

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería de Alimentos



Una Institución Adventista

Determinación de la cinética de secado de semillas de papaya
(*carica papaya*) en un secador solar

Por:

Wendy Naddya Chuco Lazaro

Asesor:

Ing. Enrique Mamani Cuela

Juliaca, diciembre de 2016

Área temática: *otras ingenierías y tecnologías*

Ficha catalográfica elaborada por el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI) de la UPeU

TIA	Chuco Lazaro, Wendy Naddya
2	Determinación de la cinética de secado de semillas de papaya (carica papaya) en un
CH576	secador solar / Autora: Wendy Naddya Chuco Lazaro; Asesor: Ing. Enrique Mamani Cuela
2016	- Juliaca, 2016. 75 páginas: anexos, figuras, tablas.
	Tesis (Licenciatura) -- Universidad Peruana Unión. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. EP. Ingeniería de Alimentos, 2016. Incluye referencias y resumen. Campo del conocimiento: Ingeniería de Alimentos.
	1. Secado. 2. Modelamiento. 3. Papaya.

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Ing. Enrique Mamani Cuela, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería de Alimentos, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE SECADO DE SEMILLAS DE PAPAYA (*CARICA PAPAYA*) EN UN SECADOR SOLAR" constituye la memoria que presenta la Bachiller Wendy Naddya Chuco Lazaro para aspirar al título de Profesional de Ingeniero de Alimentos, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los veintitrés días del mes de noviembre del dos mil diecisiete.


Ing. Enrique Mamani Cuela

Determinación de la cinética de secado de semillas de papaya (*carica papaya*) en un secador solar

TESIS

Presentada para optar el título profesional de Ingeniero de Alimentos

JURADO CALIFICADOR



Dr. Augusto Pumacahua Ramos
Presidente



Ing. Ana Monica Torres Jiménez
Secretario



Ing. Lidelza Rebeca Azaña Vilca
Vocal



Ing. Nancy Curasi Rafael
Vocal



Ing. Enrique Mamani Cueta
Asesor

Juliaca, 15 de diciembre del 2016

DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación lo dedico a Dios y a mi madre. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mi madre Hedy Irma Lázaro Ateste, quien a lo largo de mi vida ha velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ella que soy lo que soy ahora.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A mí asesor Ing. Enrique Mamani Cuela, por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito.

A mi familia por su apoyo incondicional en todos estos 5 años de formación académica.

También me gustaría agradecer a mis docentes, Ing. Enrique Mamani Cuela, Dr. Augusto Pumacahua Ramos, Ing. Ana Mónica Torres Jiménez, Ing. Nancy Curasi Rafael, por sus consejos, su enseñanza y más que todo por su amistad.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	14
1.1. Objetivo General.....	16
1.2. Objetivos Específicos	16
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Papaya (<i>Carica Papaya</i>).....	17
a) Composición química	17
2.2. Secado de semillas de papaya	20
2.3. Tipos de secadores	23
2.3.1. Secadero de dos plantas.....	23
2.3.2. Secadero de cabina, bandejas o compartimentos	24
2.3.3. Secadero de túnel	24
2.3.4. Secadero de transportador	25
2.3.5. Secadero de tolva	25
2.3.6. Secadero de lecho fluidizado.....	25

2.4. Transferencia de calor y material.....	28
2.5. Cinética de secado	31
2.6. Modelo Matemático	36
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	38
3.1. Lugar de ejecución	38
3.2. Materiales.....	38
3.2.1. Materia prima.....	38
3.2.2. Materiales de proceso.....	38
3.2.3. Materiales de Laboratorio	38
3.2.4. Equipos.....	39
3.3. Metodología Experimental.....	39
3.3.1. Descripción del Diagrama de Flujo.....	40
3.3.2. Curva de secado y modelamiento matemático.....	41
3.3.3. Análisis de Humedad (AOAC, 925.10, 1990)	45
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	46
4.1. Curvas y tiempos de secado.....	46
4.2. Ajuste de modelos teóricos de secado.....	48
4.3. Humedad inicial del fruto.....	58
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
5.1. Conclusiones	60
5.2. Recomendaciones	60
REFERENCIAS	62
ANEXOS.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición de la papaya	20
Tabla 2 Tratamiento de secado	41
Tabla 3 Modelos matemáticos	42
Tabla 4 Tiempos (cada 30 min)	47
Tabla 5 Constantes obtenidas para el modelo Lewis	48
Tabla 6 Constantes obtenidas para el modelo Page	50
Tabla 7 Constantes obtenidas para el modelo Hend-Pab	51
Tabla 8 Constantes obtenidas para el modelo Logaritmico.....	52
Tabla 9 Constantes obtenidas para el modelo Midilli	53
Tabla 10 Constantes obtenidas para el modelo Aprox diff	54
Tabla 11 Constantes obtenidas para el modelo Peleg	55
Tabla 12 Ajuste de modelos matemáticos para el secado	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de deshidratacion en capa delgada (Dominguez, 1983).....	27
Figura 2. Curva de secado a 50°C (Zuñiga, 2010)	28
Figura 3. Humedad en base seca en función del tiempo (Ramírez, 2009)	32
Figura 4. Diagrama de flujo para el secado de Semilla de Papaya (Carica Papaya)	40
Figura 5. Tiempo para tratamiento sin goma y con goma	48

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A - Tiempo	67
Anexo B - Constantes obtenidas para el modelo Lewis	68
Anexo C - Constantes obtenidas para el modelo page	68
Anexo D - Constantes obtenidas para el modelo Hend-Pab	69
Anexo E - Constantes obtenidas para el modelo Logaritmico	69
Anexo F - Constantes obtenidas para el modelo Midilli	70
Anexo G - Constantes obtenidas para el modelo Aprox diff	70
Anexo H - Constantes obtenidas para el modelo Peleg	71
Anexo I - Metodología experimental del secador solar	72
Anexo K - Fotografías	73

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue analizar la cinética de secado de las semillas de papaya en un secador tipo cajón, los que fueron colocadas sobre una bandeja de acero con un peso de 231 g. Se realizó las medidas de la temperatura y la masa las semillas de papaya (Carica Papaya) en una balanza digital. Se determinó la humedad inicial de las semillas por el método estándar (105 °C/24h).Seguidamente se determinó las humedades durante el secado por diferencia de masa a cada 30 min; las humedades durante el secado fueron ajustados, mediante la herramienta Solver de Excel (Windows 2010), a modelos exponenciales. Estos modelos fueron: Lewis, Page, Herderson-Pabis, Logaritmico, Midilli, Aprox, dif,, Midilli, Peleg . Para verificar cual modelo es la más apropiada al secado solar, fue utilizado el Coeficiente de determinación (R²) y la media absoluta porcentual del error (MA%E),Los modelos que se adecuaron mejor fueron Lewis 3.97 %, Page 4.28%, Henderson-Pabis 7.43 %, logarítmico 3.54 %,Aprox. Dif 2.79%, Peleg 8.33%.

Palabras clave: Secado, Modelamiento, Papaya.

ABSTRACT

The aim of this work is analyze drying kinetics of papaya seeds in a box type dryer, were placed on a steel tray with a weight of 572 gr. measures the temperature and mass papaya seeds (Carica Papaya) on a digital scale was performed. It was determined the seed moisture initial by the standard method (105 ° C / 24h) .The moisture during the drying mass difference every 30 min. Humidities during drying were adjusted by the Excel Solver tool (Windows 2010), to exponential models. These models were Lewis, Page, Henderson-Pabis , Logarithmic, 2 Terminos, Midilli, Aprox, dif, Peleg, lumped. To check which model is the most appropriate solar drying on the first day, we used the coefficient of determination (R²) and the mean absolute percental error (MA% E) The models were adapted were better Lewis 3.97 %, Page 4.28%, Henderson-Pabis 7.43 %, logarítmico 3.54 %,Aprox. Dif 2.79%, , Peleg 8.33%.

Keywords: Drying, Modeling, Papaya.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El secado es una operación que se encuentra en casi todos los sectores industriales, es la operación unitaria más antigua, común, diversa e intensiva energéticamente (Kudra y Mujumdar, 2009). Sin embargo, no todas las tecnologías de secado son necesariamente óptimas en términos de consumo de energía, calidad del producto deshidratado, seguridad de operación, capacidad de controlar el secador durante posibles fallas en el proceso, o impacto medio ambiental (Kudra y Mujumdar, 2009).

Varios tipos de secadores y métodos de secado, se utilizan comercialmente para eliminar el contenido de humedad de una amplia variedad de alimentos. Si bien existen diferentes tipos de secadores, la selección de ellos es específica para cada producto a secar en particular, ya que depende de la forma, propiedades y características de cada producto, así como también de sus rangos de operación (Jayaraman y Das Gupta, 1992).

El secado solar de productos agrícolas es una de las aplicaciones potenciales más importantes de la energía solar, ya que para ello se requiere calor a bajos niveles de temperatura, donde la eficiencia de los colectores es mayor, y además, no es indispensable la acumulación de energía. El secado solar natural en patios secadores es la forma más antigua y difundida del empleo de la energía solar para el secado de productos agropecuarios. El secado natural en los patios secadores ha ido disminuyendo progresivamente a favor del secado en secadores mecánicos que utilizan energía convencional, dado fundamentalmente por la disminución del tiempo de secado, lo que conlleva a eliminar la posibilidad de daño al

producto por secado lento y la disminución del costo de la mano de obra. (Fonseca Fonseca, Bergues Ricardo, Abdala Rodríguez, Griñán Villafañe, & Hernández Gálvez, 2002).

Al utilizar secadores que emplean energía convencional se consume mayor cantidad de ésta, y debe hacerse una inversión inicial generalmente alta, por lo tanto, cuando el secado se efectúa en secadores que utilizan energía convencional puede suceder que el costo sea alto. El aumento del precio de los combustibles en los últimos años ha originado el incremento del interés en el aprovechamiento de la energía solar para el secado de productos agropecuarios, y numerosos países entre los que se pueden citar Brasil, Argentina, Perú, etcétera, trabajan en este sentido.

Por otra parte, se conoce que la productividad de un secador solar es inferior a la de un secador que utilice energía convencional, por lo tanto, para ser competitivo con este último, los costos iniciales y de operación deben ser menores, manteniendo una calidad en el producto comparable a la de un secador térmico convencional. En el proceso de beneficio de diferentes productos agrícolas se realiza, como paso imprescindible, el secado de semillas, el que se efectúa en secadores térmicos convencionales, constituyendo esta operación uno de los renglones de mayor consumo energético y con un peso apreciable dentro de los costos del proceso. La producción de semillas es una actividad intrínsecamente rentable y considerada estratégica para muchos países del tercer mundo. En nuestro país es también una de las líneas priorizadas en el contexto de la investigación científica por su incidencia fundamental en la alimentación humana.

1.1. Objetivo General

- Determinar la cinética de secado de las semillas de papaya (*carica papaya*) en un secador solar.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar las curva de secado para las semillas de papaya.
- Determinar el modelo matemático que mejor describa la cinética de secado.
- Evaluar las condiciones de operación (humedad y temperatura), en el proceso de secado.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1.Papaya (*Carica Papaya*).

