

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN AGRICULTURA ANDINA



TESIS

**ESTUDIO DEL MODELO CINÉTICO Y PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
EN EL PROCESO DE SECADO CONVECTIVO DE AGUAYMANTO
(*Physalis peruviana* L.)**

PRESENTADA POR:

ALFREDO FERNANDEZ AYMA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAGISTER SCIENTIAE EN POSCOSECHA Y MARKETING

PUNO, PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO



MAESTRÍA EN AGRICULTURA ANDINA

TESIS

ESTUDIO DEL MODELO CINÉTICO Y PROPIEDADES GEOMÉTRICAS EN
EL PROCESO DE SECADO CONVECTIVO DE AGUAYMANTO (*Physalis
peruviana L.*)

PRESENTADA POR:

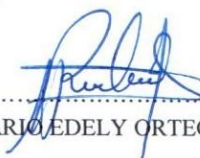
ALFREDO FERNANDEZ AYMA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAGISTER SCIENTIAE EN POSCOSECHA Y MARKETING

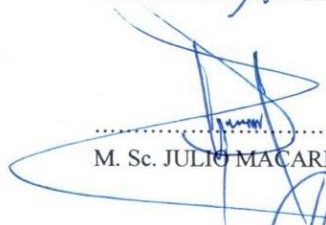
APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE



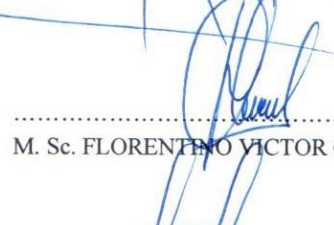
.....
D. Sc. ROSARIO EDELY ORTEGA BARRIGA

PRIMER MIEMBRO



.....
M. Sc. JULIO MACARIO CHOQUE LAZARO

SEGUNDO MIEMBRO



.....
M. Sc. FLORENTINO VICTOR CHOQUEHUANCA CÁCERES

ASESOR DE TESIS



.....
Dr. ALEJANDRO COLOMA PAXI

Puno, 26 de julio de 2019

ÁREA: Poscosecha y Marketing.

TEMA: Estudio del Modelo Cinético y Propiedades Geométricas en el Proceso de Secado Convectivo de Aguaymanto (*Physalis Peruviana L.*).

LÍNEA: Conservación de Productos Alimenticios.

DEDICATORIA

A ti Dios Mío, porque no me abandonas, me das tu amor, me levantas de las caídas, permites mi existencia en estos días y sobre todo, hoy me concedes realizar el sueño más importante de mi vida

“A mí querido padre Aquiles; mis hermanos German, Beysi, Héctor, Alex y Gisela, quienes con su apoyo en momentos cruciales y determinantes me apoyaron para la superación, gracias a ustedes hoy puedo alcanzar mi meta. Dios los bendiga y cuide siempre”.

“A mi Abuelo Juan de Dios Fernández y a mi madre Justina Ayma, In memoriam, por sus ejemplos de bondad, humildad, perseverancia y perfección, cuídenos desde el cielo”.

“A mis amigos, mis profesores y colaboradores por dedicarme su apoyo”.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano, mi querida alma mater, fiel testigo de mi formación profesional, y por el apoyo incondicional que tuve el honor de gozar.

A la Escuela de Postgrado, Maestría en Agricultura Andina, especialidad en Poscosecha y Marketing por facilitarme con nuevos conocimientos para la Investigación.

A mi director de tesis Dr. Alejandro Coloma Paxi, por su paciencia, preciado tiempo y sus conocimientos, que fueron de valiosa ayuda; deseo contar siempre con su sabiduría y amistad.

A mis profesores, con profunda admiración, por todas sus enseñanzas, por compartir sus conocimientos y experiencias, por su tiempo y dedicación, por ser forjadores de mi formación profesional, a mis jurados de tesis D. Sc. Rosario Edely Ortega Barriga, M. Sc. Julio Macario Choque Lazaro, M. Sc. Florentino Victor Choquehuanca Cáceres, quienes, con su valioso conocimiento y dedicación, han permitido la consecución de esta investigación.

A mis compañeros y amigos de la Universidad, por su afecto, su comprensión, por todos los momentos de la diversión, por apoyarme, aconsejarme, por esos pequeños y grandes detalles que tuvieron conmigo.

A todas aquellas personas que en algún momento de mi vida estuvieron allí, pero sobre todo, a quienes creyeron en mí y me impulsaron a seguir siempre adelante.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
SIMBOLOGÍA	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Materia prima.....	3
1.1.1 Aguaymanto (<i>Physalis peruviana</i> L.)	3
1.1.2 Taxonomía.....	4
1.1.3 Descripción botánica de la planta.....	4
1.1.4 Propiedades beneficiosas para ser humano	7
1.2 Caracterización físico química de aguaymanto	7
1.2.1 Características físicas del aguaymanto	7
a. Color.....	8
b. Diámetro o calibre.....	9
c. Peso.....	9
d. Densidad.....	10
1.2.2 Características fisicoquímicas del aguaymanto	10
a. Sólidos solubles totales (SST)	11
b. Acidez.....	11
c. Índice de madurez.....	11
d. pH.....	12
1.2.3 Composición proximal.....	14

a. Carbohidratos.....	14
b. Proteínas	15
c. Humedad.....	15
d. Grasa.....	16
e. Fibra.....	16
1.3 Cosecha.....	16
1.4 Postcosecha.....	17
1.5 Maduración del fruto	17
1.5.1 Patrón de respiración y producción de etileno	18
1.5.2 Cambios de firmeza del fruto	18
1.5.3 Colores del aguaymanto en diferentes etapas de maduración.....	19
1.6 Calidad del aguaymanto.....	20
1.7 Productos derivados	21
1.8 Fundamentos de transferencia de calor y masa	21
1.8.1 Mecanismos de transferencia de calor.....	21
1.8.2 Transferencia de calor por convección.....	22
1.8.3 Transferencia simultánea de masa y calor	22
1.8.4 Transferencia de masa en los alimentos.....	23
1.8.5 Conservación de alimentos	23
1.9 Deshidratación de aguaymanto.....	23
1.9.1 Secado de sólidos.....	23
1.9.2 Contenido de humedad.....	24
1.9.3 Agua en poros, superficies y capilares	24
1.9.4 Humedad de equilibrio	25
1.9.5 Humedad en los sólidos.....	25
1.10 Curvas de secado y determinación experimental.....	26
1.10.1 Mecanismos de deshidratación	26
1.10.2 Tiempo de secado	27
1.10.3 Curvas de secado.....	27
1.11 Modelo dinámico de proceso de secado	28
1.11.1 Cinética de secado	28
1.11.2 La difusión de humedad.....	29
1.11.3 Proceso de secado	29

1.11.4 Leyes de Fick.....	30
1.11.5 Coeficiente de difusión	31
1.12 Propiedades geométricas de alimentos	34
1.12.1 Forma y tamaño.....	35
1.12.2 Densidad de alimentos sólidos.....	35
1.12.3 Porosidad.....	36
1.12.4 Esfericidad	36
1.12.5 Encogimiento.....	37
1.13 Antecedentes.....	38

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema	43
2.2 Enunciados del problema.....	44
2.3 Justificación	44
2.4 Objetivos.....	45
2.4.1 Objetivo general.....	45
2.4.2 Objetivos específicos	46
2.5 Hipótesis	46
2.5.1 Hipótesis general:	46
2.5.2 Hipótesis específicos:.....	46

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de ejecución de trabajo de investigación.....	47
3.2 Población y muestra.....	47
3.3 Materiales y equipos	48
3.3.1 Maquinarias y equipos	48
3.3.2 Instrumentos de medición de variables.....	48
3.3.3 Materiales de laboratorio	48
3.4 Metodología experimental	49
3.4.1. Metodología general del proceso de deshidratación de aguaymanto.....	49

3.4.2. Determinación del tiempo de secado en diferentes estados de madurez, forma y temperatura sobre el secado de aguaymanto.....	50
3.4.3. Evaluación de modelo cinético y determinación la difusividad efectiva y energía de activación en diferentes estados de madurez, forma y temperatura en el secado de aguaymanto.	52
3.4.4. Evaluación de la esfericidad y encogimiento en el proceso de secado convectivo de aguaymanto (<i>Physalis peruviana</i> L.)	55
3.5 Factores en estudio.....	56
3.6 Variables de respuesta	57
3.7 Análisis estadístico	57
3.7.1 Diseño experimental.....	57

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Determinación del tiempo de secado en diferentes estados de madurez, forma y temperatura sobre el secado de aguaymanto.....	62
4.2 Evaluación del modelo cinético y determinación de la difusividad efectiva y energía de activación en diferentes estados de madurez, forma y temperatura en el secado de aguaymanto	68
4.2.1 Evaluación del modelo cinético de secado	68
4.2.2. Difusividad efectiva del agua	73
4.2.3. Energía de activación	76
4.3 Evaluación de esfericidad y encogimiento del producto seco de aguaymanto.....	78
4.3.1 Evaluación de esfericidad	78
4.3.2 Evaluación de encogimiento.....	82
CONCLUSIONES	88
RECOMENDACIONES.....	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	99

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Calibres del Aguaymanto.....	9
2. Análisis fisicoquímico del aguaymanto según lugar de procedencia	10
3. Color del fruto y cáliz de aguaymanto (<i>Physalis peruviana</i> L.).....	12
4. Composición fisicoquímica del aguaymanto verde y anaranjado	13
5. Reportes de la composición fisicoquímica de (<i>Physalis peruviana</i> L.).....	13
6. Composición proximal del aguaymanto verde y anaranjado	14
7. Reportes de la composición nutricional de (<i>Physalis peruviana</i> L.)	15
8. Clasificación del fruto de aguaymanto de acuerdo con su color	19
9. Valores de varias raíces para las primeras cuatro funciones de Bessel	34
10. Modelos matemáticos en estudio	54
11. Distribución esquemática de los tratamientos de los factores en estudio	56
12. Diseño de multinivel factorial 3x2x2 para superficie de respuesta	61
13. Humedad libre (kg H ₂ O/ kg s.s.) a 78,4% de humedad en base húmeda para el estado de madurez 6 (madura)	63
14. Humedad libre (kg H ₂ O/ kg s.s.) a 80,5% de humedad en base húmeda para el estado de madurez 3 (pintona)	65
15. Tiempo de secado (h).....	67
16. Valores estadísticos R ² , SSE, MSE y RMSE de ajuste de los modelos para las curvas experimentales de secado de aguaymanto de estado de madurez 6 (madura).....	69
17. Valores estadísticos R ² , SSE, MSE y RMSE de ajuste de los modelos para las curvas experimentales de secado de aguaymanto de estado de madurez 3 (pintona).....	73
18. Valores del coeficiente de difusividad efectiva del agua (m ² /s).....	75
19. Energía de activación (<i>E_a</i>) obtenida para cada tratamiento de secado en (kJ/mol)..	77
20. Valores de esfericidad para la forma cilíndrica	78
21. Valores de esfericidad para la forma lámina	79
22. Análisis de varianza para esfericidad a P< 0,05	80
23. Valores de encogimiento para la forma cilíndrica en producto seco	83

24. Valores de encogimiento para la forma lámina en producto seco	84
25. Análisis de varianza para el encogimiento a $P < 0,05$	85

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Baya de aguaymanto (<i>Physalis peruviana</i> L.)	3
2. Capuchón, cáliz o capacho del fruto	5
3. Fruto del arbusto de la <i>Physalis peruviana</i>	6
4. Corte transversal de la semilla de <i>Physalis peruviana</i>	7
5. Vista de frente de la semilla de <i>Physalis peruviana</i>	7
6. El color del fruto de uchuva, basado en la NTC 4580 de (ICONTEC, 1999)	8
7. Curva de los datos de humedad libre en función del tiempo	28
8. Flujograma para obtener las curvas de cinética de secado.	49
9. Diagrama de cinética de secado para aguaymanto estado de madurez (madura).	64
10. Diagrama de cinética de secado para aguaymanto de estado de madurez 3 (pintona)	66
11. Razón de humedad (RM) en función del tiempo de secado de aguaymanto en estado de madurez 6 (madura).	68
12. Razón de humedad (RM) en función del tiempo de secado de aguaymanto en estado de madurez (pintona).	70
13. Relación $\ln(RM)$ en función del tiempo de secado de aguaymanto en estado de madurez 6 (madura)	74
14. Relación $\ln(RM)$ en función del tiempo de secado de aguaymanto en estado de madurez 3 (pintona).	75
15. Variación de $\ln(De)$ para diferentes inversas de temperatura.	77
16. Gráfico de combinación de tratamientos para esfericidad de aguaymanto.	79
17. Superficie de respuesta para esfericidad	81
18. Gráfico de efectos principales para esfericidad.	82
19. Gráfico de combinación de tratamientos para el encogimiento de aguaymanto.	84
20. Superficie de respuesta para el encogimiento	86
21. Gráfico de efectos principales para el encogimiento.	87

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Informe de análisis de alimentos (análisis proximal).	100
2. Datos de variación de peso para el estado de madurez 6 (madura) a 40°C	101
3. Datos de variación de peso para el estado de madurez 6 (madura) a 60°C.	101
4. Datos de variación de peso para el estado de madurez 6 (madura) a 80°C.	102
5. Datos de variación de peso para el estado de madurez 3 (pintona) a 40°C.	102
6. Datos de variación de peso para el estado de madurez 3 (pintona) a 60°C.	103
7. Datos de variación de peso para el estado de madurez 3 (pintona) a 80°C.	103
8. Razón de humedad para el estado de madurez 6 (madura).....	104
9. Razón de humedad para el estado de madurez pintona (grado de color 3).	104
10. Logaritmo natural de razón de humedad para el estado de madurez 6 (madura). ..	105
11. Logaritmo natural de razón de humedad para el estado de madurez 3 (pintona). ..	105
12. Semiespesores de cilindro y lámina en centímetros.	106

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Magnitud	Unidad
Ss	área superficial de una esfera de volumen de la partícula	m ²
Sp	área superficial inicial de sólido	m ²
R ²	coeficiente de determinación	
R _{aj} ²	coeficiente de determinación ajustado	
D	coeficiente de difusión o difusividad	m ² /s
D _e	coeficiente de difusión efectiva	m ² /s
C	concentración	mol/m ³
D ₀	constante de difusividad equivalente a la difusividad infinitamente a alta temperatura	m ² /s
M ₀	contenido inicial de humedad	kg H ₂ O/ kg s.s.
RMSE	desviación de raíz cuadrada media	
E _a	energía de activación	kJ.mol ⁻¹
L	espesor medio de la placa para el secado de ambos lados, o el espesor de la losa para el secado de un lado	m
MSE	Error cuadrático medio o promedio de cuadrado de los errores	
J	flujo difusivo	mol/m ² s
V	gasto en ml de NaOH gastados durante la titulación	
M _c	humedad crítica	kg H ₂ O/ kg s.s.
M _e	humedad de equilibrio	kg H ₂ O/ kg s.s.
M	humedad del producto en el momento t	kg H ₂ O/ kg s.s.
H _{bh}	humedad en base húmeda	kg H ₂ O/ kg
X = H _{bs}	humedad en base seca	kg H ₂ O/ kg s.s.
M _l	humedad libre	kg H ₂ O/ kg s.s.
m _w	peso de agua	kg H ₂ O
m _{ss}	peso de sustancia seca	kg s.s.
m _t	peso total en un momento dado	kg
x	posición dado	m
%H _{bh}	porcentaje de humedad en base húmeda	%
N	normalidad del NaOH	

n	número de términos en las series (n=1)	adimensional
m	masa total	kg
M_t	razón de humedad	kg H ₂ O/ kg s.s.
RM	relación de humedad	
T	temperatura absoluta	°K
t	tiempo	h
r	trayectoria de difusión	m
V_g	volumen a granel	m ³
V_a	volumen aparente	m ³
V_{ap}	volumen aparente a un contenido de humedad	m ³
V_{apo}	volumen aparente inicial	m ³
V_r	volumen real	m ³

SÍMBOLOS GRIEGOS

Símbolo	Magnitud	Unidad
ϵ_g	fracción de volumen de vacíos	Adimensional
ρ_a	densidad aparente	kg/m ³
ρ_r	densidad real	kg/m ³
λ_m	raíces de la ecuación de Bessel	

SUBÍNDICES

a aparente

r real

o inicial

bh base húmeda

bs base seca

RESUMEN

El aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) es una fruta de alto valor nutricional, su consumo reduce el estrés, depresión, cansancio mental y disminución del colesterol, con el secado convectivo se pretende alargar la vida útil, los objetivos de este estudio fueron determinar el tiempo de secado, modelo cinético, difusividad efectiva, energía de activación, esfericidad y encogimiento; se desarrollaron en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, en un secador convectivo, usando temperaturas de 40, 60 y 80°C, estado de madurez de 3 y 6, forma cilíndrica y lámina, donde el menor tiempo de secado fue para el estado de madurez 6 a 80°C por 6 horas; los mejores modelos fueron para estado de madurez 6, Midilli y para estado de madurez 3, logarítmico; La difusividad efectiva obtenida para estado de madurez 6 y 3 variaron entre $1,080 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ a $5,094 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ y $8,959 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ a $3,593 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ respectivamente. Las energías de activación para madura cilíndrica de 22,23 kJ/mol, madura lámina de 20,31kJ/mol, pintona cilíndrica de 22,59 kJ/mol y pintona lámina de 24,01 kJ/mol respectivamente; La mayor esfericidad de 0,807 se obtuvo en el estado de madurez madura de forma cilíndrica a 40°C; mientras tanto el mayor encogimiento de 0,448 se obtuvo en el estado de madurez pintona de forma lámina tratada a 40°C. Concluyendo que las temperaturas, estado de madurez y forma geométrica influenciaron en el proceso de secado, los valores de la difusividad efectiva incrementaron con la temperatura, la mayor esfericidad y encogimiento se obtuvo a menor temperatura.

Palabras Clave: Aguaymanto, cinética de secado, difusividad efectiva, modelamiento, propiedades geométricas y secado.

ABSTRACT

Aguaymanto (*physalis peruvian l.*) is a fruit of high nutritional value, its consumption reduces stress, depression, mental fatigue and lower cholesterol, with convective drying is intended to extend the shelf life, the objectives of this study were determine drying time, kinetic model, effective difusivity, activation energy, sphericity and shrinkage; were developed in the unit operations laboratory of the National University of Micaela Bastidas of Apurímac city, in a convective dryer, using temperatures of 40, 60 and 80°C, maturity status of 3 and 6, cylindrical shape and foil, where the shortest drying time was for maturity status 6 to 80°C for 6 hours; the best models were for maturity state 6, midilli and for maturity state 3, logarithmic; The effective diffuseness obtained for maturity status 6 and 3 ranged from 1,080x10⁻⁹m²/s to 5,094x10⁻⁹m²/s and 8,959x10⁻¹⁰m²/s to 3,593x10⁻⁹m²/s respectively. Activation energies for mature cylindrical 22,23 kJ/mol, mature sheet of 20,31kJ/mol, cylindrical pintone 22,59 kJ/mol and 24,01 kJ/mol sheet pintone respectively; The highest sphericity of 0,807 was obtained in the mature state of maturity cylindrically at 40°C; meanwhile the largest shrinkage of 0,448 was obtained in the state of pintone maturity in a treated sheet form at 40°C. Concluding that temperatures, maturity status and geometric shape influenced the drying process, the values of effective diffuseness increased with temperature, the increased sphericity and shrinkage was obtained at lower temperatures.

Keywords: Aguaymanto, drying kinetics, effective difusiveness, geometric properties, modeling, and drying.

INTRODUCCIÓN

El aguaymanto (*Physalis peruviana* L.), es una planta originaria de los Andes sudamericanos, específicamente de Perú. Pertenece a la familia de las Solanáceas, al género *Physalis*, se caracteriza por su fruto, una baya carnosa con gran cantidad de semillas envuelto en un cáliz de 5 sépalos (Basoalto *et al.*, 2010). Este fruto es de apariencia esférica y evoluciona de un color verde a un amarillo-anaranjado, posee un diámetro entre 1,25 y 2,5 cm, y un peso entre los 4 y 10 g (Luchese, Gurak, y Ferreira, 2015; Herrera, 2009). El aguaymanto posee diversas propiedades, entre ellas, un efectivo poder antioxidante, el cual previene el envejecimiento y su accionar como un práctico antidiabético que estabiliza el nivel de glucosa en la sangre y es rico en vitaminas A, B y C, lo mismo que en hierro, fósforo, fibra y carbohidratos (Bonilla *et al.*, 2009). Debido a la gran presencia de nutrientes y vitaminas, este alimento es beneficioso para preservar la salud de los tejidos especializados como la retina, ayudar al desarrollo y la salud de los tejidos de la piel y las membranas mucosas (Puente *et al.*, 2011). Su consumo también es recomendable para las mujeres que atraviesan por la menopausia, gracias a que aumenta la cantidad de estrógenos, ayuda a la absorción de hierro, combate el estrés, el cansancio mental y la depresión. Otras propiedades del aguaymanto son la mejora de la función cardiovascular, y la producción de una mayor cantidad glóbulos rojos. Además, actúa como antirreumático, desinflamando las articulaciones; disminuye los niveles de colesterol en la sangre cumpliendo el rol de antidiabético, estabilizando el nivel de glucosa en la sangre y purificándola (Wu *et al.*, 2006; Tacanga, 2015).

El secado, es la reducción del contenido de humedad que permite obtener productos sólidos con un bajo contenido de agua, para el almacenamiento, envasado, distribución y consumo, en la mayoría de los procesos el agua es eliminada por evaporación convectiva (Singh y Heldman, 2014; Toledo, Singh y Kong, 2018; Holdsworth, 2016); sin embargo, durante el proceso hay cambios físicos, químicos y bioquímicos en la materia prima (Ibarz y Barboza, 2014); los modelos de secado se encuentran los modelos de Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis modificado (Delgado, 2014; Cabrera *et al.*, 2017) indica que el aumento de la temperatura de secado disminuye el tiempo de proceso de secado. Las propiedades geométricas de la esfericidad y encogimiento son usadas para el almacenamiento (Mohammad, 2016; Alvarado, 2001) y para el diseño de empaques, en el análisis de calidad y en el control de procesos (Ospina, 2001; Berk, 2018).

La tendencia del consumo son productos naturales y se ve la necesidad de incentivar la conservación de esta materia prima con el fin de contribuir a los productores, a través de investigaciones, la conservación es una alternativa para dar un valor agregado al fruto e incentivar y diversificar su consumo, de esta manera también coadyuvar en los aspectos nutricionales del poblador andino. Con la conservación del aguaymanto prolongará la vida útil para la época de escasez para que el consumo sea en cualquier estación del año (Balaguera, Ramírez y Arévalo, 2014).

La protección del producto a posibles contaminaciones tanto del tipo químico como microbiológico y las estrictas normas de calidad obligan a los productos, procesadores y especialmente distribuidores; a buscar las alternativas de conservación y más adecuados a las necesidades actuales del mercado. Asimismo, contribuirá a la solución de los problemas de la sociedad con la incentivación del cultivo de este producto con unos buenos parámetros de manejo postcosecha y que pueden aplicar también para otros productos y así mejorar las condiciones económicas de los productores. En la investigación los modelos de secado de aguaymanto son novedosos por lo que desarrollará nuevos métodos de predicción de propiedades geométricas y que aportará para el beneficio científico para la posterior aplicación en el diseño de ingeniería postcosecha, transformación y comercialización de este producto.

El presente estudio tuvo como objetivo general, estudiar el modelo cinético y propiedades geométricas en el proceso de secado convectivo de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.)

Los objetivos específicos de la investigación fueron las siguientes:

- Determinar el tiempo de secado en diferentes estados de madurez, forma y temperatura sobre el secado de aguaymanto.
- Evaluar el modelo cinético y determinar la difusividad efectiva y energía de activación en diferentes estados de madurez, forma y temperatura en el secado de aguaymanto.
- Evaluar la esfericidad y encogimiento del producto deshidratado de aguaymanto.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Materia prima

1.1.1 Aguaymanto (*Physalis peruviana* L.)

Physalis peruviana L., es una planta originaria de los Andes sudamericanos, específicamente de Perú. Hoy se encuentra en casi todos los altiplanos de los trópicos y en varias partes de los subtrópicos, incluyendo Malasia, China, África y el Caribe. Perteneció a la familia de las Solanáceas, al género *Physalis*, y posee distintas y varias denominaciones comunes. En Chile, se conoce por “goldenberries” o “physalis”, en Colombia “uchuva”, en Ecuador “uvilla”, en Perú “aguaymanto”, en España “alquequenje” y en Sudáfrica “cape gooseberry”. A nivel del mercado internacional el nombre más común es goldenberry. Se caracteriza por su fruto, una baya carnosa con gran cantidad de semillas envuelto en un cáliz de 5 sépalos que le otorga protección natural. Este fruto es de apariencia esférica y evoluciona de un color verde a un amarillo-anaranjado. Posee un diámetro entre 1,25 y 2,5 cm, y un peso entre los 4 y 10 g (Basoalto *et al.*, 2010; Luchese, Gurak, y Ferreira, 2015).



Figura 1. Baya de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.)

Aunque ha sido considerado como uno de los cultivos marginados de la región andina, en la actualidad su cultivo está experimentando una considerable expansión.

Para el futuro desarrollo del cultivo de aguaymanto y la mejora genética del mismo es esencial una conservación, caracterización adecuada de los recursos filogenéticos, así como conocer los distintos avances en el mejoramiento de dicha especie y las posibilidades futuras (Bonilla *et al.*, 2009).

1.1.2 Taxonomía

Physalis peruviana “Aguaymanto”, es una planta herbácea, que se caracteriza por poseer un fruto redondo de sabor agridulce. En 1763 el científico Sueco Carlos Linneo lo determinó como fruto oriundo del Perú (Fisher *et al.*, 2005; Whitson y Manos, 2005).

Dominio: Eucariota.

Reino: Plantae

División: Embriophyta

Clase: Dicotyledoneae

Orden: Tubiflorales

Familia: Solanaceae

Género: *Physalis*

Especie: *Physalis peruviana*

Nombre científico: *Physalis peruviana*

Nombre común: Aguaymanto, tomatillo, uvilla, uchuva, etc.

1.1.3 Descripción botánica de la planta

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) es una planta, que alcanzan una altura de 1 a 1,5 m, su crecimiento es indeterminado y es ramificada desde la base. Sus hojas se caracterizan porque son alternas, simples, pecioladas, acorazonadas y pubescentes con largos de 5 a 15 cm y anchos que pueden llegar a los 10 cm. Sus flores tienen forma de campana, crecen en las axilas de las hojas, son solitarias, pedunculadas y hermafroditas. Su propagación es por semilla aunque también se puede por injertos (FAO, 2006; Schreiber, 2015).

La uchuva crece en diversas condiciones medioambientales como suelos ligeramente ácidos y ricos en materia orgánica, precipitaciones entre 1 000 y 2 000 mm, con un amplio rango de altura hasta los 3 000 msnm., y una óptima temperatura para la producción de 18°C (Puente, Pinto, Castro y Cortés, 2011).

Al género *Physalis* pertenecen más de ochenta variedades, las cuales se encuentran en estado silvestre, su principal característica es que alberga el fruto dentro de un cáliz, que le permite una vida útil cercana a un mes, además de estar encargado de protegerlo de insectos, pájaros, patógenos y las condiciones climáticas externas. Sin este, el fruto duraría de 4 a 5 días al ambiente (Cedeño y Montenegro, 2004).

El cáliz es cónico (Figura 2), de color verde y termina en 5 dientes agudos, llamados sépalos; el cáliz es papiráceo, protege a los fruto de pájaros, insectos, organismos patógenos, también de las condiciones climáticas extremas; el cáliz maduro puede pesar de 0,12 a 0,25 g, llega a un tamaño de 5 cm de largo, se mantiene verde hasta madurar la fruta (El cáliz es importante también como fuente indispensable de carbohidratos durante los primeros 20 días de crecimiento), luego toma un color pardo traslúcido. Comúnmente al cáliz se le llama también capuchón o capacho (García y Torres,1989; Fischer y Melgarejo, 2013).



Figura 2. Capuchón, cáliz o capacho del fruto

El fruto es una baya globulosa (Figura 3), contenida en un saco membranoso constituido por el cáliz, aproximadamente 4 cm de largo, la baya tiene de 1 a 2,6 cm de longitud y de 1 a 3 cm de diámetro, se encuentra recubierta de una piel delgada, lisa de color amarillento verdoso o amarillo ámbar, con muchas semillas pequeñas blanquecinas dentro de una pulpa jugosa, blanda y traslucida. Cuando está completamente madura exhala un olor agradable y tiene la forma y el grosor de una cereza (García y Torres,1989).



Figura 3. Fruto del arbusto de la *Physalis peruviana*

Las semillas son de tamaño pequeño (desprovistas de hilos placentarios), de forma ovalada achatada, las cuales miden de 1,5 a 3,0 mm de largo, teniendo de ancho un promedio aproximado de 1,0 mm; variando en cada fruto y entre ecotipos los cuales van desde 150 a 320 semillas por fruto. Tienen una coloración amarillo parduzco. En un gramo puede contener más de 1 000 semillas. Logran conservar su capacidad germinativa alrededor de 2 a 3 años en condiciones favorables, las cuales en forma fresca pueden tener un rendimiento de germinación aproximado al 90%.

La morfología y características de cada una de las semillas son las siguientes (Figura 4 y 5):

- Episperma. La Testa es dura o coriácea, superficie con fisuras de forma redondeada; Tegmen, delgado.
- Endospermo. Color blanco, posee fisuras redondeadas.
- Embrión. Hipocótilo, a manera de hendidura en la base de los cotiledones.
- Plúmula, dilatación ovoidea por encima del hipocótilo.
- Radícula, dilatación ovoidea por debajo del hipocótilo.
- Cotiledón, en número de 2 y forma ligeramente ovoidea.

