



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Baltazar Nicolás Cáceres Huambo

..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada:

"DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EFECTIVA DEL AGUAYMANTO
(Physalis peruviana L)

Presentado por: Maria Isabel PALOMINO HUILLCA DNI N° 71388066 ;

presentado por: Willy Anthony TURPO HUAMANCALI DNI N°: 72813523

Para optar el título Profesional/Grado Académico de
INGENIERO QUÍMICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 6.00%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 09 de abril de 2026.....

Firma

Post firma B. Nicolás Cáceres Huambo

Nro. de DNI 23879771

ORCID del Asesor 0009-0005-4702-5605

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:576556200

F Determinación del coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto (*Physalis peruviana* L) (1) (1).pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:576556200

112 páginas

Fecha de entrega

9 abr 2026, 12:04 p.m. GMT-5

26.358 palabras

Fecha de descarga

9 abr 2026, 12:10 p.m. GMT-5

129.954 caracteres

Nombre del archivo

F Determinación del coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto (*Physalis peruviana* L) (1) (1).pdf

Tamaño del archivo

1.5 MB




6% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe


- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
2 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XII
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
CAPÍTULO I GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Formulación del problema	3
1.3.1 Problema general	3
1.3.2 Problemas específicos	3
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo general.....	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
1.5 Justificación	4
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Bases teóricas.....	9
2.2.1 Aguaymanto (<i>Physalis peruviana L</i>)	9

2.2.2 Humedad	15
2.2.3 Actividad del agua	16
2.2.4 Secado	17
2.2.4.1 Curvas de secado para alimentos agrícolas.....	21
2.2.4.2 Factores que afectan la velocidad del secado	22
2.2.5 Pretratamientos en secado de alimentos	23
2.2.6 Coeficiente de difusión efectiva o difusividad.....	25
2.2.7 Leyes de difusión de Fick	26
2.2.7.1 Determinación del coeficiente de difusión efectiva para una geometría esférica	29
2.2.8 Energía de activación.....	34
2.2 Hipótesis de investigación.....	36
2.2.1 Hipótesis general.....	36
2.2.2 Hipótesis específicas	36
2.3 Identificación de variables	36
2.3.1 Variables dependientes	36
2.3.2 Variable independiente	36
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	37
3.1 Características de la investigación	37
3.2 Muestra, instrumentos, equipos e insumos.....	38
3.3 Procedimiento experimental	38
3.3.1 Preparación de la materia prima	41

3.3.2 Obtención de datos experimentales mediante secado.....	41
3.3.3 Coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto	44
3.3.4 Energía de activación.....	45
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1 Humedad inicial de la materia prima	48
4.2 Secado de aguaymanto	48
4.2.1 Pérdida de peso de la muestra.....	48
4.2.2 Curvas de secado.....	59
4.2.3 Coeficiente de difusión efectiva.....	63
4.2.4 Energía de activación.....	71
CONCLUSIONES.....	76
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78
APÉNDICE.....	85
APÉNDICE 1. Datos de secado de aguaymanto con cáscara.....	85
APÉNDICE 2. Datos de secado de aguaymanto sin cáscara.....	89
APÉNDICE 3. Balance de materia.....	93
APÉNDICE 4. Balance de energía	95

APÉNDICE 5. ANOVA unidireccional para la evaluación del coeficiente de difusión efectiva.....	97
--	-----------

APÉNDICE 6. ANOVA bidireccional para la evaluación del coeficiente de difusión efectiva.....	99
---	-----------

APÉNDICE 7. Prueba estadística Tukey.....	100
--	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Aguaymanto clasificado en seis estados de madurez</i>	15
Figura 2 <i>Curva de secado en función del peso del producto</i>	17
Figura 3 <i>Curva de secado en función de la humedad libre</i>	19
Figura 4 <i>Curva de velocidad de secado de un producto</i>	20
Figura 5 <i>Curva de velocidad de secado para productos agrícolas</i>	22
Figura 6 <i>Difusión en estado no estacionario</i>	28
Figura 7 <i>Análisis de conducción en coordenadas esféricas</i>	30
Figura 8 <i>Flujograma del proceso de experimentación</i>	39
Figura 9 <i>Diagrama de flujo de bloques del proceso de secado de aguaymanto con cáscara</i>	40
Figura 10 <i>Diagrama de flujo de bloques del proceso de secado de aguaymanto sin cáscara</i>	40
Figura 11 <i>Esquema representativo del secador</i>	42
Figura 12 <i>Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición</i>	51
Figura 13 <i>Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, segunda repetición</i>	52
Figura 14 <i>Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición</i>	52
Figura 15 <i>Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición</i>	57
Figura 16 <i>Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, segunda repetición</i>	57
Figura 17 <i>Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición</i>	58

Figura 18 <i>Humedad en base seca vs tiempo durante el secado de aguaymanto con cáscara, primera repetición.</i>	59
Figura 19 <i>Humedad en base seca vs tiempo durante el secado de aguaymanto con cáscara, segunda repetición.</i>	59
Figura 20 <i>Humedad en base seca vs tiempo durante el secado de aguaymanto con cáscara, tercera repetición.</i>	60
Figura 21 <i>Humedad en base seca vs el tiempo durante el secado de aguaymanto sin cáscara, primera repetición.</i>	61
Figura 22 <i>Humedad en base seca vs el tiempo durante el secado de aguaymanto sin cáscara, segunda repetición.</i>	61
Figura 23 <i>Humedad en base seca vs el tiempo durante el secado de aguaymanto sin cáscara, segunda repetición.</i>	62
Figura 24 <i>Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición.</i>	64
Figura 25 <i>Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, segunda repetición.</i>	64
Figura 26 <i>Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición.</i>	65
Figura 27 <i>Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición.</i>	67
Figura 28 <i>Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, segunda repetición.</i>	67
Figura 29 <i>Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición.</i>	68
Figura 30 <i>Relación ln (D_{ef}) vs. 1/T del aguaymanto con cáscara</i>	72

Figura 31 <i>Relación $\ln(D_{ef})$ vs. $1/T$ del aguaymanto sin cáscara</i>	74
---	----

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valor nutricional del Aguaymanto.....	12
Tabla 2 Resumen de fórmulas.....	47
Tabla 3 Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto con cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición.	48
Tabla 4 Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto con cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, segunda repetición.	49
Tabla 5 Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto con cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición.....	50
Tabla 6 Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto sin cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición.	54
Tabla 7 Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto sin cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C. segunda repetición.	55
Tabla 8 Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto sin cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición.....	56
Tabla 9 Difusividad efectiva en el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C. 65	65
Tabla 10 Difusividad efectiva en el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C. 68	68
Tabla 11 Energía de activación en secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C. 72	72
Tabla 12 Energía de activación en secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C. .73	73

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tiene por objeto determinar el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto con cáscara y sin cáscara (*Physalis peruviana* L.), que es el parámetro clave durante el proceso de secado de alimentos. Para alcanzar este propósito, se realizó un pre-tratamiento osmótico sumergiendo el aguaymanto en una disolución de sacarosa y se utilizó un secador convectivo de bandejas, a temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, y una velocidad de aire de 2.5 m/s, durante el proceso de secado se registró el peso de las muestras cada 30 minutos. El coeficiente de difusión efectiva se determinó ajustando los datos experimentales de secado al modelo de Fick en geometría esférica, linealizado mediante regresión de $\ln(MR)$ frente al tiempo. Se concluye que el coeficiente de difusión efectiva (D_{ef}) del aguaymanto varía significativamente a medida que la temperatura aumenta tanto en el aguaymanto con cáscara y sin cáscara. Para el aguaymanto con cáscara los coeficientes determinados fueron 7.6097×10^{-10} , 1.1709×10^{-9} , 1.4547×10^{-9} y 1.6410×10^{-9} m²/s a temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C respectivamente; mientras que, para el aguaymanto sin cáscara, los valores fueron 1.4715×10^{-9} , 1.6297×10^{-9} , 1.7357×10^{-9} y 2.2777×10^{-9} m²/s en las mismas condiciones. Las energías de activación fueron de 48.78 kJ/mol para el aguaymanto con cáscara y 26.37 kJ/mol para el sin cáscara.

Palabras clave: Coeficiente de difusión efectiva, Secado convectivo, Aguaymanto, Energía de activación.

ABSTRACT

The present research project aims to determine the effective diffusion coefficient of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) with and without husk, which is a key parameter during the food drying process. To achieve this objective, an osmotic pretreatment was carried out by immersing the goldenberries in a sucrose solution, and a convective tray dryer was used at temperatures of 60, 65, 70, and 75°C, with an air velocity of 2.5 m/s. During the drying process, the weight of the samples was recorded every 30 minutes. The effective diffusion coefficient was determined by fitting the experimental drying data to Fick's model in spherical geometry, linearized by regression of $\ln(MR)$ versus time. It was concluded that the effective diffusion coefficient (D_{ef}) of goldenberry varies significantly as the temperature increases, both for samples with and without husk. For goldenberry with husk, the coefficients obtained were 7.6097×10^{-10} , 1.1709×10^{-9} , 1.4547×10^{-9} , and 1.6410×10^{-9} m²/s at 60, 65, 70, and 75°C, respectively; while for goldenberry without husk, the values were 1.4715×10^{-9} , 1.6297×10^{-9} , 1.7357×10^{-9} , and 2.2777×10^{-9} m²/s under the same conditions. The activation energies were 48.78 kJ/mol for goldenberry with husk and 26.37 kJ/mol for the one without husk.

Keywords: Effective diffusion coefficient, Convective drying, Goldenberry, Activation energy.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Introducción

El aguaymanto (*Physalis peruviana* L.), es una fruta autóctona de las regiones andinas de Perú, Colombia, Ecuador y Bolivia. Los valles interandinos son ideales para este cultivo debido a su entorno agroecológico natural. En la actualidad, su producción se lleva a cabo principalmente en las regiones montañosas del Perú (Cusco, Huánuco, Huancavelica, Junín y Cajamarca), aunque también se puede encontrar en la costa y en la selva (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2020).

La demanda del aguaymanto, tanto en frutos frescos como en productos transformados, ha aumentado en los últimos años tanto a nivel nacional como internacional. Se ha investigado también algunas de sus propiedades nutricionales, y se han descubierto propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas excepcionales (Bautista, 2014).

La investigación sobre el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto no solo contribuye al conocimiento científico de las propiedades físicas de esta fruta, sino que también tiene implicaciones prácticas en la industria alimentaria. La optimización de los procesos de secado y conservación puede mejorar la calidad del aguaymanto como producto final, preservando sus características sensoriales y nutricionales.

En este contexto, el presente estudio se centra en la determinación precisa del coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto, a diferentes temperaturas de secado con y sin cáscara, utilizando métodos experimentales avanzados. A través de este análisis, permite generar información técnica relevante para optimizar los procesos de

secado, mejorar la eficiencia energética y contribuir a la preservación de la calidad del producto durante su procesamiento y almacenamiento.

1.2 Planteamiento del problema

El aguaymanto (*Physalis peruviana* L.), es una fruta originaria de los andes que tiene un alto valor nutricional y está ganando importancia en el mercado, ya sea para ser consumido fresco o para la producción de productos procesados o deshidratados. No obstante, al tener un alto porcentaje de humedad, tiene una rápida tasa de deterioro físico y microbiológico, lo que acorta su tiempo de vida útil y provoca pérdidas después de la cosecha.

El secado es un proceso que extiende la durabilidad del fruto, por ello, constituye una opción eficaz para disminuir estas pérdidas. Sin embargo, en la práctica surgen problemas para determinar correctamente las condiciones operativas debido a que el aguaymanto depende de la resistencia interna a la transferencia de masa, la cual no puede ser descrita si no se conoce el coeficiente de difusión efectiva, parámetro fundamental para modelar y optimizar el proceso.

El escenario se complica debido a que la presencia o ausencia de cáscara tiene un impacto importante en la cinética de secado, ya que actúa como una barrera adicional a la migración del agua. No obstante, no hay datos experimentales disponibles para medir este efecto. Esta falta de información técnica provoca procesos que no son eficientes, incrementos de tiempo y del uso de energía, así como el riesgo de perjudicar las características nutricionales y sensoriales del producto final.

En consecuencia, se considera como problema principal la falta de información experimental acerca de cómo cambia el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto

con y sin cáscara a distintas temperaturas de secado. Esta brecha científica restringe el diseño y la mejora del proceso, lo que dificulta su escalada industrial y disminuye la competitividad del producto deshidratado en el mercado.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿Cuál es el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) con y sin cáscara a diferentes temperaturas de secado?

1.3.2 Problemas específicos

- ✓ ¿Cuál será el efecto de la temperatura de secado en la humedad y tiempo de secado del aguaymanto con y sin cáscara?
- ✓ ¿Cómo variará el coeficiente de difusión del aguaymanto con cáscara a diferentes temperaturas de secado?
- ✓ ¿Cómo variará el coeficiente de difusión del aguaymanto sin cáscara a diferentes temperaturas de secado?
- ✓ ¿Cuál es la energía de activación del aguaymanto con y sin cáscara?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- ✓ Determinar el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) con y sin cáscara a diferentes temperaturas de secado.