En el Perú, la papaya (*Carica papaya*.) es una especie importante en la economía del poblador amazónico debido a su fruta de alto rendimiento y valor nutritivo. Su cultivo presenta una serie de ventajas como calidad de su fruto, desarrollo vegetativo corto y la cosecha semanal luego de haber iniciado la producción, permitiendo el rápido retorno del capital invertido. Según (Carbajal y Remuzgo, 2007).La papaya (*carica papaya*) en la actualidad es uno de los frutos de mayor consumo en el país, debido principalmente a sus poderes digestivo. Existen diversas formas de propagar la papaya, sin embargo, desde el punto de vista comercial, el uso de semilla sexual es el más generalizado (Franciosi, 1992) a pesar de las dificultades que se presentan al obtenerse plantas de diferente sexo y que a veces las plantas resultantes no reproducen exactamente las características de la planta originaria (Ibar, 1979).

Las semillas son esféricas, pequeñas y negras. Están envueltas en una capa mucilaginosa llamada sarcotesta o cubierta. Un fruto bien polinizado llega a tener de 300 a 700 semillas (2).

La papaya pertenece a un grupo de especies de plantas conocidas como plantas laticíferas. Estas plantas contienen una serie de células ramificadas e interconectadas que forman una matriz de tubos complejos

a) Composición química

La papaya es un fruto climatérico. El climatérico es un estado de auto estimulación, en el que se produce un cambio de crecimiento a envejecimiento de los frutos, observándose un incremento repentino en la actividad respiratoria, así como cambios bioquímicos iniciados por

la producción auto catalítica de etileno (Rhodes, 1970) (Blakesley y col, 1979), determinaron que la calidad organoléptica, el perfil de volátiles y el contenido lipídico dependía del estado de madurez del fruto.

(Selvaraj y Col ,1982), analizaron en cuatro cultivares de papaya el contenido en azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos, vitaminas y minerales en frutos a distintos estados de desarrollo, pero sin llegar a la madurez. El contenido en humedad variada en un 87 a 94%, el carbohidratos de 2 a 12 % (Sacarosa 7-50%, glucosa 17-78% y fructosa 13-50% del contenido total de carbohidratos), la materia seca aumentaba de un 7% a los 15 días de la formación del fruto, a 13 % en la cosecha. Durante este periodo, hay una débil disminución del contenido de sólidos insolubles en alcohol, almidón y algunos minerales y un aumento en azúcares. La concentración de ácidos varía mucho de su formación a maduro. El contenido en hierro aumentaba con el desarrollo del fruto, mientras que el potasio, fósforo y calcio no sufrían apenas modificaciones. El contenido en vitamina C y A, así como en proteínas aumentaba con la maduración.

El cambio más significativo que ocurre en la maduración del fruto es la aparición de azúcares, cuyo contenido y clase varía según el tipo de fruto, variedad y condiciones climáticas. Los polisacáridos se metabolizan en azúcares, hay aumento de dulzor. Según (Chan y Col, 1971), el azúcar predominante en la papaya madura es sacarosa (48,3%), seguido de glucosa (29,0%) y fructosa (21%).

El contenido en ácidos orgánicos de la papaya madura es más bajo que el de otras frutas y esto contribuye a su agradable sabor dulce (Chan y Col 1971) En la papaya, a diferencia de la mayoría de las frutas, se produce un aumento en el contenido de vitamina C a medida que se desarrolla el fruto, alcanzándose el máximo valor en la madures (55 mg/100g de producto). Durante la maduración la pulpa de papaya sufre un cambio de color verde o naranja. Este proceso es debido a la perdida de clorofilas y ala síntesis de carotenoides (Mackinmey ,1996). Estos cambios de pigmentación se producen al sufrir los cloroplastos cabios estructurales originándose los cromoplastos.

El contenido de azúcares en la papaya varía considerablemente, dependiendo de la variedad y de las condiciones de cultivo. La composición de azúcares en papaya madura es de 48.3% de sacarosa, 29.8% de glucosa y 21.9% de fructosa (Kalra et al., 1995). El pH de la pulpa de papaya se encuentra entre 5.5 y 5.9. Contiene unos 106 compuestos volátiles. El linalol, es el compuesto mayoritario y es causante del olor característico de la papaya fresca. Otro gran componente es el benzil isotiocianato que tiene un leve sabor pungente. Otros compuestos off-flavor que se encontraron en el papaya se identificaron como ácidos butínico, hexanoico y octanoico, así como sus correspondientes esteres metílicos. Otros autores reportan la presencia de 18 compuestos más, de los cuales se encontró que el butanoato de metilo, es el responsable de olores suaves en algunas papayas.

La papaya contiene muchas enzimas, las cuales tienen gran importancia en la calidad y estabilidad de los productos procesados de papaya. Estas enzimas incluyen a la papaína, invertasa, estearasa, poligalacturonasa, miorinasa y la ácido fosfatasa (Kalra et al., 1995).

Tabla 1

Composición de la papaya

COMPONENTES POR PORCIÓN DE 100GR	
Calorias	23.10 - 25.80g
Humedad	85.90 -92.60g
Proteínas	0.081 - 0.34g
Grasas	0.05 - 0.96g
Hidratos de carbono	6.17 - 6.75g
Fibra Cruda	0.51 - 1.30g
Cenizas	0.31 - 0.66g
Calcio	12.90 - 40.80 mg
Hierro	0.25 -0.78 mg
Potasio	183.0 mg
Sodio	4.0 mg
Fosforo	12.0 mg

NOTA: Tomada de (Nakasone y Paul, 1998 e Barreira et al, 1999)

2.2. Secado de semillas de papaya

El secado usualmente se define como el proceso de remoción térmica de sustancias volátiles (humedad) hasta obtener un producto seco (Mujumdar, 2006). Es una operación unitaria en la que se da el transporte simultáneo de calor y masa (Fito et al., 2001): La transferencia de energía (principalmente como energía calórica) desde el medio circundante para evaporar la humedad de la superficie y la transferencia de la humedad interna hacia la

superficie del sólido y su evaporación posterior (Mujumdar, 2006). La remoción de agua en forma de vapor desde la superficie del sólido depende de condiciones externas de temperatura, flujo y humedad del aire, área de la superficie del material expuesta y presión mientras que el movimiento del agua a través del sólido depende de su composición física, la temperatura y su porcentaje de humedad (Mujumdar, 2006). La transferencia de energía puede ocurrir por convección, conducción o radiación, o en algunos casos por una combinación de ellos (Mujumdar, 2006). A continuación se explica brevemente cada mecanismo:

- Convección: El calor se transfiere al sólido que se está secando mediante una corriente de aire caliente (u otro fluido) que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua es también el agente transportador del vapor de agua que se elimina del sólido (Fito et al, 2001)

- Conducción: El calor de evaporación se proporciona a través de superficies calentadas (en reposo o en movimiento) colocadas directamente con el material a secar. El calentamiento de estas superficies se realiza normalmente 3 mediante vapor. El agua evaporada se elimina mediante una operación de vacío o a través de una corriente de gas cuya función principal es la de eliminar agua (Fito et al., 2001)

Radiación: Es la denominación que se da a la transmisión de la energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. Se basa en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. La energía es absorbida selectivamente por las moléculas de agua, por ende mientras el producto se seca, se requiere menos energía. Incluye varias fuentes de radiación electromagnética con longitudes de onda desde el espectro solar hasta microondas (0,2 m –0,2 mm). Dentro de esta categoría se incluye el infrarrojo (Mujumdar, 2006).El estudio del secado es de trascendental

importancia en Ingeniería Química, debido a que es una operación unitaria básica, para el manejo de productos sólidos. Entre las operaciones unitarias, el secado, en su forma más primitiva es la primera de todas, pues el hombre desde que fue nómada, secó frutos utilizando la energía solar, no obstante, formas más elaboradas del secado han surgido. En términos generales, el término secado se refiere a la eliminación de líquidos, en cantidades grandes, de un material sólido, por medio de vapor arrastrado por un gas. El líquido a remover, es generalmente agua, no obstante hay otros. (Kudra y Mujumdar, 2009).

Según Jangam et al (2010) todas las variedades de alimentos necesitan, de alguna forma, ser conservadas principalmente para reducir o detener deterioros, para mantenerlos disponibles durante un periodo determinado de tiempo, para mantener propiedades nutricionales por el mayor tiempo posible o para obtener productos con valor agregado. Entre estas causas, el deterioro es la razón principal para el empleo de técnicas de preservación o conservación.

El secado es una de las técnicas más antiguamente utilizada para la conservación de alimentos. El secado al sol de frutas, granos, vegetales, carnes y pescados ha sido ampliamente utilizado desde los albores de la humanidad proporcionando al hombre una posibilidad de subsistencia en épocas de carencia (Fito et al., 2001). Es uno de los procesos más rentables para conservar productos alimenticios, el cual se basa en la remoción de agua mediante la aplicación de calor (Jangam et al., 2010). La operación de secado además conlleva una apreciable reducción del peso y volumen de los alimentos que se deshidratan, consiguiéndose así una importante reducción de los costes de transportes y almacenamiento de estos productos (Fito et al., 2001).

La operación de secado involucra una serie de cambios físicos, químicos y sensoriales en el alimento que dependen de la composición de este así como de la severidad del método de secado. Ejemplos de estos cambios son encogimiento, cristalización, despolimerización, variación de color, sabor, textura, viscosidad, velocidad de reconstitución, valor nutritivo y estabilidad en el almacenamiento.

Estos factores relacionados con la calidad del producto deben ser analizados cuando se va a diseñar una operación de deshidratación de alimentos, para así provocar un mínimo daño al alimento, sin olvidarse de otros aspectos más tecnológicos relacionados con la eficacia y el coste del proceso (Contreras, 2006). En el sector alimenticio es necesario mantener la calidad del producto durante el secado además de reducir el costo del proceso. Debido a esto es necesario desarrollar técnicas de secado innovadoras y rentables en este rubro (Jangam et al., 2010).

2.3. Tipos de secadores

2.3.1. Secadero de dos plantas

Este secadero consiste básicamente en un edificio de dos plantas. En la planta baja se sitúa un horno o quemador y en ella el aire caliente y los productos de la combustión ascienden, por convección natural o forzada, y penetran a través del piso enrejillado de la segunda planta, sobre el que se esparce el producto húmedo en forma de capa uniforme. El aire húmedo se elimina por una chimenea situada en el piso superior. Es preciso rastrillar o voltear el producto regularmente. Los principales inconvenientes son los largos tiempos de desecación y la falta de control de las condiciones de desecación. Este tipo de secaderos se emplea principalmente para desecar lúpulo, rodajas de manzana y malta (Chiou y Otros, 1991).

2.3.2. Secadero de cabina, bandejas o compartimentos

Consiste en una cabina aislada provista interiormente de un ventilador para circular el aire a través de un calentador; el aire caliente sale por una rejilla de láminas ajustables y es dirigido bien horizontalmente entre bandejas cargadas de alimento o bien verticalmente a través de las bandejas perforadas y el alimento. El secadero dispone de reguladores para controlar la velocidad de admisión de aire fresco y la cantidad deseada de aire de recirculación. Resultan relativamente baratos de construcción y de mantenimiento y son muy flexibles. Se utilizan principalmente para desecar frutas y verduras. (Bett y Bobylston, 1992).

