, el circuito del refrigerante entra en acción cada 10 minutos, que es el tiempo en el que el aire de secado se satura, aumentando su humedad relativa en $5 \pm 1\%$.

En la Figura 9 se presentan las relaciones entre las propiedades psicométricas del aire de los diferentes experimentos de secado; entre el punto 1 y 2 se muestra la temperatura de 60°C y humedad relativa de 10%, entre el punto 3 y 4 la temperatura 55°C y humedad relativa de 12.5%, y en entre el punto 5 y 6 la temperatura de 50°C y humedad relativa de 15%, de acuerdo con el comportamiento de la bomba de calor, el aire de secado cambia de condiciones durante el proceso, siendo un proceso cíclico en donde la humedad relativa del aire es inversamente proporcional a la temperatura del aire.

De acuerdo con la Figura 9 realizada por medio del Software Psychrometric Chart (1996), la transferencia de masa con respecto a la variación de W (kg de agua /kg de aire seco), es menor a temperaturas más bajas, sin embargo, el experimento de temperatura 50°C, humedad relativa de 15% y espesor 2 mm mostró mayor uniformidad en el secado.

En la Figura A9, se muestra el equipo de bomba de calor (Dártico). Por otro lado, en la Figura A10 se muestra el esquema de los circuitos de aire y de refrigeración de la bomba de calor tomado de Colak & Hepbasli (2009).

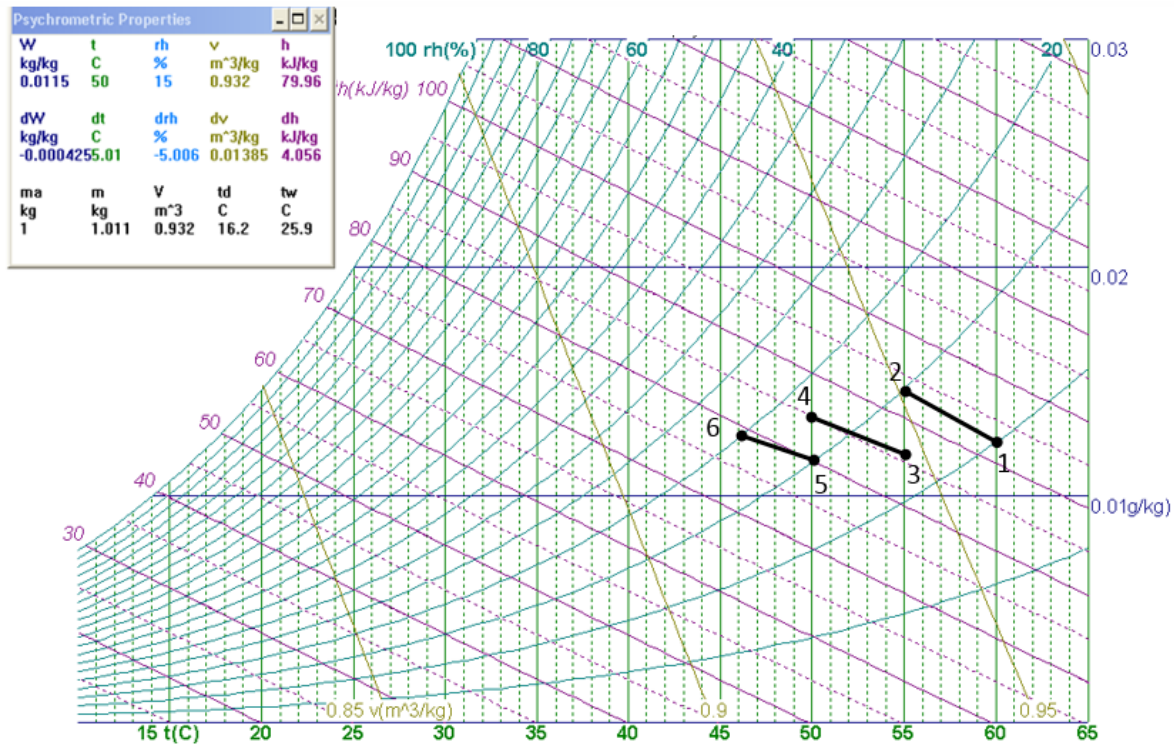


Figura 9. Propiedades psicrométricas del aire de secado

5.2.2. Cinéticas de secado

Las Figuras 10, 11 y 12, presentan las cinéticas de secado a diferentes temperaturas, para espesores 4 mm, 3 mm y 2 mm respectivamente, las cuales variaron entre tiempos de 2.5 y 8 horas para alcanzar una humedad final de $10 \pm 2\%$ (b.h). Existe una influencia directa de la temperatura de secado y espesor de la muestra sobre la velocidad y el tiempo de secado. A mayor temperatura y menor espesor, mayor velocidad de secado y menores tiempos de proceso.

En la Figura 12, se muestran las cinéticas de secado para muestras de 2 mm de espesor. Aunque con las temperaturas de 55°C y 60°C, se obtuvieron menores tiempos de secado, esto no garantizó mayor eficiencia en la extracción de almidón ni reducción de a_w , por lo cual se escogió la combinación de 50°C de temperatura, humedad relativa de 15% y 2 mm de espesor para establecer la curva de velocidad de secado y los coeficientes de difusividad efectivos.