1.4.2 Objetivos específicos

- ✓ Evaluar el efecto de la temperatura de secado en la humedad y tiempo de secado del aguaymanto con y sin cáscara.

- ✓ Determinar el coeficiente de difusión del aguaymanto con cáscara a diferentes temperaturas de secado.
- ✓ Determinar el coeficiente de difusión del aguaymanto sin cáscara a diferentes temperaturas de secado.
- ✓ Determinar la energía de activación del aguaymanto con y sin cáscara.

1.5 Justificación

El aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) es una fruta andina de alto valor nutricional y creciente demanda en mercados nacionales e internacionales por sus propiedades funcionales y potencial nutracéutico. A pesar de su importancia económica y alimentaria, muchos de sus parámetros fisicoquímicos y termodinámicos no han sido estudiados con suficiente profundidad, especialmente aquellos relacionados con su comportamiento durante los procesos de secado, como el coeficiente de difusión efectiva.

Desde una perspectiva científica y tecnológica, la determinación del coeficiente de difusión efectiva resulta fundamental para describir los mecanismos de transferencia de masa que ocurren durante el secado de productos agroindustriales. Este parámetro permite modelar y predecir el tiempo de secado, optimizar las condiciones operativas del proceso, minimizar el consumo energético y preservar las características sensoriales, nutricionales y funcionales del producto final. En el caso del aguaymanto, disponer de valores experimentales confiables de difusión efectiva constituye una herramienta clave para el diseño, dimensionamiento y escalamiento de equipos de secado en aplicaciones industriales y semiindustriales.

Desde el enfoque ambiental, el conocimiento de estos parámetros permite diseñar procesos más sostenibles y eficientes energéticamente, lo que conlleva una reducción en el uso de combustibles y emisiones contaminantes. La optimización de procesos en la agroindustria, apoyada en datos como el coeficiente de difusión, es una herramienta clave en la transición hacia una producción más limpia y responsable con el medio ambiente.

Esta investigación aporta al aprovechamiento integral del aguaymanto, promoviendo su valorización en la agroindustria y contribuyendo al desarrollo de tecnologías apropiadas para pequeños y medianos productores. Al generar información técnica confiable, se fortalecen las bases para la innovación y la competitividad del sector agroalimentario, especialmente en regiones donde este fruto representa una alternativa económica importante.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Antecedentes

Rueda *et al.*, (2009) calcularon el coeficiente de difusión de la cáscara de manzana *Red Delicious* con ayuda de una balanza de humedad. La segunda Ley de Fick se utilizó para analizar varios modelos de difusión. Los valores del coeficiente de difusión obtenidos para las distintas temperaturas variaron entre $4.93 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a 50°C y $9.69 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a 70°C , lo que evidencia un comportamiento exponencial. La ecuación diferencial parcial no lineal generada por altos niveles de humedad se resuelve utilizando el método de líneas para diferentes temperaturas de operación y el cálculo del coeficiente de difusión fue en función de la temperatura y la humedad, cuya expresión final es $Def = 25 e^{12.97M/1} e^{-(4223-6M+5332)/T}$.

Vega *et al.*, (2005) estudiaron y modelaron la cinética del secado del pimiento (*cv Lamuyo*) a diferentes temperaturas de trabajo ($50, 60, 70$ y 80°C), mediante aire caliente. La velocidad de aire se mantuvo constante a 2.5 m/s . Las experiencias fueron realizadas en un secadero de laboratorio, que permite registrar la masa de las muestras en tiempo real. Según los hallazgos, se pueden observar tres etapas diferentes en el proceso de secado. La primera etapa consiste en una inducción breve; en la segunda etapa, el producto se humedece hasta que hay un gramo de agua por gramo de materia seca y la velocidad de secado disminuye linealmente con la cantidad de humedad libre del producto. En la tercera etapa, el producto se seca más lentamente y se utilizan las ecuaciones difusionales de Fick para modelar la velocidad de secado, obteniéndose una energía de activación (E_a) igual a 39.7 kJ/mol con un factor de Arrhenius (D_0) igual a $9.19 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

López *et al.*, (2022) obtuvieron modelos matemáticos semi-empíricos que representan la cinética de secado convectivo del epicarpio de zapallo a diferentes temperaturas (55, 65 y 75°C y velocidad de secado 2.5 m/s). Se determinó la mejor condición de secado para obtener la harina, que se caracterizó y utilizó para hacer la torta sin gluten. Se descubrió que el modelo de dos términos describía mejor la curva a 55°C, mientras que el modelo logarítmico describía mejor las curvas a 65 °C y 75°C. Se decidió que la temperatura de 65°C era la mejor para el secado.

Hincapie y Zapata (2018) estudiaron la cinética de secado de la uchuva en un secador de lecho fluidizado, usando temperaturas de 60, 70 y 80°C, con velocidades de aire de 9.5 m/s. Se examinó cómo la temperatura de secado afectó las características del producto, como el pH, los sólidos solubles (°Brix), la acidez, la humedad y el color. Se determinaron el coeficiente de difusión efectivo para cada temperatura de trabajo, siendo este 1.12×10^{-9} m²/s, 1.95×10^{-9} m²/s y 2.69×10^{-9} m²/s para 60, 70 y 80 °C respectivamente. Para determinar la relación entre el coeficiente de difusión y la temperatura, se utilizó una ecuación de Arrhenius, los valores de los D_{eff} se ajustaron con el inverso de la temperatura, para establecer la energía de activación y el factor pre exponencial en el secado en lecho fluidizado del fruto de uchuva la cual entregó una energía de activación de 42.903 kJ/mol y un factor de frecuencia de 8.23×10^{-6} . Los resultados indicaron que el tratamiento a 80°C afectó principalmente el color de la uchuva. Además, los tiempos de secado para alcanzar un equilibrio fueron de 8, 5,5 y 5 horas para 60, 70 y 80°C, con pérdidas de humedad de 92, 85 y 94 %, respectivamente.

Torki *et al.*, (2016) estudiaron el efecto de la temperatura de secado sobre el comportamiento de secado y los parámetros de transferencia de masa de rodajas de limón. Los experimentos de secado se llevaron a cabo en un horno secador de laboratorio con ventilación de aire a temperaturas de 50, 60 y 75°C. Se observó que la

temperatura de secado afectaba significativamente al tiempo y a la velocidad de secado. Las curvas de velocidad de secado revelaron que el proceso a los niveles de temperatura tenía lugar en el periodo de caída de la tasa totalmente. Se evaluó la utilidad de ocho modelos de capa fina para simular la cinética de secado y el modelo de Midilli y Kucuk mostró el mejor ajuste a las curvas de secado experimentales. La difusividad efectiva de la humedad se determinó sobre la base de la segunda ley de Fick, obteniéndose 1.62×10^{-11} , 3.25×10^{-11} y $8.11 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para las temperaturas de 50, 60 y 75°C, respectivamente. La energía de activación y la constante de Arrhenius se calcularon $60.08 \text{ kJ mol}^{-1}$ y $0.08511 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ respectivamente. El valor medio del coeficiente de transferencia de masa convectiva para las temperaturas de secado de 50, 60 y 75°C se calculó en 5.71×10^{-7} , 1.62×10^{-6} y $2.53 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, respectivamente.

Khan *et al.*, (2016) determinaron la difusividad efectiva adecuada para predecir la cinética de secado. Se desarrollaron modelos de secado para diferentes frutas y verduras basados en difusividades efectivas dependientes de la humedad y de la temperatura. Se usó el software de simulación COMSOL Multiphysics para resolver las ecuaciones acopladas de transferencia de masa y calor. Se llevó a cabo una extensa investigación experimental sobre cinco tipos de frutas y verduras y los resultados se compararon con los resultados simulados. Los experimentos se repitieron tres veces y se utilizó el promedio del contenido de humedad en cada valor para construir las curvas de secado. Se observó que el perfil de humedad y el perfil de temperatura en el caso de MDED (Moisture Dependent Effective Diffusivity) o en español difusividad efectiva dependiente de la humedad, se ajustaban más estrechamente a los resultados experimentales. Para todas las frutas y verduras, la proporción de humedad con MDED fue significativamente menor que la proporción de humedad con TDED (Temperature-Dependent Effective Diffusivity) o en español difusividad efectiva dependiente de la

temperatura. Este hallazgo confirma que el MDED es más preciso para predecir la cinética en el secado de alimentos. Además, la proporción de humedad de la manzana fue la más baja, mientras que la pera mostró la proporción de humedad más alta. Por otro lado, la zanahoria mostró un índice de humedad considerablemente menor en comparación con la papa.

Beigi,O., (2016) investigo las influencias de la velocidad de flujo y la temperatura del aire en los parámetros de energía y comportamiento de deshidratación de rodajas de manzana. En este sentido, las rodajas de manzana se secaron en un secador convectivo con temperaturas de aire de 50, 60 y 70 °C, y velocidades de aire de 1, 1.5 y 2 m/s. La tasa de deshidratación aumento a medida que la velocidad de flujo y temperatura del aire aumentaron de 1 a 2 m/s y 50 a 70 °C respectivamente. El coeficiente de difusión efectiva se determinó que estaba en el rango de 6.75×10^{-10} y 1.28×10^{-9} m²/s, los cuales se encuentran dentro del rango reportado para productos agrícolas con alto contenido de agua, estos resultados se hallaron a partir de la perdida de humedad (determinada por la diferencia de pesos).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Aguaymanto (*Physalis peruviana L*)

Physalis peruviana L., conocida como aguaymanto, tomate silvestre, tomate de la sierra, topotopo (quechua), uchuva, cereza del Perú, sacabuche, es una planta herbácea cultivada desde la época prehispánica y nativa en el Perú (Brack, 1999).

Esta fruta originaria del Perú es una parte importante de la dieta de la población rural, donde crece y se extiende por todas partes, en especial en las regiones cálidas y secas cercana a los andes. Sin embargo, últimamente la demanda local, nacional y

extranjera de este fruto se encuentra en estado creciente, tanto en frutos frescos como en productos transformados (Araujo, 2009).

Género: *Physalis*

Morfología: *Physalis peruviana*

Hábitat: Se encuentra en estado silvestre en los pisos altitudinales intermedios de los Andes, entre los 1500 y 3000 msnm.

Cosecha y rendimiento: Los frutos son cosechables cuando el color del cáliz pasa de verde a dorado-café, normalmente después de un período de desarrollo de 60-80 días.

Crece en altitudes desde el nivel del mar hasta los 3.300 msnm y puede soportar bajas temperaturas, pero sufre daños irreversibles por debajo de los 0 °C, lo que afecta su crecimiento si la temperatura se mantiene por debajo de los 10°C. Necesitan mucha luz y hay que protegerlas de los fuertes vientos. Debe haber suficiente agua durante el desarrollo del fruto, pero no suficiente agua cuando la fruta está madurando. Esta planta tiene una alta fertilidad, crece en suelos pobres, requiere pocos fertilizantes, pero tiene buen drenaje.

La planta se propaga con semillas (5000-8000 en 30 g). Los granos secos seleccionados se fermentan en agua durante 5 días. Después de separar las semillas de la pulpa, el residuo se planta en semilleros con tierra bastante húmeda y las semillas germinan de 8 a 14 días. En cuanto alcanza una altura de 20 cm se trasplanta al campo, la distancia entre hileras debe de ser de 50-90 cm y entre plantas de 40-80 cm. La cosecha se extiende de abril a junio en el hemisferio sur. Esto puede variar dependiendo de las características climáticas de la zona. Una planta puede producir cerca de 300 frutos.

El fruto puede durar meses si se almacena en un lugar seco, por ello, se recomienda no remover el cáliz. Presenta excelentes rendimientos y un enorme potencial agroindustrial y de exportación como producto fresco o en forma de mermelada y dulces naturales (Agromercado, 2021).

a) Taxonomía del aguaymanto

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophyta*

Clase: *Magnoliopsida*

Orden: *Solanales*

Familia: *Solanaceae*

Subfamilia: *Solanoideae*

Tribu: *Physaleae*

Subtribu: *Physalinae*

Género: *Physalis*

b) Composición nutricional del aguaymanto

El fruto de aguaymanto ha sido usado como una buena fuente de vitamina C y complejo B. Este fruto contiene 8% de calcio y es muy útil para las personas con diabetes debido a su alto nivel de fructosa. El nivel de fósforo es muy alto (ver Tabla 1) y su alto contenido de fibra dietética permite que la pectina de fruta actúe como un regulador intestinal (Ramadan, 2003).

La Tabla 1 muestra una comparación del valor nutricional del aguaymanto de dos estudios distintos siendo el primero realizado en Colombia (Ramadan & Moersel) y el segundo en Perú (Ministerio de Agricultura y riego).