2.3.3. Secadero de túnel

Permite desecar frutas y verduras de forma semicontinua con una gran capacidad de producción. Consiste en un túnel que puede tener hasta unos 24 metros de longitud con una sección transversal rectangular o cuadrada de unos 2 por 2 metros. El producto húmedo se extiende en capas uniformes sobre bandejas de listones de madera o malla metálica. Las bandejas se apilan en carretillas o vagonetas dejando espacios entre las bandejas para que pase el aire de desecación. Las carretillas se introducen de una en una, a intervalos adecuados en el túnel de desecación. El aire se mueve mediante ventiladores que lo hacen pasar a través de calentadores y luego fluye horizontalmente entre las bandejas, aunque también se produce cierto flujo a través de las mismas. (Perren y Otros, 1996)

Los secaderos de túnel se clasifican de acuerdo al sistema utilizado:

- sistema concurrente
- sistema contracorriente
- sistema de flujo transversal

- túnel simple o de salida de aire central

2.3.4. Secadero de transportador

El principio de este tipo de secadero es similar al túnel de desecación pero el producto húmedo es conducido a través del sistema sobre una cinta transportadora que sustituye a las carretillas. Los secaderos de transportador se utilizan en la desecación de frutas y verduras picadas de diferentes clases.

2.3.5. Secadero de tolva

Consiste en una caja con un falso fondo o base de malla metálica. Un ventilador hace pasar el aire sobre un calentador y el aire caliente seguidamente asciende a través del producto a velocidad relativamente baja. Este tipo de secadero se aplica principalmente al “acabado” de productos vegetales desecados en otros tipos de secadero, reduciendo el contenido de humedad desde alrededor del 15% hasta un 3% aproximadamente. (Moreira, 2001; Vitrac y Otros, 2000)

2.3.6. Secadero de lecho fluidizado

El aire caliente es forzado a través de un lecho de sólidos de forma tal que los sólidos queden suspendidos en el aire. El aire caliente actúa tanto como medio fluidizante como de desecación. Pueden operar de forma discontinua o continua. Se ha aplicado bien comercialmente o a escala experimental a una diversidad de productos con éxito variable, como guisantes, alubias, zanahorias, cebollas, gránulos de patata, cubos de carne, harina, cacao, café, sal y azúcar. También se utilizan lechos para aglomerar y revestir polvos secos. (Moreira, 2008). Descripción del Secado:

En el proceso de secado el agua del alimento es eliminada, en mayor o menor grado, y con ello se consigue una mayor conservación microbiológica, además de retardar muchas reacciones indeseables (Ibarz, 2005)

A pesar que los términos de secado y deshidratación se usan indistintamente, no debería ser así, ya que se considera que un alimento está deshidratado si no contiene más de 2,5% de agua, mientras que uno seco puede contener más de 2,5% de agua (Barbosa-Cánovas, 1996). A excepción de la liofilización, secado osmótico y secado a vacío, la eliminación del agua del alimento se consigue de forma mayoritaria mediante una corriente de aire seco, que elimina el agua de la superficie del producto hacia el seno de la corriente de aire. El proceso de secado de alimentos no sólo rebaja su contenido en agua, sino que puede afectar otras características físicas y químicas de los mismos, como son destrucción de nutrientes, reacciones enzimáticas y no enzimáticas, entre otras (Ibarz, 2005) En el proceso de secado es importante conocer los mecanismos involucrados en el movimiento del agua en el interior y exterior del alimento. Este movimiento puede ser debido a fuerzas capilares, difusión del agua por gradientes de concentración, difusión en la superficie, difusión del vapor de agua en los poros llenos de aire, flujo debido a gradientes de presión y a la vaporización y condensación del agua (Ibarz,2005). El esquema básico de deshidratación en capa delgada se muestra en la Figura 1. Durante cada intervalo de tiempo, el aire pasa a través de la capa delgada, el producto disminuye su contenido de humedad en ΔCH y el aire aumenta su razón de humedad en ΔH debido a la remoción de la humedad. Simultáneamente, la temperatura del producto aumenta en ΔTP y la temperatura del aire disminuye en ΔT como consecuencia del enfriamiento evaporativo y el calentamiento del producto. (Domínguez, 1983).

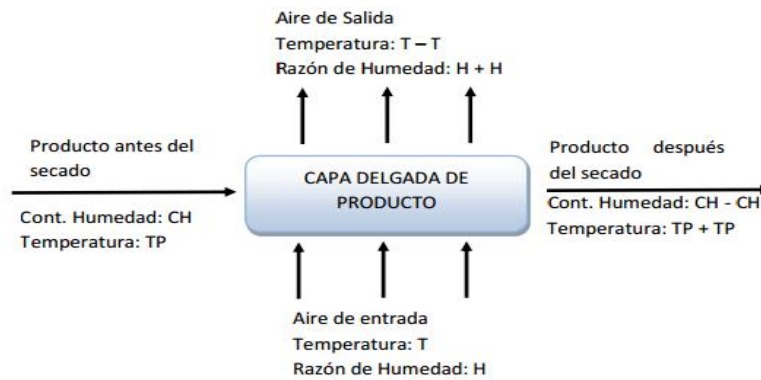


Figura 1. Esquema de deshidratación en capa delgada (Dominguez, 1983).

Los sistemas más usuales emplean la convección como mecanismo de transferencia de calor y el aire como vehículo de esta energía, por lo tanto la transferencia de calor dependerá, en este caso, de la temperatura del aire, de su humedad, de su caudal, de la superficie expuesta del alimento y de la presión (Vanaclocha, 2003). El proceso de secado está normalmente dividido en tres fases: una fase inicial de precalentamiento, seguido de otra de velocidad de secado constante y una o más fases de velocidad de secado decreciente. En la Figura 2 se muestra la curva de secado obtenida cuando se representa el contenido de humedad contra el tiempo de secado (Vanaclocha, 2003). En la Figura 2 se pueden distinguir las siguientes etapas:

Etapa de pre-calentamiento: esta etapa transcurre mientras el producto y el agua en él contenida se calientan ligeramente, hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo. El producto a secar al principio está frío, su presión de vapor es igualmente baja, por lo que la velocidad de transferencia de masa es muy lenta. El gradiente de temperatura entre el aire caliente y la superficie fría del producto es elevado, por lo cual la transferencia de calor es alta.

La cantidad de calor transferida a la superficie del producto es netamente superior a la cantidad de calor arrastrada por la poca agua evaporada; existe un desequilibrio. El excedente de calor se utiliza entonces en calentar la superficie del producto, lo cual produce una disminución del gradiente de temperatura, que cesará cuando se alcance el equilibrio estacionario. Este periodo es muy corto en comparación con el tiempo total de secado. (Vanaclocha, 2003).

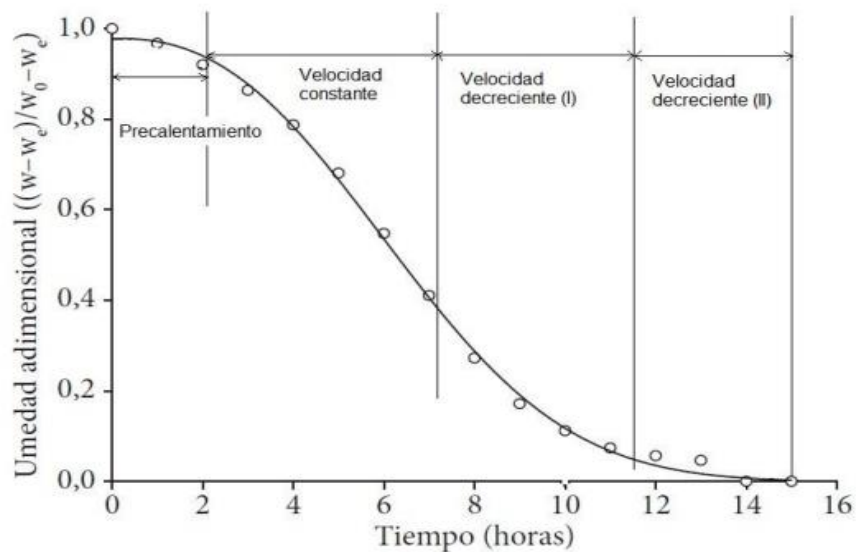


Figura 2. Curva de secado a 50°C (Zuñiga, 2010).

2.4. Transferencia de calor y material

La fritura involucra simultáneamente los mecanismos de transferencia de masa y de calor (Moreira, 2001). Al sumergir el alimento en el aceite caliente la transferencia de calor se realiza por dos mecanismos: conducción y convección. La transferencia de calor por conducción, bajo condiciones no estacionarias, tiene lugar en el interior del alimento. La magnitud de esta transferencia está influenciada por las propiedades térmicas del alimento y éstas pueden

cambiar durante el 37 proceso. La convección ocurre entre el aceite caliente y la superficie del alimento (Singh, 1995). La transferencia de materia durante la fritura está caracterizada, principalmente, por el movimiento del agua en forma de vapor, del alimento al aceite, y por el movimiento del aceite al alimento. Esta transferencia de materia es impulsada por la transferencia de calor del aceite al alimento, por ello es inevitable describir ambos fenómenos de transferencia de forma conjunta. Como resultado de los fenómenos de transferencia que tienen lugar en la fritura, el producto final presenta dos regiones características: la costra o superficie deshidratada, en la cual se producen los principales cambios, y el interior del alimento donde la temperatura no sobrepasa la temperatura de ebullición del agua a esa presión (Dobarganes y Otros, 2000; Singh, 1995). Cuando el alimento ingresa en el aceite caliente, el calor de éste es transferido al alimento, el cual rápidamente se calienta y cuando el agua alcanza su punto de ebullición empieza a evaporarse y pasa al aceite.

Por este motivo la fritura puede considerarse como un proceso de deshidratación (Stier, 2004) y el comportamiento de la cinética de transferencia de agua es similar al producido en cualquier proceso de deshidratación, como puede ser el llevado a cabo utilizando aire caliente (Baumann y Escher, 1995). Farkas y Otros (1996) distinguen tres periodos durante la fritura atendiendo a la transferencia de calor y agua. Primero tiene lugar la etapa de calentamiento del alimento. Esta etapa se inicia con la inmersión del alimento en el aceite caliente a alta temperatura y termina cuando la superficie del alimento alcanza la temperatura de ebullición del agua superficial. Como se indicó antes, el calor es transferido por convección natural desde el aceite hacia la superficie del alimento y por conducción desde la superficie al interior del mismo. Tiene una duración muy corta y se caracteriza porque todavía no se detecta la presencia de burbujas de vapor de agua. Esta etapa se identifica con la de velocidad de secado

creciente. En la segunda etapa la cantidad de calor transferido es suficiente para que el agua presente en la superficie del alimento alcance condiciones de ebullición; esto produce un incremento en el coeficiente de transferencia de calor por convección, resultando un aumento del calor transferido al alimento y, por lo tanto, la pérdida de agua del alimento también se incrementa, ocasionando que se pueda observar como una explosión de burbujas de vapor. En esta etapa empieza formarse la costra en la superficie del alimento y se identifica con la de velocidad de secado constante. Se trata de una etapa muy breve o incluso inapreciable al evaporarse el agua superficial muy rápidamente. La tercera etapa, también conocida como etapa de velocidad decreciente, es la de mayor duración. Durante esta etapa la temperatura del interior del alimento es cercana al punto de ebullición del agua existente en el mismo y se elimina la mayor cantidad de agua de su interior. Dado que la costra sigue aumentando de espesor, y por su baja conductividad térmica, disminuye la transferencia de calor y, por ende, la salida de agua del interior del alimento. El fin de esta última etapa, conocido como punto final de la ebullición, se produce cuando aparentemente ya no se aprecia la salida de burbujas de vapor del alimento. Esto puede ser ocasionado por la reducción de la transferencia de calor en la interface costra e interior del alimento, o por la eliminación total del agua del alimento. La cinética de absorción de aceite por parte del producto es más compleja, porque mientras el vapor esté presente en los poros del alimento, impedirá el paso del aceite al interior del mismo, y sólo cuando disminuya la salida del vapor el aceite podrá transferirse al alimento, si bien dependerá de las propiedades de permeabilidad de la costra formada en la superficie del alimento. Así, cuando el alimento es retirado del aceite caliente y empieza el enfriamiento, la presión del vapor disminuye y produce un efecto de succión, ayudando a que el aceite depositado en la superficie del alimento pueda atravesar la costra (Vitrac y Otros, 2000).