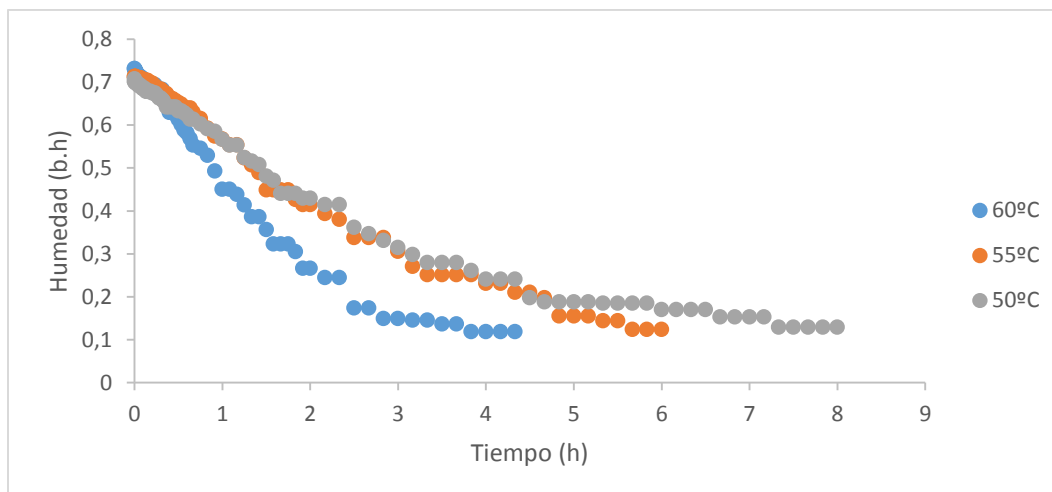


Figura 10. Cinéticas de secado para espesor de muestra 4 mm

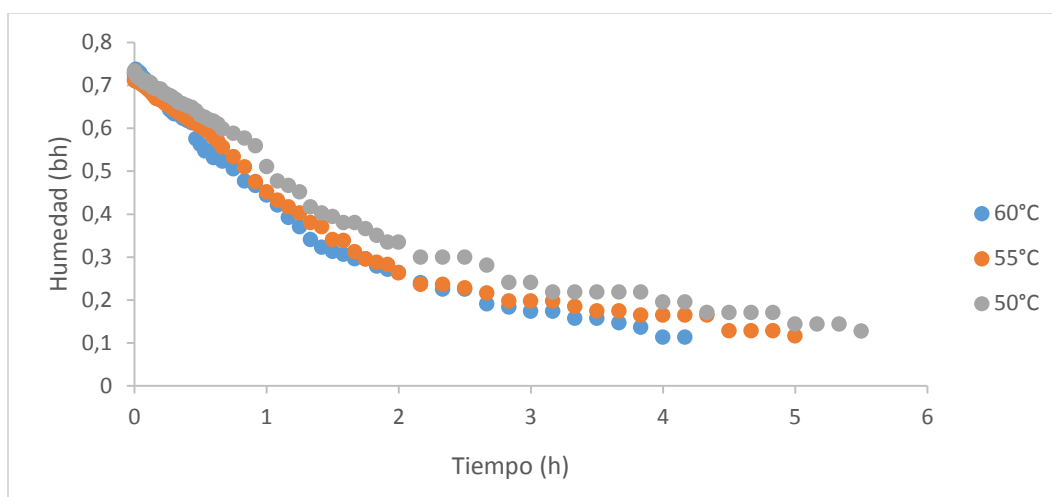


Figura 11. Cinéticas de secado para espesor de muestra 3 mm

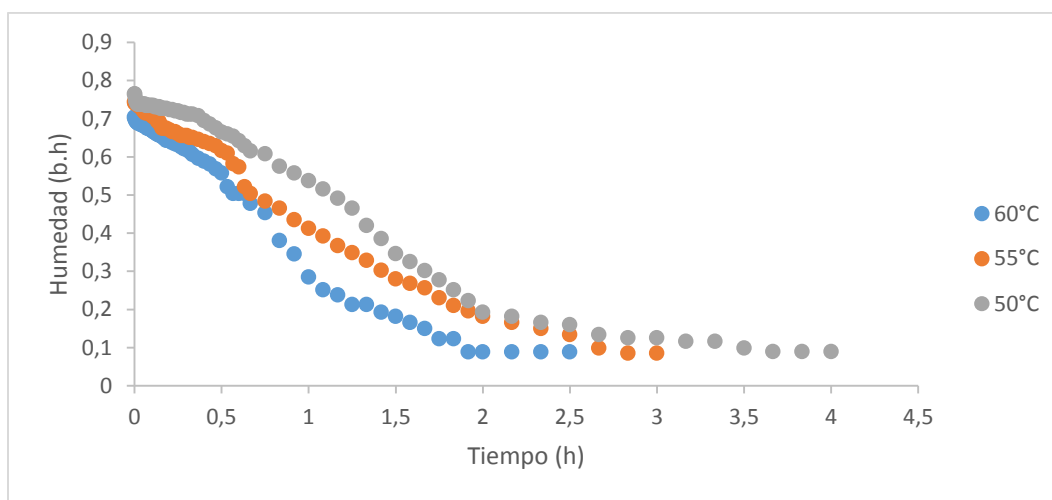


Figura 12. Cinéticas de secado para espesor de muestra 2 mm

5.2.3. Velocidad de secado

La Figura 13 muestra la curva experimental de secado para arracacha a condiciones de 50°C de temperatura, 15% de humedad relativa y 2 mm de espesor, siendo estas las mejores condiciones obtenidas experimental y estadísticamente.

El medio de secado trabajó a condiciones de humedad relativa de 15%, la cantidad de rodajas a secar en promedio fue de 238 unidades y abarcó un área total de 38 cm². La humedad inicial de la arracacha fue del 0.704 (b.h). Mediante la cinética de secado se determinó la humedad en equilibrio; obteniendo un valor de 0.047 (b.h). La humedad libre se calculó para cada tiempo empleando la Ecuación 3. Esta humedad libre inicial dio un valor de 2.33 hasta un valor de 0.014 (b.s) después de 4 horas de secado.

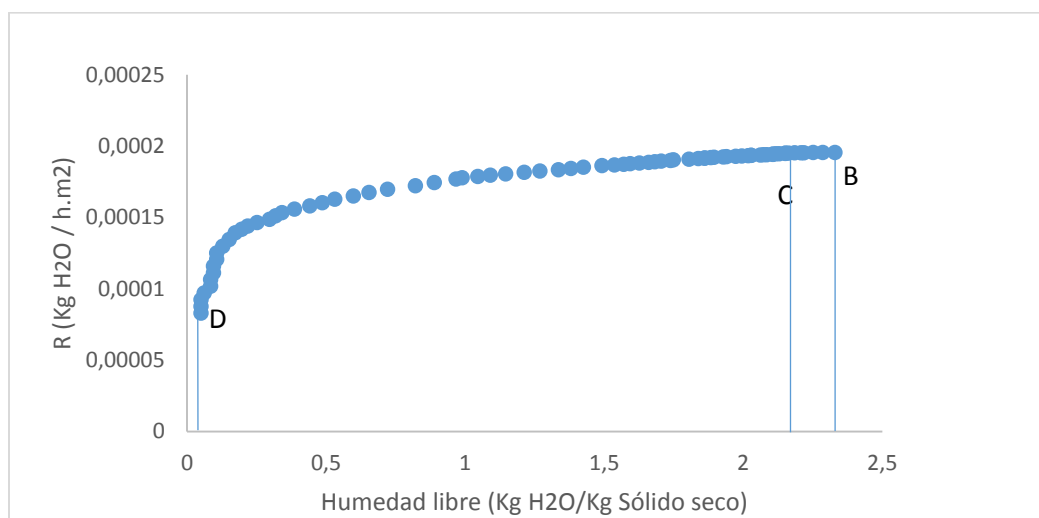


Figura 13. Curva velocidad de secado en arracacha

En la curva de velocidad para las condiciones de secado evaluadas. Entre los puntos B y C ocurre el secado a velocidad constante, en el cual se empleó la Ecuación 6, obteniendo un tiempo de velocidad constante de 0.027 horas. Esta etapa se caracteriza por la evaporación de un contenido importante de agua no ligada, la temperatura permanece constante en la superficie y alcanza el valor de la temperatura del bulbo húmedo del aire, en un promedio de 51.5°C (UNAD, 2001). El agua se evapora tan pronto llega a la superficie y recibe el calor necesario para su cambio de fase, este periodo finaliza al alcanzar la humedad crítica de 2.19 (b.s); humedad crítica determinada, identificada en la gráfica por el punto C.

Al final del periodo de secado a velocidad constante se empieza a observar puntos secos en la superficie de las rodajas y esto es debido a que ya no hay saturación. Entre los puntos C y D de la Figura 13. La capa superficial de agua ya se ha evaporado completamente y la velocidad de secado estará controlada por la velocidad de movimiento de la humedad al interior de las rodajas de arracacha (Treybal, 1988). Esta etapa se conoce como primer periodo de velocidad decreciente y constituye la fase más larga del secado. En este periodo los factores más importantes a tener en cuenta son la

temperatura del aire 50°C, humedad relativa del aire 15% y el espesor del lecho del alimento de 2 mm. De esto depende la velocidad en el secado.