Tabla 1

Valor nutricional del Aguaymanto

Componentes	Ramadan & Moersel (2003)	(Ministerio de Agricultura y Riego, Agroideas, 2020)
Humedad	78.9%	78.90%
Carbohidratos	19.6 g	16 g
Cenizas	1 g	1. g
Fibra	4.9 g	4.90 g
Grasas totales	0.15-0.2 g	0.16 g
Proteínas	0.05-0.3 g	0.05 g
Ácido ascórbico	43 mg	43 mg
Calcio	8 mg	8 mg
Caroteno	1.6 mg	1.61 mg
Fósforo	55.3 mg	55.30 mg
Hierro	1.2 mg	1.23 mg
Niacina	1.7 mg	1.19 mg
Riboflavina	0.03 mg	0.03 mg

Fuente: Adaptado de Ramadan y Moersel (2003) y (Ministerio de Agricultura y Riego, Agroideas, 2020)

c) Composición química y acción farmacológica

El Aguaymanto es un fruto exótico con propiedades farmacológicas atribuidas principalmente a la presencia de múltiples lactonas esteroidales, compuestos químicos reconocidos por sus propiedades citotóxicas contra diferentes tipos de cáncer entre ellos el cáncer de mamas (Lan, 2013).

Los beneficios de la medicina tradicional, se atribuyen al contenido de vitaminas, proteínas, minerales y ácidos (principalmente oleico y linoléico) se resalta la purificación de la sangre, fortificación del nervio óptico, control de la amibiasis, calcificación de los huesos, antimicrobacterial, antipirético, entre otros (Rodríguez, 2009).

Wu *et al.*, (2006) menciona que el aguaymanto tiene propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, proporcionando un importante antecedente farmacológico para desarrollar productos para la prevención del envejecimiento y las enfermedades inflamatorias.

Rodríguez y Rodríguez, (2007) indica que el consumo de aguaymanto reduce los niveles de glucosa en sangre a los 90 y 120 minutos después de la comida en adultos jóvenes, causando un gran efecto hipoglucémico después de ese periodo.

d) Tipos de aguaymanto

En el Perú existen diversos ecotipos o selecciones que se distinguen principalmente por el tono de los frutos: verde amarillo (verde limón) y naranja. El más conocido es llamado Gold caracterizado por su color naranja en el fruto (Tacanga, 2015).

Existen más de 100 especies de *Physalis*, la mayoría se consideran malezas, no obstante, hay cuatro que se cultivan por su fruto, estas son: Tomatillos (*P. ixocarpa*), ground cherries (*P. pruinosa*, *P. pubescens*), y aguaymanto Gold (*P. peruviana*). Los aguaymantos a menudo se confunden con los ground cherries (*Physalys pruinosa*, *Physalis pubescens*), pero estos se distinguen fácilmente. El follaje del aguaymanto Gold es pubescente (presencia de vellosidad), mientras que las ground cherries son lisas. Además, la envoltura del aguaymanto presencia diez costillas, en cambio las

ground cherries tienen 5. Las plantas maduras del aguaymanto crecen entre 1.5 o 1.8 metros y las ground cherries alcanzan un máximo de 0.9 metros. (Durner, 2019).

e) Grado de madurez

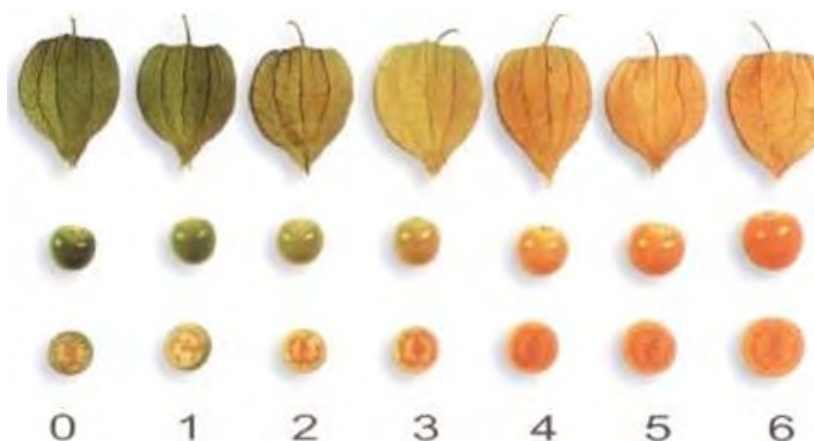
Para la poscosecha de los frutos, se dispone de un rango para determinar el índice de madurez adecuado para la recolección. Sin embargo, en el caso del aguaymanto, los productores y vendedores suelen emplear como índice de madurez principal la evaluación visual mediante el color del cáliz, que coincide plenamente con el color de la fruta. Normalmente, cuando los frutos se tornan amarillos y el cáliz cambia de verde a amarillo al mismo tiempo, es el instante ideal para cosechar esos frutos. (Galvis *et al.*, 2005).

Según Castañeda y Paredes (2003), tanto la pulpa como el cáliz del aguaymanto se tiñen a la vez. Notaron que el fruto tiene un color verde intenso durante los primeros 35 días; después de este periodo, empieza a adquirir un color amarillo. Alrededor del día 63, la pulpa y la cáscara presentan un tono amarillo, propio de la madurez para el consumo, debido a que las enzimas clorofilazas degradan la clorofila, lo cual sucede más rápidamente en un medio ácido.

Esto, a su vez, hace que los carotenos (principalmente el B-caroteno), que estaban ocultos porque se producen a medida que el fruto se desarrolla (Agusti, 2000), sean más perceptibles. El día 84, el color cambia a naranja, lo que señala que el fruto está sobremaduro.

Figura 1

Aguaymanto clasificado en seis estados de madurez



Fuente: (Castañeda y Paredes, 2003).

El comportamiento de los sólidos solubles totales (SST), también conocidos como grados Brix, es una de las características que muestran la madurez. La medición de SST se relaciona con los azúcares disueltos en el jugo celular, según Fisher y Martínez (1999). El contenido de SST está compuesto por un 80 a un 95% de azúcares.

El aguaymanto tiene un alto contenido de azúcares (11 a 20 g de carbohidratos digeribles por cada 100 g de peso fresco); los frutos pintones tienen de 9 a 13 °Brix, mientras que los maduros contienen entre 13 y 15 °Brix. También poseen una cantidad considerable de ácidos (de 1,6 a 2,0% de acidez en los frutos maduros). La sacarosa es el azúcar que más predomina, ya que su contenido es aproximadamente 2,5 veces superior al de la fructosa y la glucosa. (Herrera, 2000).

2.2.2 Humedad

En la industria alimentaria, la humedad es la cantidad de agua presente de un alimento. Se puede expresar tanto en base húmeda como en base seca.

El contenido de humedad en base húmeda expresa la cantidad total de agua en el total de la masa del alimento mientras que la humedad en base seca expresa la cantidad de agua por unidad de alimento seco, en procesos de secado es importante la humedad en base seca ya que la cantidad de agua durante el proceso de secado va cambiando con el tiempo y caso contrario si se usa la humedad en base húmeda va cambiando durante todo el proceso complicando los cálculos. (Cáceres, 2022).

Para una mejor comprensión las dos humedades se definen como:

En base seca:

$$H_{bs} = \frac{\textit{peso de agua}}{\textit{peso de sólido seco}} \quad (1)$$

En base húmeda:

$$H_{bh} = \frac{\textit{peso de agua}}{\textit{peso de agua} + \textit{peso de sólido seco}} \quad (2)$$

La humedad en equilibrio es el contenido de humedad que un material higroscópico, en este caso el aguaymanto, alcanza cuando está en equilibrio con respecto a la humedad del aire que lo rodea y para este caso que es deshidratado bajo condiciones constantes del sistema (temperatura, flujo y humedad del aire del sistema). Es decir que está en un punto donde no pierde ni gana agua.

2.2.3 Actividad del agua

Cuando se investiga la preservación de alimentos, uno de los elementos más importantes a tener en cuenta es la actividad de agua (A_w), ya que cuantifica la disponibilidad del agua en un alimento. Este parámetro representa la fracción de agua libre, la cual es la única disponible para el crecimiento microbiano y para participar en diversas reacciones físicas, químicas y bioquímicas. Asimismo, la actividad de agua

refleja el grado de interacción del agua con los demás constituyentes del alimento y se encuentra estrechamente relacionada con la formulación del producto, el control de los procesos de deshidratación y de rehidratación, la migración de la humedad en el almacenamiento y muchos otros factores (Badui, 2006)

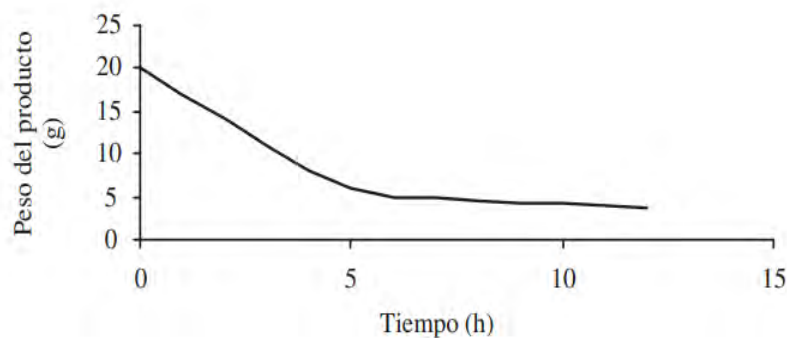
2.2.4 Secado

El secado es la eliminación total o parcial del agua de una sustancia. Esta definición puede aplicar a sólidos, líquidos o gases, también puede causar cambios indeseables en los alimentos, como el sabor y el olor de los productos deshidratados; esto se debe principalmente a la pérdida de componentes volátiles durante el proceso, de la misma manera al desarrollo de sabores y aromas típicos de los productos cocidos causados por las altas temperaturas (Fito *et al.*, 2016).

Durante el proceso de secado, los datos a menudo se expresan como la variación que experimenta el peso del producto que se secó a lo largo del tiempo como se puede apreciar en la Figura 1 (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005).

Figura 2

Curva de secado en función del peso del producto



Fuente: (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005).

El contenido de humedad en base seca de un producto se define como la relación entre la cantidad de humedad del alimento y la cantidad de materia seca y se expresa como:

$$Y_t = \frac{W_T - W'_S}{W'_S} \quad (3)$$

Donde:

W_T : Masa total del producto en un tiempo determinado (g)

W'_s : Masa de los sólidos secos (g)

Y_t : Humedad absoluta expresada como peso de agua/peso de sólido seco (g agua/g ss)

Ss: Sólido seco

Una variable importante en los procesos de secado es el contenido de humedad libre, Y , que se define como:

$$Y = Y_t - Y_{eq} \quad (4)$$

Donde:

Y : Contenido de humedad libre (g agua libre / g ss)

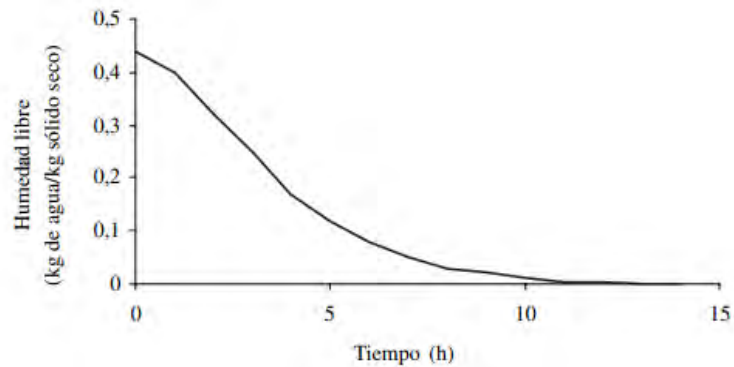
Y_{eq} : Contenido de humedad en equilibrio (g agua en equilibrio / g ss)

Y_t : Humedad libre (g agua/g ss)

El contenido de humedad libre frente al tiempo de secado se representa en la Figura 3.

Figura 3

Curva de secado en función de la humedad libre



Fuente: (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005).

La velocidad de secado, R , es proporcional al cambio del contenido de humedad con respecto al tiempo.

$$R \propto \frac{dY}{dt} \quad (5)$$

Se obtiene el valor de $\frac{dY}{dt}$ para cada punto de la curva, mediante el valor que adquiere la tangente de la misma en cada punto.