A continuación se observan las partes anteriormente mencionadas, refiriéndose a el corte transversal y corte de frente correspondientes a la semilla del fruto (García y Torres, 1989).

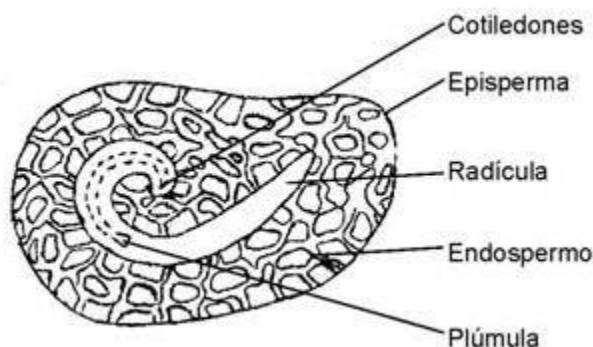


Figura 4. Corte transversal de la semilla de *Physalis peruviana*.

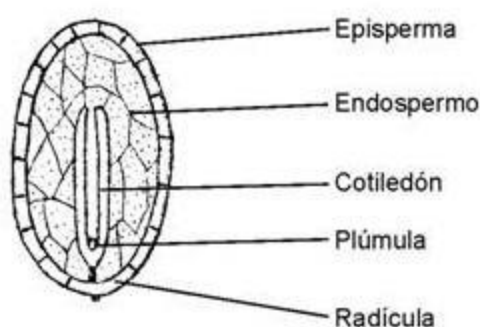


Figura 5. Vista de frente de la semilla de *Physalis peruviana*.

1.1.4 Propiedades beneficiosas para ser humano

La especie tiene propiedades beneficiosas para el ser humano, tanto medicinales como nutricionales. Ayuda a purificar la sangre, tonifica el nervio óptico y es benéfica para diabéticos, entre otros. Posee vitaminas A, C y complejo B (rico en pectinas), además de hierro y fósforo. Por lo tanto, este fruto puede tener más de un uso: alimenticio, medicinal y también ornamental. En cuanto al uso alimenticio puede optar distintas vías de comercialización, como fruto fresco (con/sin cáliz), fruto congelado, fruto deshidratado o fruto para proceso industrial (mermeladas, pulpa, néctares, conservas) (Basoalto *et al.*, 2010; Tacanga, 2015).

1.2 Caracterización físico química de aguaymanto

1.2.1 Características físicas del aguaymanto

Herrera (2009), indica que las propiedades físicas son el color, tamaño, peso, textura, etc. Considera que la fruta del aguaymanto está en diferentes lugares y

depende de las condiciones ambientales y la edad del fruto con el índice de madurez no es lo mismo. El variable físico más usado para evaluar la madurez es el color.

a. Color

Es el parámetro físico más usado para evaluar la madurez es el color de la fruta dado que es un método sencillo, rápido y económico, pero no es muy confiable, por lo que debe combinarse con algún otro parámetro para tener mayor confiabilidad sobre el estado de madurez de la fruta (Puente, Pinto, Castro y Cortez, 2011). También Castañeda y Paredes (2003), estudiaron la evolución de algunas propiedades físicas del aguaymanto en cultivos de Cundinamarca, encontraron que la piel y la pulpa del aguaymanto cambian de color de manera simultánea y alrededor de los 35 días la baya comienza a cambiar de un color verde intenso hacia un color amarillo (Figura 6), que se intensifica alrededor del día 63, mientras que la pulpa presenta una coloración amarilla característica de la madurez de consumo. En el día 84 la coloración se torna naranja indica que el fruto está sobremaduro.

En la Figura 6 se muestra el color del fruto y el cáliz de uchuva, basado en la Norma Técnica Colombiana NTC 4580 de ICONTEC (1999).

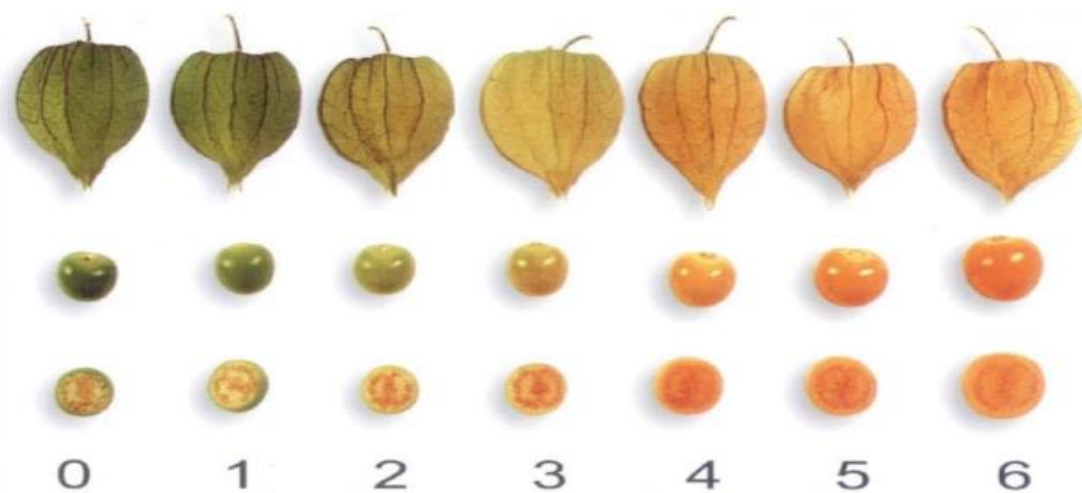


Figura 6. El color del fruto de Uchuva, basado en la NTC 4580 de (ICONTEC, 1999)

Para fruta de exportación se debería cosechar pasando el estado 3 de la Figura 6. La tendencia de los consumidores europeos parece inclinarse a frutos con cálices más verdes que amarillos ya que para ellos es un indicador de frescura (Galvis, 2005).

b. Diámetro o calibre

El diámetro o calibre del fruto es bastante variable que va desde 1,25 a 2,50 cm, sobre todo en primeros frutos, supera los 2,50 cm. el tamaño del fruto, básicamente depende del tipo genético de la planta, lo cual puede ser grande o pequeño el fruto del aguaymanto según la variedad de la planta. Asimismo, el color depende de la variedad. Por lo tanto, el color como el tamaño del fruto de una misma variedad están relacionados, ya que a medida que alcanza la madurez el fruto, tenderá a crecer el tamaño y se intensificará el color y se determina por el diámetro ecuatorial de cada fruto (Herrera, 2009). En la Tabla 1 se encontraron 5 calibres del aguaymanto y su tolerancia para su comercialización hecho por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (NTC 4580).

Tabla 1

Calibres del Aguaymanto

Diámetro (mm)	Calibre	Tolerancia
Menor o igual a 15	A	Se admite el 10% por número o peso de aguaymanto que se encuentran en un calibre inmediatamente superior o inferior al especificado en el empaque.
15,1 – 18	B	
18,1 – 20	C	
20,1 – 22	D	
Mayores o iguales a 22,1	E	

Fuente: NTC 4580 (1999).

c. Peso

El peso de los frutos varía de acuerdo a los ecotipos, desde 1,70 a 10 g. El número de frutos por planta puede llegar a tener más de 2 000, según el manejo tecnológico. Fruto que pesa casi 10 gramos y de diámetro supera los 2,5 cm (Herrera, 2009).

Herrera (2009), determinó que el peso unitario varía según su tamaño, el cual aumenta hasta alcanzar la madurez. En promedio para frutos maduros en diferentes ecotipos el peso del cáliz representa entre 3 y 11%. Así mismo, se han encontrado altos índices de redondez y esfericidad del fruto.

d. Densidad

La densidad del fruto depende de su contenido de la materia seca, el agua y aire dentro del fruto. Mendoza y Rodríguez (2012), reportan que la densidad del aguaymanto maduro es de 1,031 g/cm³, mientras que Martín, Cortés y Montoya (2009), determinaron una densidad de 1,038 g/cm³ para el aguaymanto.

1.2.2 Características fisicoquímicas del aguaymanto

Las características fisicoquímicas del aguaymanto en diferentes coloraciones del cáliz y sistemas de manejo. Los autores lograron concluir que la cosecha de los frutos de aguaymanto debe realizarse a partir de la fase tres de coloración: es decir, amarillo – verdoso, ya que los frutos presentan los atributos físicos y químicos mínimos de calidad requeridos para su comercialización (Lima, Severo, Manica y Silva, 2009).

En la Tabla 2 se observa que la baya presentarán un alto contenido de humedad ($\geq 80\%$), pH ácido, valor no muy elevado de °Brix, porcentaje de acidez moderadamente bajo y un índice de madurez entre 5,1 y 5,6, lo que revelan Aparcana y Villareal (2014), un estado de madurez idóneo para el consumo humano.

Tabla 2

Análisis fisicoquímico del aguaymanto según lugar de procedencia

Pruebas	Procedencia			
	Huánuco	Junín	Ancash	Cajamarca
pH	4,0	4,0	4,0	4,0
Humedad (%)	80,95	80,00	81,81	80,04
°Brix	13,5	14,0	14,2	14,3
Acidez (%)	2,40	2,59	2,64	2,80
Índice de madurez	5,62	5,40	5,38	5,11

Fuente: Aparcana y Villareal (2014).

a. Sólidos solubles totales (SST)

Velásquez y Mestanza (2013), evaluaron que el sabor del fruto está determinado por los azúcares, ácidos orgánicos y compuestos químicos volátiles presentes; cuando el fruto cambia de verde a maduro, el contenido de azúcares se eleva y los ácidos orgánicos disminuyen y desciende también el contenido de almidón mientras que los sólidos solubles aumentan (Fisher y Martínez 1999). Agronet (2010), sostiene que, los sólidos solubles o °Brix, es un indicador de la cantidad de azúcares que presenta la fruta. Así a mayor cantidad de azúcares, mayor grado de madurez de la fruta. A medida que el fruto madura, disminuye los contenidos de almidón y aumenta la concentración de azúcares solubles, en especial sacarosa (ver Tabla 3), mientras disminuye la concentración de ácidos orgánicos, siendo el predominante el ácido cítrico (Fischer, 2000).

El contenido mínimo de sólidos solubles totales expresado como °Brix, de acuerdo con la tabla de color se muestra en la Tabla 3.

b. Acidez

La acidez total titulable, como medida general de la presencia de ácidos en el fruto, presenta un comportamiento de disminución durante la maduración del fruto de aguaymanto. Este fruto se caracteriza por presentar alta acidez total titulable que puede oscilar entre 1,5% y 4%. La disminución de la acidez total titulable es atribuida principalmente a la utilización de los ácidos orgánicos como sustratos respiratorios y a la conversión de estos en azúcares (Novoa, 2006).

En la Tabla 4 muestra el contenido de acidez expresado en % de ácido cítrico en cada estado de madurez (color) según la Norma Técnica Colombiana 4580 (1999).

El Contenido máximo de acidez expresado como porcentaje de ácido cítrico, de acuerdo con la tabla de color se muestra en la Tabla 3.

c. Índice de madurez

El índice de madurez determina el grado de maduración de los frutos como resultante de la relación entre los SST (°Brix) y el porcentaje de acidez de los frutos. Un fruto tropical como el aguaymanto, es su óptima madurez, muestra la mayor cantidad de carbohidratos y a su vez presenta la menor concentración de acidez, es

decir, el índice de madurez tiene una relación directa con la cantidad de azúcares en el fruto, mientras que con la acidez va disminuyendo (Duque, 2005; Balaguera, Ramírez y Arévalo, 2014). La Tabla 5 consolida el comportamiento de los sólidos solubles totales y la acidez, ya que en ella se presenta la evolución del índice de madurez.

El índice de madurez es la identificación del momento de madurez para realizar la cosecha de los frutos. Indican por cambios perceptibles, que el fruto ha llegado en su desarrollo a la "madurez fisiológica" que le permitirá alcanzar madurez de consumo una vez se separe de la planta. También se usan los términos "madurez de cosecha" o "madurez comercial" que es la etapa fisiológica en el desarrollo del fruto en que se puede desprender de la planta y alcanza a desarrollar madurez de consumo; es un aspecto importante para determinar el momento óptimo de cosecha. Por ser el aguaymanto un fruto climatérico, es importante identificar el momento preciso para realizar la cosecha, ya que la recolección en un estado incorrecto de madurez afecta la vida de poscosecha del fruto, y por lo tanto su comercialización (Fischer *et al.*, 2005; Tacanga, 2015).

Tabla 3

Color del fruto y cáliz de aguaymanto (Physalis peruviana L.)

Grado de color	0	1	2	3	4	5	6
Grados Brix	9,40	11,40	13,20	14,10	14,50	14,80	15,10
% Ácido Cítrico	2,69	2,70	2,56	2,34	2,03	1,83	1,68
Índice de madurez mín.*	3,50	4,20	5,20	6,00	7,10	8,10	9,00

(*°Brix mín. / % ácido cítrico máx.)

Fuente: Color del fruto y cáliz de uchuva, según la Norma Técnica Colombiana NTC 4580 (1999).

d. pH

En la Tabla 4 muestra que el fruto a medida que va madurando el pH aumenta, esto porque consigue que las enzimas descompongan la clorofila y endulcen la fruta.

En la Tabla 4, Veliz y Espinoza (2010), reportan: “Al evaluar el futo del aguaymanto en estado verde es de 12 °Brix, 3,1 pH y 2,4 de acidez titulable; mientras que el fruto del aguaymanto en estado anaranjado es de 13,5 °Brix, 3,5 pH y 1,4 de acidez titulable.

Tabla 4

Composición fisicoquímica del aguaymanto verde y anaranjado

Componentes	Verde	Anaranjado
pH	3,1	3,5
Sólidos solubles	12	13,5
Acidez	2,4	1,4
°Brix/acidez	5	9,64

Fuente: Véliz y Espinoza (2010)

Numerosas investigaciones reportan la caracterización fisicoquímica de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) según aguaymanto procedente del mercado de Medellín (Ver Tabla 5), las cuales coinciden en valores aproximados para parámetros (Puente *et al.*, 2011; Tacanga, 2015).

Tabla 5

Reportes de la composición fisicoquímica de (Physalis peruviana L.)

Parámetro fisicoquímico	(Mendoza, Rodríguez y Millán, 2012)	(Marín, Cortés y Montoya, 2010)	(Márquez <i>et al.</i> 2009)	(Restrepo, Cortés, y Márquez, 2009)
Actividad de agua	0,998	0,988	---	---
Acidez (%)	2,00	2,05	2,40	2,10
°Brix	13,0	14,3	12,5	13,8
Densidad (kg/m ³)	1 031	1 038	---	---
pH	3,72	3,39	3,56	3,39

Fuente: Mendoza, Rodríguez y Millán (2012); Marín, Cortés y Montoya (2010); Márquez *et al.* (2009); Restrepo, Cortés y Márquez (2009).

1.2.3 Composición proximal

El fruto de aguaymanto contiene nutrientes tales como agua, fibra, proteína, carbohidratos, a continuación, se muestra la composición proximal del aguaymanto en la Tabla 6.

Tabla 6

Composición proximal del aguaymanto verde y anaranjado

Componentes	Verde (%)	Anaranjado (%)
Humedad	83,38	83,45
Carbohidratos	10,16	11,99
Proteína	0,83	0,85
Grasa	1,33	1,33
Fibra	2,31	2,16
Ceniza	1,99	0,22

Fuente: Véliz y Espinoza (2009)

a. Carbohidratos

Los carbohidratos en el fruto dependen de varios factores, tales como el estado de madurez en la cosecha, que determinan el sabor de los frutos, son indicadores del estado de desarrollo y de sustratos respiratorios del fruto. En general, el contenido de carbohidratos totales se incrementa durante el desarrollo del fruto. El aguaymanto inmaduro presenta altos niveles de almidón, el cual aumenta con la maduración del fruto y alcanza su máximo nivel en 20 días después, para posteriormente hidrolizarse durante la maduración. La primera consecuencia de la hidrólisis de almidón es el aumento de los azúcares solubles (Fischer, 2000).

Fischer y Ludders (2007), citaron que el cáliz está implicado en la producción y en la transformación de carbohidratos, principalmente de la sacarosa. Con su eliminación, el desarrollo del fruto es más lento, lo cual se aprecia por los contenidos de almidón. Así el cáliz tiene también una fuente importante para los asimilados, especialmente en la etapa temprana del crecimiento del fruto.

Tabla 7

Reportes de la composición nutricional de (Physalis peruviana L.)

Parámetro Nutricional	Rango
Humedad	79,8 – 85,5%
Proteína	0,3 – 1,5 g
Grasa	0,15 – 0,5 g
Carbohidratos	11,0 – 19,6 g
Fibra	0,4 – 4,9 g
Cenizas	0,7 – 1,0 g
Carotenos	16 mg
Tiamina	0,1 – 0,18 mg
Riboflavina	0,03 – 0,18 mg
Niacina	0,8 – 1,7 mg
Vitamina C	20 – 43 mg
Potasio	210 – 467 mg
Magnesio	7 – 19 mg
Calcio	2 – 28 mg
Fósforo	27 – 55,3 mg
Hierro	0,3 – 1,2 mg
Zinc	0,28 – 0,40 mg

Fuente: Adaptado de (Erkaya, Dağdemir y Şengül, 2012).

b. Proteínas

Repo y Encina (2008), determinaron que el aguaymanto tuvo mayor contenido de proteínas, 1,9 g/100 g, con respecto a otras frutas estudiadas (papaya de monte, tomate de árbol y tuna), además de contener fuentes de hierro y zinc.

c. Humedad

La determinación es sumamente importante para conocer la humedad en la que se encuentran en el alimento, para indicar la estabilidad del mismo y así poder

establecer las condiciones de almacenamiento. Para la determinación de humedad existen varios métodos y cada uno depende de factores como: la naturaleza de la muestra, la rapidez del método y la exactitud deseada, para obtener un resultado confiable (Castillo, 2011).

d. Grasa

Los compuestos grasos provienen de las semillas del fruto. las condiciones climáticas, así como de riego provocan una disminución o incremento en el contenido de grasas (Macías, 2011).

e. Fibra

El aguaymanto es considerado un alimento con un porcentaje alto de fibra bruta, la cual incluye a la hemicelulosa, la pectina y ácidos grasos (Macías, 2011).

El aguaymanto es un fruto cuyo atributo peculiar es el sabor agridulce, contiene valores destacables de nutrientes como vitamina A, fibra, proteína, potasio, fósforo, hierro y zinc (Restrepo, 2008). La caracterización nutricional de aguaymanto ha llamado poderosamente la atención de investigadores en los últimos 25 años, en la Tabla 7 muestra los datos según los principales autores, el año en el cual publicaron sus trabajos y el factor nutricional sobre el cual se enfocó la investigación (Erkaya, Dağdemir y Şengül, 2012).

1.3 Cosecha

Comienza cuando los frutos toman color amarillo-anaranjado (grado 3 a 5) y presentan entre 14 y 15°Brix. Sus dimensiones son entre 1,8 y 2,4 cm. de diámetro y de 1,7 a 2,3 cm. de longitud. Un indicador de la madurez del fruto, el cual toma una coloración amarillo-verdosa y comienza a endurecerse. Para la recolección de los frutos se toma la precaución, ya que son susceptibles a daños mecánicos por manipulación. La forma más apropiada de recolección es manual con tijeras, ya que el fruto no se desprende con facilidad, evitando así la rotura o desprendimiento del cáliz. Se cosechan frutos con cálices de color parecido y se colocan en bandejas acolchadas con papel para evitar compresión y daño mecánico. Este fruto sigue madurando luego de ser separado de la planta, por lo tanto es importante identificar el momento preciso para cosechar (Basoalto *et al.*, 2010).

1.4 Postcosecha

En el proceso desde la cosecha hasta que el fruto llegue al consumidor final se distingue del secado de los cálices, selección y empaque, almacenamiento y el transporte.

El secado del cáliz se puede hacer en láminas de cartón, mallas, mesones de madera u otro, a temperatura ambiente, no mayor a 20°C. Se pueden usar ventiladores para reforzar el movimiento del aire. Se debe lograr una humedad óptima final del cáliz de 35%. Este proceso evita la aparición de enfermedades y permite disminuir los contenidos de ácidos, logrando un equilibrio de dulzor/acidez. Selección de frutos, se realiza de acuerdo a la calidad comercial. Para ello se abren los cálices y se apartan los frutos dañados, verdes, sobre-maduros o afectados por plagas-enfermedades. Además se debe eliminar residuos de cosecha, hojas, impurezas, frutos rotos y contaminación alguna. Los envases utilizados deben de estar siempre libres de contaminación y en buen estado, empaques a granel (Basoalto *et al.*, 2010; Fischer, Miranda, Piedrahíta, y Romero, 2005).

El almacenamiento de los frutos debe estar en un lugar seco y fresco de temperaturas 7 a 10°C (no superar los 18°C) y humedad de 80-90%, evitando propagación de hongos y deterioro comercial. A temperatura de 18°C y HR de 70%, frutos con cáliz conservan su calidad por unos 20 días, a diferencia de frutos sin cáliz, que en las mismas condiciones lo hacen por no más de 5 días. Por lo tanto, los frutos almacenados con cáliz son más resistentes al deterioro y deshidratación. De esta manera y con sistemas de refrigeración, el fruto se puede almacenar durante 4 a 5 meses a 2°C y el transporte debe de permitir mantener la calidad del fruto, libre de contaminación química y biológica (Basoalto *et al.*, 2010).

1.5 Maduración del fruto

La maduración corresponde a la fase final del crecimiento y desarrollo del fruto, en la cual se presenta una serie de cambios, generalmente coordinados, que llevan a la senescencia. En este proceso se producen cambios tanto de síntesis como de degradación (Kays, 1997). En algunos frutos, el inicio de la maduración se acompaña por un aumento en la intensidad respiratoria y en la producción de etileno, el cual llega a su valor máximo cuando el fruto está completamente maduro, es decir, cuando ha alcanzado su madurez de consumo; a partir de ese momento su intensidad respiratoria disminuye y corresponde al periodo de senescencia. Los frutos que presentan este comportamiento se denominan

climatéricos; los frutos no climatéricos no presentan aumento de la respiración (Kays, 1997; Wills *et al*, 1998).

En cuanto a los cambios de color en el fruto, la cáscara y la pulpa se colorean simultáneamente. Castañeda y Paredes (2003) (Citado por Galvis, 2005) observaron que el fruto presenta coloración verde-intensa durante los primeros 35 días después de la antesis; a partir de este día comienza a cambiar hacia color amarillo; alrededor del día 63 la corteza y la pulpa presentan coloración amarilla característica de la madurez de consumo, como consecuencia de la degradación de la clorofila por acción de las enzimas clorofilazas, que en medio ácido aumenta su actividad. Fisher y Martínez (1999), explicaron que durante la maduración el aguaymanto cambia del color verde a naranja debido a la degradación de clorofilas y acumulación de carotenoides, principalmente β -caroteno, paralelo a este proceso. A medida que el fruto madura, disminuye los contenidos de almidón y aumenta la concentración de azúcares solubles, en especial sacarosa, mientras que disminuye la concentración de ácidos orgánicos, siendo el predominante el ácido cítrico (Novoa, Bojaca y Galvis, 2006).

1.5.1 Patrón de respiración y producción de etileno

Duque, Mayorca y Knapp (2005), definieron que, de acuerdo con su tasa respiratoria, el aguaymanto es considerado como fruto climatérico que presenta además un claro incremento de la producción de etileno durante la etapa de maduración. El etileno puede estar asociado a distintos procesos durante la maduración de los frutos de aguaymanto, como, por ejemplo, el ablandamiento, la actividad antioxidante, el cambio de color, entre otros (Valdenegro, Fuentes y Herrera, 2012).

1.5.2 Cambios de firmeza del fruto

La firmeza es considerada como uno de los principales atributos de calidad y con frecuencia limita la vida útil en poscosecha. Según Ciro y Osorio (2008), establecieron que frutos pintones en el momento de la cosecha conservan mayores valores de firmeza durante el almacenamiento que frutos recolectados con mayor grado de madurez.

1.5.3 Colores del aguaymanto en diferentes etapas de maduración

Según Galvis (2005), el color de la epidermis del fruto de aguaymanto puede ser usado como índice de madurez. La cosecha se puede realizar cuando el cáliz comienza a adquirir una tonalidad amarilla, lo cual también se presenta en el fruto.

Para cosechar, aguaymanto, el principal índice que se tiene en cuenta es el color. En un trabajo de la Universidad Nacional de Colombia se encontró que en una escala de colores de 0 a 6 (Ver Figura 6) en los grados tres y cuatro, el aguaymanto, por ser un producto perecedero, requiere un exigente manejo después de la cosecha para conservar la calidad obtenida en las etapas anteriores (Herrera, 2009).

Según la Norma Técnica Colombiana 4580 clasifica los frutos de acuerdo con su color en la Tabla 8.

Tabla 8

Clasificación del fruto de aguaymanto de acuerdo con su color

Color	Características
0	Fruto fisiológicamente desarrollado de color verde oscuro
1	Fruto de color verde un poco más claro
2	El color verde se mantiene en la zona cercana al cáliz y hacia el centro del fruto aparecen tonalidades anaranjadas
3	Fruto de color anaranjado claro con visos verdes hacia la zona del cáliz
4	Fruto de color anaranjado claro
5	Fruto de color anaranjado
6	Fruto de color anaranjado intenso

Fuente: NTC 4580 (1999)

Herrera (2009), propone en la Figura 6 el punto tres como referencia de madurez fisiológica momento en que el fruto presenta picos en la acumulación de β - caroteno y sólidos solubles. Lo anterior coincide con el momento en el que se observa contraste entre el color del cáliz y del fruto, siendo el fruto amarillo claro.

1.6 Calidad del aguaymanto

Según la Norma Técnica Colombiana 4580 (1999), menciona los requisitos mínimos para procesamiento y consumo:

- Frutos: Deben ser enteros.
- Forma: Tener la forma característica de la uchuva.
- Color: La coloración debe ser homogénea, dependiendo del estado de madurez definido en la tabla de color.
- Debe presentar aspecto fresco, consistencia firme y corteza liza y brillante.
- Libres de daños mecánicos tales como cortes, punciones o magulladuras y sin ataque de insectos y/o enfermedades que demeriten la calidad del fruto.
- Libres de humedad externa anormal producida por mal manejo en las etapas de pos cosecha (recolección, acopio, selección, clasificación, adecuación, empaque, almacenamiento y transporte).
- Exentos de cualquier olor y/o sabor extraño provenientes de otros productos empaques o recipientes y/o agroquímicos con los cuales hayan estado en contacto.
- Exentos de materiales extraños tales como tierra, polvo, agroquímicos y cuerpos extraños visibles en el producto o en su empaque.
- La longitud del pedúnculo del fruto no debe exceder de los 25 mm.

Según la norma NTC 4580 (1999), las categorías para el aguaymanto son:

Categoría Extra: Debe cumplir con todos los requisitos anteriormente mencionados y estar exenta de todo defecto que demerite la calidad del fruto. El Capacho puede presentar manchas superficiales ocasionadas por la humedad y/o hongos (sin la presencia de éstos). Estos defectos en conjunto no deben exceder el 5% del área total.

Categoría I: Debe cumplir con todos los requisitos anteriormente mencionados y estar exenta de todo defecto que demerite la calidad del fruto. El capacho puede presentar manchas superficiales ocasionadas por humedad y/o hongos (sin la presencia de éstos). Estos defectos en conjunto no deben exceder el 10% del área total.

Categoría II: Comprende aguaymanto que no puede clasificarse en las características anteriores, pero cumple con los requisitos generales definidos anteriormente. Se admiten frutos con rajaduras que no excedan el 5% del área total. El capacho puede presentar manchas superficiales ocasionadas por humedad y/o hongos (sin además la presencia de éstos). Estos defectos en conjunto no deben exceder el 20% del área total. El rajado de los frutos de aguaymanto es uno de los defectos que demerita su calidad, pues permite la entrada de microorganismos al fruto, los cuales generan pudriciones y propician condiciones para el deterioro de los frutos sanos durante el almacenamiento.

1.7 Productos derivados

Las ventajas tecnológicas de aguaymanto se realizan con una actividad paralela a la producción de fruta, ya que las empresas agroindustriales para aumentar su aprovechamiento y consumo. La obtención de diversos productos derivados es una alternativa para el productor, procesador y consumidor de aguaymanto. Entre los derivados en los mercados están las pulpas, bebidas, productos azucarados y deshidratados. Ya se consiguen pulpas con y sin semillas, conservadas mediante diferentes técnicas que emplean el frío o el calor. Algunas bebidas comienzan a ofrecerse en el comercio de néctares y refrescos. De los productos azucarados en jarabes, salsas y compotas; entre los concentrados se hallan las mermeladas, bocadillos y dulces. Los deshidratados los "pasabocas" simples y los recubiertos con chocolate (Fischer *et al.*, 2005; Vásquez *et al.*, 2013).

1.8 Fundamentos de transferencia de calor y masa

1.8.1 Mecanismos de transferencia de calor

Existen tres modos de transferencia de calor, en el proceso son: conducción, convección y radiación. Conducción es la transferencia de calor por el movimiento molecular en cuerpos sólidos. La convección es la transferencia de calor por flujo de fluido, creado por diferencias de densidad y los efectos de flotabilidad, en productos fluidos. La radiación es la transferencia de energía electromagnética entre cuerpos a diferentes temperaturas. El primer modo es la transferencia de calor al recipiente o en el envase de la calefacción y medio de refrigeración; los principales modos de transferencia de calor a ser considerados para los distintos medios de

calentamiento con vapor, o microondas, es muy eficaz, con aire caliente, etc. (Holdsworth, 2016; Singh y Heldman, 2014; Ceballos, 2012).