(Moreira y Otros (1995) observaron que mientras transcurre el tiempo de fritura aumenta la cantidad de aceite que se encuentra en la superficie del alimento (en su caso en tortillas de maíz) y que el contenido final de aceite en el alimento se incrementa considerablemente en el período de enfriamiento y está regido por fuerzas capilares. Los principales parámetros que influyen en la pérdida de agua y la absorción de aceite son la temperatura y el tiempo de fritura (Dobarganes y Otros, 2000; Moreira, 2001). Otros parámetros a considerar son la forma del alimento y la relación entre el tamaño del producto y la superficie expuesta al medio circundante.

Así, (Baumann y Escher ,1995) exponen que al incrementar la temperatura la velocidad de deshidratación aumenta, reduciéndose el tiempo de fritura; en cambio, al aumentar el espesor del producto se incrementa el tiempo. Para (Krokida ,2000) el transporte de agua y aceite es más intenso cuanto mayor es la temperatura del aceite y menor el espesor de la muestra. Por ejemplo, si el alimento se procesa en láminas, aquellas más gruesas presentan una menor área específica, reduciéndose el área relativa disponible para perder el agua; también el camino interno que tiene que recorrer el agua es más largo y se requiere más calor para evaporar dicha agua, además la corteza que se forma impide que el agua salga con facilidad (Costa y Oliveira, 1999).

2.5.Cinética de secado

En las experiencias de secado al representar la humedad del sólido frente al tiempo, operando en condiciones de secado y circulando el aire sobre el objeto a secar, se obtienen curvas del tipo indicado en la figura 2.30, en la que puede observarse que al principio la humedad del sólido disminuye linealmente con el tiempo de secado (porción recta de la

representación), o lo que es lo mismo, durante este periodo la velocidad permanece constante.
(Ramírez, 2009)

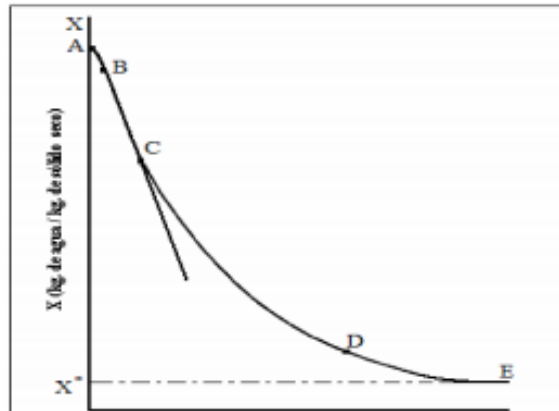


Figura 3. Humedad en base seca en función del tiempo (Ramírez, 2009)

El secado transcurre a esta velocidad constante hasta que la humedad del sólido alcanza un valor crítico (punto C), a partir del cual la velocidad de secado disminuye, llegando ésta a ser nula cuando la humedad del sólido alcanza el valor de equilibrio (punto E), con el aire en las condiciones constantes de operación, es decir cuando la humedad libre es cero. (Wang, 2006)

En la figura 1 se muestra la velocidad de secado por la pérdida de humedad del sólido húmedo por unidad de tiempo. Se especifican las variables presentes tales como humedad crítica (X_c), humedad de equilibrio X^* , etc.; las cuales se emplean para elaborar la gráfica de velocidad de secado frente a la humedad. (Fellows, 2000)

En el período de secado a tasa constante, el agua se evapora de acuerdo al suministro de calor para el sólido húmedo, por tanto, la transferencia de calor gas-sólido controla el proceso. Como todo calor transferido es convertido en calor latente, puede representarse la tasa de secado en la siguiente forma:

$$N_a = \frac{h(T_g - T_{bu})}{\lambda}$$

Donde N_a es el flujo másico ($\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$), h el coeficiente de transferencia de calor en ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$), T_g es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{K}$), T_{bu} es la temperatura de bulbo húmedo del aire ($^{\circ}\text{K}$), λ es el calor latente de vaporización del agua (Kj Kg^{-1}) a T_{bu} . Además, si se convierten los datos a rapidez de secado expresadas como Masa ($\text{Kg evaporados /Tiempo} \cdot \text{área superficie húmeda}$) y graficando contra el contenido de humedad se obtiene un gráfico donde se muestran las fases de secado, como muestra la figura 4. Al principio de la operación, la superficie se encuentra húmeda, cada vez escapa vapor y llega agua al exterior del alimento, se dice que la velocidad de secado es constante (B-C) en la figura 4. Luego cuando el alimento alcanza el valor de la humedad crítica (punto C) la película superficial de la humedad se reduce y el secado del produce puntos secos sobre la superficie. Aquí empieza a descender la velocidad de secado y se completa el periodo de secado superficial no saturado.

Si el contenido de humedad del alimento sólido al inicio es inferior al del punto crítico, no hay periodo de velocidad constante (Treybal 2000). Para describir el proceso de secado en el período de tasa decreciente, se utilizan modelos teóricos, semi-teóricos y empíricos. Esos modelos son generalmente basados en el fenómeno de transferencia de masa, despreciando

el efecto de transferencia de calor (Kolawole 2006). Como el agua está contenida en el interior del alimento, en poros e intersticios, la velocidad decrece hasta llegar a un segundo punto crítico que marca el principio del segundo periodo de secado(C-D).En este periodo final la velocidad de vaporización es prácticamente independiente de la velocidad del aire. El calor de vaporización se introduce al sólido por conducción. La temperatura en la superficie del alimento se acerca a la de bulbo seco del aire (Mc cabe 1991).

Un modelo teórico utilizado para interpretar el secado de alimentos en productos agrícolas es la teoría de difusión de humedad como líquido o vapor, representada por la segunda ley de Fick (Crank 1975):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{\text{eff}} \nabla X)$$

Donde X es la humedad en base seca (Kg agua/Kg sólido seco), t es el tiempo (s) y Deff es la difusividad efectiva (m² s⁻¹). Como el fenómeno de migración es complejo, se trabaja con la difusividad efectiva, que engloba todos los efectos que pueden intervenir en ese fenómeno. Las soluciones analíticas para la segunda ley de Fick se aplican a sólidos de forma geométrica simples y constantes a lo largo del proceso. Considerando que el sólido sea una placa plana con ambas superficies expuestas a lo largo del secado, difusividad constante, variación del volumen despreciable y despreciando el efecto del gradiente de temperatura en el interior de la muestra; se obtiene la siguiente solución analítica (Crank 1975; Treybal 1981):

$$MR = \frac{8}{m^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2} \right]$$

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$$

Donde MR es la humedad adimensional, X es la humedad de la partícula en base seca en el tiempo registrado, Xeq es la humedad de equilibrio en base seca, X0 es la humedad inicial en base seca, Deff es la a difusividad efectiva, t es el tiempo y L el espesor de la muestra.

Para observar si existe influencia de la temperatura de secado sobre la difusividad del agua desde el interior del producto hacia la superficie del mismo, se aplicó la ecuación de Arrhenius (ecuación 4) con la cual se puede obtener la energía de activación (Ea), que representa la energía para iniciar la reacción de difusión (S. Simal et al. 2005).

$$D_{we} = D_0 \cdot e^{[-E_a / RT]}$$

Donde Dwe es la difusividad efectiva de agua (m² · s⁻¹); D0 es el factor de Arrhenius (m² · s⁻¹); Ea es la energía de activación (kJ·mol⁻¹); T es la temperatura absoluta de secado (K) y R es la constante universal de los gases (8.314 J mol⁻¹ K⁻¹). Para alimentos de alto contenido de humedad como la mayoría de frutas la variación de volumen es grande y, por esta razón, las soluciones analíticas no pueden ser aplicadas de forma exacta y deben ser consideradas como aproximados de la solución real.

Algunos modelos semi-teóricos son basados en la teoría da difusión, asumiendo que la resistencia ocurren una fina capa de la superficie de la partículas. Uno de los modelos más utilizado es la ecuación empírica de Page, que es una modificación del modelo exponencial:

$$M = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-Kt^B)$$

2.6. Modelo Matemático

El modelo es un esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento. Un modelo es, en definitiva, una herramienta de ayuda a la toma de decisiones. Por esta razón, sus resultados deben ser inteligibles (comprendido y entendido) y útiles, (Ramos et al., 2010). Existen diferentes métodos aproximados para solucionar problemas de modelado de procesos, los cuales son descritos por ecuaciones matemáticas algunas incluyen derivadas parciales por las razones del proceso; la falta de disponibilidad de soluciones analíticas a las correlaciones o ecuaciones empíricas, hace que se requieran de datos experimentales sobre todo para propósitos de diseño, así estos modelos o ecuaciones, presentan simplicidad de solución, facilidad para determinar rápidamente un parámetro, hay tres categorías principales en las cuales modelado matemático puede describirse: un método diferencial, método integral, y método estocástico.

(Jun y Irudayaraj, 2009) La solución de una ecuación no lineal o de una función trascendente, como método, supone la búsqueda de un valor tal que satisfaga la ecuación o función en cuestión. (Scenna, 1999), lo cual implica la optimización de tal solución. Los métodos analíticos imponen demasiadas restricciones a las funciones objetivos. Además, no siempre es posible resolver el sistema de ecuaciones analíticamente. Por este motivo se desarrollaron los métodos numéricos, se han utilizado diversos modelos matemáticos para

describir la cinética de secado de productos agrícolas. Estos modelos son utilizados para estimar el tiempo de secado de los diferentes productos en relación con las curvas de secado. Existen tres tipos de modelos de secado usados para describir la cinética de secado en capa fina de productos agrícolas. El modelo teórico, que solo considera la resistencia interna, la transferencia de calor y el agua entre el producto y el aire caliente, los modelos semiteóricos y los empíricos, que presentan una relación directa entre la humedad del producto y el tiempo de secado. (Midilli et al., 2002). Entre los modelos semiteóricos tenemos los modelos de Page, Page modificado, Henderson y Pabis, y Logarítmico, que se utilizan para la cinética del secado de productos agrícolas, (Corrêa et al., 2007).