La velocidad de secado R se puede expresar según Geankoplis (1983) como:

$$R = -\frac{W'_S}{A} \frac{dY}{dt} \quad (6)$$

Donde:

W'_S : Flujo masico del sólido seco (Kg/h)

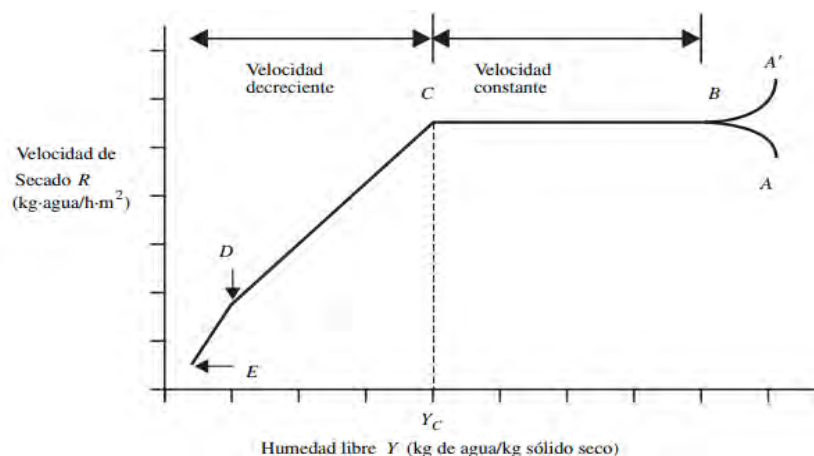
A : Área de la superficie de secado (m^2)

El proceso de secado de un material se puede explicar a través de una serie de etapas. En la Figura 4 se muestra una curva común de velocidad de secado. Los puntos

A y A' representan el inicio de secado del material frío y material caliente respectivamente. El punto B representa el equilibrio de temperatura de la superficie del producto. El tiempo necesario para llegar de A o A' a B por lo general es corto, y a menudo se pasa por alto los cálculos del tiempo de secado. La porción de la curva B-C se llama período de velocidad constante de secado, e implica la eliminación del agua no ligada al producto, en el cual, el agua se comporta como si el sólido no estuviera presente. El punto C marca el inicio del período de velocidad decreciente, este periodo se puede dividir en dos partes. La primera se da cuando los puntos húmedos en la superficie disminuyen constantemente hasta que la superficie está completamente seca (punto D), mientras que la segunda etapa comienza en el punto D, cuando la superficie está completamente seca, y el plano de evaporación se traslada al interior del sólido. El período de velocidad decreciente se da cuando la velocidad de secado no se mantiene constante y empieza a disminuir; además, la actividad de agua en la superficie llega a ser inferior a la unidad. En este caso, la velocidad de secado está gobernada por el flujo interno del agua y el vapor (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005).

Figura 4

Curva de velocidad de secado de un producto.



Fuente: (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005).

2.2.4.1 Curvas de secado para alimentos agrícolas

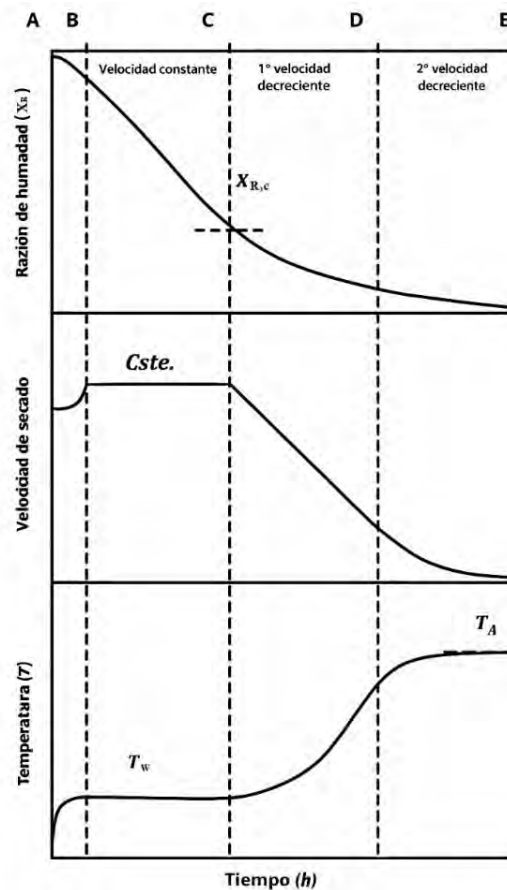
Para los casos de productos biológicos las curvas presentan etapas de velocidad constante cortos o solo la etapa de velocidad decreciente. Se puede decir que hay dos fenómenos que se compensan, la variación de la presión de vapor de agua en la superficie de producto tiende a disminuir porque la migración interna del agua es débil, pero tiende a aumentar porque la temperatura del producto aumenta.

En la Figura 5 se describe la velocidad de secado y la temperatura como función del tiempo. Se presenta la variación de la relación de humedad o humedad residual, velocidad de secado y temperatura del aire en función del tiempo para la etapa inicial, la etapa de velocidad constante, y las dos etapas de velocidad decreciente característico en muchos de estos productos.

En el proceso de secado de productos agrícolas y biológicos se pueden presentar uno o varios períodos de velocidad decreciente en los que el movimiento de humedad es controlado por resistencias internas y externas combinadas o a la transferencia de calor y masa. Una característica de muchas frutas es que se secan durante los periodos de velocidad decreciente, esto se debe a que el proceso de secado es controlado por un mecanismo de difusión (Cáceres, 2022).

Figura 5

Curva de velocidad de secado para productos agrícolas.



Fuente: (Cáceres, 2022)

2.2.4.2 Factores que afectan la velocidad del secado

Según Suarez (2009) la velocidad de secado se ve influenciada por una variedad de factores, que pueden variar ligeramente dependiendo del tipo y sistema de secado utilizado. Sin embargo, los siguientes factores son muy importantes:

Tamaño y forma del alimento:

El tiempo de secado depende de la geometría y el tamaño de los alimentos. Los trozos más pequeños tardan mucho menos en secarse que los grandes, debido a la menor cantidad de humedad y al camino más corto para que esta llegue a la superficie.

Espesor del alimento:

La velocidad de transferencia de calor y la tasa de evaporación del agua están influenciadas por el espesor o grosor del alimento. Los alimentos con más contenido de agua pueden requerir tiempos de secado más largos o cambios en las condiciones de secado.

Composición del alimento:

La velocidad y la uniformidad del secado de un alimento pueden verse afectadas por su composición, que incluye su contenido de azúcares, grasas y proteínas. Algunos alimentos pueden tener capas externas más secas que impiden que el agua fluya desde el interior.

Temperatura del aire:

La tasa de transferencia de calor y la velocidad de evaporación del agua están influenciadas por la temperatura utilizada durante el proceso de secado. Cuanto más caliente sea el medio de calentamiento del aire, más humedad podrá absorber antes de saturarse. De esta manera, el aire con temperatura alta que está cerca de los alimentos recogerá la humedad expulsada de ellos más que el aire fresco.

Una temperatura adecuada puede acelerar el proceso de secado sin disminuir la calidad del producto final.

2.2.5 Pretratamientos en secado de alimentos

Para mejorar la calidad de los alimentos, mayor velocidad de transferencia de calor y energía, antes de ser colocados en la secadora, pasan por diversos pretratamientos, que no son deseables. Cualquiera que sea el método de secado

utilizado, conducirá inevitablemente a un mayor o menor deterioro de determinadas características de calidad de los alimentos. El objetivo es preservar el aroma y el sabor tanto como sea posible, estabilizar el color y evitar el pardeamiento enzimático y reducir los cambios de textura.

Estos pueden ser:

- Tratamiento físico
- Tratamiento químico y enzimático
- Tratamiento térmico
- Tratamiento no térmico

Deshidratación Osmótica

La deshidratación osmótica (DO) es una operación que consiste en eliminar el agua de los alimentos mediante el contacto directo con una solución concentrada. Esto ocurre porque el agua del producto (solución más diluida) se difunde a través de la membrana celular semipermeable hacia el medio circundante (solución más concentrada) para establecer el equilibrio. Como la membrana es sólo parcialmente selectiva, también se produce, aunque en menor medida, cierta difusión del soluto de la disolución hacia el alimento (Zapata y Castro, 1999).

El mecanismo de la deshidratación osmótica se basa en la diferencia de presión osmótica entre la solución circundante y el interior del alimento (en este caso el aguaymanto). La concentración de solutos en el interior del aguaymanto es mucho menor que la solución de sacarosa, este gradiente de potencial químico provoca el movimiento del agua a través de las membranas celulares semipermeables hacia la solución hipertónica. El agua se desplaza desde una zona de menor presión osmótica

(tejido vegetal) a una mayor (solución concentrada) hasta encontrar el equilibrio (Mari *et al.*, 2024).

2.2.6 Coeficiente de difusión efectiva o difusividad

La difusividad o coeficiente de difusión describe todos los mecanismos posibles de movimiento de la humedad dentro de los alimentos, como la difusión de líquidos, vapor, superficial, flujo capilar e hidrodinámico (Mohammadi *et al.*, 2008).

La difusión efectiva o coeficiente de difusión efectiva es el parámetro clave más importante requerido para el análisis, diseño y optimización de la transferencia de calor y masa en los procesos de secado de alimentos. Generalmente, se utilizan dos tipos de difusividad efectiva: la difusividad efectiva dependiente de la humedad (Moisture Dependent Effective Diffusivity, MDED) y la difusividad efectiva dependiente de la temperatura (Temperature-Dependent Effective Diffusivity, TDED), para desarrollar modelos matemáticos para el secado de alimentos (Khan *et al.*, 2016).

La difusividad efectiva de la humedad representa el término conductor de todos los mecanismos de transferencia de humedad, este parámetro suele determinarse a partir de curvas de secado experimentales y se usa en casos reales como por ejemplo en alimentos, suelos, membranas y materiales sólidos porosos.

Transferencia molecular de masa

También conocido como difusión. Se lleva a cabo por el movimiento molecular aleatorio del fluido (movimiento individual de las moléculas) debido a gradientes de concentración. Este proceso se rige por las leyes de Fick, que establecen la relación matemática entre el flujo de masa y el gradiente de concentración, siendo esta la base

para describir y cuantificar los fenómenos de difusión en sistemas sólidos, líquidos y gaseosos.

Transferencia de masa por convección

La transferencia de masa por convección implica la transferencia de un objeto o material entre una superficie límite y un fluido que se mueve entre dos relativamente inmiscibles. La ecuación de velocidad para la transferencia de masa por convección se expresa de la siguiente forma:

$$N_A = h * \frac{dC}{dx} \quad (7)$$

Donde h es la constante, dC/dx la gradiente de concentración y N_A , el flujo de masa, sucede en la dirección de la disminución en la concentración. Esta ecuación es la relación que define el coeficiente convectivo de transferencia de masa (Rangel, 2019).

2.2.7 Leyes de difusión de Fick

Las ecuaciones básicas de la difusión fueron escritas en 1855 por Adolfo Fick, el cual dice que, en la difusión o movimiento de solutos hacia el solvente, es completamente similar a la penetración del calor en la conducción térmica.

Primera ley de Fick

La primera ley de Fick describe como el flujo de una sustancia que se difunde en un medio bajo condiciones de estado estacionario (cuando la concentración no cambia en el tiempo) (Crank, 1975).

$$F = -D \frac{dC}{dx} \quad (8)$$

Donde:

F: Flujo de difusión ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$ o $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

D: Coeficiente de difusión (m^2/s)

C: Concentración de la sustancia (mol/m^3 o kg/m^3)

x: Distancia

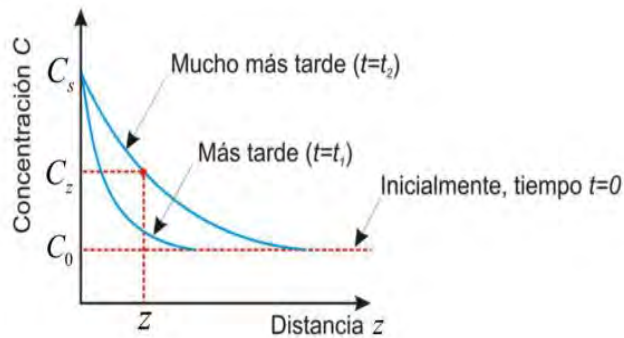
Segunda ley de Fick - Difusión en estado no estacionario

Representa la cantidad de difusión por unidad de tiempo a través de una unidad de área perpendicular a la dirección de difusión según el gradiente de concentración es igual a la unidad.

En problemas de ingeniería, no es fácil encontrar estados estacionarios donde las condiciones no cambien con el tiempo. En casi todos los casos, la difusión ocurre en una etapa no estacionaria, donde la concentración de soluto está en cualquier punto del material cambiando con el tiempo. Supongamos que la sustancia A se difunde en otra sustancia B. A medida que pasa el tiempo, la concentración del soluto en cualquier punto del sólido aumenta en la dirección z, como se muestra en los tiempos t_1 y t_2 de la Figura 6 (Rodríguez *et al.*, 2017).

Figura 6

Difusión en estado no estacionario.