Entre los puntos D y E la velocidad de secado es controlada principalmente por el flujo de humedad al interior de las rodajas de arracacha y ya no depende de las condiciones externas en el secador de bomba de calor. Los fenómenos presentes son la difusión de líquido, el movimiento capilar y la difusión de vapor. Esta fase finaliza al alcanzarse la humedad de equilibrio en el punto E, en donde la velocidad de secado llega a ser nula (Treybal, 1988).

El tiempo de velocidad decreciente o tiempo postcrítico se calculó mediante la Ecuación 7, dando un valor de 3.4 horas como tiempo de velocidad de secado decreciente en el primer tramo, entre los puntos C y D. El tiempo en el segundo tramo de velocidad decreciente entre D y E no se determinó debido a que el tiempo para calcular la humedad en equilibrio supera las 4 horas de secado.

5.2.4. Coeficientes de difusividad efectiva

El coeficiente de difusividad efectiva de agua (De) calculado para el tiempo de velocidad de secado decreciente fue de $1,9071 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, a partir de los datos de la cinética de secado a temperatura de 50°C, humedad relativa 15%, espesor de 2 mm y tiempo de secado de 3,9 horas. Según el estudio realizado por Montes *et al.* (2008), se encuentran en el rango que presentan los tubérculos a la temperatura el tratamiento de 50°C. Sin embargo, el rango que presentan la mayoría de alimentos esta entre 10^{-9} a $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ (Madamba *et al.*, 1996) a temperaturas inferiores de 50°C; esto se debe a la influencia de la temperatura, cuando hay aumento provoca mayor movilidad de las moléculas de agua, aumentando la difusividad y disminuyendo la resistencia interna a la transferencia de materia (Clemente, 2003).

5.3. Parámetros característicos de la harina de arracacha

Se realizaron pruebas adicionales a la harina de arracacha del mejor experimento (Espesor 2 mm, Temperatura 50°C – HR 15%), con el fin de realizar una caracterización y mostrar la funcionalidad del almidón de arracacha como indicativo de calidad, después de pasar por los procesos de secado, molienda y tamizado.

5.3.1. Índice de absorción, índice de solubilidad y poder de hinchamiento

En la Tabla 6 se reportan los valores promedios del índice de absorción (IAA), índice de solubilidad (ISA) y poder de hinchamiento (PH) de tres muestras de harina de arracacha, con procesos de cocción realizados a diversas temperaturas, verificando su comportamiento reológico en medio acuoso. Los índices de IAA, ISA y PH se pueden utilizar como un indicativo del grado de modificación de los almidones por tratamientos termomecánicos (Rodríguez *et al.*, 2012).

Los resultados muestran la influencia directa de la temperatura de cocción con los diferentes parámetros. En primer lugar, el ISA se incrementa con respecto la temperatura de cocción, esto puede deberse a una fracción mínima de gránulos de almidón gelatinizados en el proceso de secado. Las propiedades del almidón pueden ser notablemente cambiadas por medio de la modificación mecánica del gránulo. Si la energía mecánica durante la deformación es suficiente para romper los enlaces covalentes, el almidón pasa por estados intermedios, de ser una sustancia insoluble en agua fría hasta ser un material soluble en agua fría (Cobana & Antezana, 2007). Lo que corrobora la diferencia de porcentajes de solubilidad entre las temperaturas de cocción por debajo y encima del rango de gelatinización del almidón de arracacha. Esto indica que hubo un grado de modificación en las características del almidón, permaneciendo con parte de las propiedades funcionales después de los tratamientos termomecánicos.

En segunda instancia el IAA y el PH aumentan con el incremento de la temperatura, mostrando comportamientos similares reportados por Rodríguez *et al.* (2012), que dice que la gelatinización causa un incremento en el poder de hinchamiento, no obstante, estos valores tienen un punto de quiebre en la temperatura de 60°C en donde vuelven a disminuir, posiblemente por la degradación del almidón a causa de las altas temperaturas. Según Rodríguez *et al.* (2006), la reducción de estos índices se pueden explicar probablemente porque parte del material solubilizado, entre los que se destacan moléculas de amilosa, interaccionan entre sí para formar otra estructura, lo cual impide la absorción de agua y por consiguiente reduce el poder de hinchamiento.

El ISA y el IAA son parámetros que muestran la magnitud de la interacción entre las cadenas de almidón dentro de las secciones amorfas y cristalinas. Estas interacciones se afectan por la relación amilosa/amilopectina y sus características (Rodríguez *et al.*, 2012).

Por consiguiente, entre más deformación tengan los gránulos de almidón debido a la gelatinización, aumentará el grado de solubilidad, y por tanto, disminuirá el índice de absorción. Lo anterior no coincide con los datos presentados, esto posiblemente se debe a que algunos gránulos de almidón pudieron tener un grado de gelatinización a temperaturas bajas, proporcionando una mezcla de harina con almidón de arracacha con características no nativas, lo que ocasionó que la reducción del IAA se produjera después de alcanzar las temperaturas de degradación del almidón.

Rodríguez *et al.* (2012) presentaron valores comparables de IAA y PH en harinas de papa, trigo y quínoa; así mismo, antecedentes de extracción de almidón de yuca por vía seca y húmeda exhibidas por Cobana & Antezana (2007), presentaron equivalencias con los índices de solubilidad de la harina de arracacha.

Tabla 6. Índices de solubilidad, absorción y poder de hinchamiento en harina de arracacha

Temperatura	IAA	ISA (%)	PH
30°C	2.34 ± 0.1	24.55 ± 3.1	3.39 ± 0.1
40°C	2.55 ± 0.4	32.38 ± 2.5	3.46 ± 0.7
60°C	4.01 ± 1.1	64.23 ± 4.1	9.91 ± 0.7
70°C	2.46 ± 0.1	73.81 ± 2.6	9.41 ± 0.5

5.3.2. Viscosidad aparente

El almidón de arracacha está compuesto con valores superiores al 95% de amilopectina, y de acuerdo con Cobana & Antezana (2007), los productos con mayor contenido de amilopectina resultan más adhesivos y se aprovechan como espesantes y estabilizantes. Se escogieron temperaturas antes y después del punto de gelatinización del almidón de arracacha, con el objetivo de evaluar las diferencias entre los tratamientos térmicos de cocción en agua, ya que a mayor temperatura los almidones nativos aumentan su viscosidad y poder de hinchamiento.

En las Figuras 14 y 15 se comparan las viscosidades aparentes y esfuerzos de corte con respecto al tiempo, de las suspensiones de harina de arracacha preparadas a diferentes temperaturas. El comportamiento de los pares de temperaturas 30°C-40°C y 60°C-70°C son similares a velocidades de corte superiores a 10 s⁻¹.

Se observa un incremento de la viscosidad y del esfuerzo de corte con respecto a la temperatura. Sin embargo, al igual que el comportamiento del IAA y el PH, existe un punto de quiebre en la temperatura de 60°C, en el cual a una temperatura superior (70°C) disminuyen considerablemente estos parámetros. Esto se debe a que parte del material a temperaturas de degradación del almidón interaccionan entre sí para formar estructuras que cambian sus características físicas. Según Huang & Rooney (2001), la intensidad de la gelatinización depende de la temperatura y el contenido de humedad, es irreversible, aumenta el tamaño de los gránulos, y produce un incremento en la viscosidad de la suspensión, que varía con las condiciones de cocción y el tipo de gránulo de almidón.