1.8.2 Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección se produce por cambios de la densidad en un fluido por cambios en la temperatura en paredes del recipiente (convección libre o natural) o mediante el movimiento en el contenido del recipiente en sentido axial o radial (convección forzada). El proceso de convección natural inicialmente es por conducción en las capas externas de fluido adyacente a la pared calentada; esto resulta en una disminución de la densidad, y la capa de fluido caliente se eleva, el movimiento del fluido inducida se hace caer en el centro núcleo. La temperatura del fluido se hace más uniforme y la fuerza impulsora más pequeño, la velocidad del fluido tiende a disminuir y, finalmente, cuando el fluido se vuelve se calienta de manera uniforme, el movimiento cesa (Holdsworth, 2016; Singh y Heldman, 2014).

1.8.3 Transferencia simultánea de masa y calor

El transporte de calor y masa en los productos alimenticios tienen las propiedades, es decir, coeficiente de difusión y conductividad térmica afectan en gran medida la velocidad de secado y ambas propiedades de masa y de transporte térmico se ven afectados fuertemente por la estructura física (porosidad) del material, y en menor grado por la temperatura y el contenido de humedad (Saravacos y Maroulis, 2011). Transferencia de calor se produce dentro del producto y con la gradiente de la temperatura entre la superficie del producto y la superficie del agua en alguna ubicación dentro del producto se provoca la evaporación, los vapores son transportados desde la superficie del agua dentro del producto a la superficie del producto el gradiente causando de difusión de agua-vapor es la presión de vapor en el agua líquida superficie en comparación con la presión de vapor de aire en el producto superficie. La transferencia de calor y masa se produce en la estructura del producto a nivel molecular, la transferencia de calor está limitada por conductividad térmica en la estructura del producto, mientras que la transferencia de masa es proporcional a la difusión molecular de vapor de agua en el aire (Singh y Heldman, 2014; Toledo, Singh y Kong, 2018).

1.8.4 Transferencia de masa en los alimentos

Las diversas operaciones de transferencia de masa en la elaboración y almacenamiento de alimentos la aplicación exacta de estos principios generalmente es difícil debido a la complejidad y la heterogeneidad de la estructura de los alimentos y las características físicas, químicas y biológicas, los cambios durante el procesamiento. Éstas incluyen el traslado de humedad, la difusión en alimentos porosos, difusión de los solutos, y la difusión de compuestos aromáticos (Rao, 2014). En la superficie del producto, se produce el transporte de vapor desde la superficie del producto al aire y la transferencia de calor desde el aire a la superficie del producto es una función de la presión de vapor existente y gradientes de temperatura, respectivamente, y la magnitud de los coeficientes de convección en la superficie del producto (Singh y Heldman, 2014; Toledo, Singh y Kong, 2018).

1.8.5 Conservación de alimentos

Las formas de conservación donde se someten los alimentos con el fin de ampliar su vida útil o de consumo, es decir, transformar dichos alimentos, mediante la utilización de diferentes procesos tecnológicos en productos de buena aceptabilidad por parte de los consumidores. Además de garantizar que son sanos e inocuos y que aportan diferentes compuestos nutritivos que deben ser consumidos por el hombre para mantener una buena salud y nutrición (Brito *et al.*, 2014; Ceballos, 2012).

1.9 Deshidratación de aguaymanto

1.9.1 Secado de sólidos

El secado se define como la eliminación de la humedad de un producto, y en la mayoría de las situaciones prácticas durante el secado es la transferencia de masa interna. El principal objetivo de la deshidratación de alimentos es alargar la vida comercial del producto final. Por esta razón, el contenido de humedad se reduce a fin de limitar el crecimiento microbiano y para retrasar el deterioro reacciones químicas. El aire caliente se utiliza en la mayoría de los procesos de secado, y este tipo de operación tiene ha utilizado desde tiempos históricos (Ibarz y Barboza, 2014). El costo del transporte depende en el contenido de humedad del producto, y el costo de secado. Un exceso de sequedad es un desperdicio; no sólo es más calor, es decir, gasto, complicado

que es necesario, pero a menudo el secado excesivo da como resultado un producto degradado, hay que considerar a los métodos involucrados en el ahorro de energía en las secadoras (Mujumdar, 2015).

1.9.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad de los materiales biológicos tiene una variada influencia en sus propiedades mecánicas y su comportamiento en los procesos de secado. El conocimiento de la estructura física, la fisiología y la composición química es fundamental para comprender los cambios que presentan en las diferentes fases del manejo poscosecha y en los procesos industriales (Ospina, 2001). El contenido de agua en los sólidos es importante en la calidad del producto, las interacciones entre el material, vapor de agua, y el agua líquida son bastante complejos. El agua y el vapor de interactuar con las superficies y capilares, al mismo tiempo. La variación en los cambios de temperatura, presión de vapor, número y tamaño de los capilares. Estos proporcionan las influencias adicionales en procesos termodinámicos que dependen de las propiedades del material en proporciones de agua líquida, vapor de agua y materia sólida. El vapor de agua es una componente del aire ambiente y de forma permanente interactúa con las superficies de los sólidos. El agua ligada en un sólido es agua capilar (también conocido como agua de la célula), que también tiene una alta energía de unión. Agua en estado gaseoso o vapor de agua, en un sólido se llama agua libre. Esta es la fracción de agua para ser eliminado (es decir, secado) o añadido (es decir, humectación). El último tipo de agua en un sólido está unido químicamente el agua (Wernecke y Wernecke, 2014; Ceballos, 2012).

1.9.3 Agua en poros, superficies y capilares

Las moléculas de agua se unen en las superficies, los capilares y poros de un sólido en función de sus propiedades higroscópicas. Debido al pequeño diámetro de capilares y las cavidades dentro del sólido, que se llaman poros, el agua puede ser fuertemente ligada. Por otra parte las aberturas de capilares pueden evolucionar por su propia presión de vapor interno. La energía de enlace de absorción de agua depende de la estructura química y la superficie de la morfología del material, y el número de poros y capilares dependen principalmente de producto. La cantidad de agua que puede ser absorbida en la superficie depende del tamaño de los granos y la densidad aparente (Wernecke y Wernecke, 2014).

1.9.4 Humedad de equilibrio

Un sólido húmedo expuesto a un suministro continuo de gas fresco sigue perdiendo la humedad hasta que la presión de vapor de agua en el sólido es igual a la presión parcial del vapor en el gas. El sólido y el gas entonces están en equilibrio, y contenido de agua del sólido se denomina la humedad de equilibrio. Además la exposición a este aire indefinidamente por períodos largos no dará lugar a ninguna pérdida adicional de humedad (Mujumdar, 2015; Toledo, Singh y Kong, 2018). Un intercambio de material higroscópico y energía con que alcanza su entorno, hasta un estado de equilibrio. La presencia de agua es una causa de una cierta presión de vapor de agua en la superficie del material (Wernecke y Wernecke, 2014).

1.9.5 Humedad en los sólidos

Una descripción de los diversos estados de agua en sólidos son parámetros más importantes que definen el contenido de agua de un material, indica la cantidad total de agua en porcentaje de la masa total, el contenido de humedad en base húmeda se representa por la siguiente relación (Wernecke y Wernecke, 2014):

$$\%H_{bh} = \frac{m_w}{m_w + m_{ss}} \times 100 \quad (1)$$

Donde, $\%H_{bh}$ es el porcentaje de humedad en base húmeda (%), m_w es el peso de agua (kg H₂O) y m_{ss} es peso de sustancia seca (kg s.s.)

Contenido de humedad en base seca que es la relación de masa del agua y masa de los sólidos secos (Wernecke y Wernecke, 2014).

$$X = H_{bs} = \frac{m_w}{m_{ss}} \quad (2)$$

Donde, $X = H_{bs}$ es la humedad en base seca (kg H₂O/ kg s.s.).

Un sólido húmedo cuando está libre de humedad y sus cambios de volumen durante el proceso de secado, no es conveniente expresar la humedad contenido en términos de volumen. El contenido de humedad de un sólido generalmente se expresa como el contenido de humedad en peso de material en el sólido seco. El agua puede convertirse en sólido por la retención en los capilares, estructuras celulares o por adsorción química o física en la superficie del sólido, la humedad en un material

higroscópico es la humedad en exceso al equilibrio. Los dos contenidos de humedad están relacionados por la expresión (Mujumdar, 2015; Berk, 2018):

$$X = H_{bs} = \frac{H_{bh}}{1 - H_{bh}} \quad (3)$$

Donde, H_{bh} es humedad en base húmeda (kg H₂O/ kg).

1.10 Curvas de secado y determinación experimental

1.10.1 Mecanismos de deshidratación

Los mecanismos de transferencia de agua en el producto durante el proceso de secado, el agua es movido debido a las fuerzas capilares, la difusión de líquido debido a los gradientes de concentración, la difusión de vapor de agua en los poros llenos de aire, el flujo debido a los gradientes de presión, y el flujo debido al agua de vaporización-condensación. En los poros con estructura rígida, las fuerzas capilares son responsables de la retención de agua, la presión osmótica es responsable de la retención de agua dentro de los sólidos, así como en la superficie (Ibarz y Barboza, 2014).

La humedad de un sólido puede ser unida. Hay dos métodos de eliminación de la humedad no ligada: la evaporación se produce cuando la presión de vapor de agua en el sólido de la superficie es igual a la presión atmosférica, esto se logra elevando la temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición, si el material es sensible al calor, el punto de ebullición, podría ser bajada mediante la reducción de la presión. En segundo lugar, la vaporización, el secado se lleva a cabo por convección. El aire es enfriado por el producto, y la humedad se transfiere al aire por el producto (Mujumdar, 2015; Berk, 2018).

Un material higroscópico es uno que contiene agua ligada que ejerce una presión de vapor más baja que la presión de vapor del agua líquida a la misma temperatura. Se espera que los productos con hidratos de carbono se comportan de una manera higroscópica, ya que los grupos hidroxilo de todas las moléculas de azúcar permiten la formación de enlaces de hidrógeno con moléculas de agua. La interacción entre las moléculas de agua y los grupos hidroxilo causa disolución o solubilización de azúcares. En las proteínas solubles en agua, como en la mayoría de las proteínas

globulares, los aminoácidos polares son uniformemente distribuidos en la superficie, mientras que los grupos hidrofóbicos están situados hacia el interior de la molécula. Esta disposición permite la formación de enlaces de hidrógeno con el agua (Ibarz y Barboza, 2014).

1.10.2 Tiempo de secado

El tiempo de secado es un factor vital que significativamente influye en el colapso de las células, por lo tanto, una temperatura de secado más baja (es decir, el tiempo de secado más largo) podría causar daños estructurales en el producto alimenticio, porque la mayoría de los materiales alimenticios tienen cualidades de un estado gomoso durante el secado. Debido a esto, un tiempo de secado más largo hace que el colapso de los tejidos vegetales, incluso cuando se seca a una temperatura baja porque tejidos de las plantas tienen una temperatura de transición vítrea muy baja (Mohammad, 2016; Berk, 2018).

1.10.3 Curvas de secado

La cinética de secado de un material depende de la humedad del alimento y de la intensidad de evaporación con el tiempo o variables relacionadas con este, como la propia humedad o las dimensiones del equipo. La intensidad de evaporación se determina a través de la velocidad de secado, que es el cambio de humedad (base seca) en el tiempo (Barbosa y Vega, 2000). A partir de las curvas de cinética de secado o sea la humedad en bases seca X en función a tiempo t o la gradiente de la humedad en bases seca dX/dt en función a humedad en bases seca X , que deben ser obtenidas a nivel de laboratorio (McCabe *et al.*, 2007). La eliminación de la humedad de un producto alimenticio típico sigue una serie de velocidades de secado, como se ilustra en la Figura 7. Las zonas de velocidad de secado existen diferentes etapas (Singh y Heldman, 2014; Geankoplis, 2007):

Etapas A-B: La eliminación inicial de humedad se produce en la etapa de calentamiento o enfriamiento inicial del sólido normalmente de poca duración en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que se alcance el equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los gases. Este equilibrio se alcanza a la temperatura de bulbo húmedo del gas.

Etapa B-C: El período de secado a velocidad constante se produce con el producto a la temperatura de bulbo húmedo del aire, donde se evapora la humedad libre. En este período el sólido tiene un comportamiento no higroscópico. Si el gas tiene un estado estacionario y en general depende solo de las propiedades y velocidad del mismo, en la mayoría de los casos la tasa de eliminación de la humedad disminuye con el tiempo.

Etapa C-E: Es el segundo período de secado o período de velocidad de secado decreciente; donde se evapora la humedad ligada del material y predominan las condiciones internas o las características internas y externas simultáneamente. En estas condiciones el sólido tiene un comportamiento higroscópico. El contenido de humedad crítico continuará hasta que el contenido de humedad se reduce, el contenido de humedad por debajo del contenido crítico está bien definida debido al cambio brusco en la velocidad de eliminación de la humedad.

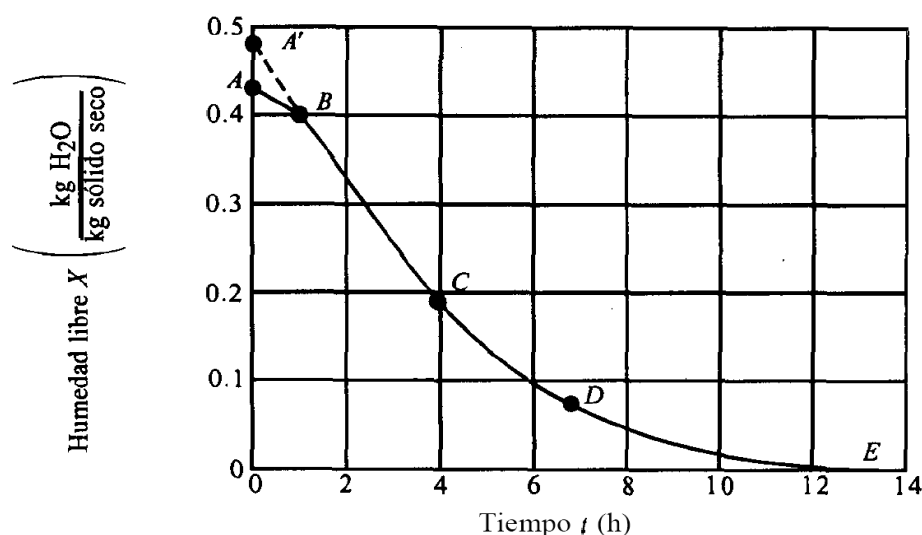


Figura 7. Curva de los datos de humedad libre en función del tiempo (Geankoplis, 2007)

1.11 Modelo dinámico de proceso de secado

1.11.1 Cinética de secado

Los modelos de simulación del proceso de secado se utilizan diseños nuevos, la predicción de la corriente de aire sobre el producto y el comportamiento de secado del producto en particular a secar se consideran indispensables para la optimización

de la eficacia de secado usado en los modelos de simulación. Para este propósito, se requiere un modelo suficientemente precisa, capaz de predecir el agua, las tasas de extracción y que describe el funcionamiento de secado de cada producto en particular en las condiciones normales que se utilizan en las instalaciones comerciales. El estudio matemático de la cinética de secado es un proceso complejo, ya que implica no sólo la masa, sino también los fenómenos de transferencia de calor que se produce al mismo tiempo (Delgado, 2014).

1.11.2 La difusión de humedad

Las eliminaciones de la humedad de un producto alimenticio se producirán debido a la difusión de agua líquida y / o vapor de agua a través de la estructura del producto. Esta fase de movimiento de la humedad seguirá la evaporación del agua en algún lugar dentro del producto. La tasa de difusión de la humedad puede ser estimada por las expresiones para la difusión molecular. El flujo de masa para el movimiento de la humedad es una función del gradiente de presión de vapor, así como el coeficiente de difusión para el vapor de agua en el aire y la transferencia de masa convectiva en la superficie del producto (Singh y Heldman, 2014).

La difusión en los alimentos sólidos durante el secado, rehidratación, o almacenamiento es un proceso complejo que puede involucrar la difusión molecular, el flujo capilar, flujo hidrodinámico, o superficie difusión, la estructura física de los alimentos desempeña un papel muy importante en la difusión de agua y otras moléculas pequeñas. Difusión de gases, vapores, líquidos y en medios sólidos es un proceso más complejo que la difusión en líquidos. Los sólidos tienen generalmente una estructura heterogénea, y pueden interactuar con los compuestos, la difusividad de moléculas pequeñas en sólidos, es mucho menor que en los líquidos, y esto puede afectar a las tasas de los diversos procesos físicos y químicos que involucran la transferencia de masa (Rao, 2014; Berk, 2018).

1.11.3 Proceso de secado

En los procesos de secado, los datos se obtienen generalmente como el cambio en el peso del producto con el tiempo. Sin embargo, los datos a veces de secado se pueden expresar en términos de velocidad de secado, como sigue:

El contenido de humedad del producto se define como la relación entre la cantidad de agua en el alimento y la cantidad de sólidos secos, y se expresa como (Ibarz y Barboza, 2014).

$$M_t = \frac{m_t - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (4)$$

Donde, m_t es el peso total en un momento dado (kg), m_{ss} es peso de sustancia seca (kg s.s.) y M_t es la razón de humedad (kg H₂O/ kg s.s.)

Este caso existe cuando el secado del producto en su totalidad se lleva a cabo en el periodo de velocidad de secado constante. Es casi siempre es posible cuando el sólido contiene la humedad libre o no unido, una variable muy importante en el proceso de secado es el denominado contenido de humedad libre, una curva de secado típico es obtenida mediante el trazado del contenido de humedad libre M_l contra el tiempo de secado que es definido como (Delgado y Barbosa de Lima, 2014):

$$M_l = M_t - M_e \quad (5)$$

Donde M_l es la humedad libre (kg H₂O/ kg s.s.) y M_e es la humedad de equilibrio (kg H₂O/ kg s.s.).

1.11.4 Leyes de Fick

Las leyes de Fick sobre la difusión son leyes cuantitativas, escritas en forma de ecuación diferencial que describen matemáticamente al proceso de difusión de materia o energía en un medio en el que inicialmente no existe equilibrio químico o térmico. Reciben su nombre del médico y fisiólogo alemán Adolf Fick (1829-1901), que las derivó en 1855. Estas leyes pueden ser utilizadas para resolver el coeficiente de difusión, se puede utilizar la primera ley de Fick para derivar la segunda ley, la cual resulta idéntica a la ecuación de difusión (Rao, 2014).

Primera ley de Fick

La primera ley de Fick relaciona al flujo difusivo con la concentración bajo la asunción de un estado estacionario. Esta ley postula que el flujo de un soluto va desde una región de alta concentración a las regiones de baja concentración, con una magnitud que es proporcional a gradientes de concentración, la difusión

molecular es la transferencia de masa causada por el movimiento aleatorio de las moléculas. En gases y líquidos, medios de transporte también pueden resultar del movimiento masivo del fluido (convección). La ley toma la forma (Rao, 2014):

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (6)$$

Donde, J es el flujo difusivo ($\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$), D es el coeficiente de difusión o difusividad (m^2/s), C es la concentración (mol/m^3) y x es la posición dado (m).

Segunda ley de Fick

El principal mecanismo en el secado de sólidos es la difusión del agua en los sólidos de estructura fina y en capilares, poros, y los pequeños agujeros llenos de vapor de agua. El vapor de agua se difunde hasta que alcanza la superficie, en el que pasa a la corriente de aire global. La ley de Fick, se puede expresar como (Ibarz y Barboza, 2014).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (7)$$

Donde, M es el contenido de humedad del producto ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg s.s.}$), t es el tiempo (h), x es la distancia de la transferencia de masa (m) y D_e es el coeficiente de difusión efectiva (m^2/s).

1.11.5 Coeficiente de difusión

El fenómeno de secado de productos naturales durante el proceso es controlado por el mecanismo de difusión de líquido y / o vapor. Suponiendo que el coeficiente de difusión es constante, es decir, independiente de contenido de humedad en el interior, y que la contracción del material es insignificante, segunda ley de Fick, que establece una relación entre el coeficiente de difusión y la gradiente de concentración en un entorno determinado, se puede utilizar (Delgado, 2014).

$$\frac{dM}{dt} = D_e \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} \quad (8)$$

Donde, M es el contenido de humedad interior ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg s.s.}$), r es la trayectoria de difusión (m), t es el tiempo (h) y D_e es el coeficiente de difusión efectiva (m^2/s).

En 1975, Crank dio la primera solución analítica para diversas geometrías (esfera, cilindro, placa rectangular), más tarde utilizados por muchos investigadores para describir los fenómenos de secado de diversos productos alimenticios, dependiendo del tipo de la geometría considerado, la solución a la ecuación de Fick toma diferentes formas para las soluciones para la geometría simple, como la placa, el cilindro y la esfera se dan a continuación (Delgado, 2014).

Lámina

Por último, para una lámina infinita, la condición inicial y el límite necesario para la resolución analítica de la Ecuación 7 son:

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 0 \text{ y } 0 \leq r < L, \quad M = M_0 \\ t > 0 \text{ y } r = 0, \quad \frac{dM}{dr} = 0 \\ t > 0 \text{ y } r = L, \quad M = M_e \end{array} \right\} \quad (9)$$

Dónde, L es el espesor medio de la placa para el secado de ambos lados, o el espesor de la losa para el secado de un lado. La solución de la Ecuación 7 es entonces para una lámina infinita la razón de humedad es:

$$RM = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n - 1)^2} \exp\left(-\frac{(2n - 1)^2 \pi^2 D_e t}{4L^2}\right) \quad (10)$$

Dónde, M es el contenido de humedad en el momento t (kg H₂O/ kg s.s.), M₀ es el contenido inicial de humedad (kg H₂O/ kg s.s.), M_e es la humedad de equilibrio (kg H₂O/ kg s.s.), L es el espesor de la lámina (m) y n = es el número de términos en las series (n=1).

La difusividad de humedad en sólidos y alimentos de forma definitiva puede ser estimado a partir de los datos sobre la tasa de secado bajo condiciones especificadas. Se supone que durante el período de la disminución de la tasa de secado, la humedad se transfiere principalmente molecular (Rao, 2014).

Difusión de la ecuación de difusión no estacionario por una lámina infinita de espesor medio L, el secado de ambas superficies planas y la solución simplificada es:

$$RM = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_e t}{4L^2}\right) \quad (11)$$

Donde, M_o es la humedad inicial (kgH₂O/kgs.s.) y M_e es la humedad de equilibrio (kgH₂O/kgs.s.).

Cilindro

En el caso de la difusión radial en un cilindro de radio r_0 y la longitud L , tenemos las siguientes condiciones iniciales y de contorno, donde M_o es el contenido de humedad inicial y M_e es el contenido de humedad de equilibrio (Delgado, 2014):

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 0 \text{ y } 0 \leq r < r_0, \quad M = M_o \\ t > 0 \text{ y } r = 0, \quad \frac{dM}{dr} = 0 \\ t > 0 \text{ y } r = r_0, \quad M = M_e \end{array} \right\} \quad (12)$$

Estas condiciones se establecen que la humedad está inicialmente distribuida uniformemente a lo largo de la muestra, la transferencia de masa es simétrica con respecto al centro eje y la humedad de la superficie contenido alcanza instantáneamente equilibrio con el alrededor. La solución analítica de la ecuación.

$$RM = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = 4 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^2} \exp\left(-\frac{\lambda_m^2 D_e t}{r_0^2}\right) \quad (13)$$

Donde, λ_m son las raíces de la ecuación de Bessel, RM es la razón de humedad y $m = 1, 2, 3, \dots$ es el número de términos a considerar (Ibarz y Barboza, 2014).

$$RM = \frac{M - M_s}{M_o - M_s} = \frac{4}{r_a^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} e^{(-\beta_n^2 D_e t)} \quad (14)$$

Dónde, r_a es el radio del cilindro (m) y β_n son las raíces de la función de Bessel de primer tipo y orden cero.

Suponiendo que sólo el primer término de las ecuaciones de la serie presentada es importante y aplicando el logaritmo natural de ambos lados de ecuaciones, es posible obtener el coeficiente de difusión eficaz de la pendiente de la recta línea obtenida cuando $\ln(RM)$ se representa en función del tiempo. Para cada uno de las geometrías las ecuaciones correspondientes son (Delgado, 2014):

Relación de tipo Arrhenius entre la difusividad y la temperatura efectiva.

Lámina:

$$\ln(RM) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_e}{4L^2} t \quad (15)$$

Cilindro:

$$\ln(RM) = \ln\left(\frac{4}{\lambda_1^2}\right) - \frac{\lambda_1^2 D_e}{r_0^2} t \quad (16)$$

Tabla 9

Valores de varias raíces para las primeras cuatro funciones de Bessel

Funciones de Bessel				
Raíces	J_0	J_1	J_2	J_3
Primera raíz	2,4048	3,8317	5,1356	6,3802
Segunda raíz	5,5201	7,0156	8,4172	9,7610
Tercera raíz	8,6537	10,1735	13,3237	14,7960
Cuarta raíz	11,7915	13,3237	14,7960	16,2235
Quinta raíz	14,9309	16,4706	17,9598	19,4094

Fuente: George Stokes, (1851).

1.12 Propiedades geométricas de alimentos

Las propiedades geométricas de los granos y semillas, constituyen una información fundamental de ingeniería para diseñar y construir estructuras de almacenamiento, montar sistemas adecuados de transporte, además, es un parámetro fundamental para el diseño de empaques, en el análisis de calidad y en el control de procesos (Ospina, 2001; Toledo, Singh y Kong, 2018).

Propiedades de los materiales juegan un papel vital en el mantenimiento de la estructura de una muestra fresca oponiéndose a las fuerzas externas debido a la transferencia de calor y masa. Sin embargo en dicho material hay porosidad debido a que hacen variar los

cambios en las condiciones de secado. Temperatura, contenido y distribución de agua, y la presión son parámetros que deben tenerse en cuenta (Mohammad, 2016).

1.12.1 Forma y tamaño

Son parámetros que están asociados en los alimentos que permiten describir cualquier producto. Criterios de redondez, esfericidad y semejanza a determinadas formas geométricas se utilizan para determinar la forma y tamaño, se usan diferentes fórmulas matemáticas, las cuales se basan en las tres principales dimensiones ortogonales: longitudinal (eje mayor), ancho (eje medio) y espesor (eje menor) (Alvarado, 2001).

1.12.2 Densidad de alimentos sólidos

La densidad es una de las más importantes propiedades mecánicas y es ampliamente usado en cálculos y la caracterización de los productos alimenticios. En muchos casos, los alimentos contienen fases como sólido, líquido y gaseoso o de aire. En este caso, una simple definición no es suficiente para relacionar la masa y volumen, también depende de la temperatura y la composición, las definiciones están dadas de la siguiente manera (Rao, 2014; Berk, 2018).

• Densidad real

La densidad de un sólido, la cual incluye el volumen todo cerrado, pero no los poros conectado externamente. En este caso, la partícula no es modificada estructuralmente, como en el caso de la densidad del material, la densidad real es el cociente entre la masa del producto y su volumen real (volumen excluyendo los huecos entre los sólidos) (Mujumdar, 2015).

$$\rho_r = \frac{m}{V_r} \quad (17)$$

Donde, ρ_r es la densidad real (kg/m^3), m es la masa total (kg) y V_r es el volumen real (m^3).

• Densidad aparente

Densidad aparente es la relación entre la masa de partículas y el volumen total de la masa del producto. La densidad aparente es un factor importante en el análisis de transferencias de masa y calor a través de partículas, en el control de calidad, en la

evaluación, cálculo y diseño de sistemas de transporte, limpieza y clasificación (Alvarado y Aguilera, 2001). Densidad aparente (ρ_a) es la densidad de una sustancia incluyendo los vacíos de aire de partículas inter e intra (Mujumdar, 2015; Berk, 2018).

$$\rho_a = \frac{m}{V_a} \quad (18)$$

Donde, ρ_a es la densidad aparente (kg/m^3) y V_a es el volumen aparente (m^3).

1.12.3 Porosidad

La porosidad indica la fracción de volumen de espacio vacío o aire en un material y se define como diferentes formas de porosidad son utilizados en los cálculos en procesamiento y producto final. La porosidad se refiere a la relación del espacio libre que existe en el material y volumen total del material, puede ser obtenido a partir de la siguiente relación (Mohammad, 2016; Berk, 2018).

$$\text{Porosidad } (\varepsilon) = \frac{V_{\text{vacío}}}{V_{\text{Total}}} \quad (19)$$

La porosidad puede ser expresada alternativamente de acuerdo con la siguiente ecuación por lo general se estima a partir de la densidad aparente y la densidad real del material. Teniendo en cuenta todos los tipos de poros, una porosidad aparente en alimentos puede ser determinados por la siguiente relación (Mohammad, 2016).

$$\varepsilon = \frac{(\rho_r - \rho_a)}{\rho_r} \quad (20)$$

1.12.4 Esfericidad

La esfericidad es un parámetro importante utilizado en el cálculo de flujo de fluidos y transferencia de materia y calor. La esfericidad se puede definir de diferentes formas (Serpil y Servet, 2009).