Fuente: (Rodríguez *et al.*, 2017)

La segunda ley de Fick se usa cuando en el proceso de secado la concentración varía con el tiempo. Esta se obtiene a partir de la primera con los siguientes pasos:

- a) Considerar un volumen en forma laminar donde la concentración varía con x (coordenada espacial) y con el tiempo t .
- b) Se realiza la conversión de masa

Tasa de acumulación de masa dentro del volumen es igual al flujo que entra menos el flujo que sale. Se representa como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} \quad (9)$$

- c) Se sustituye la primera Ley de Fick

De la Ecuación 9 se reemplaza el dato de la Ecuación 10

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (10)$$

Como D es constante, se reemplaza y se obtiene la segunda Ley de Fick

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (11)$$

2.2.7.1 Determinación del coeficiente de difusión efectiva para una geometría esférica

Para hallar el coeficiente de difusión efectiva para la geometría esférica se utiliza la segunda Ley de Fick. Se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

Donde el laplaciano ∇^2 en coordenadas cartesianas es:

$$\nabla^2 C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (13)$$

Esto equivale a:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(\nabla^2 C) \quad (14)$$

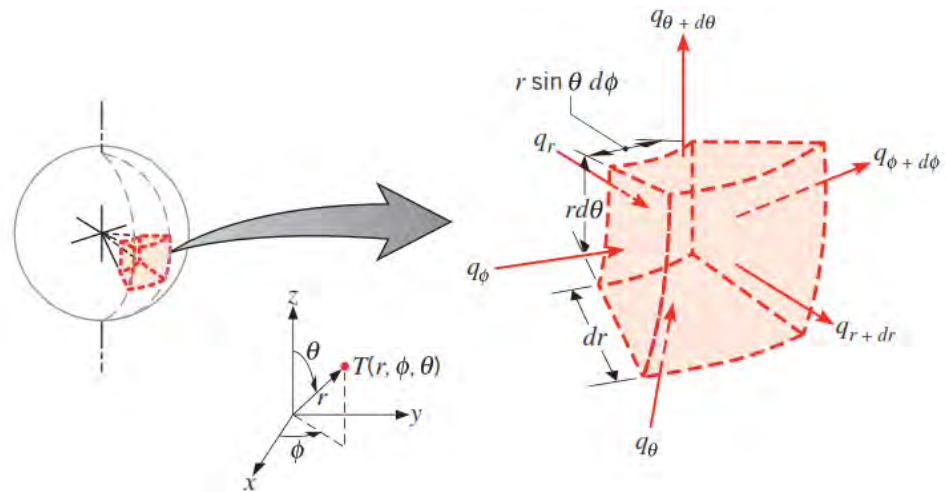
Se considera coordenadas esféricas (r, θ, φ) ya que el aguaymanto tiene una forma parecida, entonces, el operador laplaciano es:

$$\nabla^2 C = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 C}{\partial \varphi^2} \quad (15)$$

Donde r es el radio, θ el ángulo polar o colatitud que mide el ángulo desde el eje vertical (en radianes) y φ el ángulo polar que mide la rotación del eje vertical.

Figura 7

Análisis de conducción en coordenadas esféricas



Fuente: (Bergman y Lavine, 2017).

La concentración depende solamente del radio “r” y del tiempo “t”, entonces se simplifica a:

$$\nabla^2 C = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (16)$$

Se reemplaza en la Ecuación 14

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right) \quad (17)$$

Donde:

C: concentración de humedad

D: Coeficiente de difusión

r: radio

Se deriva de la Ecuación 17 se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) = 2r \frac{\partial C}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 C}{\partial r^2}$$

Se reemplaza de la Ecuación 17

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{1}{r^2} \left(2r \frac{\partial C}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right) \right) = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right)$$

Finalmente se obtiene:

$$\frac{\partial C(r, t)}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (18)$$

Donde C es el contenido de humedad (kg agua/kg totales) en un tiempo determinado; D, es el coeficiente de difusividad efectiva (m^2/s), t, denota el tiempo (s) y r es la posición radial (m).

Para simplificar la ecuación diferencial, se realiza la sustitución:

$$u(r, t) = rC(r, t) \quad (19)$$

Con lo cual la ecuación se transforma en:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{d^2 u}{dr^2} \quad (20)$$

La Ecuación 20 corresponde a la ecuación del calor unidimensional para la nueva variable u(r,t), por lo tanto se tiene las siguientes condiciones:

$$u(0, t) = 0$$

$$u(a, t) = aC_0$$

$$u(r, 0) = rC_i$$

Donde C_0 es la concentración constante en la superficie de la esfera. Estas son las ecuaciones de difusión en una lámina plana de espesor a , con extremos $r = 0$ y $r = a$, mantenidos en cero y a C_0 respectivamente, y con la distribución inicial rC_i . A continuación, se introduce la función perturbación:

$$v(r, t) = u(r, t) - rC_0 \quad (21)$$

La Ecuación 21 representa la desviación respecto a la condición estacionaria. De esta manera, las nuevas condiciones de frontera se vuelven homogéneas (nulas en los extremos) facilitando el análisis mediante el método de separación de variables.

La solución general del problema se expresa como una serie de Fourier senoidal con coeficientes exponenciales en el tiempo:

$$C(r, t) - C_0 = \frac{2a(C_i - C_0)}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi r}{a}\right) e\left(-\frac{Dn^2\pi^2}{a^2}t\right) \quad (22)$$

La Ecuación 22 corresponde a la distribución de concentración en cualquier punto r de la esfera en función del tiempo. Al evaluar la solución en el centro de la esfera ($r = 0$), se emplea el límite:

$$\lim_{n \rightarrow 0} \frac{1}{r} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi r}{a}\right) = \frac{n\pi}{a}$$

Sustituyendo en la Ecuación 22 se tiene:

$$\frac{C(r, t) - C_0}{(C_i - C_0)} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} e\left(-\frac{Dn^2\pi^2}{a^2}t\right) \quad (23)$$

Esta Ecuación 23 describe cómo evoluciona la concentración (o humedad) en el centro del fruto a lo largo del tiempo.

Dado que experimentalmente se mide el contenido de humedad promedio en todo el fruto, es necesario calcular la concentración media volumétrica:

$$\bar{C}(t) = \frac{1}{V} \int_V C dV = \frac{3}{a^3} \int_0^a r^2 C(r,t) dr \quad (24)$$

Se sustituye $C(r,t) - C_0$.

$$\bar{C}(t) - C_0 = \frac{3}{a^3} \int_0^a r^2 \left(\frac{2a(C_i - C_0)}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi r}{a}\right) e^{\left(-\frac{Dn^2\pi^2}{a^2}t\right)} \right) dr \quad (25)$$

Se simplifica

$$\bar{C}(t) - C_0 = \frac{6a(C_i - C_0)}{a^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n\pi} e^{\left(-\frac{Dn^2\pi^2}{a^2}t\right)} \frac{a^2(-1)^{n+1}}{n\pi} \quad (26)$$

Por lo tanto, se tiene.

$$\frac{\bar{C}(t) - C_0}{(C_i - C_0)} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{ef}n^2\pi^2 t}{r^2}\right) \quad (27)$$

Escrita en términos de humedad se tiene:

$$MR = \frac{M_t - M_{\infty}}{M_0 - M_{\infty}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{ef}n^2\pi^2 t}{r^2}\right) \quad (28)$$

Donde:

M_t : es la humedad en un tiempo t (kg de agua/kg de materia seca)

M_0 : es la humedad inicial (kg de agua/kg de materia seca)

M_{∞} : es la humedad de equilibrio (kg de agua/kg de materia seca)

D_{ef} : coeficiente de difusión efectiva (m^2/s)

r : radio del aguaymanto (m)

t : tiempo de secado (s)

n : números de términos de la serie

Para simplificar el modelo se considera únicamente el primer término ($n=1$) porque captura el comportamiento principal del proceso de secado y los siguientes términos disminuyen exponencialmente teniendo un impacto mínimo en los resultados cuando el tiempo de secado es relativamente corto.

Para justificar esta simplificación, se puede analizar la relación entre los dos primeros términos de la serie:

$$\frac{T\acute{e}rmino_2}{T\acute{e}rmino_1} = \frac{1}{4} \exp\left(\frac{-3D_{ef}\pi^2 t}{r^2}\right) \quad (29)$$

Dicha expresión muestra que el segundo término está sujeto tanto por un factor $\frac{1}{4}$ como por una exponencial decreciente de orden n^2 , lo que significa que, conforme aumenta el tiempo, la influencia del segundo término se vuelve aún más insignificante.

A modo ilustrativo, se evaluó esta relación para condiciones típicas del secado ($D_{ef} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $r = 0.01 \text{ m}$, $t = 500 \text{ s}$). El resultado de la contribución del segundo término sería de 24.63%, del tercer término sería 10.7% y así sucesivamente. Por lo tanto, se tiene la Ecuación 21:

$$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_{ef}\pi^2 t}{r^2}\right) \quad (30)$$

El primer término de la ecuación expresa la relación de las humedades (MR) y se calcula a partir de datos experimentales.

2.2.8 Energía de activación

Es la cantidad de energía mínima que deben de poseer las moléculas de los reactivos para tener el estado de transición y superar la barrera energética del fruto, se representa como E_a y se mide en kJ/mol o kcal/mol. Es fundamental para comprender como la temperatura afecta a la velocidad de las reacciones químicas y los procesos de transporte en sistemas físicos. (Serrato *et al.*, 2016).

Asimismo, para describir la dependencia de la velocidad con respecto a la temperatura se utilizó la siguiente ecuación:

a) Ecuación de Arrhenius

Esta ecuación define como la velocidad en una reacción química cambia con respecto a la temperatura y se expresa como:

$$\frac{d\ln(k)}{dT} = \frac{E_a}{RT^2} \quad (31)$$

Donde:

k: Constante de velocidad cinética

T: Temperatura

E_a: Energía de activación

R: Constante de los gases ideales

Por el método de separación de integrales se integra la Ecuación 31.

$$\int d\ln(k) = \int \frac{E_a}{RT^2} dT \quad (32)$$

Se obtiene:

$$\ln(k) = \frac{-E_a}{RT} + C \quad (33)$$

Asumiendo que $\ln(k_0) = C$ se tiene:

$$\ln(k) = \frac{-E_a}{RT} + \ln(k_0) \quad (34)$$

Otra forma de escribir la ecuación aplicando las propiedades logarítmicas es:

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (35)$$

b) Medición de la energía de activación

Para calcular la energía de activación se hace un ajuste en función de la temperatura para expresar la correlación entre las condiciones de secado y los valores de la difusividad efectiva, se usa la ecuación del tipo Arrhenius, por lo tanto, se tiene la Ecuación 36.

$$D_{ef} = D_o \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (36)$$

Donde, D_o es la difusividad a temperatura infinitamente alta (factor de Arrhenius) (m²/s), E_a es la energía de activación (kJ/mol), R es la constante molar de los gases (J/mol K), T es la temperatura absoluta (K).

2.2 Hipótesis de investigación

2.2.1 Hipótesis general

Existe una diferencia significativa en el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto con y sin cáscara a diferentes temperaturas de secado.

2.2.2 Hipótesis específicas

- El aumento de la temperatura reduce la humedad y tiempo de secado del aguaymanto, tanto con cáscara como sin ella.
- El coeficiente de difusión del aguaymanto con cáscara aumenta al incrementarse la temperatura de secado.
- El coeficiente de difusión del aguaymanto sin cáscara aumenta conforme se incrementa la temperatura de secado.
- La energía de activación del aguaymanto con cáscara es mayor a la del aguaymanto sin cáscara.

2.3 Identificación de variables

2.3.1 Variables dependientes

- Coeficiente de difusión efectiva
- Humedad
- Tiempo de secado
- Energía de activación

2.3.2 Variable independiente

- Temperatura de secado
- Condición de cáscara

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Características de la investigación

El presente estudio se enmarca dentro del enfoque experimental, dado que fue necesario trabajar bajo condiciones controladas que permitieran determinar con precisión la influencia de determinadas variables sobre los fenómenos analizados. Este enfoque resultó especialmente pertinente, ya que al mantener constantes ciertos factores y manipular otros, fue posible observar y medir con mayor exactitud los cambios producidos, atribuyéndolos directamente a las variaciones introducidas en las variables independientes. De esta manera, el diseño experimental facilitó la obtención de conclusiones más objetivas y fundamentadas acerca de la relación causal entre las variables estudiadas.

En este trabajo se utilizó un estudio de alcance explicativo, dado que el propósito principal es comprender y detallar la relación causal entre las variables involucradas. Este tipo de estudio permite no solo identificar si existe una relación entre la variable independiente y la variable dependiente, sino también explicar de qué manera y en qué medida los cambios en la primera influyen directamente sobre la segunda. A través de este enfoque, se busca obtener una comprensión profunda de los mecanismos subyacentes que determinan dicho impacto, proporcionando una base sólida para interpretar los resultados y formular conclusiones sustentadas en evidencia empírica.

La investigación se llevó a cabo en el laboratorio de Tecnologías de Recursos Orgánicos de la Escuela Profesional Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

3.2 Muestra, instrumentos, equipos e insumos

A continuación, se detallan la muestra, instrumentos, equipos e insumos necesarios para la experimentación:

Muestra

- Aguaymanto (Gold)

Instrumentos

- Balanza analítica
- Refractómetro con ATC exactitud $\pm 0.5\%$
- Anemómetro Omega HHF81
- Cronómetro
- Vernier

Equipos

- Secador convectivo marca KYNTEL, modelo KV45F.
- Bandejas de secado

Insumos

- Sacarosa estándar industrial

3.3 Procedimiento experimental

A continuación, se presenta el flujograma del proceso de experimentación (Figura 8), con el propósito de brindar una mayor claridad y comprensión del procedimiento experimental, así como el diagrama de bloques del proceso de secado del aguaymanto (Figura 9 y 10), que permite visualizar de manera esquemática las etapas principales del proceso, las cuales serán detalladas posteriormente.