Los modelos empíricos no forman una perspectiva de los importantes procesos que suceden durante el secado, aunque en algunos casos pueden describir las curvas de secado para determinadas condiciones experimentales como el Wang y Singh, (Keey, 1972). Entre estos modelos, el que más ha sido utilizado en estudios de cinética de secado de productos agrícolas es el modelo propuesto por Thompson.

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El presente proyecto de investigación se realizó en la Universidad Peruana Unión Filial Juliaca perteneciente a la Provincia de San Román en el Departamento de Puno, a 3825 m.s.n.m que cuenta con una humedad promedio de 54% y una temperatura entre 13 – 16 °C.

3.2. Materiales

3.2.1. Materia prima

La materia prima a utilizar son las semillas de papaya (*Carica papaya*) proveniente de la Selva de Puno de la localidad de Sandia.

3.2.2. Materiales de proceso

- Bandejas
- Balanza capacidad de 30kg
- Reloj
- Termómetro y medidor Humedad digital Modelo An-2208
- Secador Tipo Cajón
- Mesa de trabajo

3.2.3. Materiales de Laboratorio

- Placas Petri

3.2.4. Equipos

- Estufa de secado de aire forzado. Modelo 9030B.:+10°C-300°C
- Balanza analítica (modelo del cital).

3.3. Metodología Experimental.

La serie de procesos que se llevaron a cabo en el diagrama de flujo del proceso de secado de las semillas de papaya (Carica Papaya) sobre el nivel de ajustes de diferentes modelos matemático exponencial, usado en la predicción de los tiempos de secado de las semillas de papaya (Carica papaya)

Al concluir los tratamientos de secado para las semillas de papaya, se procedió a realizar las curvas de secado para cada modelo, las que relacionan la humedad de la semillas en función del tiempo de secado (t). (Shi et al., 2008), utilizando el programa Solver de Excel (Windows 2010) se ajustaran los datos obtenidos a siete modelos matemáticos: Lewis, Page, Henderson- Pabis, Logarítmico, Dos términos, Midilli, Aproximado de la difusión y, Peleg.

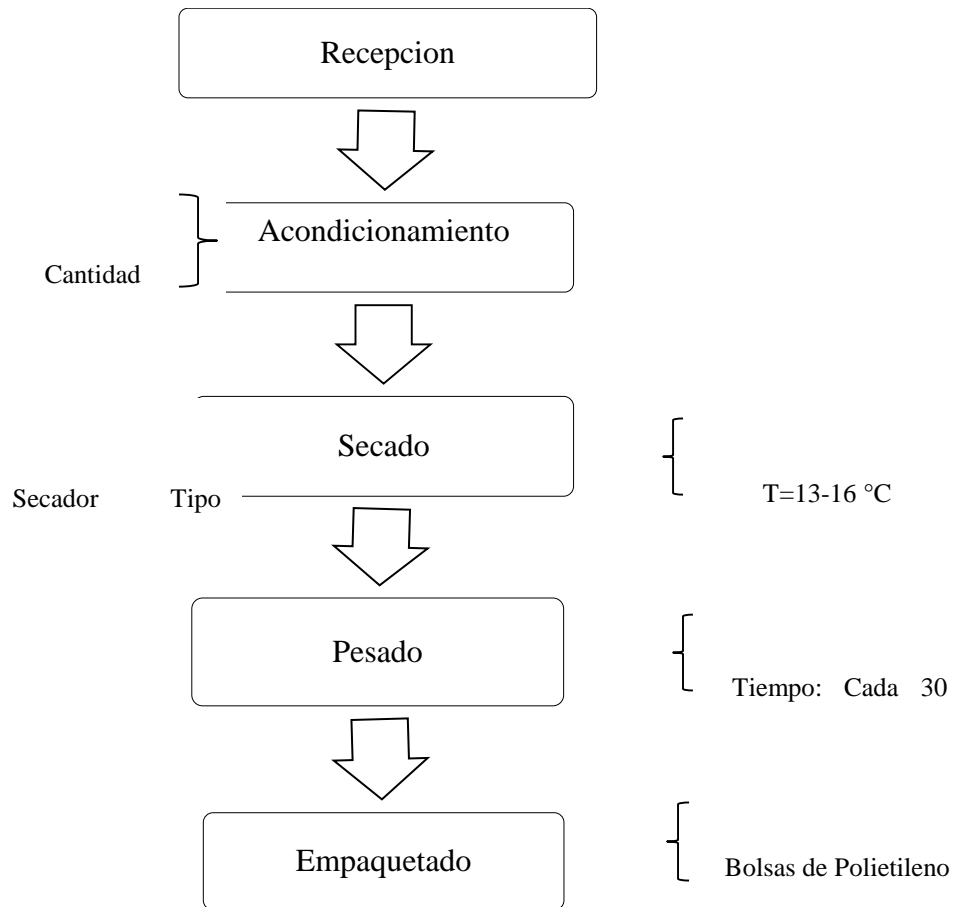


Figura 4. Diagrama de flujo para el secado de Semilla de Papaya (Carica Papaya).

3.3.1. Descripción del Diagrama de Flujo

1. Recepción

La materia prima (Semillas de papaya) fue obtenida del mercado “Dominical “Juliaca. Esta es provenientes de los productores de Sandia.

2. Acondicionamiento

Se extrae las semillas de papaya y se realiza el peso inicial de las semillas 231gr con mucilago y sin mucilago, se colocan en bandejas de acero.

3. Secado

Se colocan las semillas de papaya (*Carica Papaya*) en el secador tipo cajón, durante este proceso existe pérdida de humedad debido a la acción de la temperatura (15-28°C) y la humedad ambiente que oscila entre (25-38%).

4. Pesado

Cada media hora, se procede a pesar para obtener la curva de secado.

5. Empaquetado

Se acondicionan las semillas de papaya en bolsas de polietileno.

3.3.2. Curva de secado y modelamiento matemático

Tabla 2

Tratamiento de secado

	Con mucilago (g)	Sin mucilago (g)
Cantidad de semilla	231g	231g

La metodología a seguir para obtener la curva secada está basado en los modelos matemáticos: Lewis, Page (Saeed et al, 2006), Henderson-Pabis (Kaya et al, 2007), Logarítmica (AKpınar y Bicer 2005), Midilli (Midilli et al, 2002), Aprox. Dif, Peleg.

Los que permiten describir la cinética de secado:

Tabla 3

Modelos matemáticos

Modelo	Ecuación	Referencia
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Karathamos (1999)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Saeed et al (2006)
Henderson-Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Kaya et aal (2007)
Logaritmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	AKpinar y Bicer (2005)
Midilli	$MR = \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al (2002)
Aproximado de la difusión	$MR = a * \exp(-kt) + (1 - a) * \exp(-kbt)$	Wang et al (2007)
Peleg	$X_{Eq} = X_i - \frac{t}{k_1 + k_2 t}$	

Donde a, b, c, k, g y hh y son parámetros de ajuste de los modelos tt, simboliza el tiempo de secado y MRMR denota el cociente adimensional de humedad. MRMR relaciona la cantidad de humedad libre en el tiempo (MM) con el contenido de humedad inicial como estado de referencia (M_oM_o). Para estimar las humedades libres se parte del valor del

contenido de agua en el equilibrio (M_e) en este punto, la presión de vapor de agua al interior del alimento habrá igualado la presión de vapor en la media secante.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e}$$

El ajuste de todos los modelos se llevó a cabo minimizando la suma de los residuales al cuadrado, a través de la siguiente expresión matemática

$$RSS = \sum (MR_{cal} - MR_{exp})^2$$

Siendo RSS la sumatoria de los residuales, MR_{cal} los valores calculados con cada modelo y MR_{exp} los valores experimentales reportados por los autores de los artículos referenciados. Para el cálculo de los parámetros de ajuste y de la sumatoria de los residuales se utilizó el software Excel 2007, por medio del algorítmico de regresión lineal de la herramienta Solver.

a) LEWIS

$$MR = \exp(-kt)$$

Donde:

K: Velocidad de secado

T: Tiempo (min)

b) PAGE

$$MR = \exp(-kt^n)$$

Donde:

K: constante del modelo (1/h)

N: adimensional del modelo

T: Tiempo (min)

c) HENDERSON-PABIS

$$MR = a \exp(-kt)$$

a: constante del modelo

K: constante del modelo (1/h)

t:Tiempo (min)

d) LOGARITMICO

$$MR = a \exp(-kt) + c$$

a, k,c: constantes del modelo

t: Tiempo

e) MIDILLI

$$MR = \exp(-kt^n) + bt$$

K, n,b: Constantes del modelo

t: Tiempo (min)

f) APROXIMADO DE LA DIFUSIÓN

$$MR = a * \exp(-kt) + (1 - a) * \exp(-kbt)$$

a: constante del modelo

T: tiempo

g) PELEG

$$X_{Eq} = X_i - \frac{t}{k_1 + k_2 t}$$

T: tiempo

3.3.3. Análisis de Humedad (AOAC, 925.10, 1990)

El contenido en agua de un producto se define convencionalmente como la pérdida de masa que experimenta en condiciones determinadas. El producto se seca a 130°C bajo presión atmosférica normal, durante una hora y media. Este método de desecación a 130°C se aplica a los granos, harinas y otros productos derivados de los cereales, reducidos a partículas de dimensiones inferiores o iguales a 1.700 μ , de las cuales, menos del 10% serán superiores a 1.000 μ y más del 50% inferiores a 500.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Curvas y tiempos de secado

El secado de las semillas de papaya (*Carica Papaya*) se realizó en un Secador Tipo Cajón, los cuales difieren no sólo en las tecnologías empleadas sino también en sus costos. El secado natural aprovecha la energía solar, hecho que restringe su uso a las épocas del año en que no hay lluvias, mientras que en el secado artificial se utilizan otras fuentes de energía, tales como los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas) se realizó el análisis de humedad para garantizar la calidad y estabilidad del producto final.

Para cada tratamiento de secado se utilizaron dos muestras de la semilla de papaya con goma y sin goma para obtener las curvas de secado (tabla 1). Con el valor promedio de MR en relación al tiempo (minutos), se obtuvieron las curvas de secado para cada tratamiento. (Tabla 4) hasta obtener un producto con un porcentaje menor de 10 % de error.