El volumen del cilindro y la superficie inicial del cilindro es

$$V_p = \pi r^2 h \quad (21)$$

$$S_p = 2\pi r(r + h) \quad (22)$$

El volumen del cilindro y la superficie ideal transformado en esfera es de:

$$V_p = \frac{4}{3}\pi r_s^3 \quad (23)$$

$$S_s = 4\pi r_s^2 \quad (24)$$

De las Ecuaciones 23 y 24 se determina los valores de r_s y S_s

La esfericidad denominada como factor de forma para partículas no esféricas, que se define como como la razón entre el área superficial de una esfera de volumen igual a la partícula y el área superficial de la partícula (Alvarado y Aguilera, 2001).

$$\text{Esfericidad} = \frac{S_s}{S_p} \quad (25)$$

Donde, S_p es área superficial inicial de sólido (m^2) y S_s es el área superficial de una esfera de volumen de la partícula (m^2).

1.12.5 Encogimiento

También se puede definir el encogimiento o contracción es el descenso del volumen del alimento durante el secado. Cuando se elimina la humedad de un alimento durante el secado, existe un desequilibrio de presión entre el interior y el exterior del alimento. Este genera un esfuerzo de contracción produciéndose un encogimiento o colapso del material (Mayor y Sereno, 2004).

El encogimiento aparente se define como la razón entre el volumen aparente a un determinado contenido de humedad y el volumen aparente inicial de los materiales antes de procesado (Serpil y Servet, 2009).

$$\% \text{ de encogimiento} = \frac{V_{ap}}{V_{apo}} * 100 \quad (26)$$

Dónde, V_{ap} es el volumen aparente a un contenido de humedad y V_{apo} = volumen aparente inicial.

1.13 Antecedentes

El presente trabajo de investigación tal como se indica en el problema central y específico, tiene como preocupación central, encontrar las alternativas de solución considerando los siguientes antecedentes:

Vega *et al.* (2012), estudiaron “El modelado matemático del secado en capa fina cinética de la uchuva (*Physalis peruviana* L.)” durante el procesamiento en cuatro temperaturas (60, 70, 80 y 90°C). Isoterma de desorción se obtuvo a 40°C dando un contenido de humedad de la monocapa de 0,086 g de agua/g m.s. curva de secado experimental mostraron que el proceso de secado se llevó a cabo sólo en el período de velocidad decreciente. Varios modelos de secado en capa delgada disponibles fueron evaluados en base en las pruebas estadísticas como la suma de errores al cuadrado (SSE), chi-cuadrado (χ^2) y el coeficiente de determinación (R^2), difusividad efectiva de la humedad uchuva estaba en el rango de 4,67 a $14,9 \times 10^{-10}$ m²/s. se determinó como la activación energía de 38,78 kJ/mol. Cuando se compara los valores de humedad, se encontró modelo Midilli-Kucuk dio la mejor calidad de ajuste (SSE <0,001, χ^2 <0,001, R^2 > 0,99), mostrando esta ecuación para predecir con precisión el secado de uchuva.

Fredericksen (2013), realizó el estudio de “Modelar isoterma de sorción a tres diferentes temperaturas y transición vítrea de physalis (*Physalis peruviana* L.) en función de la humedad de equilibrio”. Donde la temperatura de transición vítrea physalis deshidratado al vacío en secador convectivo a 60°C por 72 horas, y las isotermas de sorción de agua a 20, 40, 60°C. Las isotermas de sorción de agua en physalis fueron determinadas con el uso de soluciones saturadas de sal de actividad de agua conocida. Los datos de las isotermas de sorción obtenidos, fueron modelados por las ecuaciones de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB), el modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET) y Henderson. Mientras que la influencia del agua sobre la temperatura de transición vítrea (Tg) fue analizada con el modelo de Gordon-Taylor.

Valdenegro *et al.* (2013), realizaron el estudio de “Los efectos de los procesos de secado sobre las características organolépticas y la calidad de la salud de los ingredientes obtenidos a partir de frutas Aguaymanto (*Physalis peruviana* L.)”. En este estudio, se compararon tres procedimientos de secado utilizando fruta Aguaymanto: horno (60°C), el tambor (110°C), y el secado por congelación. Se determinó la influencia de cada método de secado sobre los componentes desarrollado el contenido

de antioxidantes químicos y la capacidad de la cáscara fresca y los resultados indican que todos los procesos de secado afectados el color y las características químicas de los ingredientes.

Yildiz *et al.* (2014), realizaron el estudio “Las características físicas y químicas de los frutos Aguaymanto (*Physalis peruviana* L.)”, algunas características físicas y químicas de los frutos aguaymanto (*Physalis peruviana* L.). Que son necesarias para el diseño de equipos para la recolección, procesamiento, transporte, clasificación, separación y embalaje. La longitud del fruto, diámetro, geométrica y la media aritmética diámetros, esfericidad, superficie, áreas proyectadas (vertical-horizontal) y relación de aspecto de aguaymanto se determinaron como 17,52 mm, 17,31 mm, 17,33 mm, 17,38 mm, 98,9%, 0,949 cm², 388,67 a 387,85 mm² y 0,988, respectivamente. La masa de fruta, la densidad aparente, la densidad de la fruta, la porosidad y la dureza de fruta eran 3,091 g, 997,3 kg/m³, 462,3 kg/m³, 53,61% y 8,01 N, respectivamente. Se observó la materia seca, materia seca soluble en agua, cenizas, proteína, aceite, hidratos de carbono, acidez titulable, pH, azúcares totales, azúcares reductores, capacidad antioxidante fueron 18,67%, 14,17%, 2,98%, 1,66%, 0,18%, 13,86%, 1,26 %, 6,07, 63,90 g / kg, 31,99 g / kg y 57,67%, respectivamente. Los frutos frescos tienen 145,22 mg de equivalentes de ácido gálico (GAE)/100 g de contenido de fenol y color de la piel totales datos representados como L *, a *, b *, Inserción (C) y el ángulo Hue (α) fueron 49,92; 25,11; 50,23;56,12 y 63,48, respectivamente.

Fernández (2015), realizó el estudio de “Cinética de secado de fruta bomba (*Carica papaya* L., cv. *Maradol Roja*) mediante los métodos de deshidratación osmótica y por flujo de aire caliente” El objetivo fue evaluar el comportamiento cinético de las principales propiedades de la fruta durante los procesos de deshidratación osmótica (DO) y por flujo de aire caliente (DAC). Las frutas se cortaron en cubos (trozos) de 2,5 x 2,5 x 1,0±0,02 cm (ancho, largo y espesor) y se deshidrataron mediante DO (60°C durante 10 horas) y DAC (60°C durante 5 horas). Durante la deshidratación se monitoreó la variación de la masa, la firmeza y el porcentaje de pérdida de peso de las frutas en ambos procesos. Como resultado no se hallaron diferencias significativas de las propiedades evaluadas (masa, pérdida de peso y firmeza) entre los procesos de DO y DAC por lo que se obtienen resultados similares por ambos métodos; sin embargo, con respecto al tiempo de deshidratación para ambos métodos si se encontraron diferencias significativas entre dichas propiedades.

Olievira *et al.* (2015), desarrollo el estudio de “Las propiedades físicas (*Physalis peruviana* L.)”, también conocida como la uchuva, juega un papel importante en la nutrición es una base excelente para productos dietéticos. En este estudio se evaluaron algunas de las características biométricas, tales como el diámetro y la masa, y que permitió el cálculo de área de superficie, volumen o densidad, también se evaluaron, las coordenadas de color, por medio de un metter Chroma, y los parámetros de textura evaluados por un texturómetro: firmeza y elasticidad. El trabajo tiene un diámetro medio de 1,69 cm, una superficie de 8,98 cm², un volumen de 2,51 cm³, una masa de 2,77 g y una densidad de 1,10 g/cm³. Se encontró que las coordenadas de color para ser 56,72 para la ligereza, 16,69 para el enrojecimiento y 58,11 para la amarillez.

Pinzón *et al.* (2015), realizaron el estudio de “Comportamiento del fruto de uchuva *Physalis peruviana* L., bajo diferentes temperaturas de almacenamiento” indica que el fruto de la uchuva (*Physalis peruviana* L.), se les evaluó la pérdida de masa fresca, índice de color, firmeza, sólidos solubles totales y acidez total. Se presentaron diferencias significativas para todas las variables evaluadas entre los tratamientos bajo refrigeración y el testigo. La temperatura de almacenamiento, influyó sobre todas las características físicas y químicas evaluadas de manera satisfactoria, ya que luego de 18 días después de almacenamiento los frutos refrigerados conservaron su calidad. Los sólidos solubles totales, exhibieron diferencias significativas entre tratamientos a los 15 días de almacenamiento, el tratamiento testigo (20°C), mostró un valor máximo de 17,3±0.96 °Brix, mientras que los tratamientos de 2°C y 4°C, presentaron valores máximos de 14,5±0.40 °Brix y 15,8±0.46 °Brix, respectivamente, el aumento de los sólidos solubles totales depende en gran medida del proceso de degradación de polisacáridos a disacáridos o monosacáridos mediante hidrólisis de la pared celular.

Yasin *et al.* (2015), realizaron el estudio de “Efecto de dos tratamientos previos de inmersión en la cinética de secado de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.)” Tuvo como objetivo investigar el efecto de oleato de etilo alcalina y pretratamientos solución de sacarosa, así como la temperatura de secado sobre la cinética de secado de la baya de oro. Basado en esto, las bayas de oro se sumergieron en solución de oleato de etilo alcalina (2% oleato de etilo + 4% de carbonato de potasio) a 25°C o en solución osmótica (40% de sacarosa) a 60°C. Después de estos tratamientos previos, características de secado de aire de la baya de oro (*P. peruviana* L.) fueron investigados en 70, 75, 80 y 85°C con 1,5 m/s de velocidad de flujo de aire. También,

se secaron bayas de oro sin pretratamiento y se toma como un control. Los datos experimentales se ajustaron a modelo, la difusividad efectiva obtenida para el pretratamiento de oleato de etilo y una solución alcalina sacarosa y muestras sin tratar varió entre $1,94$ a $3,19 \cdot 10^{-9}$ m^2/s , $1,21$ a $2,93 \cdot 10^{-9}$ y $1,66$ a $2,67 \cdot 10^{-9}$ m^2/s , respectivamente.

Youssef (2015), realizó el estudio de “Impacto de la temperatura de secado caliente y velocidad del aire en la cinética de secado, color, fotoquímicos y actividad antioxidante de Uchuva (*Physalis peruviana* L.)” el efecto de la temperatura y la velocidad del aire durante el secado con aire caliente sobre la cinética de secado y atributos de calidad de fruta de uchuva. Se llevaron a cabo a 60 y $70^{\circ}C$, así como a velocidades de aire de $0,4$ y $0,6$ m/s . curvas de secado mostraron que el proceso de secado se llevó al periodo de velocidad decreciente. La difusión de la humedad eficaz aumentó con el aumento de la temperatura, velocidad del aire y se encontró que la energía de activación de $38,78$ kJ/mol , así como la diferencia total de color y el ángulo Hue fueron afectados por el secado de la temperatura del aire y la velocidad.

Ávila *et al.* (2016), realizaron la investigación titulada “Influencia de la madurez del fruto y del secado del cáliz en uchuva (*Physalis peruviana* L.), almacenada a $18^{\circ}C$ ” indica que los frutos de uchuva en estados de madurez 3 (amarillo verdoso) ó 5 (amarillo naranja) y con secado del cáliz durante seis horas a 18 y $24^{\circ}C$, se almacenaron a temperatura ambiente a $18^{\circ}C$ y humedad relativa del 75% durante 20 días, con el fin de evaluar cambios físico-químicos y fisiológicos. La uchuva presentó el máximo de respiración entre los 6 y 8 días de almacenamiento. El día 6 de almacenamiento parece ser crucial debido al metabolismo muy elevado y los contenidos más altos de azúcares y ácidos. Los sólidos solubles totales tendieron a aumentar, la acidez titulable a disminuir. El contenido de azúcares se caracterizó por mayor concentración de sacarosa, seguido por glucosa y fructosa. El estado de madurez 3 del fruto conservó mejor los azúcares y ácidos orgánicos. El índice de madurez influyó más que el secado del cáliz, sobre el comportamiento poscosecha de la uchuva. El secado del cáliz a $24^{\circ}C$ causó el pico climatérico más alto, originó la mayor pérdida de peso fresco en frutos cosechados al índice de madurez 5.

Cabrera *et al.* (2017), realizaron la investigación titulada “influencia del secado sobre la calidad fisiológica de los frutos la uchuva (*Physalis peruviana* L.) agregados con

componentes activos”. El objetivo de la investigación fue evaluar la influencia de las condiciones del proceso de secado sobre la uchuva (*Physalis peruviana* L.) impregnada al vacío con CA y deshidratada. Se usó un diseño factorial con dos variables independientes, 2 niveles por variable (temperatura: 50 y 60°C; velocidad del aire: 2,0 y 3,0 m/s) y 3 réplicas por condición de secado. Los frutos de uchuva fueron previamente impregnados al vacío con una emulsión que contenía calcio y vitaminas B₉, C, D₃ y E, también se sometieron a una deshidratación hasta una actividad de agua aproximada de 0,6. Y las curvas de velocidad de secado presentaron dos periodos de velocidad decreciente. El aumento de la temperatura de secado disminuye el tiempo de proceso, presentándose mayor degradación de los CA, mientras que la velocidad del aire ofrece un efecto no significativo. El tratamiento que permitió una mejor retención de los CA y bajos tiempos de proceso fue 60°C y 2 m/s, alcanzando niveles de 204,8±10.5 mg, 137,0±34.7 mg, 13,6±0,9 mg, 2,2±0,6 mg, 7,0±1,2 mg para calcio y vitaminas B₉, C, D₃ y E, respectivamente por porción de 50 g de uchuva deshidratada. La integración del proceso de impregnación al vacío y secado por aire convencional representa una alternativa tecnológica efectiva que confiere un mayor valor agregado al fruto de uchuva.

Renato de Jesús *et al.* (2017), realizaron la investigación titulada “Secado convectivo de frutos de capa de aguaymanto: Efecto de los pretratamientos sobre la cinética y los parámetros de calidad” donde el efecto fue los pretratamientos físicos (congelación rápida con nitrógeno líquido y congelación lenta seguida de descongelación) y químicos (solución alcalina de oleato de etilo) sobre la cinética y parámetros de calidad de la grosella espinosa (*Physalis peruviana* L.) durante el secado por convección (60°C, 2 m/s). Se evaluó la influencia de los pretratamientos sobre la cinética de secado, la contracción, la capacidad de rehidratación, la retención de ácido ascórbico, la actividad del agua, el perfil de textura y el color. Se evaluaron cinco ecuaciones de capa delgada para determinar su capacidad para predecir la cinética de secado, de la cual la ecuación de Wang y Singh tuvo el mejor desempeño. Todos los pretratamientos redujeron el tiempo de secado reduciendo la resistencia de la piel cerosa de aguaymanto a la transferencia de masa. El pretratamiento químico promovió el menor tiempo de secado y la mayor retención de ácido ascórbico, la capacidad de rehidratación, el mejor mantenimiento de la textura, así como el menor encogimiento.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema

En el Perú existe una producción de aguaymanto y tiene su temporalidad de cosecha por lo que los agricultores tienen una dificultad de una buena explotación debido al mal manejo postcosecha por los cambios ambientales y las zonas de producción se encuentran alejados, lo que dificulta su consumo, además este fruto es perecible, por lo que presenta pérdidas considerables durante el manipuleo y transporte, por lo tanto, se disminuye la buena calidad y aceptación en el mercado. La baya de aguaymanto presenta un alto potencial de cultivo, pues crece en suelos pobres, con bajos requerimientos de fertilización, es ideal para sembrarse en regiones ubicadas entre 1800 y 2800 msnm, en lugares con alta luminosidad y temperaturas promedio entre 13 y 18°C (Basoalto *et al.*, 2010; Fischer, Miranda, Piedrahíta, y Romero, 2005).

La postcosecha generalmente se realiza es en diferentes estados de madurez fisiológica por lo que los productores cosechan en cualquier estado ya sea pequeños o grandes, infestados por lo tanto hay cambios físicos y bioquímicos por que el fruto es climatérico, para alargar su conservación este alimento se somete al secado en forma entera requiere mucha energía y tiempo para la deshidratación por lo que es necesario disminuir su tamaño en forma cilíndrica y lamina así disminuyendo el área específica del producto para que el proceso de secado sea más corto (Basoalto *et al.*, 2010; Fischer, Miranda, Piedrahíta, y Romero, 2005).

La temperatura de secado natural es variable porque hay cambios ambientales, para la extracción de agua de aguaymanto en estado fresco se requiere mucha energía para que no ocurran cambios físicos, bioquímicos y microbiológicos dentro de aguaymanto.

Durante el secado la cinética se puede interpretar el modelo como difusividad efectiva y energía de activación que son relacionados con la transferencia de masa y energía dentro del producto finalmente hay variaciones en las propiedades geométricas de secado debido al encogimiento del producto y para el almacenamiento del producto. Del enunciado anterior se desprende las siguientes formulaciones del problema.

2.2 Enunciados del problema

De lo enunciado anteriormente se desprende el siguiente problema central:

Pregunta central

¿Cómo es influenciado el modelo cinético y propiedades geométricas en el proceso de secado convectivo de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.)?

Preguntas secundarias:

¿En qué medida afecta los estados de madurez, forma y temperatura en el tiempo de secado?

¿En qué medida es afectado la difusividad efectiva y energía de activación en diferentes valores de estado de madurez, forma y temperatura en el modelo de cinético de secado?

¿Cuál es la esfericidad y encogimiento en el producto deshidratado de aguaymanto?

2.3 Justificación

La tendencia del consumo son productos naturales como el aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) y se ve la necesidad de incentivar la conservación de esta materia prima con el fin de contribuir a los productores, a través de investigaciones, la conservación es una alternativa para dar un valor agregado al fruto e incentivar y diversificar su consumo, de esta manera también coadyuvar en los aspectos nutricionales del poblador andino.

El aguaymanto posee resaltantes propiedades, entre ellas, su efectivo poder antioxidante, el cual previene el envejecimiento; y su accionar como un práctico antidiabético que estabiliza el nivel de glucosa en la sangre y es rico en vitaminas A, B y C, lo mismo que en hierro, fósforo, fibra y carbohidratos (Bonilla *et al.*, 2009). Debido a la gran presencia de nutrientes y vitaminas, este alimento es beneficioso para preservar la salud de los tejidos especializados como la retina, ayudar al desarrollo y la salud de los tejidos de la piel y las membranas mucosas (Puente *et al.*, 2011).

Su consumo también es recomendable para las mujeres que atraviesan por la menopausia, gracias a que aumenta la cantidad de estrógenos, igualmente ayuda a la absorción de hierro, combate el estrés, el cansancio mental y la depresión. Otras propiedades del aguaymanto son la mejora de la función cardiovascular, y la producción de una mayor cantidad glóbulos rojos. Además, actúa como antirreumático, desinflamando las articulaciones; disminuye los niveles de colesterol en la sangre cumpliendo el rol de antidiabético, estabilizando el nivel de glucosa en la sangre y purificándola (Wu *et al.*, 2006; Tacanga, 2015).

El secado, es la reducción del contenido de humedad que permite obtener productos sólidos con un bajo contenido de agua, para el almacenamiento, envasado, distribución y consumo, en la mayoría de los procesos el agua es eliminada por evaporación convectiva, con el secado del aguaymanto prolongará la vida útil, la protección del producto a posibles contaminaciones tanto del tipo químico como microbiológico y las estrictas normas de calidad obligan a los productos, procesadores y especialmente distribuidores; a buscar las alternativas de conservación y más adecuados a las necesidades actuales del mercado (Singh y Heldman, 2014; Toledo, Singh y Kong, 2018; Holdsworth, 2016).

Asimismo, contribuirá a la solución del problema de la sociedad con la incentivación del cultivo de este producto con un buen parámetro de manejo postcosecha y que pueden aplicar también para otros productos y así mejorar las condiciones económicas de los productores. En la investigación los modelos de secado de aguaymanto son novedosos por lo que desarrollara nuevos métodos de conservación y predicción de propiedades físicas y que aportara para el beneficio científico para la posterior aplicación en el diseño de ingeniería postcosecha, transformación y comercialización de este producto más consumido en la región andina.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

Estudiar el modelo cinético y propiedades geométricas en el proceso de secado convectivo de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.)

2.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el tiempo de secado en diferentes estados de madurez, forma y temperatura sobre el secado de aguaymanto.
- Evaluar el modelo cinético y determinar la difusividad efectiva de la humedad y energía de activación en diferentes valores de estado de madurez, forma y temperatura en el secado de aguaymanto.
- Evaluar la esfericidad y encogimiento del producto deshidratado de aguaymanto.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general:

El estudio del modelo cinético y propiedades geométricas influyen en el proceso de secado convectivo de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.)

2.5.2 Hipótesis específicos:

- El estado de madurez, forma y temperatura influyen en el tiempo de secado de aguaymanto.
- La difusividad efectiva de la humedad y energía de activación en diferentes estados de madurez, forma y temperatura determina el modelo de cinética de secado.
- La esfericidad y encogimiento del producto deshidratado de aguaymanto es afectado significativamente por la materia prima acondicionada.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de ejecución de trabajo de investigación

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el Departamento de Apurímac, Provincia de Abancay, Distrito de Tamburco, en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela Académico profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, que está ubicada a una altitud de 2 700 msnm y la Dirección es Av. Inca Garcilaso de la Vega S/N. y el análisis de acidez y humedad se realizó en la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial de Universidad Nacional del Altiplano Puno.

3.2 Población y muestra

La población en estudio son las plantas de aguaymanto, procedente de la micro cuenca de distrito de Abancay, recolectadas (entre los meses de noviembre hasta junio), que está ubicada a una altitud de 2300 msnm., Provincia de Abancay del Departamento de Apurímac.

La muestra es la baya de aguaymanto con estado de madurez 3 y 6, se seleccionó entre 10 – 12 °Brix con pesos entre 2 kg se colocó en el secador, corteza firme, sin evidencia de daño mecánico e infestación. El estado de madurez de la fruta se seleccionó en base al criterio industrial de compra de materia prima y por la resistencia de la fruta a la manipulación del proceso de impregnación a vacío. Las muestras fueron acondicionadas, lavadas, peladas y cortadas utilizando molde de acero inoxidable.

3.3 Materiales y equipos

3.3.1 Maquinarias y equipos

- Estufa eléctrica de secado, Memmert, temperatura de 30 a 200°C.
- Estufa eléctrica digital, Memmert 100-800. Beschickung, Loading model
- Analizador de humedad, Ohaus, Modelo MB45, capacidad 45 g \pm 0,01%, 50 a 200°C \pm 1°C.
- Balanza analítica, Balance JR, Modelo HB-3000., capacidad min. 10 g y máx. 3 000 g, d=0,1g.
- Refrigerador-congelador Bosh KDN49

3.3.2 Instrumentos de medición de variables

- Psicrómetro digital IR, EXTECH Instruments, Modelo HD500, Infrared -50 a 500°C, Type K -100 a 1372°C.
- Multímetro digital, Marca PASCO Scientific, EX 410, Type K - 20 a 750°C \pm 3%.
- Micrómetro, PASCO scientific, 0 – 25 mm.
- Vernier, LITZ – Profesional, 0.05 a 150 mm.
- Cronometro digital, EXTECH INSTRUMENTS.
- Refractómetro digital Atago® Pocket PAL-1. 0,53%. d=0,01

3.3.3 Materiales de laboratorio

- Probeta de 500ml, PIREX.
- Depósitos de plástico (Baldes, jarras)
- Cuter profesional, Amazonas, Modelo Fiskars 1396, 9mm.
- Reglas
- Envases de plástico de alta densidad

3.4 Metodología experimental

3.4.1. Metodología general del proceso de deshidratación de aguaymanto

A continuación, se presenta una descripción de las actividades realizadas en la investigación planteada (Brito *et al.*, 2014):

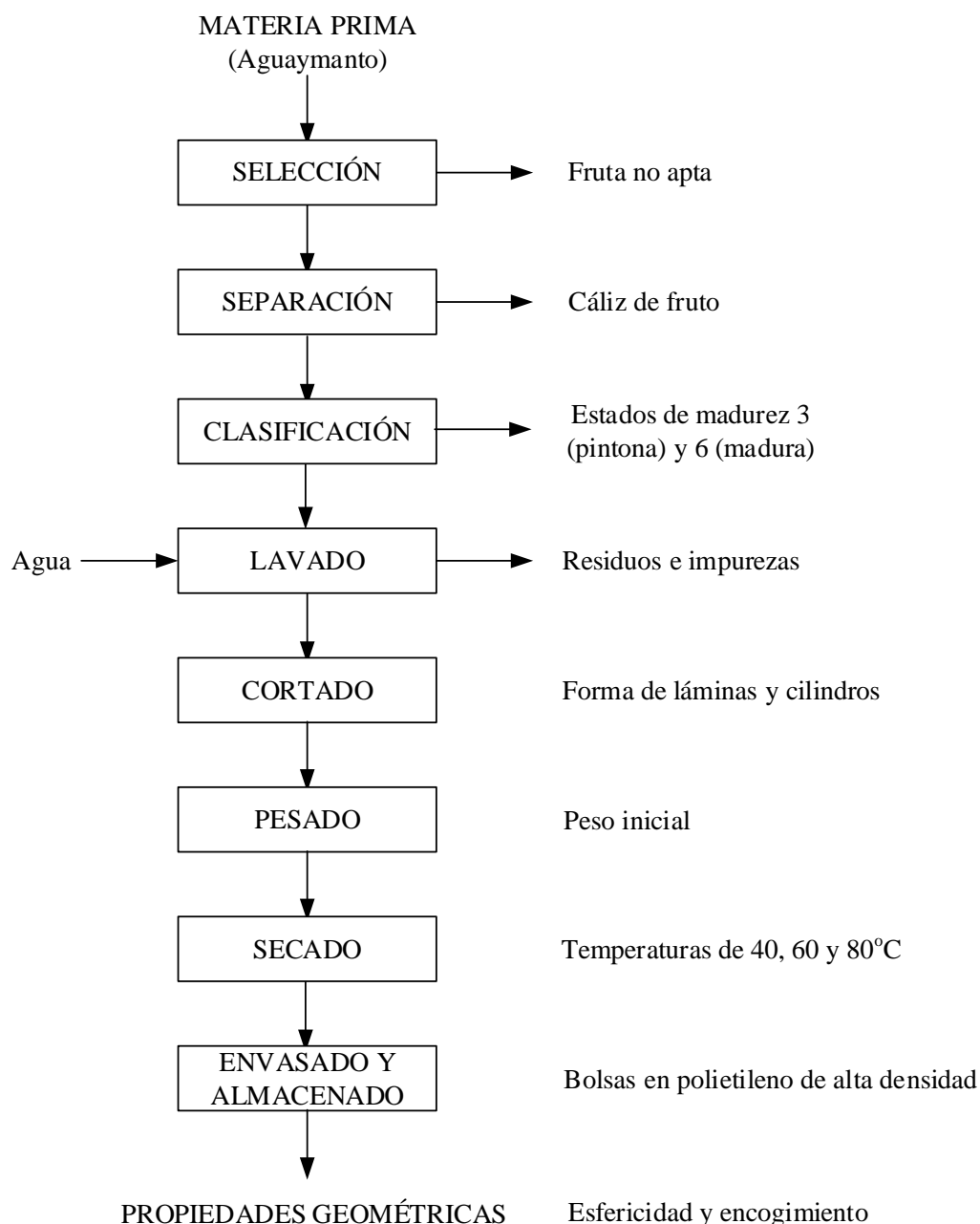


Figura 8. Flujoograma para obtener las curvas de cinética de secado.

Recolección de Aguaymanto. Se recolectó de Distrito de Abancay.

Selección. Se seleccionó aguaymanto de buena calidad, se separaron los que presentan daños mecánicos y ataques biológicos.

Separación. Con la finalidad de separar el cáliz del fruto.

Clasificación. La clasificación se hizo en función al tamaño y se observó el color externo según el grado de color de aguaymanto en estado de madurez 3 (pintona) y 6 (madura).

Lavado. La limpieza se ocupa de la remoción de los residuos, impurezas y demás suciedad visible.

Cortado. Se troceó en forma de láminas y cilindros.

Pesado. Se pesó las muestras considerando el peso inicial.

Secado. Se realizó en el secador convectivo a diferentes temperaturas de 40, 60 y 80°C.

Envasado y almacenado. Se envasó en bolsas de polietileno de alta densidad, y luego una vez selladas se colocó en refrigeración a 4°C para su conservación hasta la realización de las pruebas posteriores.

3.4.2. Determinación del tiempo de secado en diferentes estados de madurez, forma y temperatura sobre el secado de aguaymanto.

a) Método de medición de índice de madurez

Sólidos Solubles Totales (°Brix)

Se determinó por el método 932.12 de la A.O.A.C. (2005) usando un refractómetro digital PR101 marca ATAGO Master con una capacidad de 0-60 °Brix. Se tomó una gota de jugo a una temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ previamente extraído del fruto, se colocó en el sensor óptico del refractómetro para obtener la lectura correspondiente, la cual se expresó en porcentaje de sólidos solubles totales.

Acidez titulable

La acidez titulable se determinó por el método 942.15 de la A.O.A.C. (2005). Se tomó una muestra de 10 g y se adicionaron 50 ml de agua destilada y se trituró para homogenizar la muestra luego se midió el volumen y se filtró, posteriormente, se tomó una alícuota de 10 ml, agregándole 3 gotas de fenoftaleína y se tituló con una solución de hidróxido de sodio al 0,1 N.

Cálculos:

$$\% \text{ de ácido cítrico} = \frac{(V_{\text{gasto de NaOH}})(N_{\text{NaOH}})(\text{Meq ácido cítrico}) \times 100}{\text{Valicuota}} \quad (27)$$

Donde, V gasto en ml de NaOH gastados durante la titulación, N es la normalidad del NaOH, Meq. del ácido es miliequivalentes del ácido cítrico (0,064) y Valicuota del jugo en ml.