Las curvas presentadas en la Figura 15, exponen comportamientos de fluidos pseudoplásticos. De acuerdo con Rodríguez *et al.* (2006), la curva del esfuerzo de corte versus la velocidad de corte comienza en el origen y es cóncava hacia arriba, por lo que un incremento en la velocidad de corte genera menor incremento en el esfuerzo de corte. Este comportamiento se debe probablemente al rompimiento de las unidades estructurales del alimento debido a las fuerzas hidrodinámicas generadas durante el corte (Rao, 1999).

Correa & Peña (2011) encontraron resultados similares de viscosidad aparente y esfuerzo de corte, en suspensiones de harina de arracacha y fécula de maíz con tratamientos termomecánicos. Con respecto a lo anterior, se puede considerar que el almidón de arracacha aún posee en gran proporción sus propiedades reológicas posterior a los tratamientos termomecánicos de la extracción por vía seca.

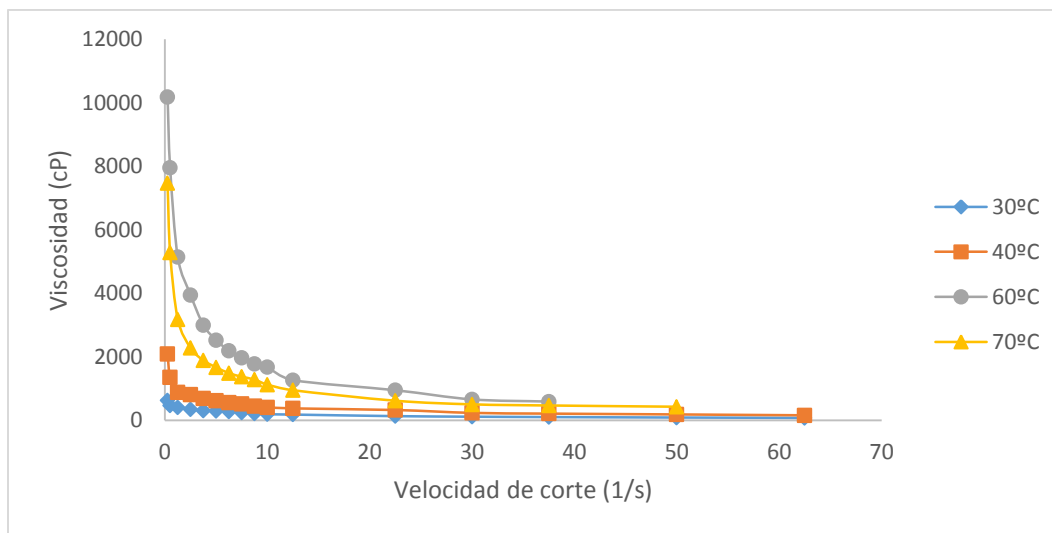


Figura 14. Viscosidad aparente de harina de arracacha cocida a diversas temperaturas

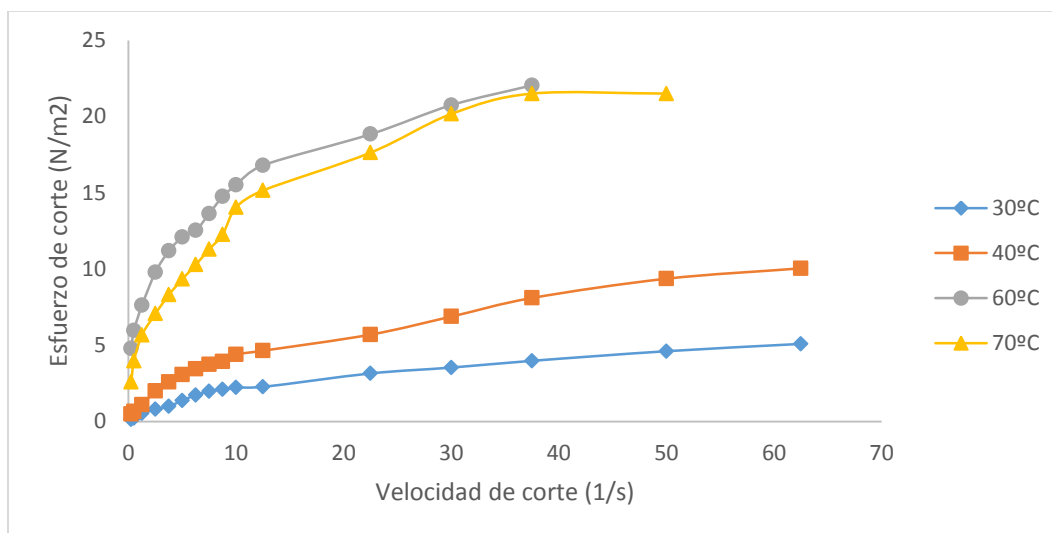


Figura 15. Relación entre la velocidad y el esfuerzo de corte de harina de arracacha cocida a diversas temperaturas

5.3.3. Microscopía

En la Figura 16 Se muestra las micrografías del almidón de arracacha tomadas en el microscopio LEICA II DM750 P con cámara digital y el software LAS EZ. Se realizó por triplicado de la muestra de secado a 50°C, humedad relativa del 15% y 2 mm de espesor, a una concentración de 1/100 de agua, almidón.

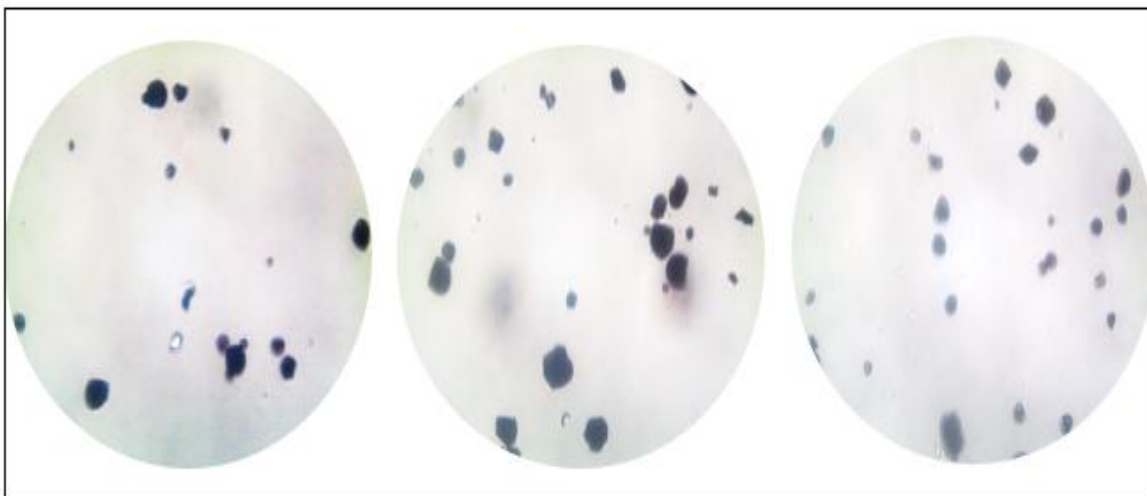


Figura 16. Micrográficas del almidón de arracacha (40x)

Según la Figura 16, el almidón de arracacha presenta una estructura irregular, de forma globular y poliédrica, después de llevar a cabo procesos de secado, molienda y tamizado. El tamaño de partícula de almidón de arracacha que se muestran en las micrográficas es una combinación de harina de arracacha extraída con micrometrías inferiores a 106 μm , 57 μm y 45 μm , con un promedio de 21.8%, 27.2% y 31.4% respectivamente del total de la muestra procesada, las muestras utilizadas en las micrográficas pasaron por las mallas de tamices No. 140, 270 y 325. Se encontró la mayoría de los gránulos de almidón quebrados, por lo cual no se midió el tamaño de la partícula. Estos resultados son comparables con los reportados por Rodríguez *et al.* (2005), que muestra valores de partícula de almidón de arracacha entre 16.38 μm y 35 μm .