Los tiempos de secado para cada tratamiento fueron:

Tabla 4

Tiempos (cada 30 min)

Tiempo
30
60
90
120
150
180
210
240
270
300
330
360
390

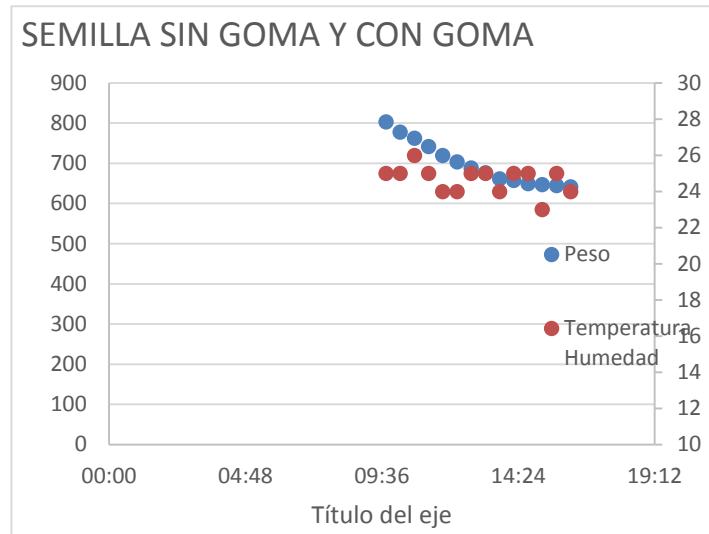


Figura 5. Tiempo para tratamiento sin goma y con goma

A partir de estos resultados se deduce que mientras mayores sean las temperaturas y potencias aplicadas al proceso de secado, menores son los tiempos requeridos para deshidratar las semillas de papaya (Carica Papaya). Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Shi et al. (2008), Toğrul (2005), Kumar et al. (2005), Hebbar et al. (2004),

Los que tienen mayor contenido de sólidos podrían presentar un más largo secado desde trayectoria media atravesado por las moléculas de agua dentro de la muestra hasta el punto de salida de aire haría más alto. No es lo que se observa en las muestras estudiadas. La comparación de los tiempos de secado muestras fue cada 30 min por un día.

4.2. Ajuste de modelos teóricos de secado

Para cada experiencia de secado se determinó el ajuste de los datos experimentales a los modelos de Lewis, Page, Henderson- Pabis, logarítmico, Midilli, Peleg, a través del coeficiente de determinación múltiple R cuadrado (R^2), (que varía entre 0 y 1) y los parámetros estadísticos.

Tabla 5

Constantes obtenidas para el modelo Lewis

Lewis	error	MSRE	MA%E
4	0	0	0
3.375312	0.083562519	0.006983	0.024159
2.850684	0.283514953	0.080381	0.090459
2.410089	0.269564259	0.072665	0.100597
2.040068	0.163395649	0.026698	0.074154
1.729314	0.127828389	0.01634	0.068831
1.468337	0.064130832	0.004113	0.041848
1.249161	0.023565854	0.000555	0.018516
1.065093	0.117040903	0.013699	0.123454
0.910508	0.049035866	0.002405	0.056921
0.780683	0.092371808	0.008533	0.134201
0.671654	0.048277424	0.002331	0.077445
0.580089	1.96524E-06	3.86E-12	3.39E-06
0.50319	0.011961837	0.000143	0.02322
Suma	1.334	0.235	0.834

Tabla 6

Constantes obtenidas para el modelo Page

Page	error	MSRE	MA%E
4	0	0	0.00
3.531129	0.07	0.01	0.021
3.036327	0.10	0.01	0.031
2.581719	0.10	0.01	0.037
2.179424	0.02	0.00	0.011
1.830663	0.03	0.00	0.014
1.532433	0.00	0.00	0.000
1.279989	0.01	0.00	0.006
1.068007	0.12	0.01	0.127
0.891173	0.03	0.00	0.034
0.744482	0.06	0.00	0.082
0.623385	0.00	0.00	0.000
0.523846	0.06	0.00	0.097
0.442339	0.07	0.01	0.141
	0.661	0.053	0.600

Tabla 7

Constantes obtenidas para el modelo Hend-Pab

Hend- Pab	erro	MSRE	MA%E
4.538321	0.538321	0.289789	0.13458
3.769707	0.310832	0.096617	0.089865
3.134199	2.43E-07	5.92E-14	7.77E-08
2.608746	0.070908	0.005028	0.026461
2.17429	0.029174	0.000851	0.01324
1.815071	0.042072	0.00177	0.022654
1.51806	0.014407	0.000208	0.009401
1.272485	0.000242	5.85E-08	0.00019
1.069438	0.121386	0.014735	0.128037
0.901554	0.040082	0.001607	0.046527
0.762743	0.074432	0.00554	0.108137
0.647972	0.024595	0.000605	0.039455
0.553076	0.027011	0.00073	0.046564
0.474614	0.040538	0.001643	0.078691
Suma	1.334	0.419	0.744

Tabla 8

Constantes obtenidas para el modelo Logarítmico

LOGARIT	error	MSRE	MA%E
4.536504	0.536504	0.287837	0.134126
3.768527	0.309653	0.095885	0.089524
3.133491	0.000708	5.02E-07	0.000226
2.608381	0.071272	0.00508	0.026598
2.17417	0.029293	0.000858	0.013294
1.815123	0.04202	0.001766	0.022626
1.518229	0.014239	0.000203	0.009292
1.272727	2.27E-07	5.16E-14	1.79E-07
1.069724	0.121672	0.014804	0.128339
0.901861	0.040389	0.001631	0.046883
0.763055	0.074744	0.005587	0.10859
0.648278	0.024901	0.00062	0.039946
0.553369	0.026718	0.000714	0.046058
0.474889	0.040263	0.001621	0.078157
Suma	1.332	0.417	0.744

Tabla 9

Constantes obtenidas para el modelo Midilli

	error	MSRE	MA%E
3.9844	0.0156	0.000243	0.0039
3.099658	0.359217	0.129037	0.1038537
2.548776	0.585423	0.34272	0.1867854
2.134604	0.54505	0.297079	0.2034031
1.809641	0.393822	0.155096	0.1787286
1.548984	0.308159	0.094962	0.1659317
1.336988	0.195479	0.038212	0.1275584
1.162911	0.109816	0.01206	0.086284
1.018972	0.07092	0.00503	0.0748062
0.899334	0.037862	0.001434	0.0439502
0.799507	0.111195	0.012364	0.1615476
0.715973	0.092596	0.008574	0.1485401
0.645935	0.065849	0.004336	0.1135152
0.587144	0.071992	0.005183	0.1397493
	2.733	1.088	1.337

Tabla 10

Constantes obtenidas para el modelo Aprox diff

APROX	error	MSRE	MA%E
DIFF			
4	0	0	0
3.463765	0.004890129	2.39E-05	0.001414
2.987845	0.146354328	0.02142	0.046696
2.565456	0.114197311	0.013041	0.042616
2.190578	0.012885121	0.000166	0.005848
1.857866	0.000723159	5.23E-07	0.000389
1.562577	0.030109791	0.000907	0.019648
1.300503	0.027775361	0.000771	0.021823
1.067906	0.119854093	0.014365	0.126421
0.861472	2.53784E-09	6.44E-18	2.95E-09
0.678257	0.010054344	0.000101	0.014607
0.515651	0.107725869	0.011605	0.17281
0.371334	0.208752465	0.043578	0.359864
0.24325	0.271901339	0.07393	0.527808
	0.467	0.051	0.279

Tabla 11

Constantes obtenidas para el modelo Peleg

PELEG	error	MSRE	MA%E
4.000	0.000	0.000	0.000
3.418	0.041	0.002	0.012
2.932	0.203	0.041	0.065
2.519	0.161	0.026	0.060
2.165	0.039	0.002	0.018
1.857	0.000	0.000	0.000
1.588	0.055	0.003	0.036
1.350	0.077	0.006	0.060
1.138	0.190	0.036	0.200
0.948	0.086	0.007	0.100
0.777	0.089	0.008	0.129
0.622	0.001	0.000	0.002
0.481	0.099	0.010	0.170
0.353	0.163	0.026	0.316
SUMA	1.202	0.166	1.168

Tabla 12

Ajuste de modelos matemáticos para el secado

MODELO	ECUACION	R	MA%E
LEWIS	$MR = \exp(-kt)$	0.9920	3.97051
PAGE	$MR = \exp(-kt^n)$	0.9971	4.289146
HENDERSON- PABIS	$MR = a \exp(-kt)$	0.9889	7.438034
LOGARITMIO	$MR = a \exp(-kt) + c$	0.988	3.541231
MIDILLI	$MR = \exp(-kt^n) + bt$	0.957303	13.36749
APROXIMADO DE LA DIFUSION	$MR = a * \exp(-kt) + (1 - a) * \exp(-kbt)$	0.996373	2.794633
PELEG	$X_{Eq} = X_i - \frac{t}{k_1 + k_2 t}$	0.991463	8.339482795

Los resultados que se resumen en la Tabla 3 , indican que los datos experimentales del secado se ajustan mejor a los modelos Lewis, Page, Henderson-Pabis, Logaritmico, Aproximado de la difusión y Peleg ya que el valor obtenido del margen de error fueron menores al 10 % mientras que el modelo Midilli tuvo como 13.36 % El valor de R2 obtenido para los modelos es significativamente mayor ($p < 0,05$) que el valor de R2 obtenido para los

modelos de Lewis ,Page Henderson –Logarítmico , dos términos, Midilli, Peleg Pabis. (Anexo 3). Estos resultados demuestran que los datos experimentales obtenidos se ajustan mejor a los modelos mencionados en comparación a Midilli.

Toğrul (2005) obtuvo que el mejor modelo que describe la cinética de secado para rodajas de zanahorias deshidratadas con infrarrojo fue el modelo de Midilli. Caglar et al. (2009) obtuvieron sus propias ecuaciones para describir el secado de uvas durante el secado infrarrojo. Con estos antecedentes es posible inferir que el modelo que mejor se ajuste a los datos experimentales depende altamente del producto sometido al proceso de secado, así como de las condiciones en que este se encuentre (entero, láminas o rodajas) además de las condiciones propias establecidas en el proceso (temperaturas, potencias de infrarrojo y velocidad del aire).

Parece que todos los modelos pueden ser utilizados para representar el proceso de secado de las semillas de papaya (*Carica Papaya*), coeficientes de determinación (R^2) mayor que 0,99 y desviaciones media cuadrática debajo de 0,2. Entre los modelos probaron la mejor (Anexos) la que mejor se adecua, que mostraron los valores más altos y R^2 desviaciones inferiores promedio al cuadrado (DQM).

Martinazzo et al, 2007 dice que para estudiar el secado de hierba de limón a temperaturas de 30, 25 y 20 ° C, obtenido para el modelo $R^2 > 0,99$ y error medio estimado de $<0,04$; Babalis et al. (2006) para estudiar el secado figoda-India a temperaturas desde 35 Se utilizan para ajustar los datos de la cinética secar el modelo de Henderson & Pabis, la obtención de $R^2 > 0,99$; Reis et al. (2011) para modelos de ajuste de página, logarítmica, Midilli et al., Y Henderson y más Pabis cinco modelos, los datos de secado cumari Pimienta a temperaturas de 45, 55 y 65 °C, se encontró, a los modelos anteriores, los valores $R^2 > 0,99$, verificando que

la Página valores de R² siempre 0,99 y por encima Promedio de error estimado (SE) ≤ 0.012. Se muestran los valores de parámetros, coeficientes de determinación (R²) y la media de las desviaciones al cuadrado de los modelos Lewis, Página, Henderson & Pabis, Logarítmica y Midilli et al., Datos ajustados secado de la formulación hecho con pulpa de las higueras Clavo añadido 25% de almidón modificado.

Parece que todos los modelos pueden ser utilizados para representar el proceso de secado de la semilla de papaya (*carica Papaya*) con una excelente precisión, que presentan, a excepción de la Midilli et al., coeficientes de determinación (R²) mayor a 13.36 %.