Preparación de solución: Para preparar el NaOH al 0,1N se pesó 1g de NaOH en escamas y se aforo con agua destilada en el matraz de 250 ml. Si el NaOH es líquido se ocupa directamente para la titulación, ya que está al 0,1 normal.

Finalmente se determinó la relación °Brix/acidez en los frutos expuestos directamente a temperatura de comercialización denominados índice de madurez: Relación de los sólidos solubles y la acidez NTP 203.121 (2007).

b) Forma del producto

Tamaño de longitud fruto: se midió con vernier desde un extremo a otro del fruto y su medida será en milímetros.

Forma cilíndrica

La fruta se cortó en paralelo al eje principal usando un cortador circular para obtener cilindros con espesor longitudinal (L) y el diámetro (D), se midió con el uso de un calibre digital con exactitud de 0,01 mm.

Forma lámina

Dimensiones axiales: directamente con un vernier tomando tres medidas axiales perpendiculares entre sí: x, y, z, para cada índice de madurez y tamaño.

El aguaymanto de diferentes formas geométricas se colocó en el secador registrándose la temperatura y peso durante el secado, el contenido de humedad se registró hasta que la muestra alcance el contenido de humedad de equilibrio. El experimento se llevó a cabo por triplicado y se consideró el valor medio.

c) **Temperatura de secado**

El experimento se llevó en el secador. Las temperaturas del aire de secado fueron (40°C, 60°C y 80°C), siguiendo un diseño factorial completamente al azar, realizando tres repeticiones para cada medición.

Temperatura de aguaymanto: Se midió la temperatura del fruto al inicio de cada prueba y a intervalos de 60 minutos durante el proceso de secado. Para la determinación de esta variable se mantuvo uniforme la temperatura.

Temperatura y humedad relativa del aire ambiente: Se determinó con un termohigrómetro, la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa. Para que no afecte en el resultado.

d) **Humedad**

La determinación del contenido de humedad (g/100g) se determinó por efecto de la gravimetría en estufa, según el método AOAC 950.27 (2005).

3.4.3. Evaluación de modelo cinético y determinación la difusividad efectiva y energía de activación en diferentes estados de madurez, forma y temperatura en el secado de aguaymanto.

Evaluación del modelo cinético de secado

Los datos experimentales de cinética de secado, donde las muestras se colocaron en un secadero y la difusividad pueden calcularse por tres métodos:

- a) A partir de las pendientes de las curvas de secado: La difusividad se calculó a partir de la representación del logaritmo neperiano de la humedad media adimensional frente al tiempo. La representación se ajusta a una línea recta y la difusividad se calculó a partir de la pendiente de la misma.
- b) Reduciendo la diferencia entre valores experimentales: Se formula el modelo basado en la ley de Fick. A partir de datos de secado experimentales se identificó el valor de difusividad efectiva que proporcione la mayor concordancia y los calculados utilizando el modelo.

c) Calculados mediante método de optimización, se basa en la medida experimental de la cinética de régimen modular. Se estimó la difusividad dependiente de la concentración de agua.

Evaluación del modelo semi-teórico

Los modelos semi-teórico se derivan directamente de la solución general de Fick de la ley por la simplificación. Es importante tener en cuenta que los modelos semi-teóricos son válida sólo en los parámetros específicos del área de distribución de la que se obtuvieron, a saber, temperatura, humedad relativa, la velocidad del flujo de aire y el contenido de humedad (Delgado, 2014).

La ecuación básica que se utiliza para caracterizar el proceso de secado en capa fina, es similar a la ley de Newton de enfriamiento, y considera sólo una constante de secado para describir el efecto de todos los mecanismos de transporte existentes durante el proceso de secado.

Los modelos de secado basados en la teoría de difusión de líquidos han sido preferidos por los investigadores en el área de secado de alimentos. Entre ellos se encuentran los modelos de Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis modificado. Estos modelos de secado no solo permiten predecir el mejor proceso, en la Tabla 10 se presentan varios estudios que tengan en cuenta lo anterior, las ecuaciones para modelar diferentes productos alimentarios. Hay que tener en cuenta que esas ecuaciones no son las únicas que se utilizan para el secado de modelado, pero son probablemente, los más utilizados (Delgado, 2014):

$$RM = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (28)$$

Donde, RM es la razón de humedad, M es la humedad (kg agua/kg s.s.) registrada en el tiempo t (s), M_e es la humedad de equilibrio (kg agua/kg s.s.) asumida como el valor registrado a tiempos prolongados de proceso (Guiné y Barroca, 2011) y M_o es el contenido de humedad inicial (kg agua/kg s.s.).

Tabla 10

Modelos matemáticos en estudio

Nombre del modelo	Modelo	Referencias
Henderson y Pabis	$RM = a \exp(-kt)$	Doymaz (2014), Simha y Gugalia (2013)
Midilli	$RM = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli <i>et al.</i> (2002), Ratti (2009), Simha y Gugalia (2013)
Logarítmico	$RM = a \exp(-kt) + c$	Doymaz (2014) y Ratti (2009)
Page	$RM = \exp(-kt^n)$	Doymaz (2014) y Ratti (2009)
Lewis	$RM = \exp(-kt)$	Doymaz (2014) y Ratti (2009)

Razón de humedad (RM), constantes (a, b, c, k, n) y tiempo (t).

Cálculo de energía de activación

El efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión eficaz es un importante factor a mejorar la calidad de los valores predichos de razón de humedad (RM), y se puede abordar a través de una relación de Arrhenius.

$$D_e = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (29)$$

Donde, D_0 es una constante de difusividad equivalente a la difusividad infinitamente a alta temperatura (m^2/s), E_a es la energía de activación (kJ/mol) y T es la temperatura absoluta ($^{\circ}K$).

La Ecuación 29 se puede reordenarse de la siguiente forma:

$$\ln(D_e) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R(T + 273,15)} \quad (30)$$

Trazado los valores experimentales de $\ln(D_e)$ como una función de $1/T$, se obtiene una línea recta donde la intersección da D_0 y la pendiente da $-E_a/R$ (Delgado, 2014).

3.4.4. Evaluación de la esfericidad y encogimiento en el proceso de secado convectivo de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.)

3.4.4.1. Medición de densidad

a. Densidad de partículas

La densidad de las partículas se realizó por el método de desplazamiento de volumen utilizado en medición de la densidad aparente sin recubrimiento la partícula. Las partículas grandes no pueden ser colocadas en un lado, se requiere un diseño especial para los alimentos que contienen estas partículas (Rao, 2014).

b. Densidad aparente

La densidad aparente se determinó por el método de desplazamiento de volumen con un picnómetro a 20 °C utilizando agua destilada como líquido de referencia y la densidad de los líquidos según el método AOAC 931,04 (A.O.A.C. 2005).

c. Método dimensión geométrica

La densidad aparente de una forma geométrica regular se determinó a partir del volumen, calculada a partir de las dimensiones y peso. Este método no es adecuado para materiales de forma irregular, donde no es fácil de medir las dimensiones características (Mujumdar, 2015; Berk, 2018).

3.4.4.2. Técnicas de medición esfericidad, según el método (Rao, 2014).

Medir las dimensiones de la forma geométrica del sólido

Calcular el volumen y el radio de la esfera

Determinar las áreas y finalmente calcular la esfericidad

3.4.4.3. Técnicas de medición encogimiento, según el método (Mayor y Sereno, 2004)

Medir las dimensiones de la forma geométrica del sólido

Calcular el volumen aparente inicial y final del producto

Determinar la relación de volúmenes

3.5 Factores en estudio

3.5.1 Madurez de baya de aguaymanto (M)

M₁= Estado de madurez 3 (pintona) y M₂= Estado de madurez 6 (madura)

3.5.2 Forma de baya de aguaymanto (F)

F₁ = Cilíndrica y F₂ = Lámina

3.5.3 Temperatura de secado (T)

T₁ = 40°C, T₂ = 60°C y T₃ = 80°C

Tabla 11

Distribución esquemática de los tratamientos de los factores en estudio

Tratamientos	Madurez	Forma	Temperatura (°C)	N° de corridas
T ₁	M ₁	F ₁	T ₁	3
T ₂	M ₁	F ₁	T ₂	3
T ₃	M ₁	F ₁	T ₃	3
T ₄	M ₁	F ₂	T ₁	3
T ₅	M ₁	F ₂	T ₂	3
T ₆	M ₁	F ₂	T ₃	3
T ₇	M ₂	F ₁	T ₁	3
T ₈	M ₂	F ₁	T ₂	3
T ₉	M ₂	F ₁	T ₃	3
T ₁₀	M ₂	F ₂	T ₁	3
T ₁₁	M ₂	F ₂	T ₂	3
T ₁₂	M ₂	F ₂	T ₃	3
Total de corridas				36

Dónde: T₁, T₂, T₃, ..., T₁₂ son los tratamientos.

3.6 Variables de respuesta

Cuya operacionalización se encuentra en la Tabla 11.

3.6.1 Evaluación del modelo cinético de secado

3.6.2 Determinación de difusividad efectiva y energía de activación

- Difusividad efectiva
- Energía de activación

3.6.3 Evaluación de propiedades geométricas

- Esfericidad
- Encogimiento

3.7 Análisis estadístico

3.7.1 Diseño experimental

El tipo de diseño estadístico para la contrastación de la hipótesis en el experimento, se propone un diseño factorial diseño completamente al azar (DCA) con $2 \times 2 \times 3$, con 3 repeticiones con un total de 36 pruebas experimentales. Los factores que se considera son: madurez (estado de madurez 3: M_1 y estado de madurez 6: M_2), forma cilíndrica (F_1) y lámina (F_2) y la temperatura en el secado ($T_1 = 40^\circ\text{C}$, $T_2 = 60^\circ\text{C}$ y $T_3 = 80^\circ\text{C}$). Como se muestra en la Tabla 11 a detalle el diseño experimental. Para el procesamiento de datos se usó software estadístico Sthatgrafics Centurión XVII versión 16.1.18 en español y Excel 2019 por lo tanto se realizó con la técnica de ANDEVA (análisis de varianza) para el contraste de la hipótesis.

a) Modelo no lineal de cinética de secado

$$RM = a e^{(-kt^n)} + bt \quad (31)$$

Donde, RM es la razón de humedad; a, b, c, k, n , son constantes y t , tiempo.

Se utilizó para el grafico de cinética de secado, mediante el ajuste de curvas exponenciales y se aceptará un coeficiente de correlación aproximadamente a 1.

Coefficientes de determinación, R^2 y R_{aj}^2

Los coeficientes más útiles para medir la calidad global del modelo de regresión múltiple es el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de determinación ajustado (R_{aj}^2), que se obtienen a partir del ANDEVA de la siguiente manera:

$$R^2 = \frac{SC_{total} - SC_{error}}{SC_{total}} * 100 \quad (32)$$

$$R_{aj}^2 = \frac{CM_{total} - CM_{error}}{CM_{total}} * 100 \quad (33)$$

Nótese que estos coeficientes comparan la variabilidad explicada por el modelo frente a la variación total, cuantificadas a través de la suma de cuadrados (SC) o por el cuadrado medio (CM). De esta forma, para interpretar estos coeficientes se cumple que $0 \leq R_{aj}^2 \leq R^2 \leq 100$ cuantifican el porcentaje de variabilidad presente en los datos y que es explicado por el modelo; por ello, son deseables valores próximos a 100. En general, para fines de predicción se recomienda un coeficiente de determinación ajustado de al menos 70 %. Cuando hay muchos factores se prefiere el estadístico R_{aj}^2 en lugar del R^2 , puesto que este último se incrementa de manera artificial con cada término que se agrega al modelo, aunque sea un término que no contribuya en mucho a la explicación de la respuesta. En cambio, el R_{aj}^2 incluso baja de valor cuando el término que se agrega no aporta mucho (Gutiérrez y De la vara, 2012).

MSE = Error cuadrático medio o promedio de cuadrado de los errores.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad (34)$$

RMSE: Desviación de raíz cuadrada media (también conocido como raíz de la desviación cuadrática media) es la muestra de desviación estándar de los residuales entre el modelo y los datos. En otras palabras, es la desviación estándar de (a) y real de cada punto de datos observado para su x dada, menos (b) lo que devuelve la regresión para esa x dada. Esto también sucede para simplificar RMSE en una ecuación que involucra solo r -cuadrado y la desviación estándar de y :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}} \quad (35)$$

El valor de RMSE mide la propagación, como la desviación estándar de los residuos, nos da la idea de cuán dispersos están los datos desde la línea del modelo.

b) Modelo estadístico lineal para análisis de varianza (ANDEVA) para las propiedades geométricas

El análisis estadístico corresponde al siguiente modelo estadístico lineal en el diseño completo al azar.

$$Y_{ijkl} = u + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + B_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (36)$$

$i = 1, 2, \dots, a$ (niveles de factor madurez: M)

$j = 1, 2, \dots, b$ (nivel del factor forma de aguaymanto: F)

$k = 1, 2, \dots, c$ (nivel del factor temperatura: T)

Donde:

Y_{ijkl} = Es el variable de respuesta de la l -ésima repetición (propiedades geométricas) al que se le aplicó el i -ésimo nivel del factor A (madurez), j -ésimo nivel del factor B (forma de aguaymanto), y k -ésimo nivel del factor C (temperatura), u = Efecto de la media general, α_i = Efecto del i -ésimo nivel de madurez (M), β_j = Efecto del j -ésimo nivel de forma de aguaymanto (F), γ_k = Efecto del k -ésimo nivel de temperatura (T), B_l = Efecto del l -ésimo repetición, $(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción del i -ésimo nivel de madurez (M) y del j -ésimo nivel de forma de aguaymanto (F), $(\alpha\gamma)_{ik}$ = Efecto de la interacción del i -ésimo nivel de madurez (M) y del k -ésimo nivel de temperatura (T), $(\beta\gamma)_{jk}$ = Efecto de la interacción del j -ésimo nivel de forma de aguaymanto (F) y del k -ésimo nivel de temperatura (T), $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ = Efecto de la interacción del i -ésimo nivel de madurez (M) y del j -ésimo nivel de forma de aguaymanto (F) y del k -ésimo nivel de temperatura (T) y ε_{ijkl} = Efecto aleatorio o error experimental en la obtención de Y_{ijkl} .

El experimento fue de 12 tratamientos con 3 repeticiones haciendo un total de 36 observaciones

c) Modelo estadístico lineal para optimización de superficie de respuesta de las propiedades geométricas

Se realizó con la metodología de superficie de respuesta para determinar los parámetros de temperatura, estado de madurez y geometría en la deshidratación de aguaymanto. Para el análisis estadístico se empleó el software Statgraphics® Centurion XVI.I (Stat Point Inc., Warrenton, VA, USA).

El análisis estadístico corresponde al siguiente modelo estadístico lineal.

$$Y_{ijkl} = u + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (37)$$

$i = 1, 2, \dots, a$ (niveles de factor madurez: M)

$j = 1, 2, \dots, b$ (nivel del factor forma de aguaymanto: F)

$k = 1, 2, \dots, c$ (nivel del factor temperatura: T)

Donde:

Y_{ijkl} = Es el variable de respuesta de la l -ésima repetición (propiedades geométricas) al que se le aplicó el i -ésimo nivel del factor A (madurez), j -ésimo nivel del factor B (forma de aguaymanto), y k -ésimo nivel del factor C (temperatura), u = Efecto de la media general, α_i = Efecto del i -ésimo nivel de madurez (M), β_j = Efecto del j -ésimo nivel de forma de aguaymanto (F), γ_k = Efecto del k -ésimo nivel de temperatura (T), $(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción del i -ésimo nivel de madurez (M) y del j -ésimo nivel de forma de aguaymanto (F), $(\alpha\gamma)_{ik}$ = Efecto de la interacción del i -ésimo nivel de madurez (M) y del k -ésimo nivel de temperatura (T), $(\beta\gamma)_{jk}$ = Efecto de la interacción del j -ésimo nivel de forma de aguaymanto (F) y del k -ésimo nivel de temperatura (T), $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ = Efecto de la interacción del i -ésimo nivel de madurez (M) y del j -ésimo nivel de forma de aguaymanto (F) y del k -ésimo nivel de temperatura (T) y ε_{ijkl} = Efecto aleatorio o error experimental en la obtención de Y_{ijkl} .

El experimento fue del diseño $3 \times 2 \times 2$ de 12 tratamientos, promediando las variables de respuesta.

Todos los efectos cumplen la restricción de sumar cero, es decir, son desviaciones relacionadas con la media general, se tiene el modelo de regresión para 3 factores esta dado por (Gutiérrez y De la vara, 2012).

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2 \tag{38}$$

Donde, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{11}, \beta_{22}$ y β_{33} son los coeficientes del modelo a determinar; x_1, x_2 y x_3 son las tres variables independientes en estudio.

La maximización de las propiedades esfericidad y encogimiento en el aguaymanto deshidratado se hizo aplicando el método de superficie de respuesta, para un nivel de significancia de $p < 0,05$. Codificando las variables de la escala natural designando a los niveles menor(-1) y mayor(1), denominando las variables como las temperaturas de 40°C(-1) y 80°C(1), estados de madurez madura(-1), pintona(1), formas geométricas de cilindro(-1) y lámina(1) como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12

Diseño de multinivel factorial 3x2x2 para superficie de respuesta

	x_1	x_2	x_3		
Corrida	Temperatura	Estado madurez	Geometría	Esfericidad	Encogimiento
1	-1	-1	-1		
2	0	-1	-1		
3	1	-1	-1		
4	-1	1	-1		
5	0	1	-1		
6	1	1	-1		
7	-1	-1	1		
8	0	-1	1		
9	1	-1	1		
10	-1	1	1		
11	0	1	1		
12	1	1	1		

Temperatura, 40°C(-1), 80°C(1); Estado de madurez, madura(-1), pintona(1); geometría, cilindro(-1) y lámina(1).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Determinación del tiempo de secado en diferentes estados de madurez, forma y temperatura sobre el secado de aguaymanto

Para determinar la cantidad de agua de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) de dos grados de estado de madurez y de buena calidad guiándose de la norma colombiana NTC 4580 (ICONTEC, 1999, p. 15).

Del Anexo 1 se determina el índice de madurez para el estado de madurez 6 (madura) con valor de 9, la forma en el Anexo 12 y en la Tabla 13, se muestra los valores promedios de humedad en base seca en función a los datos de los pesos que se muestran en los anexos 2, 3 y 4, la humedad en base seca se determinó usando la Ecuación 4.

La Tabla 13, se consideró para el cálculo del tiempo de secado y se trabajó como materia prima baya de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) húmedo y se analizó la humedad para estado de madurez 6 (madura) fue de 78,4% de agua en base húmeda y la humedad de equilibrio aproximado es de 7,4% en base húmeda que representa 0,08 kg agua/kg s.s., con los valores de la Tabla 13 se construye la Figura 9 que representa las curvas del contenido de humedad libre en función del tiempo de secado para el estado de madurez 6 (madura) según las tablas de los Anexos 2, 3 y 4 donde los resultados se presentan en intervalos de 1 hora para la mejor construcción de la curva en base seca.

Tabla 13

Humedad libre (kg H₂O/ kg s.s.) a 78,4% de humedad en base húmeda para el estado de madurez 6 (madura)

Tiempo de secado (h)	Humedad base seca (kg agua/kg s.s.)					
	C40	L40	C60	L60	C80	L80
0	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63
1	3,26	3,16	3,04	2,92	2,50	2,23
2	2,87	2,78	2,42	2,23	1,50	1,20
3	2,50	2,35	1,80	1,51	0,87	0,60
4	2,08	1,90	1,20	1,00	0,45	0,25
5	1,70	1,50	0,80	0,61	0,20	0,10
6	1,38	1,13	0,52	0,40	0,10	0,08
7	1,06	0,78	0,30	0,20		
8	0,73	0,48	0,15	0,10		
9	0,46	0,30	0,10	0,07		
10	0,27	0,18	0,08			
11	0,19	0,15				
12	0,13	0,10				
13	0,10	0,09				
14	0,08	0,08				

Fuente: Análisis en el laboratorio de Operaciones Unitarias: Cilíndrico a 40°C(C40), cilíndrico a 60°C(C60), cilíndrico a 80°C(C80), lámina a 40°C(L40), lámina a 60°C(L60) y lámina a 80°C(L80).

En la Figura 9 nos muestra que el contenido inicial de agua o humedad libre al inicio se mantiene a 3,628 kg agua/kg de sólido seco por el contenido de humedad en base húmeda inicial de 78,4% para la muestra húmeda y la humedad libre al final del proceso varió entre

0,074 a 0,101 kg agua/kg de sólido seco en las muestras secas. Así mismo se observa que el contenido de agua disminuyó con mayor facilidad cuando las muestras fueron sometidas al inicio del proceso de secado y con el aumento de la temperatura del aire de secado. Se puede apreciar además que la remoción de la humedad libre fue más rápida durante los primeros 3 horas para los 6 tratamientos dependiendo de la temperatura de 80°C donde la eliminación de agua fue más rápida, seguidamente a 60°C y 40°C respectivamente, la eliminación de agua fue casi constante y lineal respectivamente y luego de este periodo se hizo más lenta hasta alcanzar un valor aproximado a cero (punto de equilibrio).

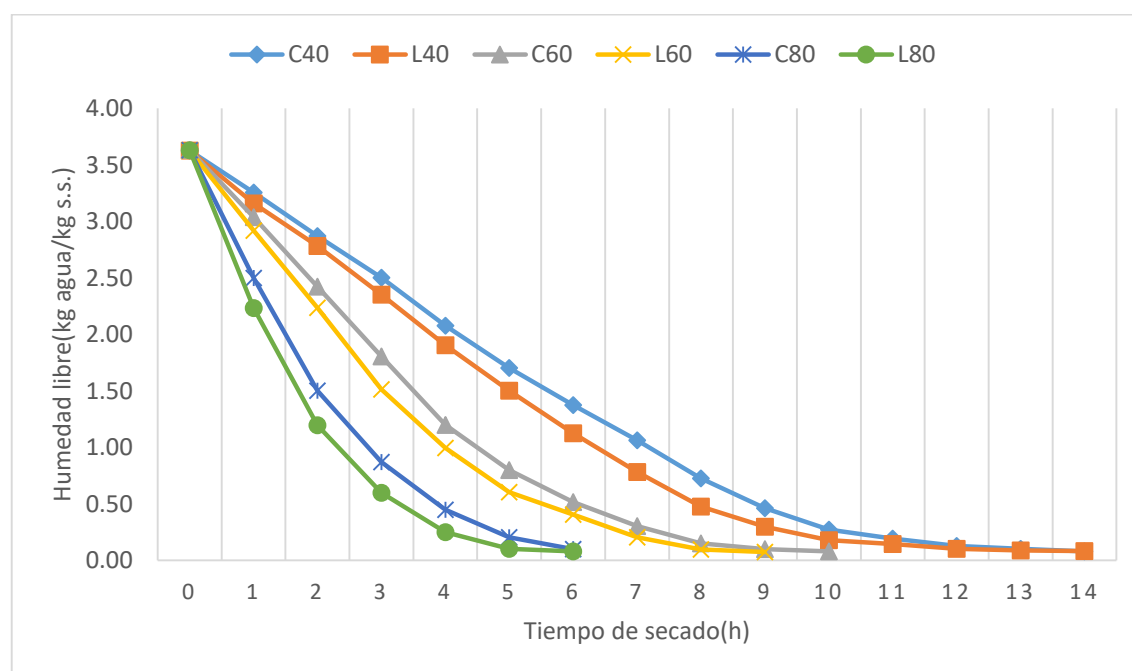


Figura 9. Diagrama de cinética de secado para aguaymanto estado de madurez (madura): Cilíndrico a 40°C(C40), cilíndrico a 60°C(C60), cilíndrico a 80°C(C80), lámina a 40°C(L40), lámina a 60°C(L60) y lámina a 80°C(L80).

Los resultados indican en forma clara que la forma del producto y el aumento de la temperatura contribuye en la solubilidad y permeabilidad de las paredes celulares del aguaymanto, para aumentar el coeficiente de difusión o difusividad del agua donde se reduce en forma significativa el tiempo de secado. Los valores similares fueron reportados en investigaciones anteriores en el secado de: modelado matemático del secado en capa fina cinética de la uchuva (Vega *et al.*, 2012), efecto de dos tratamientos previos de inmersión en la cinética de secado de aguaymanto (Yasin *et al.* 2015), influencia del secado sobre la calidad fisiológica de los frutos la uchuva agregados con

componentes activos (Cabrera *et al.*,2017), secado convectivo de frutos de capa de aguaymanto (Renato de Jesús *et al.*,2017).

Tabla 14

Humedad libre (kg H₂O/ kg s.s.) a 80,5% de humedad en base húmeda para el estado de madurez 3 (pintona)

Tiempo de secado (h)	Humedad base seca (kg agua/kg s.s.)					
	C40	L40	C60	L60	C80	L80
0	4,13	4,13	4,13	4,13	4,13	4,13
1	3,52	3,45	3,30	3,24	2,85	2,65
2	3,08	2,94	2,70	2,50	1,86	1,65
3	2,63	2,45	2,10	1,91	1,20	1,00
4	2,30	2,12	1,60	1,40	0,72	0,59
5	2,00	1,81	1,12	0,91	0,39	0,30
6	1,70	1,54	0,80	0,62	0,17	0,10
7	1,40	1,22	0,50	0,38	0,10	0,08
8	1,13	0,93	0,30	0,20	0,09	
9	0,85	0,72	0,22	0,12		
10	0,65	0,49	0,15	0,10		
11	0,42	0,30	0,13	0,08		
12	0,26	0,20	0,09			
13	0,18	0,15				
14	0,12	0,10				
15	0,10	0,08				
16	0,09					

Fuente: Análisis en el laboratorio de Operaciones Unitarias: Cilíndrico a 40°C(C40), cilíndrico a 60°C(C60), cilíndrico a 80°C(C80), lámina a 40°C(L40), lámina a 60°C(L60) y lámina a 80°C(L80).

Del Anexo 1 se determina el índice de madurez para el estado de madurez 3 (pintona) con valor de 6,13, la forma en el Anexo 12 y en la Tabla 14, se muestran los valores promedios de humedad en base seca en función a los valores de peso que se muestra en los Anexos 5, 6 y 7 y la humedad en base seca se determinó usando la Ecuación 4.

Y se determinó la humedad 80,5% en base húmeda para dicho estado de madurez, según la bibliografía la humedad del producto está en el rango de 79,8 – 85,5% con un promedio de 82,5%, (Erkaya, Dağdemir y Şengül, 2012), por lo tanto, la humedad está en el rango establecido.

En la Tabla 14, se consideró para el cálculo del tiempo de secado y se trabajó con aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) húmedo y se analizó la humedad para estado de madurez 3 (pintona) aproximadamente 80,5% de agua en base húmeda y la humedad de equilibrio aproximado es de 7,4% en base húmeda que representa 0,08 kg agua/kg s.s., con los valores de la Tabla 14 se construye la Figura 10 que representa las curvas del contenido de humedad libre en función del tiempo de secado para los tratamientos de estado de madurez 3 (pintona) según las tablas de los Anexos 5, 6 y 7 donde los resultados se presentan en intervalos de 1 hora para la mejor construcción de la curva. En la Figura 10 nos muestra que el contenido inicial de agua o humedad libre al inicio se mantiene a 4,13 kg agua/kg de sólido seco por el contenido de humedad en base húmeda inicial de 80,5% para la muestra húmeda y el de humedad libre al final del proceso varió entre 0,08 a 0,09 kg agua/kg de sólido seco en las muestras secas.

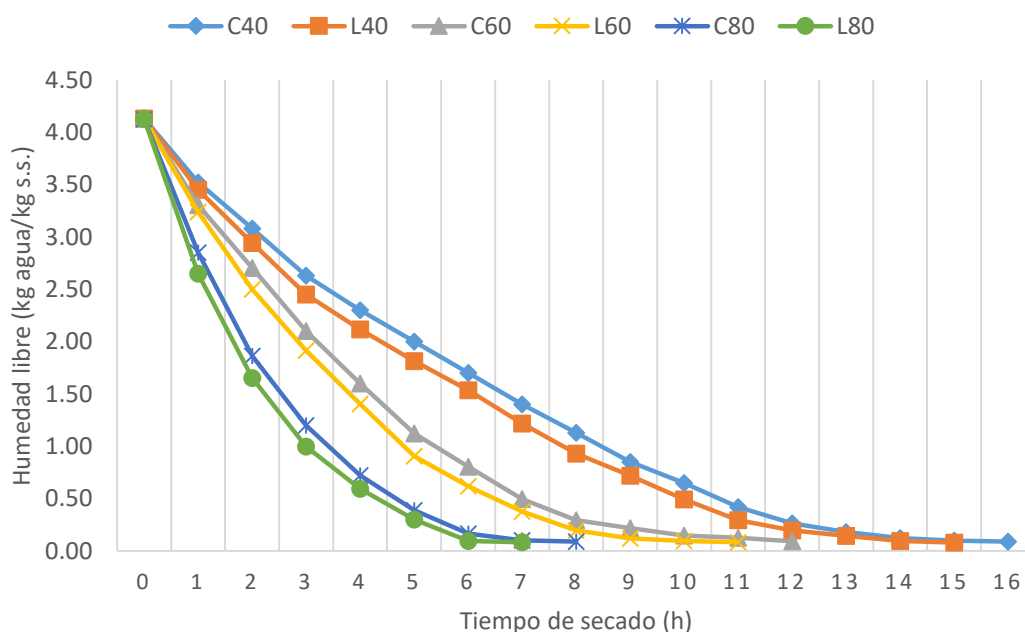


Figura 10. Diagrama de cinética de secado para aguaymanto de estado de madurez 3 (pintona): Cilíndrico a 40°C(C40), cilíndrico a 60°C(C60), cilíndrico a 80°C(C80), lámina a 40°C(L40), lámina a 60°C(L60) y lámina a 80°C(L80).