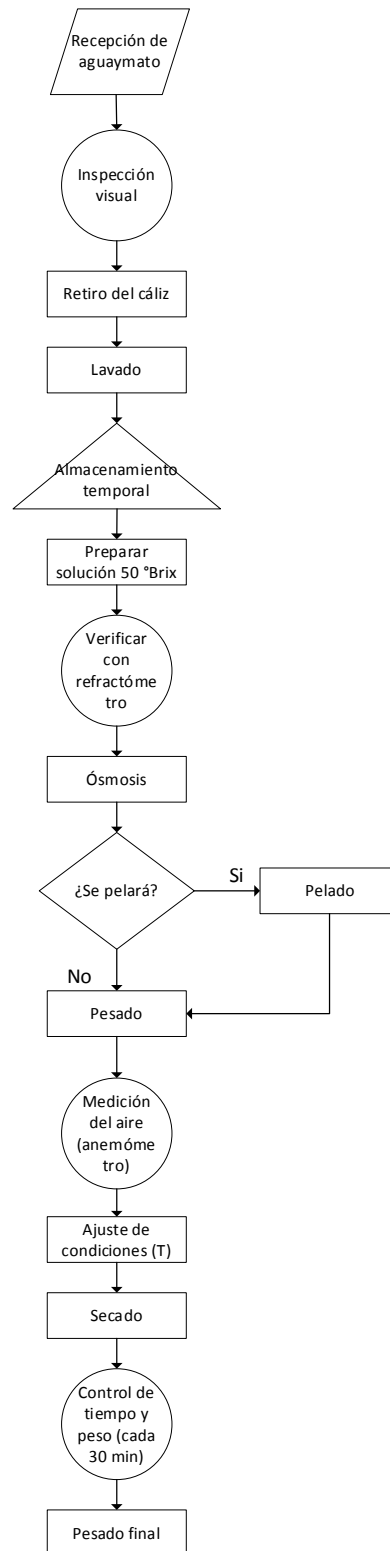
Figura 8*Flujograma del proceso de experimentación*

Figura 9

Diagrama de flujo de bloques del proceso de secado de aguaymanto con cáscara

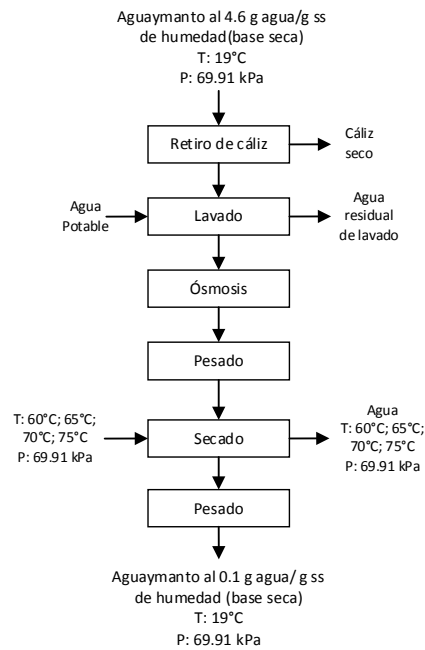
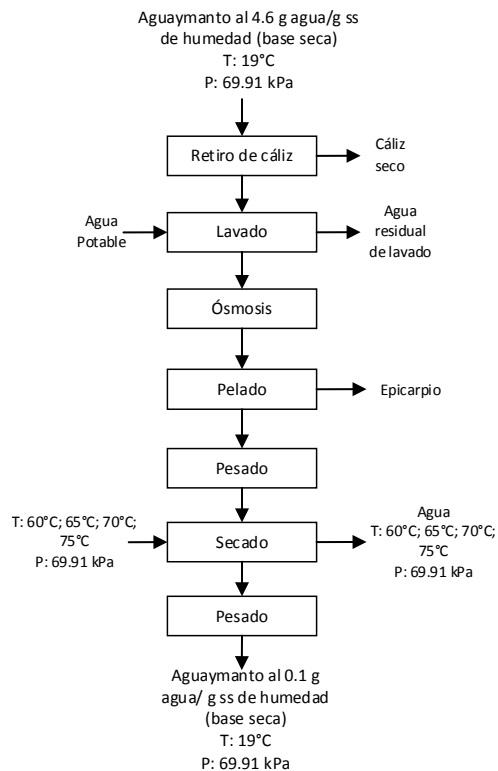


Figura 10

Diagrama de flujo de bloques del proceso de secado de aguaymanto sin cáscara



Los diagramas constituyen un resumen general del proceso; a continuación, cada una de las etapas descritas será explicada en detalle con el fin de proporcionar una comprensión más completa de la metodología empleada.

3.3.1 Preparación de la materia prima

Se recibió la materia prima (aguaymanto) de la variedad Gold proveniente de la provincia de Paucartambo. Mediante una inspección visual, se selecciona los frutos que están en buen estado y en un estado de madurez entre 4 y 5 siguiendo la clasificación de estados de madurez que se muestra en la Figura 1. Se quitó el cáliz que protege el aguaymanto evitando dañarlo y se lava el fruto para eliminar las impurezas adheridas a la superficie de la cáscara.

La materia prima se sometió a un pretratamiento osmótico con la finalidad de acortar el tiempo de secado, se preparó una disolución de sacarosa y con ayuda del refractómetro se verificó que la solución este a 50° Brix, la muestra fue sumergida en la disolución durante 150 min, transcurrido dicho tiempo se sacó la muestra de la disolución y se quitó el excedente de la disolución. Seguidamente, haciendo uso del vernier se tomó las medidas de diámetro del aguaymanto, después con la balanza analítica se procedió a pesar la muestra de aguaymanto. Para el caso de la experimentación del aguaymanto sin cáscara, después del pretratamiento osmótico con una pinza se procedió a pelar y deshacerse de la cubierta exterior. Finalmente, con la balanza se pesó el aguaymanto pelado.

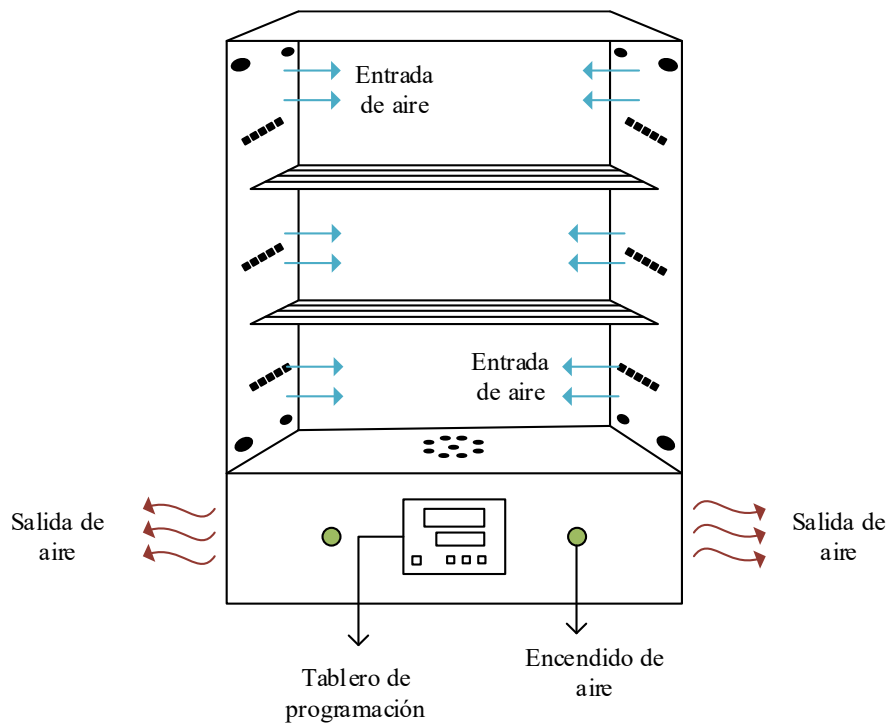
3.3.2 Obtención de datos experimentales mediante secado

Para realizar el secado se usó un secador convectivo de la marca KYNTEL, modelo KV45F. En la Figura 11 se muestra mediante un esquema representativo del secador y sus características, el cual consta de una cámara de secado, 2 bandejas y un sistema de calentamiento del aire por turbinas de flujo constante, el aire ingresa por los orificios ubicados

en los laterales internos de la cámara de secado y es expulsado por los laterales inferiores externos.

Figura 11

Esquema representativo del secador



Para iniciar con el proceso de secado primero se encendió el secador convectivo y se ajustó la temperatura a 60°C , el secador tiene un flujo de aire y constante para medir la velocidad del aire que fue de 2.5 m/s se usó un anemómetro. Posteriormente, las muestras preparadas fueron colocadas en las bandejas de secado y se realizó un control de peso a intervalos de 30 minutos utilizando un cronómetro como referencia. El criterio de finalización del secado se definió en función de la obtención de un peso constante, es decir, la variación de peso entre mediciones sucesivas fue mínima, limitada únicamente a diferencias decimales.

El procedimiento experimental fue replicado para las temperaturas de 65 , 70 y 75°C , manteniendo en todos los casos la velocidad de aire en 2.5 m/s como parámetro constante. Para

garantizar la validez estadística de los resultados, cada tratamiento térmico fue realizado por triplicado, lo que permitió disponer de datos suficientes para la evaluación de la repetibilidad y confiabilidad del proceso, minimizando el error experimental y fortaleciendo el análisis posterior de los resultados.

Una vez recopilados los datos experimentales correspondientes a las variaciones de peso en función del tiempo, se procedió a su procesamiento y análisis mediante el software Microsoft Excel. Con dicho programa se construyeron las curvas de secado para cada una de las temperaturas evaluadas (60, 65, 70 y 75°C), lo que permitió representar gráficamente el comportamiento del peso de la muestra con respecto al tiempo de secado.

Posteriormente, se procedió a calcular el contenido de humedad en base seca (Ecuación 3) para cada intervalo de tiempo registrado durante el secado. Para ello, la humedad en base seca en un tiempo dado se determinó a partir de la relación entre la masa de agua presente en la muestra y la masa seca, para ello usamos la humedad en base humedad inicial (Ecuación 37), se tiene:

$$M_{bs} = \frac{M_{bh} \times m_0 - (m_0 - m_t)}{m_0(1 - M_{bh})} \quad (37)$$

Donde:

M_{bs} : Humedad en base seca en el tiempo t (g agua/g muestra seca)

M_{bh} : Humedad inicial en base húmeda (g agua/g muestra)

m_0 : masa inicial de la muestra (g)

m_t : masa de la muestra en el tiempo t (g)

3.3.3 Coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto

La estimación del coeficiente de difusión efectiva de humedad en el aguaymanto se llevó a cabo aplicando la segunda ley de Fick para sistemas no estacionarios, considerando como aproximación geométrica la de una esfera, debido a que esta representación es la que presenta mayor similitud con la forma del aguaymanto. La formulación empleada corresponde a la solución analítica de la ecuación diferencial de difusión en coordenadas esféricas (Ecuación 30). Esta forma de la ecuación es exponencial, lo que dificulta el ajuste directo de los datos experimentales para estimar el coeficiente de difusión efectiva. Sin embargo, al aplicar el logaritmo natural a ambos lados de la ecuación, se puede transformar en una expresión lineal (Ecuación 38), lo cual facilita el análisis estadístico mediante regresión lineal.

$$\ln MR = \ln \left(\frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} \right) = \ln \left(\frac{6}{\pi^2} \right) - \left(\frac{D_{ef} \pi^2 t}{r^2} \right) \quad (38)$$

La ecuación tiene ahora la forma de una recta: $y = mx + b$, siendo x la variable independiente, también llamada: Abscisa, en coordenadas cartesianas, variable explicativa o predictora, porque es la que se controla o se manipula. Por otro lado, y vendría siendo la variable dependiente, también conocida como: Ordenada, en el plano cartesiano, variable respuesta, porque su valor depende de los cambios en x . Finalmente, m es la pendiente de la recta, y representa el grado de variación de y respecto a x , indica cuánto cambia y cuando x aumenta en una unidad. Por lo tanto, cada término se representa de la siguiente forma:

$$y = \ln \left(\frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} \right)$$

$$x = t$$

$$m = - \left(\frac{D_{ef} \pi^2}{r^2} \right)$$

Para obtener el coeficiente de difusión efectivo se asume que el radio se mantiene constante durante el proceso y se grafican los datos de secado experimental en términos de $\ln MR$ vs t , la pendiente de la recta (m) nos permite calcular la difusión efectiva para cada temperatura despejando D_{ef} como muestra en la Ecuación 39. Para el cálculo se hizo uso del software Excel. Se determinó los coeficientes de difusión teniendo en cuenta las cuatro temperaturas.

$$D_{ef} = -m \left(\frac{r^2}{\pi^2} \right) \quad (39)$$

3.3.4 Energía de activación

Para obtener la energía de activación del aguaymanto con cáscara se aplicó la ecuación de Arrhenius (Ecuación 36), la cual describe la dependencia del coeficiente de difusión efectiva (D_{ef}) con la temperatura del proceso. Dicha expresión se hizo lineal usando logaritmo natural a ambos lados de la ecuación, como se presenta en la Ecuación 40.

$$\ln(D_{ef}) = - \left(\frac{E_a}{R} \right) \frac{1}{T} + \ln D_o \quad (40)$$

Finalmente, la ecuación toma la forma de una recta: $y = mx + b$, siendo x la variable independiente. Por otro lado, y vendría siendo la variable dependiente, por lo tanto, tenemos:

$$y = \ln(D_{ef})$$

$$x = \left(\frac{1}{T} \right)$$

$$m = - \frac{E_a}{R}$$

$$b = \ln(D_o)$$

La energía de activación (E_a) y el factor de Arrhenius (D_o) fueron calculados graficando $\ln D_{ef}$ vs $1/T$ para las temperaturas experimentales (60, 65, 70 y 75°C).