De acuerdo a los resultados obtenidos para cada tratamiento de secado (Tabla 3) se observa que el valor (min-1) presente en los modelos de Newton, Page Modificado, Henderson and Pabis y logarítmico tiende a aumentar a medida que se aumenta la temperatura. Este resultado concuerda con lo obtenido por autores como Vega et al. (2007) y Puente et al. (2010) en donde se comprueba que este parámetro cinético es dependiente de la temperatura. También se encuentra este comportamiento en artículos de secado de arándanos con infrarrojo (Shi et al., 2008) y de secado infrarrojo de subproductos de uva (Ruiz et al., 2009) La misma tendencia a aumentar con la temperatura y la potencia de infrarrojo se ve para los parámetros “n” del modelo de Page Modificado y “a” del modelo logarítmico Vega y Lemus. (2006), señalan que estos parámetros podrían estar más ligados a la estructura del tejido del alimento y a la velocidad del aire de secado, más que a la temperatura.

4.3. Humedad inicial del fruto

La humedad inicial de las semillas de papaya fue de 80, 2-0,9 en términos porcentuales. Este valor corresponde a 0,8021 gramos de agua por gramo de sólido húmedo o a 4,0531 gramos de agua por gramo de sólido seco. (Muñoz 2002) informó un resultado similar para la humedad del fruto de Papaya

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se determinó las curvas de secado en el secador tipo cajón permite reducir los tiempos de secado en forma considerable en comparación al secado al aire libre, el que alcanzó un máximo de 85 % comparando el secado al aire libre
- El valor de las constantes cinéticas (k y n) de los modelos matemáticos utilizados muestran una tendencia a aumentar con la temperatura de secado y las potencias de infrarrojo.
- Con respecto a Temperatura y Humedad, los valores de los parámetros a^* y b^* mostraron una tendencia a disminuir (significativamente) a menores temperaturas de secado se observan menores pérdidas de Humedad en las semillas de papaya (Carica papaya).
- Fue posible secar las semillas de papaya en forma satisfactoria utilizando un secador tipo cajón, lo que constituye una alternativa para el secado de frutas, vegetales y otros productos alimenticios que requieran extender su vida útil mediante la eliminación de agua.

5.2. Recomendaciones

- Aplicar los ajustes de los modelos matemáticos para el secado de otras semillas alimentarias.
- Comparar tipos secadores solares y mecánicos.

REFERENCIAS

- Aular, J., Ruggiero, C., & Durigan, J. (2001). Efecto de la aplicación de thiabendazole y del tratamiento térmico sobre el pos cosecha de la parchita maracauyá. *Bioagro*, 13(2), 79-83.
- Alvis, A., Caicedo, I., & Peña, P. (2010). Determinación del Coeficiente de Transferencia de Calor. *Información tecnológica*, 21(5), 13-20.
- Arballo, J. R. (2013). Modelado y simulación de la deshidratación combinada osmótica-microondas de frutihortícolas (Doctoral dissertation, Facultad de Ingeniería).
- Baumann, B., & Escher, F. (1995). Mass and heat transfer during deep-fat frying of potato slices—I. Rate of drying and oil uptake. *LWT-Food Science and Technology*, 28(4), 395-403.
- Barbosa-Canovas, G. V., Qin, B. L., & Swanson, B. G. (1996). Biological effects inducés by pulsed electric fields of high intensity. *Tecnologías y seguridad de alimentos y otros productos*, edited by Rodrigo, M., Martinez, A., Fiszman, SM, Rodrigo, C., Mateu, A, 151-165.
- Bett, K. L., & Boylston, T. D. (1992). Effect of storage on roasted peanut quality: descriptive sensory analysis and gas chromatographic techniques. In ACS Symposium series American Chemical Society.
- Belén-Camacho, D. R., Román, J. C., Pantaleón, D. G., Moreno-Álvarez, M. J., Martínez, C. M., & Escalona, C. E. O. EFECTO DEL SECADO SOLAR EN LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD, CARBOHIDRATOS, CAROTENOIDES TOTALES E ÍNDICE DE.

- Caro, W. J. P., Díaz, D., Garcia, P. G., Marin, C. E. M., & Castro, M. (2016). Aproximación al Modelo de Estimación Para El Uso De Agua Del Rio Bogotá, Basado En El Análisis De Vertimientos En Aguas Superficiales. *Revista Científica*, 3(26), 92-108.
- Castro, A. A., Pimentel, J. D. R., Souza, D. S., Oliveira, T. V. D., & Oliveira, M. D. C. (2011). Estudio de la conservación de la papaya (*Carica papaya* L.) asociado a la aplicación de películas comestibles.
- CORZO, O., Bracho, N., Pereira, A. & Vasquez, A. (2008). Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *Food Science and Technology*, 41 (10): 2023-2028.
- Chenlo, F., Moreira, R., Torres, M. D., & Ferra, J. (2008). DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE CASTAÑA EN MEDIOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS DE SAL, SACAROSA Y GLUCOSA OSMOTIC
- Costa, R. M., & Oliveira, F. A. R. (1999). Modelling the kinetics of water loss during potato frying with a compartmental dynamic model. *Journal of Food Engineering*, 41(3), 177-185.
- DEHYDRATION OF CHESTNUT USING STATIC AND DYNAMIC MEDIA OF SALT, SUCROSE AND GLUCOSE. *CYTA-Journal of Food*, 6(2), 117-129.
- Dobarganes, C., Márquez-Ruiz, G., & Velasco, J. (2000). Interactions between fat and food during deep-frying. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102(8-9), 521-528.
- DEROSSI, A., Severini, C., & Cassi, D. (2011). Mass transfer mechanisms during dehydration of vegetable food: traditional an innovative approach. En: EL-AMIN, M. (2011). *Advances topics in mass transfer*. 1a ed. Rijeka. InTech. 305-354 p.

- ERDOĞDU, B., Ekiz, I.H., Erdoğan, F., Atungulu, G.G., Pan, Z. (2011). Industrial Applications of Infrared Radiation Heating and Economic Benefits in Food and Agricultural Processing. En: PAN, Z., & Atungulu, G.G. (2011). Infrared heating for food and agricultural processing. Boca Ratón. CRC Press. 237-274 p.
- Farkas, B. E., Singh, R. P., & Rumsey, T. R. (1996). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I, model development. *Journal of food Engineering*, 29(2), 211-226.
- Fellows, P. (2000). *Food processing technology: principles and practice*. Tecnología del procesado de los alimentos: principios y práctica (No. TP370. F4518 2000).
- FITO, P., Andres A., Barat J., Albors A. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, editorial U.P.V. 210 p.
- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2009). *Advanced drying technologies*. CRC Press.
- AGUILA CHACON, C., & NAHUELHUAL MUNOZ, L. (2008).
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z. B. (2000). Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*, 44(1), 39-46.
- Krishnamurthy, K., Khurana, H. K., Soojin, J., Irudayaraj, J., & Demirci, A. (2008). Infrared heating in food processing: an overview. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 7(1), 2-13.
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying, Principles, Classification and Selection of Dryers*.
- Moreira, R. G., Palau, J. E., Sun, X., & MERMELSTEIN, N. (1995). Deep-fat frying of tortilla chips: an engineering approach. *Food Technology*, 49(4), 146-150.
- NINDO, C., & MWITHIGA, G., (2011). Infrared Drying. En: PAN, Z., & Atungulu, G.G. (2011). Infrared heating for food and agricultural processing. Boca Ratón. CRC Press. 89-99 p.

- Sorolla, A. M. A., Grau, A. M. A., & Baviera, J. M. B. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Universidad Politécnica de Valencia.
- Singh, R. P., & MERMELSTEIN, N. (1995). Heat and mass transfer in foods during deep-fat frying: Engineering aspects of deep-fat frying of foods. *Food Technology*, 49(4), 134-137.
- Stier, R. F. (2004). Frying as a science—an introduction. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 106(11), 715-721.
- SETYAWAN, A. D., SUGIYARTO, S., & SUSILOWATI, A. (2013). Review: Physical, physical chemistries, chemical and sensorial characteristics of the several fruits and vegetables chips produced by low-temperature of vacuum frying machine. *EDITORIAL BOARD*, 86.
- TUNCEL, N., Yilmaz, N., Kocabiyik, H., Ozturk, N. & Tuncel, M. (2010). The effects of infrared and hot air drying on some properties of corn (*Zea mays*). *Journal of Food Agriculture & Enviroment*, 8 (1): 63-68.
- Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?. *Journal of food engineering*, 48(1), 19-31.
- Vitrac, O., Trystram, G., & Raoult-Wack, A. L. (2000). Deep-fat frying of food: Heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material.
- VEGA, A. & Lemus, R. (2006). Modelado de la Cinetica de Secado de la Papaya Chilena (*Vasconcellea pubescens*). *Informacion Tecnológica*, 17 (3): 23-31.
- VEGA, A., Tello, C. & Lemus, R. (2007). Simulación matemática del proceso de secado de la gracilaria chilena (*gracilaria chilensis*). *Revista Chilena de Ingenieria*, 5 (1): 55-64.

YAM, K., & PAPADAKIS, S., (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surface. *Journal of Food Engineering*, 61:137-142.

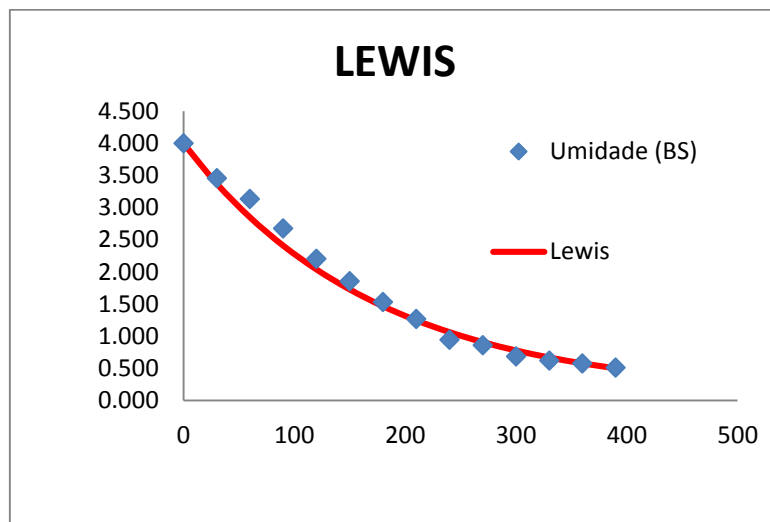
Wang, L., & Sun, D. (2006). Heat and mass transfer in thermal food processing. *FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-NEW YORK-MARCEL DEKKER-*, 150, 35