Empleando el método en seco para la extracción de almidón se obtuvieron partículas de almidón quebradas, esto es debido al daño mecánico durante el proceso de molienda y el tiempo de duración en esta operación (30 minutos), ya que a medida que se aumenta el tiempo de molienda, la proporción de gránulos quebrados de almidón es mayor (Cobana & Antezana, 2007).

El daño provocado al almidón mediante la molienda en molino de bolas puede modificar considerablemente las propiedades funcionales, también al incrementar la humedad y tiempo de molienda se produce mayor daño en la estructura del almidón. Se recomienda este tipo de molienda para la aplicación en usos industriales como producción de alcohol, cosméticos y para almidón resistente (Beltrán, 2006).

La cantidad de almidón dañado afecta directamente la absorción de agua, formación de pasta y la reología de los productos elaborados con almidón, y esto a su vez ayuda a predecir la calidad del producto final (Acevedo *et al.*, 2011).

Las variaciones en el tamaño y forma de los gránulos del almidón de arracacha se atribuye al origen biológico, a las prácticas de cultivo, a la bioquímica del cloroplasto y amiloplasta y a la fisiología de la planta (Medina & Salas, 2007).

6. CONCLUSIONES

Las mejores condiciones de secado correspondieron a 50°C de temperatura del aire, 15% de humedad relativa del aire y 2 mm de espesor de la muestra, debido a que se alcanzó la menor actividad de agua y la mayor eficiencia en la extracción de almidón.

De acuerdo con los resultados obtenidos con respecto a la actividad de agua, de la mejor combinación de temperatura – humedad relativa y espesor (50°C – 15%, y 2 mm), se puede decir que el producto es estable microbiológicamente y frente a reacciones de pardeamiento

Desde el punto de vista de secado, los menores tiempos se obtuvieron a mayor temperatura y menor espesor. Sin embargo, esto no garantizó la mayor eficiencia en la extracción de almidón y reducción de la actividad de agua.

La evaluación del color reveló que los tratamientos termomecánicos incidieron directamente sobre el cambio total de color, sin embargo, no se observó una tendencia o influencia directa sobre la variación del color según los diferentes niveles de temperatura del aire de secado y espesor de la muestra.

Por último, se concluye que los tratamientos termomecánicos influyeron directamente en la funcionalidad del almidón de arracacha; el secado y la molienda prolongada, causan daños en el gránulo de almidón, fracturándolo y afectando parcialmente los índices de absorción de agua, solubilidad, poder de hinchamiento y viscosidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E., Moreno, Y., Vargas, G., Pérez, L.,** *“Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: morfología del almidón”*. México, 2011. Pág. 4.
- Adarve, M., Mejía L.,** *“Obtención y caracterización Físico-Química de almidón fermentado de Arracacha”*, Vitae, Colombia, 2012. Pág. 2.
- Akton Software,** *“Akton Psychrometric Chart”*, Engineering Software & Services Demo, Akton Associates Inc., 1996.
- Albano, K., Franco, C., Telis, V.,** *“Rheological behavior of Peruvian carrot starch gels as affected by temperature and concentration”*, Food hydrocolloids, Vol. 40, 2014. Pág. 30-43.
- Anderson, R.A., Conway, V.F., Pfeifer, V.F. y Griffin, E.L.,** *“Gelatinization of corn grits by roll – and extrusion – cooking”*, Cereal Science Today, Vol.14, 1969. Pág. 4-12.
- Armijo, I.,** *“Determinación de humedad, método de estufa de aire”*, IDAL, 2011. Pág. 2-3.
- Badui D.S,** *“Química de los alimentos”*, Editorial Alhambra Mexicana S.A., “4ta Edición, 2006. Pág. 28-29.
- Barat, J.M.** *“Desarrollo de un modelo de la deshidratación osmótica como operación básica”* Tesis Doctoral, 1998. Pág. 5.
- Bello, J.,** *“Ciencia Bromatológica Principios generales de los alimentos”*, Ediciones Díaz de Santos S. A., Madrid-España, 2000. Pág. 179.
- Beltrán, O.** *“Estudio para la obtención de almidón de maíz por molienda seca y extracción de las proteínas”*. 2006. México. Pág. 81-82.
- Bourne, M. C.,** *“Food texture and viscosity: Concept and measurement”* San Diego: Academic Press, 2da edición. 2002. Pág. 73-87
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., Ball, S.,** *“Starch granules: Structure and biosynthesis”*, International Journal of Biological Macromolecules. Vol. 23, 1998. Pág. 85-112.
- Burgos, H., Pereda, C., Hashimoto, J., Robles, J.,** *“Arracacha”*, Gerencia regional de recursos naturales y gestión del medio ambiente, Trujillo-Perú, 2006. Pág.12-13.
- Cano, C., Viveros, J.G.,** *“Secado de guayaba y naranja empleando tecnología de ventana de refractancia”*, Tesis de grado, Universidad del Valle, 2009. Pág. 69-70.
- Cantwell M., Galen P., Mercado E.,** *“Induction of chilling injury in jicama (Pachyrhizus erosus) roots changes in texture, color and phenolics”*. Postharvest Biology and Technology, Vol. 25, 2002, Pág. 311-320.

Casassa, F., Sari, S., *“Aplicación del sistema CIELab a los vinos tintos. Correlación con algunos parámetros tradicionales”*, Revista Enológica N°III, 2006. Pág. 1-2.

Cengel, Y., *“Transferencia de calor y masa”*, 3er Edición, 2007. Pág. 777.

Chua K., Chou K., Hawlader M. N. A., *“Heat pump drying: recent Developments and future trends”*, Drying technology Vol. 20, New York, 2002. Pág. 2, 19.

Clemente, G., *“Efecto de la concentración en la cinética de secado de músculos de jamón”*. España. 2003. Pág 35.

Cobana M., Antezana R., *“Proceso de extracción de almidón de yuca por vía seca”*, Bolivian Journal of Chemistry, Vol. 24, 2007. Pág. 77-83.

Colak, N., Hepbasli, A., *“A review of heat-pump drying: Part 1 - Systems, models and studies”*, Energy Conversion and Management, Energy Conversion and Management, Vol. 50, Turquía, 2009. Pág. 2180-2186.