Posteriormente se realizó una regresión lineal para obtener la ecuación de la recta cuya pendiente (m) permitió calcular la energía de activación como se muestra en la Ecuación 41.

$$E_a = -m \cdot R \quad (41)$$

El procedimiento se efectuó aplicando un ajuste por regresión lineal a los datos experimentales mediante el software Microsoft Excel, lo que permitió determinar los valores de E_a para el aguaymanto con cáscara. con el propósito de comparar y evaluar la influencia que ejerce la presencia de la cubierta externa sobre la resistencia a la transferencia de masa durante el proceso de secado. Este análisis comparativo permitió determinar de manera más precisa el efecto que tiene la eliminación de la cáscara en el comportamiento difusivo del producto, aportando información relevante para optimizar las condiciones del proceso

A continuación, en la Tabla 2, se presenta la secuencia de fórmulas utilizadas para el cálculo del coeficiente de difusión y la determinación de la energía de activación, parámetros fundamentales para la caracterización cinética del secado y la comprensión de los mecanismos de transporte de masa involucrados.

Tabla 2

Resumen de fórmulas

Paso	Descripción	Fórmula	Observaciones
Determinación del coeficiente de difusión			
1	Se plantea la ecuación diferencial de la segunda ley de Fick para difusión en geometría esférica.	$\frac{dC}{dt} = D_{ef} \left(\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dC}{dr} \right) \right)$	C: concentración r: radio D _{ef} : coeficiente de difusión efectiva (m ² /s)
2	Solución en forma de una serie infinita, que relaciona la razón de humedad con el tiempo de secado.	$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{ef} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right)$	M _t : humedad en el tiempo M ₀ : humedad inicial M _∞ : humedad de equilibrio
3	Simplificar a una serie tomando solo el primer término de la serie, ya que es dominante en los primeros tiempos de secado.	$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_{ef} \pi^2 t}{r^2}\right)$	(n=1)
4	A partir de datos experimentales (humedad en función del tiempo), se ajusta D _{ef} calculando la pendiente de la relación logarítmica.	$\ln MR = \ln \left(\frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} \right) = \ln \left(\frac{6}{\pi^2} \right) - \left(\frac{D_{ef} \pi^2 t}{r^2} \right)$	y = ln $\left(\frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} \right)$ x = t m = $-\left(\frac{D_{ef} \pi^2}{r^2} \right)$
5	Se graficarán los datos de secado experimental en términos de ln MR vs t	$D_{ef} = -m \left(\frac{r^2}{\pi^2} \right)$	
Cálculo de la energía de activación			
1	Ajuste en función de la temperatura usando la ecuación del tipo Arrhenius	$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$	D ₀ : difusividad a temperatura infinitamente alta (factor de Arrhenius) E _a : energía de activación R: constante molar de los gases T: temperatura absoluta (K)
2	Hacer la expresión lineal usando logaritmo natural	$\ln(D_{ef}) = \ln D_0 - \left(\frac{E_a}{RT} \right)$	y = ln (D _{ef}) x = $\left(\frac{1}{T} \right)$ m = $-\frac{E_a}{R}$ b = ln (D ₀)
3	Calcular E _a y D ₀ graficando ln D _{ef} vs 1/T _A .	$E_a = -m \cdot R$ $D_0 = \exp(b)$	

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Humedad inicial de la materia prima

Haciendo uso del analizador de humedad se determinó que el aguaymanto presenta una humedad inicial de 82.16%, superior al reportado por Ramadan y Moersel (2003) de 78.9%. Esta diferencia se atribuye al fenotipo utilizado, las condiciones agroclimáticas del cultivo, el estado de madurez del fruto, así como al tiempo transcurrido entre la cosecha y el análisis.

4.2 Secado de aguaymanto

4.2.1 Pérdida de peso de la muestra

a) Para aguaymanto con cáscara

En las Tablas 3, 4 y 5 se reportan los datos experimentales de la pérdida de peso durante el tiempo de secado de aguaymanto con cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, correspondientes a la primera, segunda y tercera repetición.

Tabla 3

Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto con cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición.

Tiempo (horas)	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C
0	3.0919 g	2.3703 g	2.5211 g	2.0255 g
0.5	2.9357 g	2.1507 g	2.2386 g	1.7812 g
1	2.7960 g	1.9398 g	1.9795 g	1.5199 g
1.5	2.6394 g	1.7425 g	1.7674 g	1.2966 g
2	2.4842 g	1.5468 g	1.5638 g	1.0916 g
2.5	2.3305 g	1.3560 g	1.3792 g	0.9005 g
3	2.2005 g	1.1882 g	1.1903 g	0.7558 g
3.5	2.0619 g	1.0485 g	1.0399 g	0.6529 g
4	1.9371 g	0.9193 g	0.8992 g	0.5839 g
4.5	1.7951 g	0.8254 g	0.7896 g	0.5396 g
5	1.6813 g	0.7504 g	0.7133 g	0.5094 g
5.5	1.5551 g	0.6960 g	0.6585 g	0.4937 g
6	1.4429 g	0.6557 g	0.6225 g	0.4825 g
6.5	1.3359 g	0.6288 g	0.5976 g	
7	1.2235 g	0.6068 g	0.5813 g	
7.5	1.1143 g	0.5920 g		
8	1.0176 g			
8.5	0.9344 g			
9	0.8603 g			

En la Tabla 3 se observa una clara influencia de la temperatura sobre la pérdida de peso en el secado del aguaymanto con cáscara. A tiempos intermedios, como a las 3 horas, se evidencia que a 75 °C la pérdida de peso es mucho más pronunciada (≈ 0.76 g) en comparación con 70 °C (≈ 1.19 g), 65 °C (≈ 1.19 g) y 60 °C (≈ 2.20 g), lo que confirma una mayor velocidad de eliminación de humedad a mayor temperatura. Esta tendencia se mantiene a las 6 horas, donde a 60 °C aún se conserva una masa elevada (≈ 1.44 g), mientras que a 75 °C el producto ya se encuentra cercano al equilibrio. A tiempos largos (8–9 h), solo el tratamiento a 60 °C continúa mostrando una reducción progresiva de peso, indicando que el proceso a esta temperatura está controlado principalmente por difusión interna y requiere mayor tiempo para alcanzar el equilibrio.

Tabla 4

Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto con cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, segunda repetición.

Tiempo (horas)	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C
0	3.1637 g	2.2633 g	2.5738 g	1.6834 g
0.5	3.0122 g	2.0568 g	2.2780 g	1.3708 g
1	2.8713 g	1.8495 g	2.0060 g	1.1094 g
1.5	2.7196 g	1.6545 g	1.7892 g	0.8716 g
2	2.5640 g	1.4681 g	1.5980 g	0.6701 g
2.5	2.4175 g	1.2933 g	1.4292 g	0.5052 g
3	2.2896 g	1.1431 g	1.2378 g	0.4001 g
3.5	2.1527 g	0.9997 g	1.0955 g	0.3367 g
4	2.0240 g	0.8702 g	0.9720 g	0.3049 g
4.5	1.8926 g	0.7700 g	0.8744 g	
5	1.7840 g	0.6919 g	0.8043 g	
5.5	1.6586 g	0.6339 g	0.7540 g	
6	1.5421 g	0.5947 g	0.7182 g	
6.5	1.4339 g	0.5671 g	0.6900 g	
7	1.3201 g	0.5467 g	0.6697 g	
7.5	1.2150 g	0.5334 g		
8	1.1174 g			
8.5	1.0305 g			
9	0.9521 g			

En la Tabla 4 se confirma el mismo comportamiento, reforzando la reproducibilidad del proceso. A las 3 horas, los valores de masa son: 60 °C (≈ 2.29 g), 70 °C (≈ 1.24 g), 65 °C (≈ 1.14 g) y 75 °C (≈ 0.40 g), evidenciando nuevamente que el incremento de temperatura acelera

significativamente la transferencia de masa. A las 6 horas, el tratamiento a 75 °C prácticamente ha alcanzado condiciones cercanas al equilibrio, mientras que a 60 °C aún persiste una cantidad considerable de humedad (≈ 1.54 g). Es importante notar que entre 65 y 70 °C las diferencias son menores, lo que sugiere que en este rango la resistencia interna a la difusión comienza a dominar el proceso, limitando el efecto del aumento de temperatura. A las 9 horas, únicamente el tratamiento a 60 °C continúa activo, lo cual reafirma que a bajas temperaturas el secado se prolonga considerablemente.

Tabla 5

Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto con cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición.

Tiempo (horas)	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C
0	2.9973 g	2.3734 g	2.4233 g	1.8122 g
0.5	2.8652 g	2.1579 g	2.1242 g	1.5167 g
1	2.7635 g	1.9585 g	1.8470 g	1.2232 g
1.5	2.6439 g	1.7678 g	1.6189 g	0.9625 g
2	2.5248 g	1.5952 g	1.4105 g	0.7473 g
2.5	2.4047 g	1.4226 g	1.2299 g	0.5817 g
3	2.2968 g	1.2755 g	1.0546 g	0.4811 g
3.5	2.1798 g	1.1402 g	0.9355 g	0.4207 g
4	2.0724 g	1.0031 g	0.8412 g	0.3858 g
4.5	1.9576 g	0.8955 g	0.7703 g	0.3677 g
5	1.8568 g	0.8006 g	0.7212 g	0.3597 g
5.5	1.7486 g	0.7201 g	0.6859 g	0.3566 g
6	1.6479 g	0.6583 g	0.6609 g	
6.5	1.5528 g	0.6135 g	0.6422 g	
7	1.4366 g	0.5804 g	0.6282 g	
7.5	1.3252 g	0.5590 g		
8	1.2290 g			
8.5	1.1193 g			
9	1.0225 g			

Por su parte, la Tabla 5 mantiene las mismas tendencias observadas previamente, consolidando la consistencia experimental. A las 3 horas, la masa a 75 °C (≈ 0.48 g) es significativamente menor que a 70 °C (≈ 1.05 g), 65 °C (≈ 1.27 g) y 60 °C (≈ 2.30 g), lo que demuestra nuevamente que la velocidad de secado es directamente proporcional a la temperatura. A las 6 horas, los valores a 65 y 70 °C son parecidos (≈ 0.66 g). En contraste, a 75

°C el sistema alcanza rápidamente el equilibrio (≈ 0.36 g), mientras que a 60 °C aún se mantiene una masa considerable (≈ 1.65 g). A las 9 horas, el tratamiento a 60 °C continúa mostrando pérdida de peso (≈ 1.02 g), evidenciando un proceso más lento y prolongado.

De manera general, el análisis conjunto de las tres tablas permite concluir que la temperatura es el factor más influyente en el secado del aguaymanto con cáscara, observándose una relación inversa entre temperatura y tiempo requerido para alcanzar el equilibrio. Las tres repeticiones muestran una alta coherencia en las tendencias, lo que, valida la confiabilidad de los resultados experimentales, a pesar de ligeras variaciones atribuibles a la naturaleza heterogénea del producto. Temperaturas elevadas como 75 °C permiten reducir significativamente el tiempo de secado, pero podrían comprometer la calidad del producto final, mientras que temperaturas bajas como 60 °C prolongan el proceso y aumentan el consumo energético.

Con los datos presentados en las tablas se elaboraron las curvas de pérdida de peso con respecto al tiempo las cuales se ilustran en las Figuras 12, 13 y 14.

Figura 12

Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición.