ANEXOS

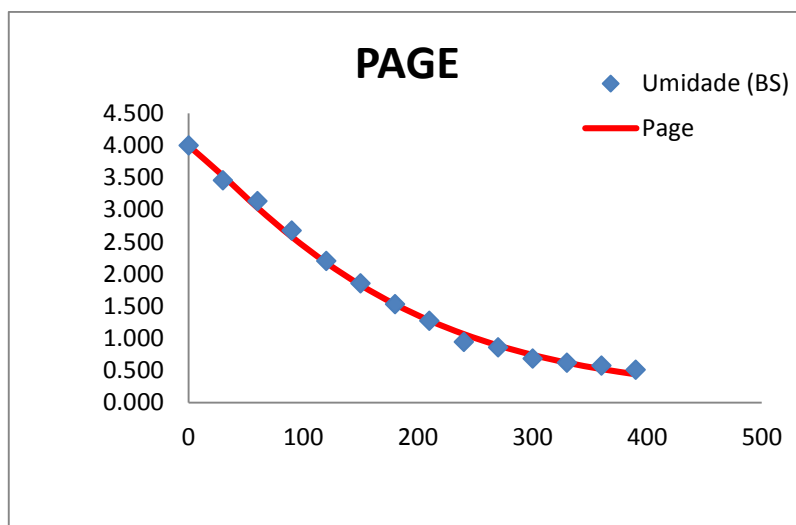
Anexo A - Tiempo

Tiempo (min)	Unidades (BS)
0	4.000
30	3.459
60	3.134
90	2.680
120	2.203
150	1.857
180	1.532
210	1.273
240	0.948
270	0.861
300	0.688
330	0.623
360	0.580
390	0.515

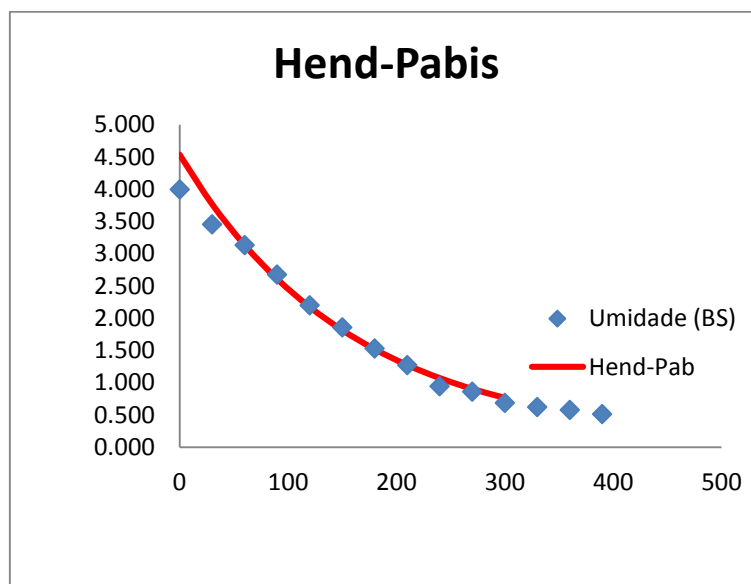
Anexo B - Constantes obtenidas para el modelo Lewis



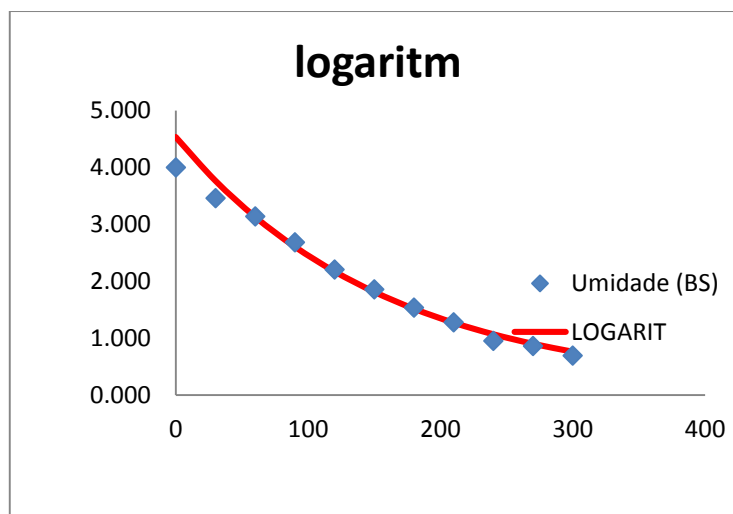
Anexo C - Constantes obtenidas para el modelo page



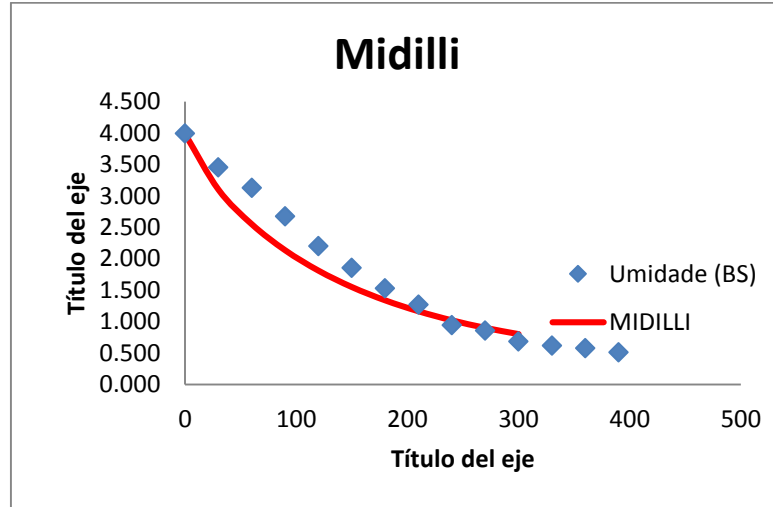
Anexo D - Constantes obtenidas para el modelo Hend-Pab



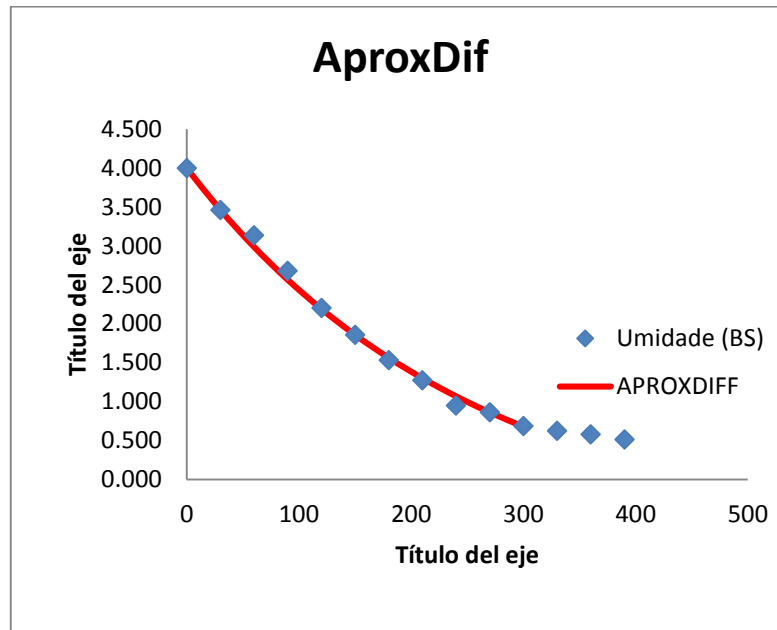
Anexo E - Constantes obtenidas para el modelo Logarítmico



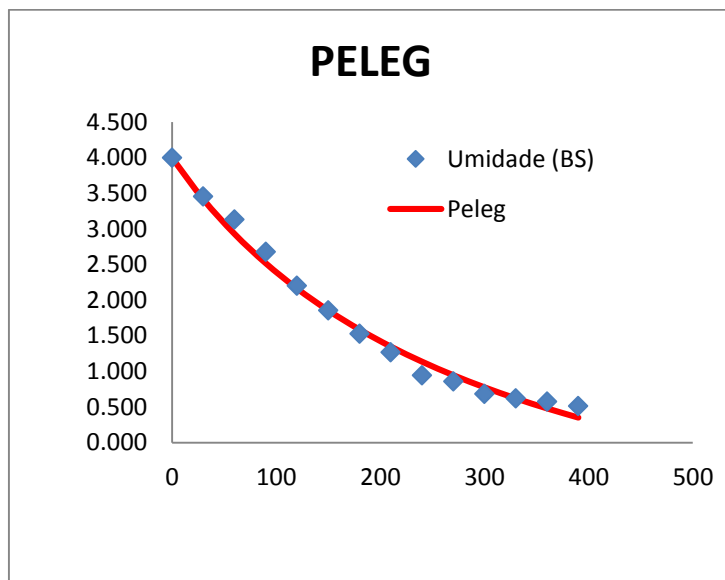
Anexo F - Constantes obtenidas para el modelo Midilli



Anexo G - Constantes obtenidas para el modelo Aprox diff



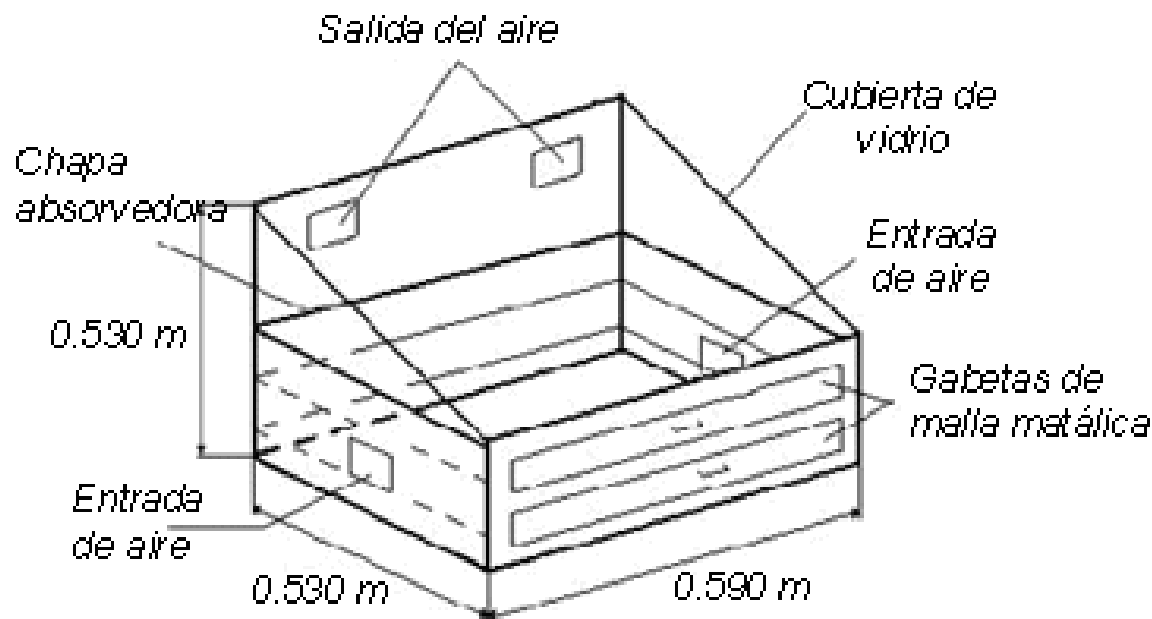
Anexo H - Constantes obtenidas para el modelo Peleg



Anexo I - Metodología experimental del secador solar

Primero se adquirieron los materiales para su elaboración

- ✓ Madera
- ✓ Clavos
- ✓ silicona
- ✓ vidrio
- ✓ pintura (spray negro)
- ✓ Malla metálica
- ✓ Agarraderas
- ✓ lápiz
- ✓ cinta métrica
- ✓ martillo perforador



Anexo J - Fotografías