Correa, R., Peña, E. A., *“Efecto del secado con aire caliente en la calidad final de la harina de arracacha (Arracacia xanthorrhiza)”*, Tesis de grado, Universidad del Valle, 2011. Pág. 53-54.

Decagon, D., Inc., *“Aqualab, wáter activity meter”*, Manual de operación Aqualab Series 4TE, 2014. Pág. 2-5.

Deng, Y., Wang, Y., Yue, J., Liu, Z., Zheng, Y., Qian, B., Zhong, Y., Zhao, Y., *“Thermal behavior, microstructure and protein quality of squid fillets dried by far-infrared assisted heat pump drying”*, Food Control, Vol. 36, Shanghai-China, 2014. Pág. 102-110.

Erbay, Z., Hepbasli, A., *“Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying”*, Energy Conversion and Management, Vol. 78, 2014. Pág. 499-507.

España, A., Valencia, A., *“Efecto del secado asistido con bomba de calor sobre las características fisicoquímicas del Kiwi (Actinidia chinensis)”*, 2014. Pág. 10.

Fennema Owen R., *“Química de los alimentos”*, Editorial ACRIBIA, 3er Edición, 2010. Pág. 55.

Fito, P., Andrés, A.M., Barat, J.M., Albors, A.M., *“Introducción al secado de alimentos por aire caliente”*, Editorial Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España, 2001. Pág. 8.

García, M., Rugel, J., Rodríguez, E., Vargas, E.M., *“Aprovechamiento de cilantro (Coriandrum sativum) y perejil (Petroselinum crispum) aplicando procesos combinados de deshidratación”*, Resultados de investigación Vol. 3 No. 2, Programa de Ingeniería de Alimentos, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2010. Pág. 20-21.

Geankoplis, C.J., *“Procesos de transporte y principios de proceso de separación (Incluye operaciones unitarias)”*, Compañía editorial continental S. A., Cuarta edición, México, 1998. Pág. 573, 589.

Gungor, A., Erbay, Z., Hepbasli, A., *“Exergetic analysis and evaluation of a new application of gas engine heat pumps (GEHPs) for food drying processes”*, Applied Energy, Vol. 88, Riyadh-Arabia Saudi, 2011. Pág. 882-891.

Hawladar M. N. A., Perera Conrad O., Tian Min, *“Properties of modified atmosphere heat pump dried foods”*, Journal of Food Engineering, Vol. 74, 2006. Pág. 392-401.

Hepbasli, A., Colak, N., *“A review of heat-pump drying (HPD): Part 2 - Applications and performance assessments”*, Energy Conversion and Management, Vol. 50, Turquía, 2009. Pág. 2187-2199.

Heredia, A., Jiménez, A.J., Fernández J., Bolaños Guzmán, Guillen, R., Rodríguez Arcos R., *“Fibra Alimentaria”*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid-España, 2003. Pág. 59.

Herrera, C., Bolaños, N., Lutz, G., *“Química de alimentos, Manual de laboratorio”*. Costa Rica. 2003. Pág. 5.

Huang, D.P., Rooney, L.W., *“Starches for snack foods. Snack foods processing”*, Technomic Publishing Company, Inc., 2001. Pág. 115-130.

Ibarz, A., Barbosa, G., *“Operaciones unitarias en la Ingeniería de alimentos”*. 2011. Pág. 593-594.

INIAP, *“Arracacia xanthorrhiza; zanahoria blanca en Ecuador”*, Biblioteca Universidad Central del Ecuador Facultad de Ciencias Agrícolas, Publicación Miscelánea. No. 67, Editorial DINAREF, Quito-Ecuador, 1999.

Jin Goh Li, Othman Mohd Y, Mat Sohif, Ruslan Hafidz, Sopian Kamaruzzaman, *“Review of heat pump systems for drying application”*, Renewable and Sustainable Energy Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, Malaysia, 2011. Pág. 4788-4796.

Jiménez, F., *“Características nutricionales de la Arracacha (Arracacia Xanthorrhiza) y sus perspectivas en la alimentación”*, Lima-Perú, 2005. Pág. 9.

López A., Virseda P., Abril J., *“Modelización de la cinética de secado de patata cortada en láminas”*, 1993. Pág. 1-2.

Madamba, P.S., Griscoll, R.H., Buckle, K.A. *“The thin-layer drying characteristics of garlic slices”*. 1996. Pág. 29.

Madriñan, C. *“Química de los alimentos”*, Colombia, 1988. Pág. 63, 145.

Martin Jenny C., López Elizabeth, *“Modificación física del almidón de yuca y evaluación de la susceptibilidad a la hidrólisis enzimática por una alfa amilasa”*, Revista Colombiana de Química, Vol. 38, 2009. Pág. 1.

Medina J., Salas J., *“Caracterización morfológica del gránulo de almidón nativo: Apariencia, forma, tamaño y distribución”*, Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes, 2007. Pág. 5,56-62.

Mendoza C. Fernando A., Arteaga M. Margarita, Pérez S. Omar, *“Efecto del secado por aspersión en las características fisicoquímicas de un producto a base de lactosuero”*, Grupo de investigación en procesos agroindustriales, Universidad de Córdoba, 2014. Pág. 1.

Montes, E., Torres, R., Andrade, R., Pérez, O., Marimon, J.L., Meza, I.I., *“Modelado de la cinética de secado de ñame en capa delgada”*. 2008. Pág. 6.

Morales Güeto Juan, *“Tecnología de los materiales cerámicos”*, Ediciones Díaz de Santos, 2005. Pág. 245.

Morillo E., Second G., Pham J. L., Risterucci A. M., *“Development of DNA microsatellite markers in the Andean root crop arracacha: Arracacia xanthorrhiza Banc. (Apiaceae)”*, Academic Search Premier, 2004. Pág. 1.

NTC 267, *“Harina de trigo”*. Colombia 2007.

Nunes, L., Finger, L.F., Miranda, J., Drummond, T., Marques, L., *“Peroxidase activity in roots of arracacha affected by pH and temperature”* Academic One File, 2011, Pág. 1.

Orrego C.E., *“Procesamiento de alimentos”*, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 1ª Edición, Colombia, 2003. Pág. 175.

Ortiz B., *“Secado con bomba de calor para la deshidratación de frutos”*, Universidad de las Américas, Puebla-México, 2003. Pág. 5.

Pineda, P., Coral, D.F., Arciniegas, M.L., Rorales, A., Rodriguez, M.E., *“Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: Estudio por calorimetría diferencial de barrido”*. 2010. Pág. 4.

Rao, M.A. *“Rheology of fluid and semisolid foods: Principles and applications”*, Maryland: Aspen publications, 1ra. Edición. 1999. Pag.184-185.

Rea J., *“Arracacia xanthorrhiza en los países andinos de Sudamérica”*, IV Congreso internacional de cultivos andinos, Nariño-Colombia, 1984.

Reinoso, A., *“Evaluación de las pérdidas de calidad postcosecha de la zanahoria blanca”*, Ecuador, 2001. Pág. 7.

Rey, F.J., Velasco, E., *“Bombas de calor y energías renovables en edificio”*, Ediciones Paraninfo, S.A., Madrid-España, 2005. Pág. 13-15.

Rocca, P.D., *“Secado de alimentos por métodos combinados”*, Argentina, 2010. Pág. 40.