Así mismo se observa que el contenido de agua disminuyó con mayor facilidad cuando las muestras fueron sometidas al inicio del proceso de secado y con el aumento de la temperatura del aire de secado. Se aprecia además que la remoción de la humedad libre fue más rápida durante los primeros 3 horas para los 6 tratamientos dependiendo de la temperatura de 80°C donde la eliminación de agua fue más rápida, seguidamente a 60°C y 40°C respectivamente la eliminación de agua fue casi constante y lineal en este periodo se hizo más lenta hasta alcanzar un valor aproximado a cero (punto de equilibrio).

Los resultados indican claramente que la forma del producto y aumento de la temperatura contribuye en la solubilidad y permeabilidad de las paredes celulares del aguaymanto, para aumentar el coeficiente de difusión o difusividad del agua donde se reduce en forma significativamente el tiempo de secado. Los valores de forma similar fueron reportados en investigaciones anteriores en secado de: modelado matemático del secado en capa fina cinética de la uchuva (Vega *et al.*, 2012), Efecto de dos tratamientos previos de inmersión en la cinética de secado de aguaymanto (Yasin *et al.* 2015), influencia del secado sobre la calidad fisiológica de los frutos la uchuva agregados con componentes activos (Cabrera *et al.*,2017), secado convectivo de frutos de capa de aguaymanto (Renato de Jesús *et al.*,2017).

Tabla 15

Tiempo de secado (h)

Estado de madurez	C40	L40	C60	L60	C80	L80
Madura (grado de color 6)	14	14	10	9	6	6
Pintona (grado de color 3)	16	15	12	11	8	7

Cilíndrico a 40°C(C40), cilíndrico a 60°C(C60), cilíndrico a 80°C(C80), lámina a 40°C(L40), lámina a 60°C(L60) y lámina a 80°C(L80).

De las Tablas 13 y 14 se obtienen la Tabla 15 que muestra los valores del tiempo de secado menor fue de estado de madurez 6 (madura) tratada a 80°C fue de 6 horas, mientras tanto para el estado de madurez 3 (pintona) para la muestra cilíndrica a 80°C fue de 8 horas y lámina a 80°C de 7 horas respectivamente.

4.2 Evaluación del modelo cinético y determinación de la difusividad efectiva y energía de activación en diferentes estados de madurez, forma y temperatura en el secado de aguaymanto

4.2.1 Evaluación del modelo cinético de secado

El modelado o ajuste de las curvas de secado, al transformar los contenidos de humedades libres en relación de humedad (RM) según Ecuación 28. La Figura 11 representa la razón de humedad (RM) en función del tiempo de secado para los 6 tratamientos para estado de madurez 6 (madura) según tablas del Anexo 8. Donde la relación de humedad (RM) es adimensional al inicio del proceso es 1 y va reduciéndose conforme la humedad es removida en el proceso de secado al igual que la humedad libre y en general ocurre en la mayoría de los procesos de secado de alimentos como indica (Rao *et al.* 2014).

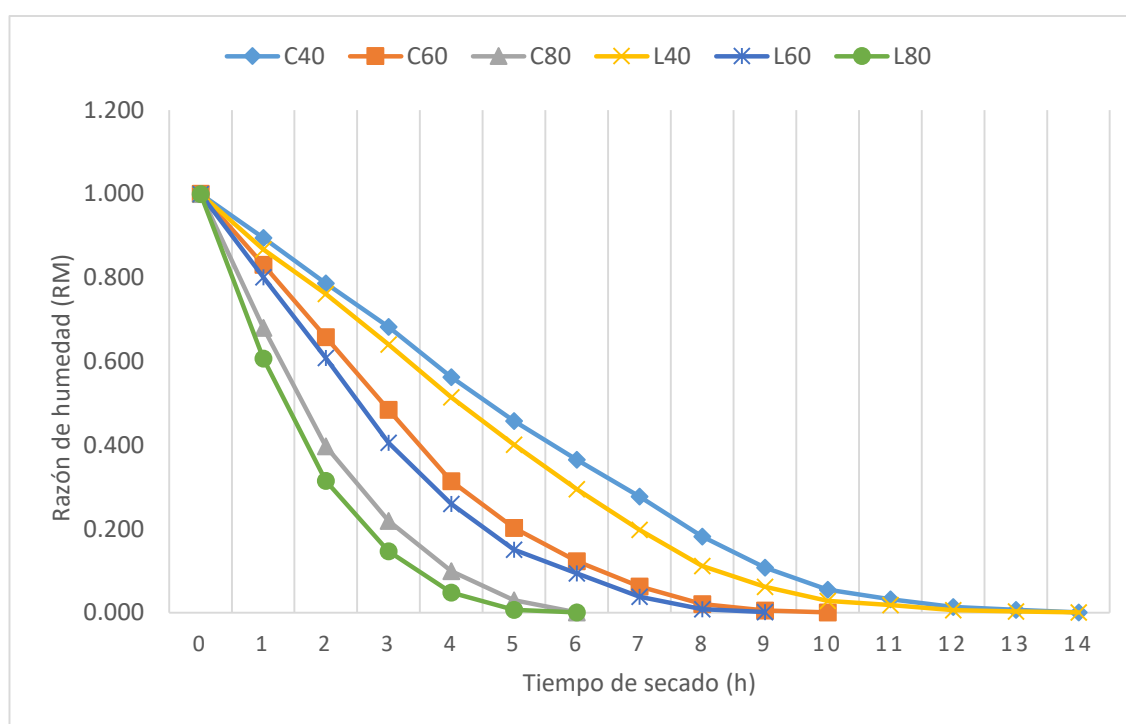


Figura 11. Razón de humedad (RM) en función del tiempo de secado de aguaymanto en estado de madurez 6 (madura): Cilíndrico a 40°C(C40), cilíndrico a 60°C(C60), cilíndrico a 80°C(C80), lámina a 40°C(L40), lámina a 60°C(L60) y lámina a 80°C(L80).

Los resultados de los indicadores estadísticos correspondientes a los modelos se detallan en la Tabla 16. El mejor modelo fue elegido al tratamiento con mayor valor de R^2 y menores valores de MSE y RMSE en general resultando ser el modelo de

Midilli seguida del modelo de Page las mismas que describen la cinética de secado de aguaymanto.

Tabla 16

Valores estadísticos R^2 , SSE, MSE y RMSE de ajuste de los modelos para las curvas experimentales de secado de aguaymanto de estado de madurez 6 (madura)

Modelo		Cilindro			Lámina		
		C40	C60	C80	L40	L60	L80
Henderson y Pabis	R^2	0,9698	0,9841	0,9933	0,9721	0,9882	0,9954
	SSE	0,0458	0,0154	0,0030	0,0410	0,0096	0,0018
	MSE	0,0038	0,0019	0,0007	0,0034	0,0014	0,0004
	RMSE	0,0618	0,0439	0,0272	0,0585	0,0370	0,0210
Midilli	R^2	0,9984	0,9995	1,0000	0,9987	0,9985	0,9996
	SSE	0,3668	0,0425	0,0004	0,2903	0,0888	0,0001
	MSE	0,0367	0,0071	0,0002	0,0290	0,0178	0,0001
	RMSE	0,1915	0,0841	0,0148	0,1704	0,1333	0,0073
Logarítmico	R^2	0,9911	0,9944	0,9996	0,9872	0,9963	0,9987
	SSE	0,0114	0,0044	0,0001	0,0156	0,0024	0,0004
	MSE	0,0010	0,0006	0,0000	0,0014	0,0004	0,0001
	RMSE	0,0322	0,0250	0,0070	0,0376	0,0200	0,0112
Page	R^2	0,9942	0,9979	0,9978	0,9947	0,9982	0,9983
	SSE	0,0086	0,0020	0,0009	0,0077	0,0014	0,0006
	MSE	0,0007	0,0002	0,0002	0,0006	0,0002	0,0001
	RMSE	0,0267	0,0158	0,0148	0,0253	0,0140	0,0121
Lewis	R^2	0,9837	0,9935	0,9994	0,9838	0,9959	0,9984
	SSE	0,0874	0,0428	0,0128	0,0772	0,0302	0,0083
	MSE	0,0067	0,0048	0,0026	0,0059	0,0038	0,0017
	RMSE	0,0820	0,0689	0,0506	0,0771	0,0614	0,0406

Coefficiente de determinación (R^2), suma de cuadrados del error (SSE), error cuadrático medio (MSE) y desviación de raíz cuadrada media (RMSE).

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 16 el valor de R^2 obtenido para los modelos de Midilli para los tratamientos son significativamente mayores ($p < 0,05$) que el valor de R^2 obtenido para los tratamientos C80 y L80, mientras en segundo lugar

modelo logarítmico para los tratamientos C80 y L80 y el modelo Page para los tratamientos C60, L80 y L60, para los modelos, Lewis y Henderson-Pabis. Además el valor de MSE y RMSE obtenido para los modelos de Page y Midilli son significativamente menores ($p < 0,05$) que los valores de MSE y RMSE obtenidos para los modelos de logarítmico, Lewis y Henderson-Pabis. Según la Tabla 16 se aprecia que para tiempos cortos el modelo de Page presenta mejor correlación sin embargo para tiempos prolongados de secado, el modelo de Midilli es la que produce el mejor ajuste con valores MR experimentales. Estos resultados muestran que los valores de los parámetros estadísticos R^2 , MSE y RMSE para el modelo de Midilli variaron de 0,9984 a 1; 0,0001 a 0,3688 y 0,0073 a 0,1915 respectivamente, mientras para el modelo de Page los valores de los mismos parámetros variaron de 0,9942 a 0,9983; 0,0001 a 0,0007 y 0,0121 a 0,267 respectivamente. Por otro lado, el menor valor R^2 reportado fue para el modelo de Henderson-Pabis con valores superiores a 0,9721 en la muestra L40, el mayor valor RMSE y MSE reportados fue para el mismo modelo de Henderson-Pabis con valores inferiores a 0,0618 para la muestra C40 y el modelo Lewis 0,0067 en la muestra C40.

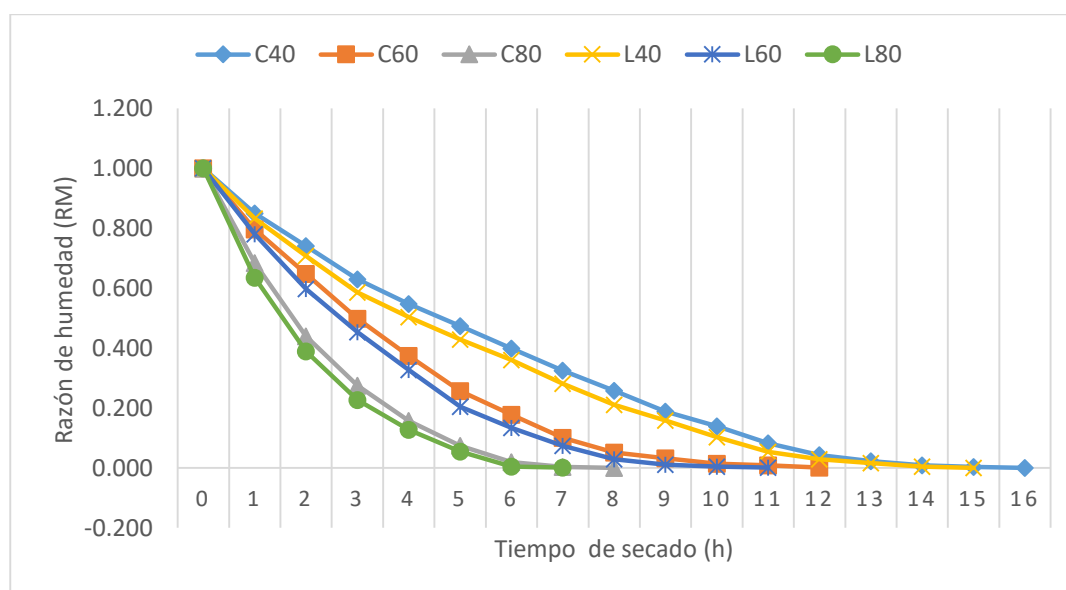


Figura 12. Razón de humedad (RM) en función del tiempo de secado de aguaymanto en estado de madurez (pintona): Cilíndrico a 40°C(C40), cilíndrico a 60°C(C60), cilíndrico a 80°C(C80), lámina a 40°C(L40), lámina a 60°C(L60) y lámina a 80°C(L80).

De igual manera como el caso anterior, la Figura 12 representa la razón de humedad (RM) en función del tiempo de secado para los 6 tratamientos para estado de madurez 3 (pintona) según tablas del Anexo 9.

También la relación de humedad (RM) es adimensional al inicio del proceso es 1 y va reduciéndose conforme la humedad es removida en el proceso de secado al igual que la humedad libre y en general ocurre en la mayoría de los procesos de secado de alimentos como indica (Rao *et al.* 2014).

La Figura 12 muestra las curvas de los datos experimentales RM con aquellos valores ajustados con el modelo de Midilli y Page como función del tiempo de secado para todos los tratamientos estudiados. Se puede apreciar que hubo una buena concordancia entre los valores de relación de humedad (RM) experimental y ajustados.

Los resultados del modelado de la presente investigación concuerdan con los resultados obtenidos por Vega *et al.* (2012). Varios modelos de secado en capa delgada fueron evaluados durante el procesamiento en cuatro temperaturas (60, 70, 80 y 90°C) en base en las pruebas estadísticas como la suma de errores al cuadrado (SSE), chi-cuadrado (χ^2) y el coeficiente de determinación (R^2). Cuando se compara el experimental con valores de humedad predichos, se encontró modelo Midilli-Kucuk que dio la mejor calidad de ajuste (SSE <0,001; χ^2 <0,001; R^2 > 0,99), mostrando esta ecuación para predecir con precisión el secado de uchuva ; estudios de Abano *et al.* (2011) obtuvieron que el mejor ajuste se obtuvo con el modelo de Page en el secado de rodajas de tomate (*Lycopersicon esculentum*) entre temperaturas de 50 a 80°C además indicaron que los ajustes de los modelos logarítmico y Henderson Pabis se desviaron de los datos experimentales para los valores de RM bajos; en el estudio del secado de tomillo entre 30 a 70°C realizado por Da Rocha *et al.* (2012) el modelo de Page resultó tener el mejor ajuste a los datos experimentales independientemente de la temperatura de secado; Por otro lado en el secado de las rodajas de champiñones sin tratar y tratadas con ácido cítrico al 0,4% en temperaturas de 40 a 70°C realizado por Doymaz (2014), determinó que el modelo logarítmico describió mejor a las curvas de secado para los dos casos; en el modelado de la cinética de secado de rodajas de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) realizado por Taheri-Garavanda *et al.* (2011) para temperaturas de 40, 60 y 80°C, humedades relativas de 20, 40 y 60% y velocidad de

aire 2 m/s determinaron que el modelo de Midilli *et al.* describieron la característica de secado del tomate.

Con los antecedentes mencionados 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 (láminas o cilíndricas) además de las condiciones propias establecidas en el proceso (temperaturas, índice de madurez y forma geométrica). Además se evidencia que para periodos cortos de secado el modelo de Midilli tiene mejor ajuste y para periodos largos en modelo de Page ajusta mejor al tener varios constantes.

Los resultados de los indicadores estadísticos correspondientes a los modelos se detallan en la Tabla 17. El mejor modelo fue elegido al tratamiento con mayor valor de R^2 y menores valores de MSE y RMSE en general resultando ser el modelo logarítmico seguida del modelo Page las mismas que describen la cinética de secado de aguaymanto. De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 17 el valor de R^2 obtenido para los modelos de Midilli para los tratamientos C60, L60 y L80 son significativamente mayores ($p < 0,05$) que el valor de R^2 obtenido, mientras en segundo lugar modelo logarítmico para los tratamientos L80, C80 y L40. Además el valor de MSE y RMSE obtenido para los modelos de Page y Midilli son significativamente menores ($p < 0,05$) que los valores de MSE y RMSE obtenidos para los modelos de logarítmico, Lewis y Henderson-Pabis. Según la Tabla 17 se aprecia que para tiempos cortos el modelo de Page presenta mejor correlación sin embargo para tiempos prolongados de secado, el modelo de Midilli es la que produce el mejor ajuste con valores MR experimentales.

Estos resultados muestran que los valores de los parámetros estadísticos R^2 , MSE y RMSE para el modelo de Midilli variaron de 0,9991 a 0,9995; 0,0000 a 0,0021 y 0,0070 a 0,0454 respectivamente, mientras para el modelo de logarítmico los valores de los mismos parámetros variaron de 0,9943 a 0,9982; 0,0001 a 0,0005 y 0,0089 a 0,0228 respectivamente. Por otro lado, el menor valor R^2 reportado fue para el modelo de Henderson-Pabis con valores superiores a 0,9721 en la muestra L40, el mayor valor RMSE y MSE reportados fue para el mismo modelo de Henderson-Pabis con valores inferiores a 0,0000 para la muestra C60.

Tabla 17

Valores estadísticos R^2 , SSE, MSE y RMSE de ajuste de los modelos para las curvas experimentales de secado de aguaymanto de estado de madurez 3 (pintona)

Modelo		Cilindro			Lámina		
		C40	C60	C80	L40	L60	L80
Henderson y Pabis	R^2	0,9759	0,9858	0,9929	0,9802	0,9876	0,9938
	SSE	0,0347	0,0144	0,0040	0,0250	0,0113	0,0027
	MSE	0,0025	0,0014	0,0007	0,0019	0,0013	0,0005
	RMSE	0,0498	0,0380	0,0259	0,0439	0,0355	0,0232
Midilli	R^2	0,9794	0,9995	0,9829	0,9832	0,9991	0,9992
	SSE	0,0248	0,0004	0,0073	0,0176	0,0007	0,0003
	MSE	0,0021	0,0000	0,0018	0,0016	0,0001	0,0001
	RMSE	0,0454	0,0070	0,0427	0,0400	0,0097	0,0096
Logarítmico	R^2	0,9955	0,9943	0,9982	0,9966	0,9958	0,9990
	SSE	0,0054	0,0047	0,0008	0,0036	0,0031	0,0003
	MSE	0,0004	0,0005	0,0002	0,0003	0,0004	0,0001
	RMSE	0,0203	0,0228	0,0125	0,0172	0,0195	0,0089
Page	R^2	0,9872	0,9950	0,9964	0,9875	0,9950	0,9958
	SSE	0,0172	0,0046	0,0018	0,0145	0,0041	0,0016
	MSE	0,0012	0,0005	0,0003	0,0011	0,0005	0,0003
	RMSE	0,0351	0,0216	0,0174	0,0334	0,0215	0,0180
Lewis	R^2	0,9833	0,9922	0,9976	0,9858	0,9939	0,9977
	SSE	0,0447	0,0254	0,0091	0,0306	0,0208	0,0049
	MSE	0,0030	0,0023	0,0013	0,0022	0,0021	0,0008
	RMSE	0,0546	0,0481	0,0361	0,0467	0,0456	0,0287

Coefficiente de determinación (R^2), suma de cuadrados del error (SSE), error cuadrático medio (MSE) y desviación de raíz cuadrada media (RMSE).

4.2.2. Difusividad efectiva del agua

La representación gráfica de los valores de $\ln(RM)$ experimentales en función del tiempo para cada tratamiento y las respectivas regresiones lineales correspondientes

se muestran en Figura 13 y las pendientes de las regresiones lineales como los coeficientes de determinación para cada tratamiento se muestran en el Anexo 10, las pendientes fueron determinados y varían entre -0,4533 a -1,257. Los altos valores del coeficiente de determinación ($R^2 > 0,9088$), y la no existencia de un patrón en el gráfico de residuales vs el valor ajustado de De indican que la segunda ley de la difusión de Fick explica al menos el 95% de los valores experimentales. Los valores de error estándar son pequeños como en el Anexo 11 indican que la Ecuación 30 predice la relación de humedad durante el secado de aguaymanto.

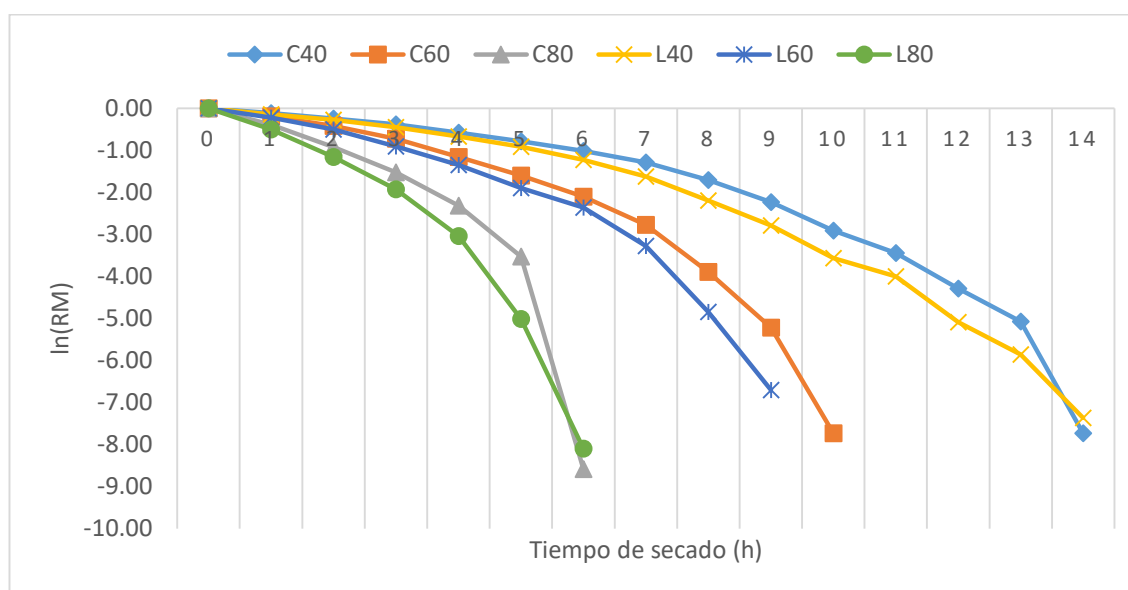


Figura 13. Relación $\ln(RM)$ en función del tiempo de secado de aguaymanto en estado de madurez 6 (madura): Cilíndrico a 40°C(C40), cilíndrico a 60°C(C60), cilíndrico a 80°C(C80), lámina a 40°C(L40), lámina a 60°C(L60) y lámina a 80°C(L80).

Así mismo también se puede representar la gráfica de los valores de $\ln(RM)$ experimentales en función del tiempo para cada tratamiento y las respectivas regresiones lineales correspondientes se muestran en Figura 14 y las pendientes de las regresiones lineales como los coeficientes de determinación para cada tratamiento se muestran en el Anexo 11, las pendientes fueron determinados y varían entre -0,3454 a -0,9682. Los altos valores del coeficiente de determinación ($R^2 > 0,918$), y la no existencia de un patrón en el gráfico de residuales vs el valor ajustado de De indican que la segunda ley de la difusión de Fick explica al menos el 95% de los valores experimentales.

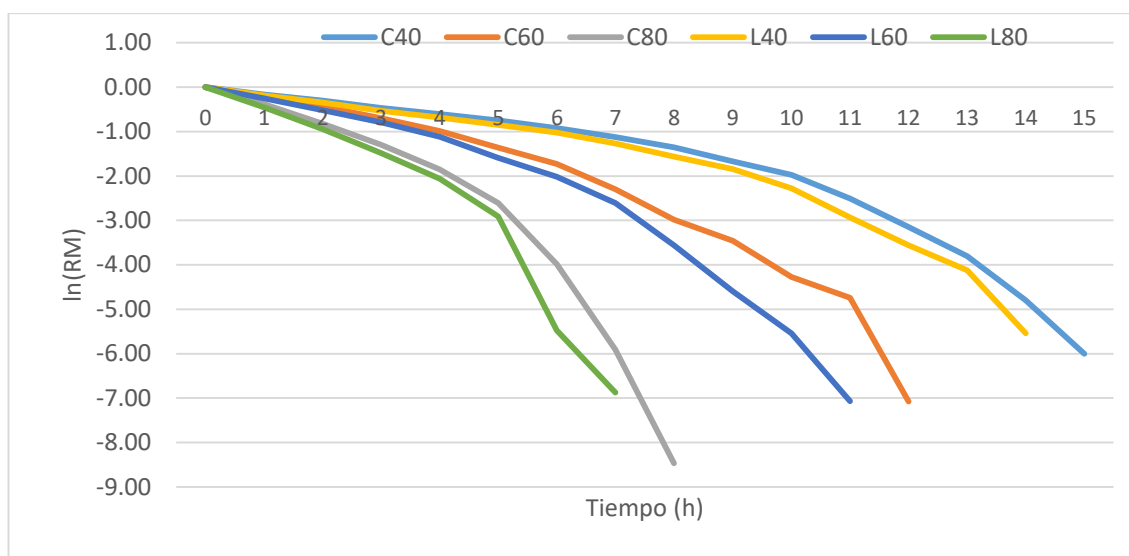


Figura 14. Relación ln(RM) en función del tiempo de secado de aguaymanto en estado de madurez 3 (pintona): Cilíndrico a 40°C(C40), cilíndrico a 60°C(C60), cilíndrico a 80°C(C80), lámina a 40°C(L40), lámina a 60°C(L60) y lámina a 80°C(L80).

Tabla 18

Valores del coeficiente de difusividad efectiva del agua (m^2/s)

T (°C)	Madura		Pintona	
	Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina
40	$1,080 \times 10^{-9}$	$2,092 \times 10^{-9}$	$8,959 \times 10^{-10}$	$1,268 \times 10^{-9}$
60	$1,751 \times 10^{-9}$	$2,83 \times 10^{-9}$	$1,306 \times 10^{-9}$	$2,367 \times 10^{-9}$
80	$2,844 \times 10^{-9}$	$5,094 \times 10^{-9}$	$2,408 \times 10^{-9}$	$3,593 \times 10^{-9}$

Los valores de la difusividad efectiva del agua calculados se presentan en la Tabla 18 donde se denota que estado de madurez madura y al incrementar la temperatura de secado, los valores de la difusividad efectiva incrementaron desde $1,080 \times 10^{-9} m^2/s$ en la muestra cilíndrica hasta un máximo de $2,844 \times 10^{-9} m^2/s$ y para la muestra lámina incrementaron desde $2,092 \times 10^{-9} m^2/s$ hasta un máximo de $5,094 \times 10^{-9} m^2/s$.

Los resultados obtenidos de De están en el rango normal esperado de $8,959 \times 10^{-10}$ a $5,094 \times 10^{-9} m^2/s$ para materiales alimentarios (Vega *et al.*, 2012). Durante el procesamiento en cuatro temperaturas (60, 70, 80 y 90°C) para la uchuva reportaron

la difusividad efectiva de la humedad uchuva estaba en el rango de $4,67$ a $14,9 \times 10^{-10}$ m^2/s . respectivamente; Yasin *et al.*, (2015), después de estos tratamientos previos, características de secado de aire de la baya de oro (*Physalis peruviana L.*) fueron investigados en 70 , 75 , 80 y $85^\circ C$ con $1,5$ m/s de velocidad de flujo de aire donde, difusividad efectiva obtenida para el pretratamiento de oleato de etilo y una solución alcalina sacarosa y muestras sin tratar varió entre $1,94$ a $3,19 \cdot 10^{-9} m^2/s$, $1,21$ a $2,93 \cdot 10^{-9}$ y $1,66$ a $2,67 \cdot 10^{-9} m^2/s$, respectivamente; al respecto de esta variación entre los materiales alimenticios Rao *et al.* (2014) indican que la presencia de grasas disminuye significativamente la difusividad del agua. Así mismo la presión tiene un efecto negativo en la difusividad del agua, debido a que la difusividad del vapor de agua es inversamente proporcional a la presión en tal sentido la compresión reduce la porosidad y la difusividad efectiva del agua.

(Ratti, 2009) indica que factores que también influyen en la difusividad efectiva del agua son la velocidad de circulación del aire de secado, los tipos de procedimientos y condiciones experimentales para determinar los contenidos de agua, los métodos usados para el tratamiento de los datos obtenidos, y la heterogeneidad de las estructuras alimenticias.

4.2.3. Energía de activación

La energía de activación fue calculada al graficar $\ln(De)$ en función de la inversa de la temperatura ($1/(T+ 273,15)$) según indicada en la Ecuación 30. Los parámetros de regresión lineal a la ecuación de Arrhenius linealizada y los parámetros correspondientes se muestran en Anexo 7. Con las ecuaciones del Anexo 7 se relaciona la dependencia del De con la temperatura de las muestras, las mismas que fueron graficados y se presenta en la Figura 15 que evidencia una dependencia lineal con la temperatura.