Rodríguez, G., García, H., Camacho, J.H., Arias, F.L., Vera, J.J., De la torre, F., *“La harina de Arracacha, Manual técnico para su elaboración”*, Colombia, 2001. Pág. 12.

Rodríguez, D., Espitia, M., Caicedo, Y., Córdoba, Y., Baena, Y., Mora, C. *“La harina de arracacha (Arracacia xanthorrhiza), Manual técnico para su elaboración”*, Corpoica en colaboración de PRONATTA, 2000. Pág. 3,10-17.

Rodríguez D., Espitia M., Caicedo Y., Córdoba Y., *“Caracterización de algunas propiedades fisicoquímicas y farmacotécnicas del almidón de arracacha (Arracacia xanthorrhiza)”*, Revista Colombiana de Ciencias Químico Farmacéuticas, N°2 Vol. 34, 2005. Pág. 140-146.

Rodríguez E., Lascano A., Sandoval G., *“Influencia de la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de quínoa y papa en las propiedades termomecánicas y de panificación de masas”*, Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica Vol. 15, 2012. Pág. 199-207.

Rodríguez E., Fernández A., AlcaláA., Ospina B., *“Reología de suspensiones preparada con harina precocida de yuca”*, Revista Ingeniería y Desarrollo Vol. 19, 2006. Pág.17-30.

Rojas, J., G. Aristizabal, A. Peñuela, C. Gómez, J. López & M. Chaparro, *“Caracterización de los productos hortofrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad”*, Feriva, 2004. Pag.213.

Rojas, T.R, Duran, O.D, *“Efecto del secado por microondas sobre el color de la papa criolla (Solanum phureja)”*, Revista Limentech Ciencia y Tecnología Alimentaria, Vol. 9 No. 2, 2011. Pag. 104-144.

Salazar, A., *“Evaluación y caracterización citogenética de 20 entradas ecuatorianas de zanahoria blanca, Cutuglahua-Pichincha”*, Trabajo de grado, Biblioteca Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas, Quito-Ecuador, 1997.

Santacruz Stalin, *“Caracterización de almidones de Arracacha xanthorrhiza, Canna edulis, Oxalis tuberosa y extraído de hojas de papa”*, Revista Boliviana de Química, Vol. 22, No. 1, 2005.

Serrano, S., *“Obtención de harina comestible a partir de los tubérculos de arracacha (Arracacia xanthorrhiza Bancroft)”*, Trabajo de grado, Universidad del Valle, Cali-Colombia, 1983. Pág. 5.

Sharma, S., Mulvaney, S., Rizvi, S., (2003): *“Ingeniería de alimentos. Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*, Editorial LIMUSA S.A., 2003. Pág. 216,224.

Steffe, J., *“Rheological methods in food process engineering”* Michigan: Freeman Press, 1996. Pág. 23

Torres, W. *“Diseño experimental para ingenieros clase 7”*. Universidad del Valle. Colombia. 2012.

Treybal, R., *“Operaciones de transferencia de masa”*, Segunda edición, 1988. Pág. 723.

Trusell, H., Saber, E., Vrhel, M. *“Color image processing”* IEEE Signal Processing Magazine 22, 2005. Pág. 14-22.

UNAD, *“Lección 32: Secado”*. Universidad Nacional abierta y a distancia. 2001.

Vallejo, J., *“Secado de pitahaya amarilla (Var. Hylocereus Selenicereus) mediante la técnica de hidrosecado y osmo-hidrosecado”* Facultad de ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Universidad Del Valle, 2010.

Van Blarcom A., Mason R. L., *“Low humidity drying of macadamia nuts”*, Proceedings of the 4th Australasian conference on tree and nut crops, 1988. Pág. 48-239.

ANEXOS

Tabla A1. Cinética bomba de calor

Tiempo (horas)	Muestra	Humedad (%)	Actividad de agua	Temperatura °C
0	1	0,7101	0,9065	24,86
	2	0,7175	0,8968	24,78
	3	0,7235	0,8984	24,85
0,25	4	0,6607	0,8917	24,95
	5	0,6742	0,8975	24,89
	6	0,7005	0,8925	24,89
0,5	7	0,5121	0,8696	24,95
	8	0,6095	0,8010	24,92
	9	0,5255	0,8500	24,90
1	10	0,1818	0,6991	25,09
	11	0,1492	0,6166	24,99
	12	0,3076	0,7634	24,85
2	13	0,1000	0,3916	25,23
	14	0,1111	0,3813	25,16
	15	0,1129	0,3862	25,10
3	16	0,0925	0,3648	25,15
	17	0,0909	0,3331	25,14
	18	0,0857	0,3724	25,13
4	19	0,0952	0,3407	25,16
	20	0,0634	0,3148	25,13
	21	0,1034	0,3089	25,15
5	22	0,0892	0,3231	25,15
	23	0,1014	0,3035	25,13
	24	0,0545	0,2388	25,14
6	25	0,0983	0,2646	25,15
	26	0,0666	0,2950	25,14
	27	0,0784	0,2677	25,16
7	28	0,0655	0,2823	25,13
	29	0,0555	0,2805	25,13
	30	0,1071	0,2639	25,09
8	31	0,0757	0,2735	25,14
	32	0,0740	0,2623	25,08
	33	0,0370	0,2654	25,10
9	34	0,0634	0,2438	25,15
	35	0,0793	0,2607	25,13
	36	0,0526	0,2904	25,15

10	37	0,0615	0,2843	25,14
	38	0,0666	0,2566	25,13
	39	0,0655	0,2404	25,11
11	40	0,0579	0,2455	25,14
	41	0,0727	0,2395	25,12
	42	0,0555	0,2409	25,10
12	43	0,0508	0,2491	25,13
	44	0,0508	0,2345	25,10
	45	0,0338	0,2421	25,14

General Linear Model: Aw versus Espesor. Temperatura

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Espesor	Fixed	3	2. 3. 4
Temperatura	Fixed	3	50. 55. 60

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Espesor	2	0,163716	0,081858	59,99	0,000
Temperatura	2	0,017311	0,008656	6,34	0,008
Espesor*Temperatura	4	0,003161	0,000790	0,58	0,682
Error	18	0,024563	0,001365		
Total	26	0,208751			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0369404	88,23%	83,00%	73,53%

Figura A1. Prueba ANOVA para actividad de agua

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Aw, Term = Espesor*Temperatura

Espesor*Temperatura	N	Mean	Grouping
4 60	3	0,550169	A
4 55	3	0,534889	A
4 50	3	0,511639	A B
3 60	3	0,460217	A B C
3 55	3	0,416011	B C D
2 60	3	0,363906	C D
3 50	3	0,361958	C D
2 55	3	0,351222	D
2 50	3	0,316081	D

Figura A2. Prueba Tukey para actividad de agua

General Linear Model: Tiempo (h) versus Espesor. Temperatura

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Espesor	Fixed	3	2. 3. 4
Temperatura	Fixed	3	50. 55. 60

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Espesor	2	35,755	17,8776	69,51	0,000
Temperatura	2	26,212	13,1060	50,96	0,000
Espesor*Temperatura	4	4,115	1,0288	4,00	0,017
Error	18	4,630	0,2572		
Total	26	70,712			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,507151	93,45%	90,54%	85,27%