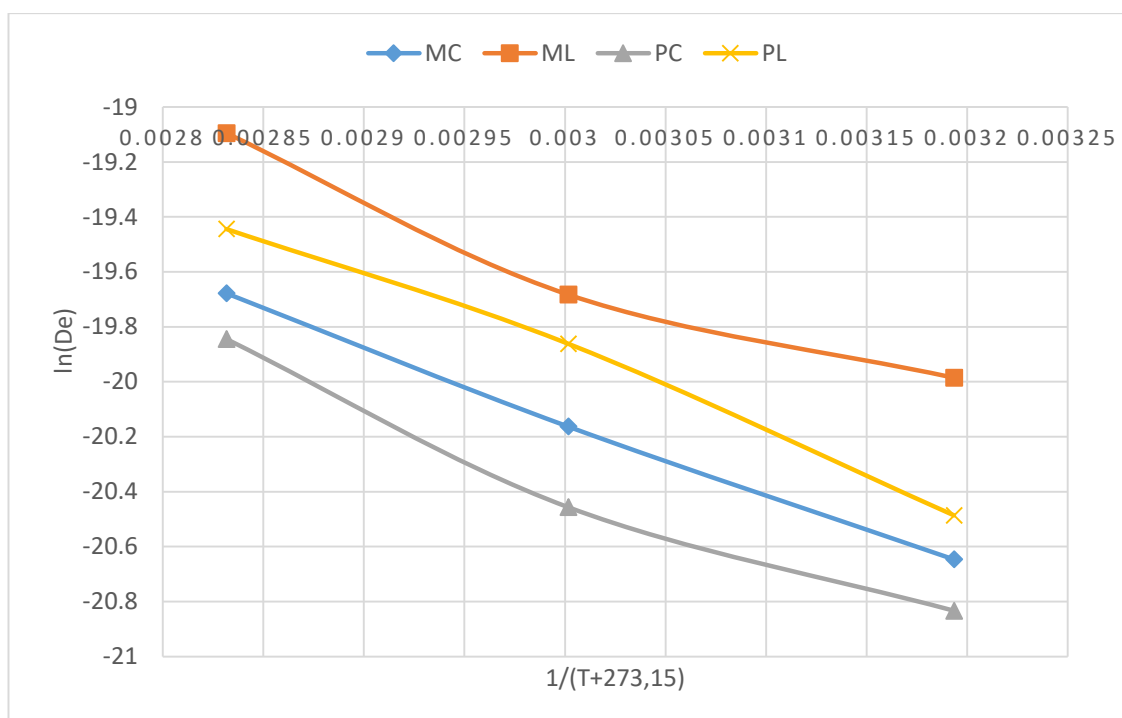


Figura 15. Variación de $\ln(De)$ para diferentes inversas de temperatura: Madura cilíndrica (MC), madura lámina (ML), pintona cilíndrica (PC) y pintona lámina (PL).

Tabla 19

Energía de activación (E_a) obtenida para cada tratamiento de secado en (kJ/mol)

Madura		Pintona	
Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina
22,23	20,31	22,59	24,01

En la Tabla 19 se presenta los valores calculados de la energía de activación (E_a), Como se puede apreciar la energía de activación para MC de 22,23 kJ/mol, ML de 20,31kJ/mol, PC de 22,59 kJ/mol y PL de 24,01 kJ/mol respectivamente. Los valores del coeficiente de determinación ($R^2 > 1;0,95;0,97$ y $0,99$ para MC, ML, PC y PL respectivamente) indican que la dependencia de De con la temperatura del aire de secado está representada por la ecuación de Arrhenius para todos los tratamientos.

Los valores de la energía de activación se encuentran dentro del rango general para los materiales alimenticios de 12,7–110 kJ/mol según, Doymaz (2014). Al respecto Vega *et al.* (2012). durante el procesamiento en cuatro temperaturas (60, 70, 80 y 90°C)

determinó la energía activación un valor de 38,78 kJ/mol; mientras tanto Youssef, (2015) estudiaron la cinética de secado de aguaymanto (*Physalis peruviana L.*) llevaron a cabo a 60 y 70°C, así como a velocidades de aire de 0,4 y 0,6 m/s. se encontró que la energía de activación de 38,78 kJ/mol, pero son ligeramente superiores a los valores reportados en estudios para rodajas de tomate 22,28 kJ/mol (Abano *et al.*, 2011), adicionalmente estos últimos señalaron que un proceso controlado por la difusión tiene una energía de activación menor a 20,31 kJ/mol, por lo tanto los valores estimados de energía de activación para la presente investigación sugieren que la difusión del agua en aguaymanto es un mecanismo limitante para trabajar a bajas temperaturas sin embargo a mayores temperaturas del secado no hay mucha resistencia a la deshidratación por difusión del aguaymanto en pintona de forma lámina y representa mayor demanda de energía de activación y mientras menor para la madura de forma lámina.

4.3 Evaluación de esfericidad y encogimiento del producto seco de aguaymanto

4.3.1 Evaluación de esfericidad

La esfericidad para la forma cilíndrica para el producto seco

Tabla 20

Valores de esfericidad para la forma cilíndrica

	Temperatura	r(cm)	h(cm)	Vp(cm ³)	Sp (cm ²)	r _s (cm)	Ss(cm ²)	Esfericidad
Madura	T40	0,725	0,640	1,057	6,218	0,632	5,018	0,807
	T60	0,700	0,580	0,893	5,630	0,597	4,484	0,796
	T80	0,710	0,580	0,919	5,755	0,603	4,570	0,794
Pintona	T40	0,700	0,590	0,908	5,674	0,601	4,535	0,799
	T60	0,685	0,560	0,826	5,358	0,582	4,256	0,794
	T80	0,665	0,540	0,750	5,035	0,564	3,993	0,793

Radio (r), altura (h), volumen de la partícula (Vp), superficie inicial del cilindro (Sp), superficie ideal transformado en esfera (Ss), radio equivalente de la esfera (r_s), temperatura a 40°C(T40), temperatura a 60°C(T60) y temperatura a 80°C(T80).

La esfericidad para la forma lámina para el producto seco

Tabla 21

Valores de esfericidad para la forma lámina

	Temperatura	L(cm)	e(cm)	Vp(cm ³)	Sp(cm ²)	r _s (cm)	Ss(cm ²)	Esfericidad
Madura	T40	1,040	0,640	0,692	4,826	0,549	3,784	0,784
	T60	1,030	0,620	0,658	4,676	0,540	3,658	0,782
	T80	1,020	0,600	0,624	4,529	0,530	3,532	0,780
Pintona	T40	1,040	0,630	0,681	4,784	0,546	3,745	0,783
	T60	1,020	0,510	0,531	4,162	0,502	3,170	0,762
	T80	1,000	0,440	0,440	3,760	0,472	2,798	0,744

Lado (L), espesor (e), volumen de la partícula (Vp), superficie inicial del cilindro (Sp), superficie ideal transformado en esfera (Ss), radio equivalente de la esfera (r_s), temperatura a 40°C(T40), temperatura a 60°C(T60) y temperatura a 80°C(T80).

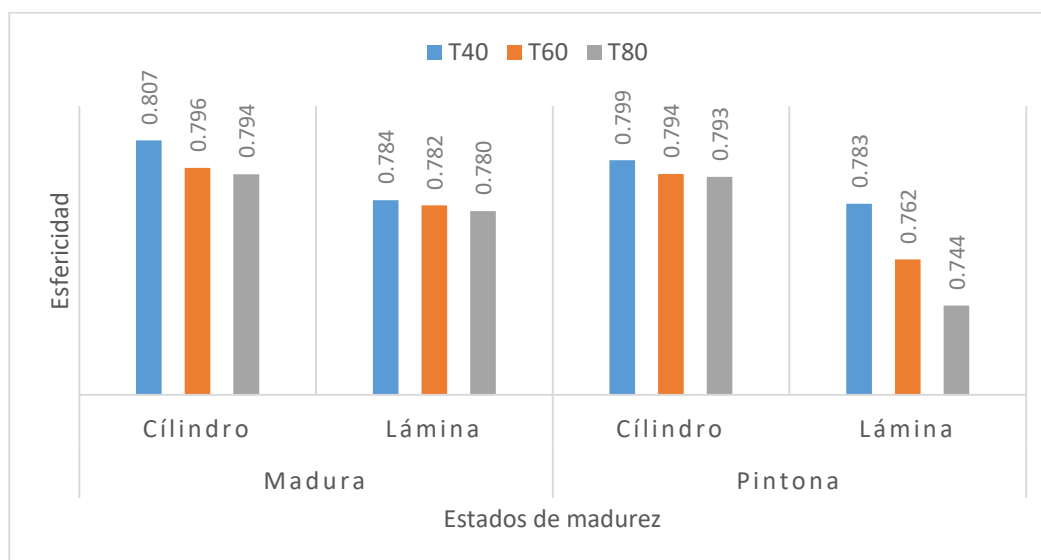


Figura 16. Gráfico de combinación de tratamientos para esfericidad de aguaymanto: Temperatura a 40°C(T40), temperatura a 60°C (T60) y temperatura a 80°C (T80).

Combinado las Tablas 20 y 21 para los dos estados de madurez tenemos se muestra la Figura 16 se ve claramente que la esfericidad es influenciada por la temperatura, estado de madurez y forma geométrica del producto después del secado. La mayor esfericidad obtuvo en el estado de madurez madura de forma cilíndrica tratada a la temperatura de

40°C con valor de 0,807 lo que indica que vario poco su forma geométrica, mientras tanto la menor esfericidad obtuvo en el estado de madurez pintona de forma lamina tratada a la temperatura de 80°C con valor de 0,744 lo que indica la variación fue mucho mayor en su forma geométrica como se muestra en la Figura 16.

La Tabla 22, muestra la tabla ANDEVA para la esfericidad, la tabla ANDEVA divide los tres factores en estudio para ver la variabilidad de esfericidad en muestras separadas para cada uno de los efectos, se encontró diferencia estadística altamente significativa para los 3 factores; en cambio no se encontró diferencia alguna para las interacciones de los factores; así mismo es significativa para la interacción de segundo orden ABC. En este caso todos son evaluados a ($p \leq 0,01$) y ($p \leq 0,05$), indicando que son significativamente diferentes de cero y las interacciones de los tratamientos no son significativos con un nivel de confianza del 95,0% y 99,0%.

Tabla 22

Análisis de varianza para esfericidad a $P < 0,05$

Fuente de variabilidad	Gl	SC	CM	Fc	Ft(5%)	Ft(1%)	N.S.
Tratamientos	11	0,00981	0,00089	12,30	2,22	3,09	**
A: Temperatura	2	0,00141	0,00071	9,76	3,40	5,61	**
B: Estado de madurez	1	0,00118	0,00118	16,26	4,26	7,82	**
C: Geometría	1	0,00553	0,00553	76,21	4,26	7,82	**
AB	2	0,00029	0,00015	2,03	3,40	5,61	n.s.
AC	2	0,00021	0,00010	0,31	3,40	5,61	n.s.
BC	1	0,00051	0,00051	1,53	4,26	7,82	n.s.
ABC	2	0,00067	0,00034	4,63	3,40	5,61	*
Error total	24	0,00174	0,00007				
Total	35	0,01155					

Grados de libertad (Gl), suma de cuadrados (SC), cuadrado medio (CM), razón-F(Fc), F tabulada (Ft) y nivel de significancia (N.S.)

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 84,9% de la variabilidad en esfericidad. El R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 78,0 %. El coeficiente de variabilidad (CV) es de 3,25%. Debido a que el valor-P es menor que

5,0%, hay una indicación de posible correlación serial al nivel de significancia del 5,0%.

La ecuación es de regresión lineal múltiple que se ha ajustado a los datos y la ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Esfericidad} = 0,808083 - 0,0003875 * T + 0,00483333 * E - 0,00333333 * G - 0,000175 * T * E - 0,00015 * T * G - 0,00383333 * E * G \quad (39)$$

Donde: T es Temperatura, E es estado de madurez y G es geometría

Graficando la ecuación con los valores de las variables están especificados en la Tablas 20 y 21 se gráfica con el programa estadístico STATGRAPHICS como se muestra en la Figura 17.

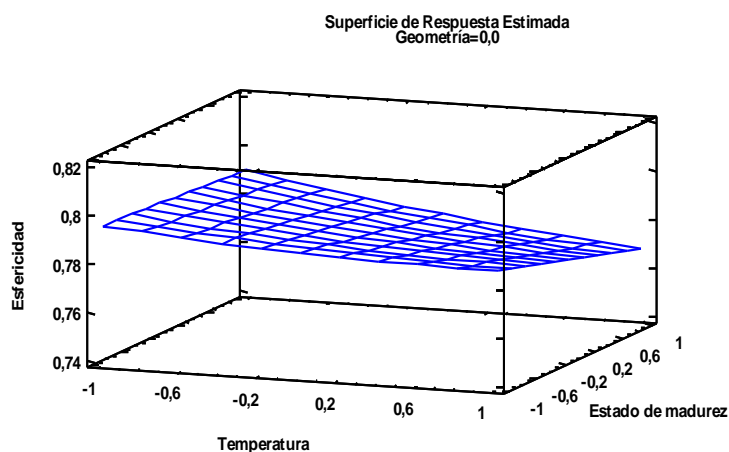


Figura 17. Superficie de respuesta para esfericidad

Optimizando la ecuación de la esfericidad según la ecuación para ello se deriva la función a cada una de las variables y se produce un máximo esfericidad con un valor óptimo de 0,8036; este valor óptimo indica la mayor esfericidad obtuvo en el estado de madurez madura de forma cilíndrica tratada a la temperatura de 40°C.

Efectos principales para esfericidad

Esta Figura 18, muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza la esfericidad sobre la región indicada, puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

Gráfica de Efectos Principales para Esfericidad

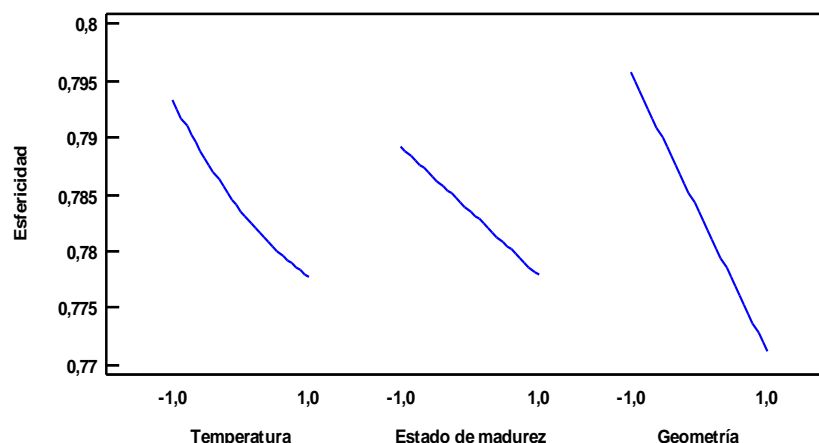


Figura 18. Gráfico de efectos principales para esfericidad: 40°C(-1,0), 80°C(1,0), madura(-1,0), pintona(1,0), cilindro(-1,0) y lámina(1,0).

En la Figura 18 se puede observar que mayor esfericidad existe cuando se seca a 40°C mientras incrementa la temperatura hay disminución de esfericidad, con respecto al estado de madurez hay mayor esfericidad en estado de madurez 6 (madura) conforme cuando el grado de madurez disminuye también la esfericidad disminuye y por último con respecto a la geometría el cilindro tiene mayor esfericidad con respecto a la lámina.

4.3.2 Evaluación de encogimiento

Por otro lado, es importante mencionar los cambios de forma y encogimiento de aguaymanto en el proceso de secado también se realizó. El encogimiento y la deformación de aguaymanto a comparación con el material experimental inicial cambiaron debido al calentamiento y la remoción de agua del aguaymanto, donde se manifiesta en el colapso celular, deformación de la forma y contracción de los capilares.

Asimismo Rao *et al.* (2014) indican que la formación de una capa seca en la parte externa de la muestra y la existencia de la parte no secado en el centro del producto. Concerniente al encogimiento. Ratti (2009) indica que esta depende del método de secado y del material experimental pues su valor se acerca a la unidad para el secado convencional, al vacío y secado con microondas, pero son menores en productos secados por liofilización; así menos del 10% de encogimiento en el producto final es

normalmente esperado para productos liofilizados comparados con 80% a 90% cuando el secado es realizado con aire caliente. En el encogimiento y la migración de solutos son posibles factores en el presente estudio puede ser influenciado a la difusividad efectiva del agua.

Tabla 23

Valores de encogimiento para la forma cilíndrica en producto seco

	Temperatura	Dimensión inicial		Dimensión final		Vi(cm ³)	Vf(cm ³)	Encogimiento
		r(cm)	h(cm)	r(cm)	h(cm)			
Madura	T40	1,070	0,920	0,725	0,640	3,309	1,057	0,319
	T60	1,005	0,960	0,700	0,580	3,046	0,893	0,293
	T80	1,075	0,900	0,710	0,580	3,267	0,919	0,281
Pintona	T40	1,070	0,960	0,700	0,590	3,453	0,908	0,263
	T60	1,060	0,950	0,685	0,560	3,353	0,826	0,246
	T80	1,055	0,940	0,665	0,540	3,287	0,750	0,228

Radio (r), altura (h), volumen inicial de la partícula (Vi), volumen final de la partícula (Vf), temperatura a 40°C(T40), temperatura a 60°C(T60) y temperatura a 80°C(T80).

El encogimiento para la forma cilíndrica para el producto seco se muestra en la Tabla 23 y el encogimiento para la forma lámina para el producto seco en la Tabla 24.

Combinado las Tablas 23 y 24 para los dos estados de madurez tenemos se muestra la Figura 19 se ve claramente que el encogimiento es influenciado por la temperatura, estado de madurez y forma geométrica del producto después del secado. El mayor encogimiento obtuvo en el estado de madurez pintona de forma lámina tratada a la temperatura de 40°C con valor de 0,448 lo que indica que vario poco su forma geométrica, mientras tanto el menor encogimiento obtuvo en el estado de madurez pintona de forma cilíndrica tratada a la temperatura de 80°C con valor de 0,228 lo que indica la variación fue mucho mayor en su forma geométrica como se muestra en la Figura 19.

Tabla 24

Valores de encogimiento para la forma lámina en producto seco

	Temperatura	Dimensión inicial		Dimensión final		Vi(cm ³)	Vf(cm ³)	Encogimiento
		L(cm)	e(cm)	L(cm)	e(cm)			
Madura	T40	1,230	1,230	1,040	0,640	1,861	0,692	0,372
	T60	1,220	1,220	1,030	0,620	1,816	0,658	0,362
	T80	1,200	1,200	1,020	0,580	1,728	0,603	0,349
Pintona	T40	1,150	1,150	1,040	0,630	1,521	0,681	0,448
	T60	1,180	1,180	1,020	0,510	1,643	0,531	0,323
	T80	1,160	1,160	1,000	0,440	1,561	0,440	0,282

Lado (L), espesor (e), volumen inicial de la partícula (Vi), volumen final de la partícula (Vf), temperatura a 40°C(T40), temperatura a 60°C(T60) y temperatura a 80°C(T80).

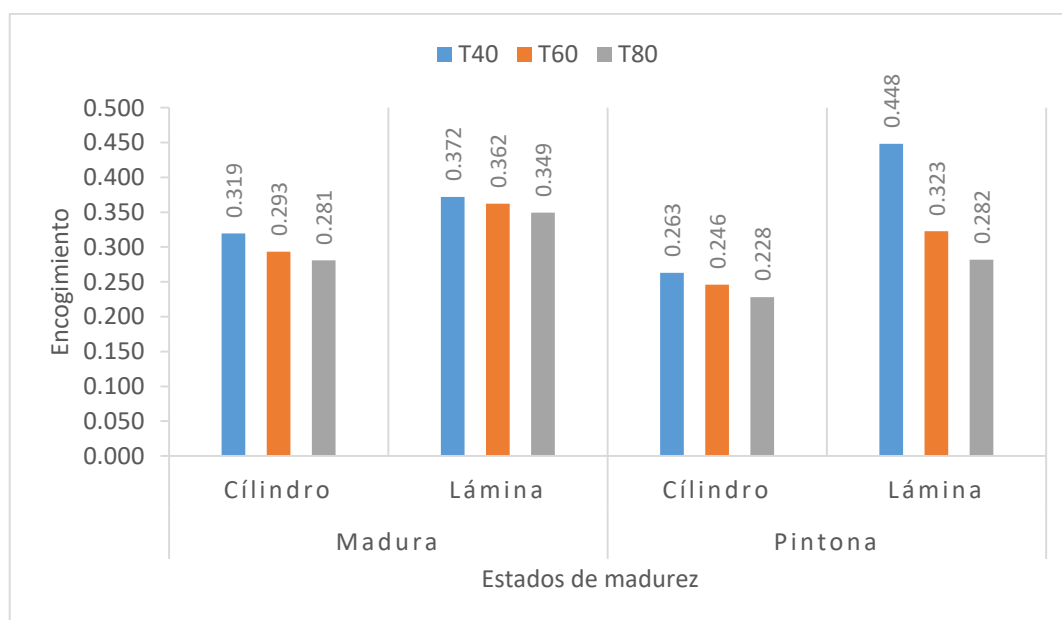


Figura 19. Gráfico de combinación de tratamientos para el encogimiento de aguaymanto: Temperatura a 40°C(T40), temperatura a 60°C (T60) y temperatura a 80°C (T80).

La Tabla 25, muestra análisis de varianza (ANDEVA) para el encogimiento

Tabla 25

Análisis de varianza para el encogimiento a $P < 0,05$

Fuente de variabilidad	Gl	SC	CM	Fc	Ft(5%)	Ft(1%)	N.S.
Tratamientos	11	0,12617	0,01147	719,37	2,22	3,09	**
A: Temperatura	2	0,02679	0,01339	840,05	3,40	5,61	**
B: Estado de madurez	1	0,00862	0,00862	540,50	4,26	7,82	**
C: Geometría	1	0,06392	0,06392	4009,21	4,26	7,82	**
AB	2	0,00800	0,00400	250,98	3,40	5,61	**
AC	2	0,00556	0,00278	0,60	3,40	5,61	n.s.
BC	1	0,00399	0,00399	0,86	4,26	7,82	n.s.
ABC	2	0,00929	0,00464	291,27	3,40	5,61	**
Error total	24	0,00038	0,00002				
Total	35	0,12655					

Grados de libertad (Gl), suma de cuadrados (SC), cuadrado medio (CM), razón-F(Fc), F tabulada (Ft) y nivel de significancia (N.S.)

La tabla ANDEVA divide los tres factores en estudio para ver la variabilidad de encogimiento, se encontró diferencia estadística altamente significativa para los 3 factores, AB y para la interacción de segundo orden ABC; en cambio no se encontró diferencia alguna para las interacciones de los factores AC y BC. En este caso todos son evaluados a ($p \leq 0,01$) y ($p \leq 0,05$), con un nivel de confianza del 95,0% y 99,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo explica 84,9% de la variabilidad en el encogimiento. El R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 78,0%. El coeficiente de variabilidad (CV) de 3,25%. Debido a que el valor-P es menor que 5,0%, hay una indicación de posible correlación serial al nivel de significancia del 5,0%.

La ecuación es de regresión lineal múltiple que se ha ajustado a los datos y la ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Encogimiento} = 0,306 - 0,03275*T - 0,0155*E + 0,0421667*G + 0,01175*T^2 - 0,0175*T*E - 0,0145*T*G + 0,0105*E*G \quad (40)$$

Donde: T es Temperatura, E es estado de madurez y G es geometría

Graficando la ecuación con los valores de las variables están especificados en las Tablas 23 y 24 se gráfica mediante el programa estadístico STATGRAPHICS como se muestra en la Figura 20.

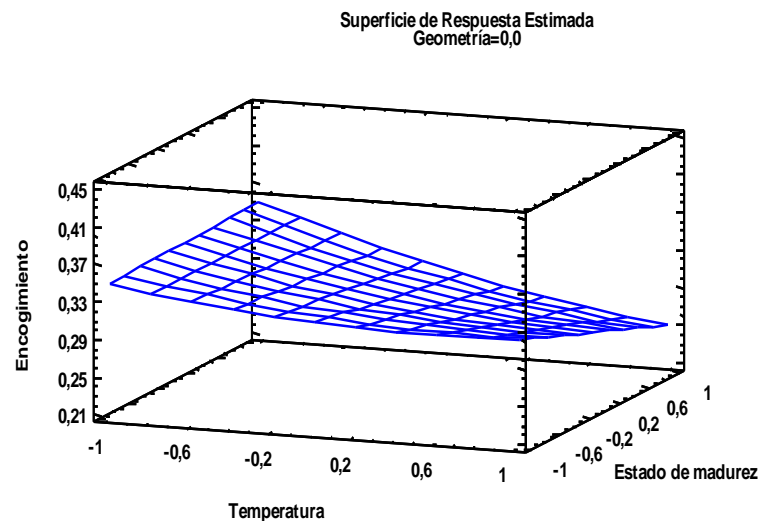


Figura 20. Superficie de respuesta para el encogimiento

Optimizando la ecuación del encogimiento según la ecuación para ello se deriva en función a cada una de las variables y se produce un máximo encogimiento con un valor óptimo de 0,419667; este valor óptimo indica la mayor esfericidad obtuvo en el estado de madurez pintona de forma lámina tratada a la temperatura de 40°C.

Efectos principales para el encogimiento

Esta Figura 21, muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza el encogimiento sobre la región indicada, puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

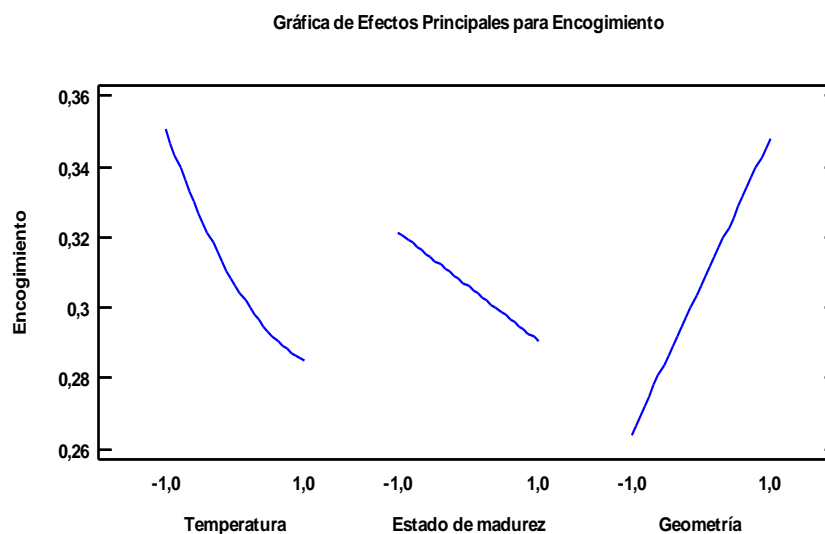


Figura 21. Gráfico de efectos principales para el encogimiento: 40°C(-1,0), 80°C(1,0), madura(-1,0), pintona(1,0), cilindro(-1,0) y lámina(1,0).

En la Figura 21 se puede observar que mayor encogimiento existe cuando se seca a 40°C mientras incrementa la temperatura hay disminución de encogimiento, con respecto al estado de madurez hay mayor encogimiento estado de madurez 6 (madura) conforme cuando el grado de madurez disminuye también el encogimiento disminuye y por último con respecto a la geometría lámina o cubo tiene mayor encogimiento con respecto al cilindro.

CONCLUSIONES

- El menor tiempo de secado de la baya de aguaymanto hasta llegar a la humedad de equilibrio resultó para el estado de madurez 6 (madura) a 80°C fue de 6 horas, mientras tanto para el estado de madurez 3 (pintona) para la forma cilíndrica fue de 8 horas y lámina de 7 horas ambos a 80°C respectivamente.
- El mejor modelo para estado de madurez 6 (madura) fue elegido el modelo de Midilli seguida del modelo Page, mientras para estado de madurez 3 (pintona) fue el modelo logaritmico seguida del modelo Page; Los valores de la difusividad efectiva del agua para el estado de madurez madura incrementaron en la muestra cilíndrica desde $1,080 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ a $2,844 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ y para la muestra lámina desde $2,092 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ a $5,094 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$; Las energías de activación para madura cilíndrica (MC) de 22,23 kJ/mol, madura lámina (ML) de 20,31 kJ/mol, pintona cilíndrica (PC) de 22,59 kJ/mol y pintona lámina (PL) de 24,01 kJ/mol respectivamente.
- La mayor esfericidad se obtuvo en el estado de madurez madura de forma cilíndrica a 40°C con valor de 0,807, mientras tanto la menor esfericidad obtuvo en el estado de madurez pintona de forma lámina a 80°C con valor de 0,744. Mientras que el mayor encogimiento obtuvo en el estado de madurez pintona de forma lámina tratada a 40°C con valor de 0,448, mientras tanto el menor encogimiento obtuvo en el estado de madurez pintona de forma cilíndrica a 80°C con valor de 0,228.