Figura A3. Prueba ANOVA para tiempo de secado

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Tiempo (h), Term = Espesor*Temperatura

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Espesor*Temperatura	N	Mean	Grouping
4 50	3	7,94444	A
4 55	3	6,11111	B
3 50	3	5,50000	B C
3 55	3	4,94444	B C
4 60	3	4,38889	B C
3 60	3	4,16667	C D
2 50	3	4,00000	C D
2 55	3	3,00000	D E
2 60	3	2,50000	E

Figura A4. Prueba Tukey para tiempo de secado

General Linear Model: % Almidon versus Espesor. Temperatura

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Espesor	Fixed	3	2. 3. 4
Temperatura	Fixed	3	50. 55. 60

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Espesor	2	10595,5	5297,77	121,75	0,000
Temperatura	2	4004,4	2002,19	46,01	0,000
Espesor*Temperatura	4	1361,1	340,28	7,82	0,001
Error	18	783,2	43,51		
Total	26	16744,3			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
6,59635	95,32%	93,24%	89,48%

Figura A5. Prueba ANOVA para extracción de almidón

Tukey Pairwise Comparisons: Response = % Almidon, Term = Espesor*Temperatura

Espesor*Temperatura	N	Mean	Grouping
2 50	3	80,3767	A
3 50	3	72,6067	A
3 55	3	63,1333	A B
2 55	3	52,8167	B C
2 60	3	37,7700	C D
3 60	3	33,6867	D E
4 50	3	18,4133	E F
4 55	3	15,1300	E F
4 60	3	10,5900	F

Figura A6. Prueba Tukey para extracción de almidón

General Linear Model: Color versus Espesor. Temperatura

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Espesor	Fixed	3	2. 3. 4
Temperatura	Fixed	3	50. 55. 60

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Espesor	2	6,352	3,176	0,22	0,807
Temperatura	2	78,595	39,298	2,69	0,095
Espesor*Temperatura	4	39,859	9,965	0,68	0,614
Error	18	263,233	14,624		
Total	26	388,040			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,82414	32,16%	2,01%	0,00%

Figura A7. Prueba ANOVA para determinación de color

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Color, Term = Espesor*Temperatura

Espesor*Temperatura	N	Mean	Grouping
2 60	3	13,2024	A
3 60	3	12,5551	A
4 60	3	12,5250	A
3 50	3	11,2717	A
4 55	3	10,8412	A
3 55	3	9,3006	A
2 50	3	9,0034	A
2 55	3	7,8490	A
4 50	3	6,6604	A

Figura A8. Prueba Tukey para determinación color

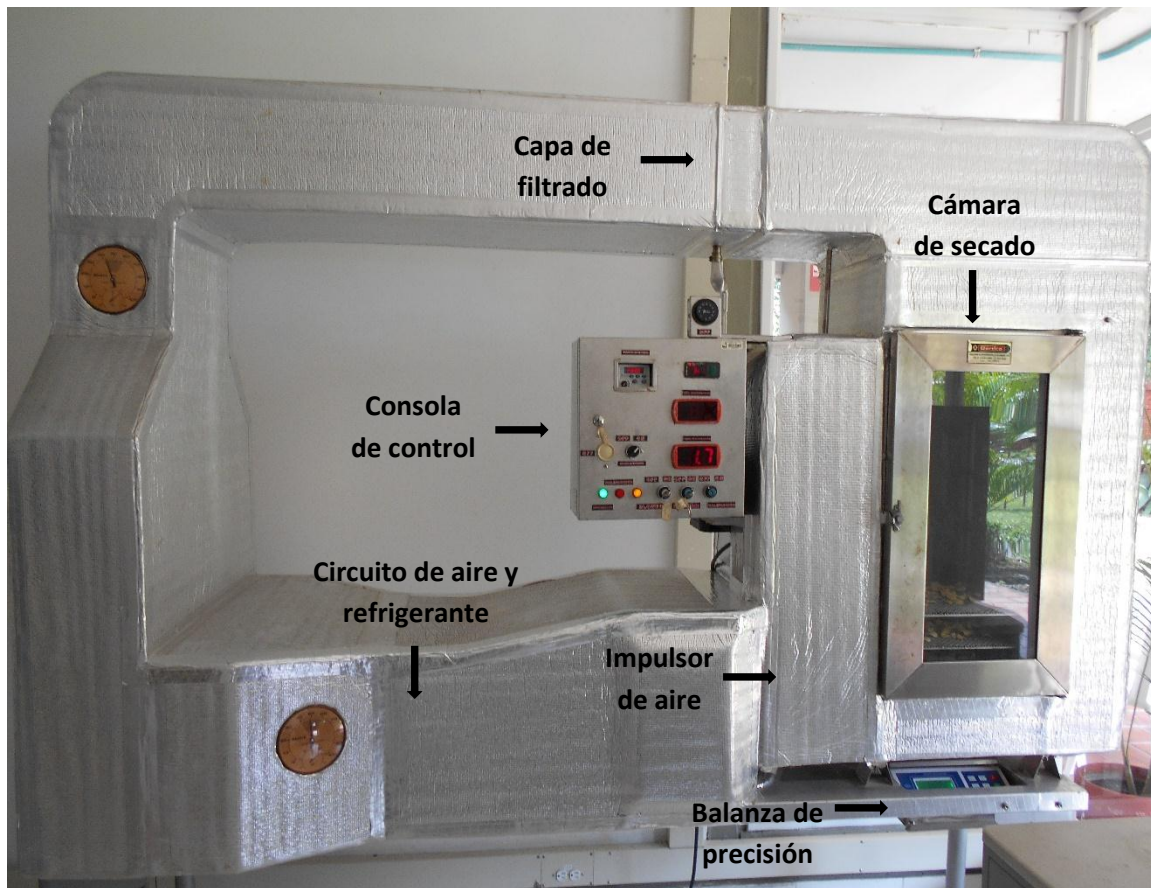


Figura A9. Secador asistido con bomba de calor (Dártico)

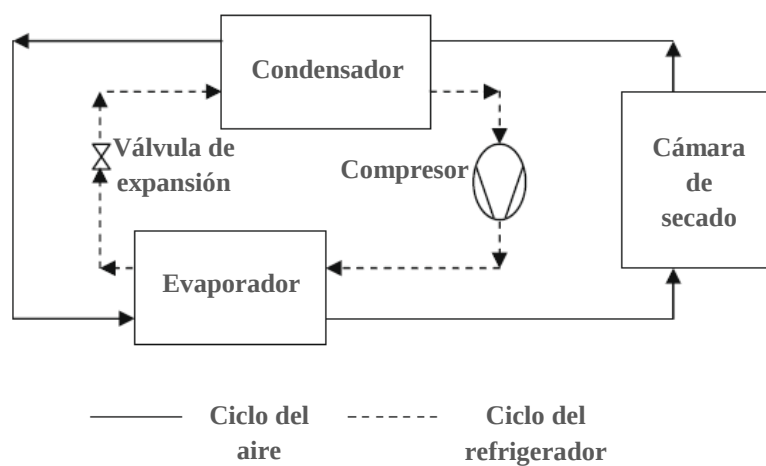


Figura A10. Esquema del sistema de bomba de calor