RECOMENDACIONES

- Realizar el estudio para diferentes productos similares estudiando todas las propiedades fisicoquímicas y geométricas del producto durante el proceso.
- Elaborar productos de aguaymanto con sustitución parcial de los ingredientes e insumos y determinar la aceptabilidad del producto.
- Efectuar las investigaciones para obtener las isoterms de sorción que permita estimar la estabilidad, vida en anaquel y microbiológica del aguaymanto para la conservación.
- Realizar las simulaciones de los modelos de secado de productos con las variables más importantes y con tecnologías avanzadas.
- Realizar la evaluación organoléptica del producto deshidratado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abano, E., Ma, H. y Qu, W. (2011). Influence of Air Temperature on the Drying Kinetics and Quality of Tomato Slices. *J Food Process Technol*, 2(5), 1-9. doi: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7110.1000123>
- Agronet, (2010). *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. Colombia. Red de Información y Comunicación Estratégica del Sector Agropecuario.
- Alvarado, J. D., y Aguilera, J. M. (2001). *Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos* (No. TX 541. M47 2001).
- Alvarez, C. (2011). Perú: *Muestras de uchuvas peruanas se enviarán a Rotterdam este sábado*. from www.freshplaza.es
- Aparcana, I. y Villareal, L. (2014). *Evaluación de la capacidad antioxidante de los extractos etanólicos del fruto Physalis peruviana "Aguaymanto" de diferentes lugares geográficos del Perú*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.
- Ávila, J. A., Moreno, P., Fischer, F. y Miranda, D. (2016). Influencia de la madurez del fruto y del secado del cáliz en uchuva (*Physalis peruviana* L.), almacenada a 18°C. *Acta Agronómica*, 55(4), 29-38.
- A.O.A.C. (2005). *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, USA.
- Balaguera, H. E., Ramírez, L. V. y Arévalo, A. H. (2014). *Physalis peruviana* L.: Fruta andina para el mundo. Capítulo: Fisiología y bioquímica del fruto de uchuva

- (*Physalis peruviana* L.) durante la maduración y poscosecha. *Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*, 120-121.
- Barbosa, G. y Vega, M. (2000). *Deshidratación de los alimentos*. Zaragoza - España: Editorial Acribia S.A.
- Basoalto, H., Correa, R. y Fernández, C. (2010). Cultivo de Goldenberry (*Physalis peruviana* L.) en la zona central de Chile. *Fundación para la Innovación Agraria - Chile*: Andrea Villena M.
- Berk, Z. (2018). *Food process engineering and technology*. Academic press.
- Bernal, H.Y. y Correa, J.E. (1998). Especies vegetales promisorias de los países del Convenio Andrés Bello. *En Corporación Andina de Fomento* (Tomo XII, p.489) Santafé de Bogotá, Colombia: Editor Secab.
- Bonilla, M.H., Arias, P.A., Landinez, M.L., Moreno, J.M., Cardozo, F. y Suarez, M.S. (2009). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la uchuva en fresco para exportación en Colombia*. Bogotá-Colombia: Editores Giro Ltda.
- Brito, B., Villacres, E., Espin, S. y Vaillant, F. (2014). Alternativas competitivas de transformación para la valorización de la producción de *Physalis peruviana* L. para los países andinos. En *Physalis Peruviana L.: Fruta andina para el mundo* (pp.135-159). Colombia: Editors: Catarina Pedro Pássaro Carvalho.
- Cabrera, Y. A., Estrada, E. M. y Cortes, M. (2017). La influencia del secado sobre la calidad fisiológica de los frutos la uchuva (*Physalis peruviana* L.) agregados con componentes activos. *Agroindustria y Ciencia de los Alimentos- Colombia*, 66 (4), 512 – 518.
- Castañeda, G. E. y Paredes, R. (2003). *Estudio del proceso respiratorio, principales ácidos orgánicos, azúcares y algunos cambios fisicoquímicos en el desarrollo del fruto de uchuva (Physalis Peruviana L.)*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Castillo, M. (2011). *Análisis proximal de alimentos*. Dirección General de Normas. México.

- Ceballos, E. J. (2012). Cambios en las propiedades de frutas y verduras durante la deshidratación con aire caliente y su susceptibilidad al deterioro microbiano. *Temas selectos de ingeniería de alimentos*, 6(1), 98 - 110.
- Cedeño, M. M. y Montenegro, D. M. (2004). *Plan Exportador, Logístico y de Comercialización de Uchuva al Mercado de Estados Unidos Para Frutexpo S.C.I. Ltda.* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá Colombia.
- Ciro, H. y Osorio, J. (2008). *Avance experimental de la ingeniería de postcosecha de frutas colombianas resistencia mecánica para frutos de uchuva (Physalis peruviana L.)*. Universidad de Colombia. Bogotá.
- Da Rocha, R., Melo, E., Corbín, J., Berbert, P., Donzeles, S. y Tabar, J. (2012). Cinética del Secado de Tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(6), 675–683.
- Delgado, J. M. y Barbosa de Lima, A.G. (2014). Fenómenos de Transporte y el secado de sólidos y materiales particulados. *Biosystems Engineering*, 92 (2), 237–245.
- Duque, C., Mayorga, H., Knapp, H., y Winterhalter, P. (2005). *Estudios sobre el delicado aroma de uchuva (Physalis peruviana) y algunos de sus precursores de tipo glicosídico*. El aroma frutal de Colombia. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 43-73.
- Doymaz, I. (2014). Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Convective Hot-Air Dried White Button Mushroom Slices. *Journal of Chemistry*, 8p. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/453175>
- Erkaya, T., Dağdemir, E. y Şengül, M. (2012). Influence of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) addition on the chemical and sensory characteristics and mineral concentrations of ice cream. *Food Research International*, 45(1), 331-335.
- FAO. (2006). Ficha técnica: *uchuva (Physalis peruviana)*. *INPHO*, Red de información sobre operaciones de poscosecha.
- Fernández, D., Muñoz, S., García, A., Cervantes, R. y Fernández, D. (2015). Cinética de secado de fruta bomba (*carica papaya* L., cv. *maradol roja*) mediante los métodos

- de deshidratación osmótica y por flujo de aire caliente. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(1), 22-28.
- Fischer, G. (2000). *Crecimiento, producción, poscosecha y exportación de la uchuva (Physalis Peruviana L.)*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Fischer, G., Elbert, G. y Ludders, P. (2007). Producción, semillas y contenido de carbohidratos de frutos de la variedad (*Physalis peruviana L.*) cultivados en dos altitudes colombianas contrastantes. *Revista de Botánica Aplicada y Calidad de los Alimentos*. Bogotá.
- Fischer, G. y Martínez, O. (1999). Calidad y madurez de la uchuva (*Physalis peruviana L.*) en relación con la coloración del fruto. *Agronomía colombiana*, 16(1-3), 35-39.
- Fischer, G. y Melgarejo, L. M. (2013). Capítulo: Ecofisiología de la uchuva (*Physalis peruviana L.*). *Physalis peruviana: fruta andina para el mundo*, 29-39.
- Fischer, G., Miranda, D., Piedrahita, W. y Romero, J. (2005). *Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (Physalis peruviana L.)*. Universidad Nacional de Colombia, 165-190.
- Fredericksen, S. A. (2013). *Modelar isoterma de sorción a tres diferentes temperaturas y transición vítrea de physalis (Physalis peruviana L.) en función de la humedad de equilibrio*. (Tesis doctoral). Universidad Austral de Chile, Valdivia – Chile.
- Galvis, J. A., Fischer, G. y Gordillo, O. P. (2005). *Cosecha y poscosecha de la uchuva. Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 165-190.
- García, M. y Torres, M. (2002); IV Seminario Nacional, Frutales de Clima Frío moderado, *La producción frutícola con enfoque de cadena, Medellín Colombia*; 257 – 259.
- Geankoplis, C. J. (2007). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México: editorial continental, S.A.
- Guiné, R. P., Pinho, S., y Barroca, M. J. (2011). Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Food and bioproducts processing*, 89(4), 422-428.

- Gutierrez, H. y De la vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGRAW-HILL/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Herrera, A. A. (2009). *Manejo poscosecha de la uchuva en producción, poscosecha y exportación de la uchuva (Physalis peruviana L.)*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. Colombia.
- Holdsworth, S. D. y Simpson, R. (2016). *Tratamiento térmico de los alimentos envasados*. Washington State University USA: Springer Cham Heidelberg.
- Ibarz, A. y Barboza, G. (2014). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. México: Ediciones Mundi-Prensa.
- Kays, S. (1997). *Postharvert physiology of perishable plant products*. Exon Press. Georgia. 532.
- Macías, V. (2011). *Análisis Químico Proximal de la Cereza del Perú cultivada en invernadero*. Trabajo Recepcional. Química Industrial. Universidad Veracruzana. México.
- Marín, Z. T., Cortés, M. y Montoya, O. I. (2010). Frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo ‘Colombia’ mínimamente procesados, adicionados con microorganismos probióticos utilizando la Ingeniería de Matrices. *Rev. Fac.Nal.Agr.*, 63(1), 5395-5407.
- Márquez, C. J., Trillos, O., Cartagena, J. R. y Cotes, J. M. (2009). Evaluación físicoquímica y sensorial de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Vitae*, 16(1), 42 - 48.
- Martin, L., Cortés, M. y Montoya, D. (2009). *Fisiología de frutas y hortalizas post recolección*. Zaragoza. Acribia editorial. España.
- Mayor, L. y Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food material. *Journal of Food Engineering*, 61, 373–386.
- Mendoza, J. H., Rodríguez de S, A. y Millán, P. (2012). Caracterización físico química de la uchuva (*Physalis peruviana*) en la región de Silvia Cauca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(2), 188 - 196.

- McCabe, W. L., Smith, J. C. y Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: Edición McGraw-Hill. S.A.
- Mohammad, U. H. J., Azharul, K., Kumar, C., Brown, J. R. (2016). *Porosity Establishing the Relationship between Drying Parameters and Dried Food Quality*. Universidad de Wisconsin-Madison, EE.UU.: Richard W. Hartel.
- Mujumdar, A. S. (2015). *Manual de secado industrial*. Boca Ratón Londres Nueva York: CRC Press.
- Norma Técnica Colombiana 4580 (1999). *Fruta fresca, Uchuva, Especificaciones*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Bogotá.
- Novoa, R. H., Bojaca, M. y Galvis, J. A. (2006). La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12 °C (*Physalis peruviana* L.). *Agronomía Colombiana*.
- Lima, S. M., Severo, J., Manica, R. y Silva, J. A. (2009). Características físico-químicas de *Physalis* en diferentes coloraciones de cáliz y sistemas de conducción. *Revista Brasileña de Fruticultura*.
- Luchese, C. L., Gurak, P. D., y Ferreira, L. D. (2015). Osmotic dehydration of *physalis* (*Physalis peruviana* L.): Evaluation of water loss and sucrose incorporation and the quantification of carotenoids. *LWT - Food Science and Technology*, 63(2),1-9.
- Olievira, S. F., Gonçalves, F. J., Correia, P. M. y Guiné, R. P. (2015). *Las propiedades físicas de Physalis peruviana* L., Conferencia Internacional de Ingeniería- Universidad de Beira Interior - Covilhã, Portugal
- Ospina, M. J. (2002). *Características físico mecánicas y análisis de calidad granos*. Bogotá: Unidad de Publicaciones Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 87-89.
- Pinzon, E., Reyes, A., Alvarez, J., Leguizamo, M. y Joya, J. (2015). Comportamiento del fruto de uchuva *Physalis peruviana* L., bajo diferentes temperaturas de almacenamiento. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 32(2), 26 - 35.

- Puente, L. A., Pinto, C. A., Castro, E. S. y Cortes M. (2011). *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit. A review. *Food, Research International*, 44, 1733-1740.
- Puente, L., Pinto, C., Castro, E. y Cortes, M. (2011). *Physalis peruviana* Linnaeus, las múltiples propiedades de una fruta altamente nutricional. *Revista Investigación Alimentaria Internacional*.
- Rao, M. A., Rizvi, S. H., Datta, A. K. y Ahmed, J. (2014). *Ingeniería de propiedades de alimentos*. London New York: CRC Press.
- Ratti, C. (2009). *Advances in Food Dehydration* (Vol. 5). United States of America: Taylor y Francis Group.
- Renato de Jesús, J., Gomez, J., L. y Martins de Oliveira, H. (2017). Secado convectivo de frutos de capa de aguaymanto: Efecto de los pretratamientos sobre la cinética y los parámetros de calidad. *Revista Ciencia y Tecnología de los Alimentos- LWT*, 82 (1), 404 – 410.
- Repo, R., Encina, C. R. (2008). Determinación de la capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de frutas nativas peruanas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*.
- Restrepo, A. M. (2008). *Nuevas perspectivas de consumo de frutas: Uchuva (Physalis peruviana L.) y fresa (Fragaria vesca L.) mínimamente procesadas fortificadas con vitamina E*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Restrepo, A. M., Cortés R, M. y Márquez, C. J. (2008). Uchuvas (*Physalis peruviana* L.) mínimamente procesadas fortificadas con vitamina E. *Vitae*, 16(1), 19 - 30.
- Saravacos, G. D. y Maroulis, Z. B. (2011). *Food Process Engineering Operations*. London New York: Edición. CRC Press.
- Schreiber, F. (2015). Sierra exportadora: Proyecto de factibilidad aguaymanto Recuperado de <http://www.sierraexportadora.gob.pe/berries/factibilidad/aguaymanto.pdf>.
- Serpil, S. y Servet, G. S. (2009). *Propiedades físicas de los alimentos*. Zaragoza – España: Acribia, S.A.

- Singh, P. y Heldman, D. (2014). *Introducción a la Ingeniería de los Alimentos*. Zaragoza – España: Acribia, S.A.
- Stokes, G. G. (1851). *On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums* (Vol. 9, p. 8). Cambridge: Pitt Press.
- Tacanga, A. (2015). *Características y propiedades funcionales del aguaymanto (Physalis peruviana L.)*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- Taheri-Garavanda, A., S., R. y Keyhani, A. (2011). Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Tomato Influence of Air Dryer Conditions. *International 98 Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 2(2), 147-160.
- Toledo, R. T., Singh, R. K. y Kong, F. (2018). *Fundamentals of food process engineering* (Nº. 664 T65 1980.). New York: Van Nostrand Reinhold.
- Valdenegro M., Fuentes L. y Herrera R. (2012). Cambios en la capacidad antioxidante durante el desarrollo y maduración del fruto dorado (*Physalis peruviana L.*) y en respuesta al tratamiento con 1-metilciclopropeno. *Biología y Tecnología Poscosecha*.
- Valdenegro, M., Almonacid, S., Henríquez, C., Lutz, M. y Fuentes, L. (2013). Los efectos de los procesos de secado sobre las características organolépticas y la calidad de la salud de los ingredientes obtenidos a partir de frutas Aguaymanto (*Physalis peruviana L.*). Universidad de Valparaíso – Chile, doi: [scientificreports.642](https://doi.org/10.29354/scientificreports.642), 2(2), 1-7.
- Vásquez, J. E., Ochoa, C. I. y Bustos, M. (2013), Effect of Chemical and Physical Pretreatments on the Convective Drying of Cape Gooseberry Fruits (*Physalis peruviana*), doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.06.037, *J. Food Eng*, 119(3), 648–654
- Vega, G. A., Puente, D. L., Lemus, M. R., Miranda, M. y Torres, M. J. (2012). El modelado matemático del secado en capa fina Cinética de la uchuva (*Physalis peruviana L.*). *Diario de Procesamiento y conservación de alimentos Chile*, 38, 728-736.
- Velásquez, T. y Mestanza, R. (2003). *Cultivo del tomatito nativo, tomatillo, uvilla o aguaymanto*. *Revista Innovación Agraria*. INIA Cajamarca. Cajamarca, Perú.

- Veliz, S. N. y Espinoza, S. C. (2009). Evaluación del contenido de vitamina C, β -caroteno y actividad de antioxidantes totales en la pulpa estabilizada de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.). *Prospectiva Universitaria*. Perú.
- Wernecke, R. y Wernecke, J. (2014). *Humedad industrial y Medición-Una guía práctica*. Alemania: Edición, Wiley-VCH Verlag GmbH y Co. KGaA.
- Whitson, M. y Manos, P. S. (2005). Untangling *Physalis* (Solanaceae) from the Physaloids: atwo-gene phylogeny of the Physalinae. *Sistematic Botany*. 30, 216-230.
- Wills, R., McGlasson, B., Graham, D. y Joyce, D. (1998). *Introduction to the physiology and handling of fruit, vegetable and ornamentals*. UNSW Press, Adelaine, USA.
- Wu, S. J., Tsai, J. Y., Chang, S. P., Lin, D. L., Wang, S. S. y Huang, S. N. (2006). Supercritical carbon dioxide extract exhibits enhanced antioxidant and anti-inflammatory activities of *Physalis peruviana*. *Journal of Ethnopharmacology*. 108, 407-413.
- Yasin, O., Aysun, O. y Senem, T. (2015). Efecto de dos tratamientos previos de inmersión en la cinética de secado de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.). *Instituto Central de Investigación de Horticultura-Turquía*. 11 (1), 40-47.
- Yildiz, G., Izli, N., Ünal, H. y Uylaşer, V. (abril de 2015). Las características físicas y químicas de los frutos Aguaymanto (*Physalis peruviana* L.). *Ciencia y Tecnología de Alimentos India*, 52 (4), 2320-2327.
- Youssef, K. M. (2015). Impacto de la temperatura de secado caliente y velocidad del aire en la cinética de secado, color, fotoquímicos y actividad antioxidante de Uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Ciencia de alimentos de frutas y lácteos Egipto*, 6 (1), 23 – 40.



ANEXOS

Anexo 1. Informe de análisis de alimentos (análisis proximal).



Universidad Nacional del Altiplano - Puno
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



Ciudad Universitaria, Av. Sesquicentenario N° 1150, Telf.: (051)599430 / IP. 10301 / (051) 366080

LABORATORIO DE EVALUACIÓN NUTRICIONAL DE ALIMENTOS

INFORME DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS Nro. 0012-2019-LENA-EPIA

SOLICITANTE : ALFREDO FERNADEZ AYMA
 LUGAR DE PROCEDENCIA : UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
 ESCUELA DE POSTGRADO
 MAESTRIA EN AGRICULTURA ANDINA
 ESPECIALIDAD EN POSTCOCECHA Y MARKETING
 TITULO : ESTUDIO DEL MODELO CINETICO Y PROPIEDADES
 GEOMETRICAS EN EL PROCESO DE SECADO CONVECTIVO DE
 AGUAYMANTO (*Physalis peruviana L.*)
 PRODUCTO : AGUAYMANTO
 ENSAYO SOLICITADO : -HUMEDAD
 °BRIX
 -ACIDEZ (Exp. En Ac. Cítrico)
 FECHA DE RECEPCION : 18 de Marzo del 2019
 FECHA DE ENSAYO : 18 de Marzo del 2019
 FECHA DE EMISION : 20 de Marzo del 2019

RESULTADOS:

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

RESULTADOS DE HUMEDAD °BRIX Y ACIDEZ (Exp. En Ac. Cítrico)

ESTADO DE MADUREZ	% HUMEDAD	°BRIX	% ACIDEZ (Exp. Cítrico)
MADURA (GRADO DE COLOR 6)	78,4	15,3	1,7
PINTONA (GRADO DE COLOR 3)	80,5	14,1	2,3

CONCLUSION: Los resultados de Humedad, °BRIX y Acidez (Exp. En Ac. Cítrico) están conformes.

Puno, C.U. 20 de Marzo del 2019

Oswaldo Arpas Alca
 INGENIERO AGROINDUSTRIAL
 C.I.P. 190625

JENATURA
 Alimentos Instrumentación
 A UNA PUNO

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
 FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
 Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial

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

E-mail: direccion.epiai@unap.edu.pe

Anexo 2. Datos de variación de peso para el estado de madurez 6 (madura) a 40°C

t (h)	Cilindro a 40°C				Lámina a 40°C			
	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio
0	51,7	51,9	53,0	52,2	38,3	40,7	38,6	39,2
1	46,1	47,6	50,3	48,0	34,8	35,7	35,2	35,2
2	41,8	43,2	46,0	43,7	32,1	32,5	31,5	32,0
3	38,8	38,7	41,0	39,5	27,7	29,2	28,3	28,4
4	35,4	33,5	35,2	34,7	23,9	25,3	24,6	24,6
5	30,6	29,2	31,7	30,5	20,8	22,0	20,8	21,2
6	26,1	26,1	28,2	26,8	17,1	18,9	18,0	18,0
7	23,5	22,1	24,2	23,3	14,7	15,9	14,7	15,1
8	19,1	18,2	21,1	19,5	11,9	13,1	12,5	12,5
9	16,5	15,7	17,3	16,5	10,5	12,2	10,3	11,0
10	14,6	13,4	15,1	14,4	9,3	10,5	10,2	10,0
11	13,8	12,6	14,0	13,5	9,1	10,1	9,9	9,7
12	12,9	12,0	13,3	12,7	8,9	9,7	9,4	9,3
13	12,8	11,8	12,7	12,4	8,9	9,6	9,2	9,2
14	12,4	11,7	12,5	12,2	8,8	9,6	9,1	9,2

Anexo 3. Datos de variación de peso para el estado de madurez 6 (madura) a 60°C.

t (h)	Cilindro a 60°C				Lámina a 60°C			
	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio
0	53,4	51,8	51,8	52,3	38,2	38,7	40,7	39,2
1	46,3	45,8	44,5	45,5	31,8	33,1	34,7	33,2
2	39,2	39,5	37,1	38,6	26,2	27,8	28,2	27,4
3	32,2	33,5	29,2	31,6	20,5	21,3	22,1	21,3
4	25,3	25,7	23,4	24,8	17,7	15,7	17,3	16,9
5	21,2	20,0	19,7	20,3	12,9	13,7	14,2	13,6
6	17,9	16,5	16,9	17,1	11,1	12,0	12,6	11,9
7	15,5	15,1	13,5	14,7	9,7	9,6	11,3	10,2
8	13,7	12,6	12,7	13,0	8,9	8,5	10,5	9,3
9	12,9	12,2	12,1	12,4	8,7	8,2	10,4	9,1
10	12,7	12,0	11,9	12,2				

Anexo 4. Datos de variación de peso para el estado de madurez 6 (madura) a 80°C.

t (h)	Cilindro a 80°C				Lámina a 80°C			
	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio
0	49,3	50,2	48,1	49,2	42,2	39,5	41,6	41,1
1	36,8	38,2	36,6	37,2	30,1	27,9	28,1	28,7
2	27,0	27,3	25,5	26,6	20,3	18,7	19,5	19,5
3	19,9	20,7	19,1	19,9	15,1	13,5	14,0	14,2
4	14,6	16,8	14,8	15,4	11,8	10,7	10,8	11,1
5	13,1	13,2	12,1	12,8	10,4	9,2	9,8	9,8
6	11,0	12,8	11,3	11,7	10,2	8,8	9,8	9,6

Anexo 5. Datos de variación de peso para el estado de madurez 3 (pintona) a 40°C.

t (h)	Cilindro a 40°C				Lámina a 40°C			
	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio
0	52,3	49,1	52,5	51,3	39,2	42,3	42,1	41,2
1	44,3	44,9	46,4	45,2	35,0	37,1	35,1	35,7
2	41,5	39,2	41,7	40,8	31,2	33,1	30,7	31,7
3	35,7	36,1	37,1	36,3	27,8	28,1	27,2	27,7
4	32,5	32,4	34,1	33,0	24,2	26,2	24,7	25,0
5	29,2	29,3	31,5	30,0	21,7	23,3	22,8	22,6
6	26,2	26,7	28,1	27,0	19,4	21,2	20,5	20,4
7	23,4	23,5	25,1	24,0	16,2	18,1	19,1	17,8
8	21,5	20,7	21,7	21,3	14,2	16,1	16,2	15,5
9	19,1	17,4	19,0	18,5	12,5	14,2	14,7	13,8
10	17,0	15,4	17,1	16,5	11,5	12,5	12,0	12,0
11	13,6	13,5	15,5	14,2	9,8	11,2	10,2	10,4
12	12,1	11,9	13,9	12,6	9,2	10,5	9,1	9,6
13	11,3	11,2	12,9	11,8	8,8	10,4	8,4	9,2
14	10,9	10,8	12,0	11,2	8,7	9,5	8,2	8,8
15	11,1	10,4	11,5	11,0	8,5	9,5	8,0	8,7
16	11,1	10,2	11,4	10,9				

Anexo 6. Datos de variación de peso para el estado de madurez 3 (pintona) a 60°C.

t (h)	Cilindro a 60°C				Lámina a 60°C			
	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio
0	49,2	48,2	47,5	48,3	41,9	40,8	40,9	41,2
1	41,5	41,1	39,0	40,5	35,3	33,6	33,2	34,0
2	35,3	36,0	33,4	34,9	29,1	28,0	27,2	28,1
3	30,2	29,3	28,1	29,2	24,1	23,8	22,3	23,4
4	25,2	24,4	23,9	24,5	20,4	18,8	18,7	19,3
5	20,9	19,8	19,3	20,0	16,3	15,4	14,2	15,3
6	17,9	16,9	16,2	17,0	13,4	12,7	12,9	13,0
7	15,1	13,7	13,5	14,1	11,5	10,8	10,9	11,1
8	12,8	11,9	11,9	12,2	10,2	9,3	9,3	9,6
9	11,9	11,7	10,8	11,5	10,1	8,1	8,8	9,0
10	11,1	11,6	9,7	10,8	9,1	8,6	8,7	8,8
11	10,8	11,4	9,6	10,6	8,8	8,6	8,7	8,7
12	10,5	10,9	9,5	10,3				

Anexo 7. Datos de variación de peso para el estado de madurez 3 (pintona) a 80°C.

t (h)	Cilindro a 80°C				Lámina a 80°C			
	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio	R ₁	R ₂	R ₃	Peso promedio
0	51,2	49,2	51,4	50,6	41,3	39,2	40,1	40,2
1	38,4	37,3	38,3	38,0	29,0	27,5	29,3	28,6
2	29,2	27,4	28,2	28,3	21,1	19,3	22,0	20,8
3	22,3	20,4	22,4	21,7	16,7	14,2	16,1	15,7
4	18,2	16,2	16,6	17,0	13,2	11,2	13,1	12,5
5	12,9	13,7	14,5	13,7	10,9	9,8	9,9	10,2
6	11,3	10,3	12,9	11,5	8,9	8,2	8,7	8,6
7	11,0	9,4	12,2	10,9	8,7	8,1	8,7	8,5
8	10,9	9,3	12,1	10,8				

Anexo 8. Razón de humedad para el estado de madurez 6 (madura).

t(h)	Cilindro			Lámina		
	C40	C60	C80	L40	L60	L80
0	0,999	0,998	1,000	0,999	0,999	1,000
1	0,894	0,831	0,680	0,868	0,800	0,606
2	0,786	0,658	0,397	0,761	0,608	0,314
3	0,682	0,484	0,219	0,640	0,406	0,146
4	0,562	0,314	0,099	0,514	0,260	0,048
5	0,457	0,202	0,030	0,401	0,150	0,007
6	0,365	0,122	0,000	0,294	0,094	0,000
7	0,277	0,063		0,198	0,038	
8	0,182	0,020		0,111	0,008	
9	0,108	0,005		0,062	0,001	
10	0,055	0,000		0,028		
11	0,032			0,018		
12	0,014			0,006		
13	0,006			0,003		
14	0,000			0,001		

Anexo 9. Razón de humedad para el estado de madurez pintona (grado de color 3).

t(h)	Cilindro			Lámina		
	C40	C60	C80	L40	L60	L80
0	1,000	0,999	0,999	1,000	1,000	0,999
1	0,849	0,795	0,683	0,832	0,780	0,634
2	0,740	0,647	0,439	0,707	0,597	0,388
3	0,629	0,497	0,274	0,585	0,453	0,227
4	0,547	0,374	0,157	0,503	0,327	0,127
5	0,473	0,256	0,074	0,428	0,204	0,055
6	0,399	0,177	0,019	0,360	0,133	0,004
7	0,324	0,101	0,003	0,281	0,074	0,001
8	0,257	0,051	0,000	0,210	0,029	
9	0,188	0,032		0,158	0,010	
10	0,139	0,014		0,102	0,004	
11	0,082	0,009		0,053	0,001	
12	0,043	0,001		0,029		
13	0,022			0,016		
14	0,008			0,004		
15	0,002			0,000		
16	0,000					

Anexo 10. Logaritmo natural de razón de humedad para el estado de madurez 6 (madura).

t(h)	Cilindro			Lámina		
	C40	C60	C80	L40	L60	L80
0	-0,001	-0,002	0,000	-0,001	-0,001	0,000
1	-0,112	-0,186	-0,386	-0,142	-0,223	-0,501
2	-0,240	-0,419	-0,923	-0,273	-0,497	-1,157
3	-0,382	-0,725	-1,520	-0,446	-0,902	-1,923
4	-0,576	-1,158	-2,315	-0,666	-1,347	-3,039
5	-0,782	-1,599	-3,523	-0,914	-1,894	-5,013
6	-1,008	-2,100	-8,587	-1,223	-2,364	-8,097
7	-1,284	-2,769		-1,620	-3,278	
8	-1,704	-3,894		-2,194	-4,846	
9	-2,227	-5,218		-2,787	-6,700	
10	-2,909	-7,733		-3,563		
11	-3,440			-3,997		
12	-4,286			-5,087		
13	-5,073			-5,860		
14	-7,730			-7,363		

Anexo 11. Logaritmo natural de razón de humedad para el estado de madurez 3 (pintona).

t(h)	Cilindro			Lámina		
	C40	C60	C80	L40	L60	L80
0	0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,000	-0,001
1	-0,164	-0,229	-0,381	-0,184	-0,249	-0,456
2	-0,301	-0,435	-0,823	-0,347	-0,515	-0,946
3	-0,464	-0,698	-1,293	-0,536	-0,792	-1,484
4	-0,603	-0,984	-1,854	-0,687	-1,118	-2,063
5	-0,749	-1,364	-2,607	-0,848	-1,591	-2,908
6	-0,920	-1,732	-3,985	-1,023	-2,017	-5,477
7	-1,126	-2,296	-5,908	-1,271	-2,609	-6,875
8	-1,357	-2,980	-8,469	-1,561	-3,557	
9	-1,671	-3,458		-1,847	-4,598	
10	-1,976	-4,270		-2,280	-5,541	
11	-2,505	-4,741		-2,935	-7,072	
12	-3,149	-7,075		-3,557		
13	-3,804			-4,121		
14	-4,797			-5,541		
15	-6,001					

Anexo 12. Semiespesores de cilindro y lámina en centímetros.

T (°C)	Cilindro	Lámina	Cilindro	Lámina
40	0,460	0,615	0,480	0,575
60	0,480	0,610	0,475	0,590
80	0,460	0,600	0,470	0,580