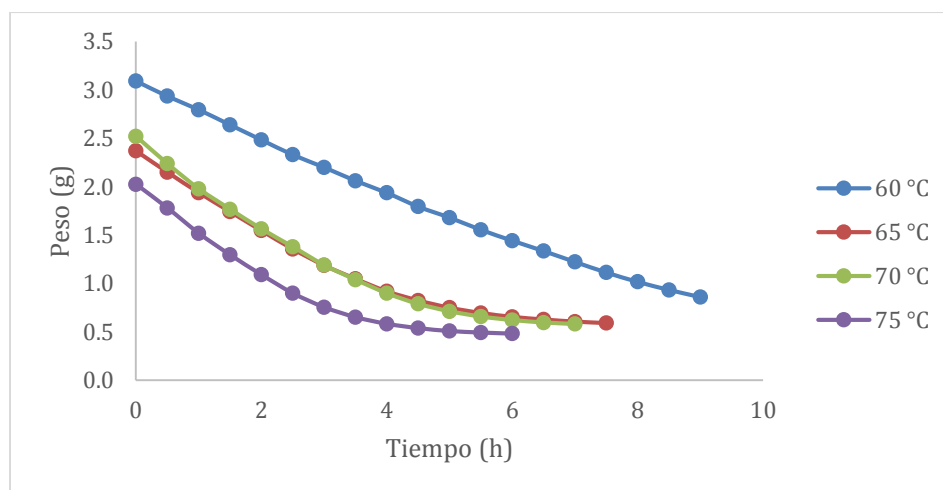
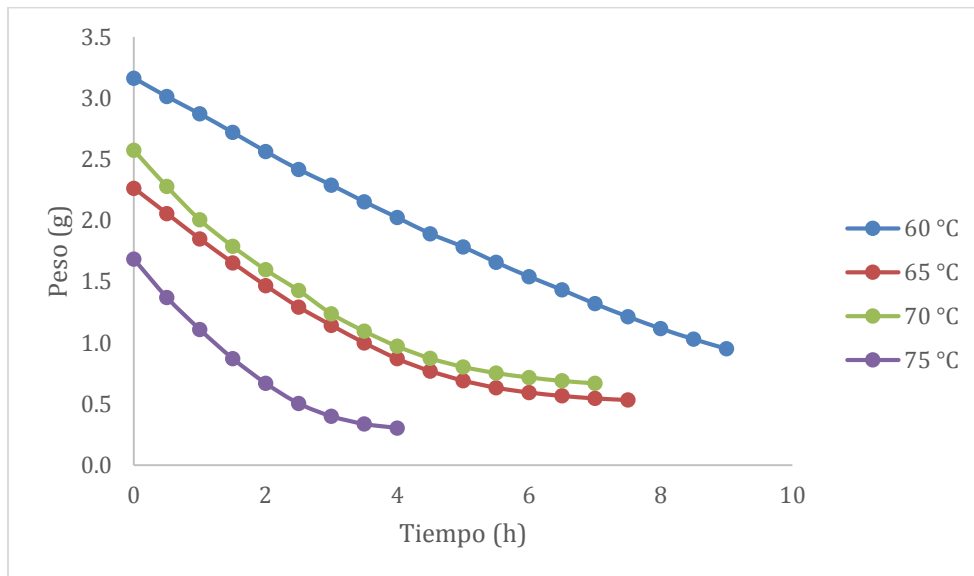
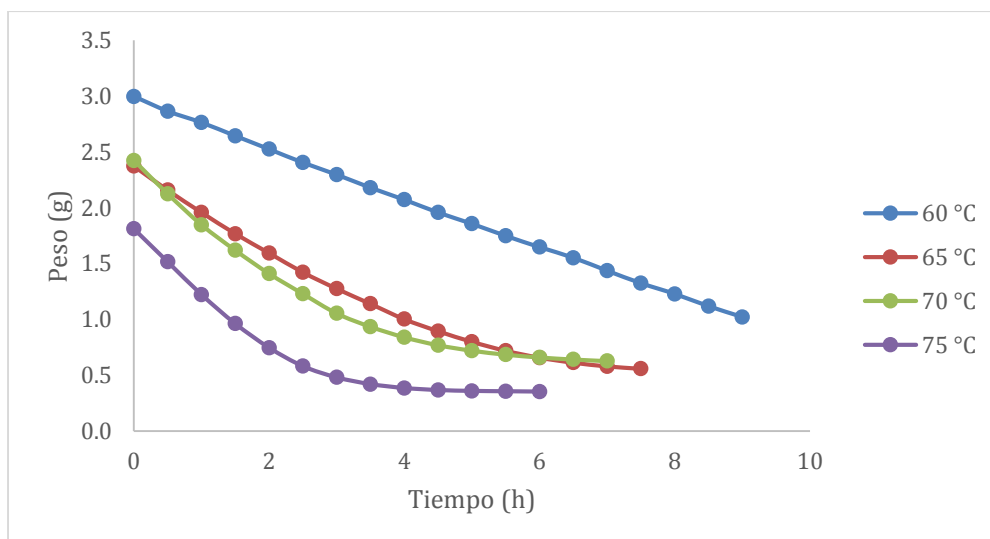


Figura 13

Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, segunda repetición.

**Figura 14**

Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición.



En las Figuras 12, 13 y 14 se observan que, a medida que aumenta la temperatura de secado, la velocidad de pérdida de peso del aguaymanto con cáscara incrementa

considerablemente. En particular, a 75°C se alcanza más rápidamente un peso final estable, lo que indica un proceso de secado más eficiente en comparación con las temperaturas más bajas.

A 60°C, la curva presenta una pendiente más suave, lo que refleja una mayor duración del proceso de secado debido a una menor tasa de evaporación de la humedad. Por otro lado, las curvas correspondientes a 65°C y 70°C muestran comportamientos intermedios, en los que se aprecia una mayor rapidez en la pérdida de peso que a 60°C, pero sin alcanzar la velocidad observada a 75°C.

Los resultados de las tres repeticiones además reflejan una tendencia similar, aportando consistencia y fiabilidad a los datos obtenidos.

Se puede apreciar que en el trabajo de Aredo *et al.*, (2012) llegaron al equilibrio en unos 450 minutos a una temperatura de 60 °C y una velocidad de flujo de aire de 3 m/s, a diferencia del presente trabajo en el que se alcanzó el equilibrio con la misma temperatura en unos 540 minutos y con una velocidad de flujo de aire de 2.5 m/s esta diferencia se atribuye principalmente al pretratamiento utilizado. En el estudio de Aredo *et al.*, (2012) el aguaymanto fue sometido a un proceso de deshidratación osmótica con un tiempo de inmersión de 240 minutos y a unos 65°Brix, lo que favorece una mayor eliminación inicial del agua. En contraste, en el presente trabajo se empleó una solución de 50 °Brix durante 150 minutos, teniendo un menor gradiente osmótico y por tanto una menor remoción de humedad previa al secado convectivo.

b) Para aguaymanto sin cáscara

En las Tablas 6, 7 y 8 se reportan los datos experimentales de la pérdida de peso durante el secado de aguaymanto sin cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, correspondientes a la primera, segunda y tercera repetición.

Tabla 6

Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto sin cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición.

Tiempo (horas)	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C
0	2.3270 g	2.6095 g	3.1367 g	2.4738 g
0.5	1.7865 g	1.9643 g	2.3350 g	1.7328 g
1	1.4316 g	1.5776 g	1.8688 g	1.2908 g
1.5	1.1307 g	1.2944 g	1.5708 g	1.0099 g
2	0.9225 g	1.0774 g	1.3482 g	0.8265 g
2.5	0.7796 g	0.9104 g	1.1835 g	0.7010 g
3	0.6812 g	0.7939 g	1.0391 g	0.6208 g
3.5	0.5999 g	0.7005 g	0.9377 g	0.5665 g
4	0.5404 g	0.6246 g	0.8551 g	0.5365 g
4.5	0.4875 g	0.5728 g	0.7917 g	0.5210 g
5	0.4557 g	0.5354 g	0.7433 g	0.5111 g
5.5	0.4263 g	0.5080 g	0.7081 g	0.5062 g
6		0.4942 g	0.6847 g	0.5024 g
6.5		0.4855 g	0.6685 g	
7		0.4807 g	0.6583 g	
7.5		0.4766 g		

En la Tabla 6 se observa una disminución progresiva de la pérdida de peso a medida que avanza el tiempo. Comparando condiciones a tiempos iguales, por ejemplo, a las 3 horas, la pérdida de peso sigue el orden 70 °C (1.0391 g) > 65 °C (0.7939 g) > 60 °C (0.6812 g) > 75 °C (0.6208 g), lo cual sugiere que, en esta repetición, 70 °C presenta mayor eficiencia de secado inicial-intermedio que incluso 75 °C. A las 6 horas, la tendencia se mantiene parcialmente: 70 °C (0.6847 g) sigue siendo superior a 65 °C (0.4942 g) y 60 °C (0.4263 g), mientras que 75 °C (0.5024 g) muestra valores cercanos a 65 °C. Este comportamiento podría explicarse por fenómenos de endurecimiento superficial a temperaturas más altas como 75 °C, que limitan la difusión interna de humedad.

Tabla 7

Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto sin cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C. segunda repetición.

Tiempo (horas)	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C
0	2.2644 g	2.6075 g	3.0852 g	2.3560 g
0.5	1.7341 g	2.0149 g	2.3790 g	1.6629 g
1	1.3535 g	1.6363 g	1.9361 g	1.2408 g
1.5	1.0248 g	1.3817 g	1.6180 g	0.9928 g
2	0.8218 g	1.1643 g	1.3776 g	0.8201 g
2.5	0.6929 g	0.9959 g	1.1951 g	0.6967 g
3	0.6137 g	0.8805 g	1.0379 g	0.6124 g
3.5	0.5503 g	0.7866 g	0.9295 g	0.5534 g
4	0.5045 g	0.7092 g	0.8404 g	0.5168 g
4.5	0.4669 g	0.6554 g	0.7684 g	0.4962 g
5	0.4434 g	0.6139 g	0.7141 g	0.4850 g
5.5	0.4230 g	0.5824 g	0.6737 g	0.4792 g
6	0.4092 g	0.5604 g	0.6469 g	0.4754 g
6.5		0.5452 g	0.6272 g	
7		0.5356 g	0.6149 g	
7.5		0.5287 g		

En la Tabla 7 se confirma una tendencia similar, aunque con ligeras variaciones atribuibles a la variabilidad experimental. A las 3 horas, nuevamente la mayor pérdida de peso se presenta a 70 °C (1.0379 g), seguida de 65 °C (0.8805 g), 60 °C (0.6137 g) y 75 °C (0.6124 g), mostrando coherencia con la primera repetición. A las 6 horas, los valores son 70 °C (0.6469 g), 65 °C (0.5604 g), 75 °C (0.4754 g) y 60 °C (0.4092 g), manteniendo la superioridad de 70 °C. Es importante notar que 75 °C no supera consistentemente a 65 °C, lo cual refuerza la hipótesis de limitaciones difusivas internas a temperaturas elevadas.

Tabla 8

Pérdida de peso (g) durante el secado de aguaymanto sin cáscara a las temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición.

Tiempo (horas)	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C
0	3.1299 g	2.4303 g	3.0495 g	2.2221 g
0.5	2.5190 g	1.8832 g	2.2993 g	1.6057 g
1	2.1302 g	1.5118 g	1.8660 g	1.2041 g
1.5	1.7789 g	1.2077 g	1.5607 g	0.9402 g
2	1.4941 g	1.0104 g	1.3341 g	0.7708 g
2.5	1.2809 g	0.8645 g	1.1652 g	0.6578 g
3	1.1353 g	0.7675 g	1.0142 g	0.5816 g
3.5	1.0159 g	0.6903 g	0.9220 g	0.5261 g
4	0.9235 g	0.6269 g	0.8417 g	0.4917 g
4.5	0.8367 g	0.5817 g	0.7813 g	0.4702 g
5	0.7792 g	0.5469 g	0.7311 g	0.4604 g
5.5	0.7247 g	0.5221 g	0.6954 g	0.4545 g
6	0.6833 g	0.5081 g	0.6715 g	0.4509 g
6.5	0.6503 g	0.5001 g	0.6539 g	
7	0.6228 g	0.4944 g	0.6401 g	
7.5	0.6014 g	0.4908 g		
8	0.5872 g			
8.5	0.5770 g			
9	0.5692 g			

En las Tablas 6, 7 y 8 se observa que la pérdida de peso es más rápida, especialmente en las primeras dos horas de secado. Aunque el efecto de la temperatura sigue existiendo, sin embargo, es menos marcado que cuando el aguaymanto se seca con la cáscara, por ello, en esta repetición la curva de 60°C muestra una disminución considerable, acercándose incluso a los valores obtenidos para 75°C, esto se debe a que al no tener cáscara el aguaymanto no tiene una resistencia que obstaculice la evaporación del agua.

En términos generales, el análisis conjunto de las tres tablas muestra una alta reproducibilidad en la tendencia global del proceso de secado, donde la temperatura de 70 °C se posiciona consistentemente como la más eficiente en términos de pérdida de peso a tiempos equivalentes. Aunque podría esperarse que 75 °C proporcione mayores velocidades, los resultados sugieren la presencia de resistencias internas al transporte de humedad, probablemente asociadas a fenómenos estructurales del aguaymanto, como la formación de una capa superficial menos permeable.

Con los datos presentados en las tablas se elaboraron las curvas de pérdida de peso con respecto al tiempo las cuales de ilustran en las Figuras 15, 16 y 17.

Figura 15

Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición.

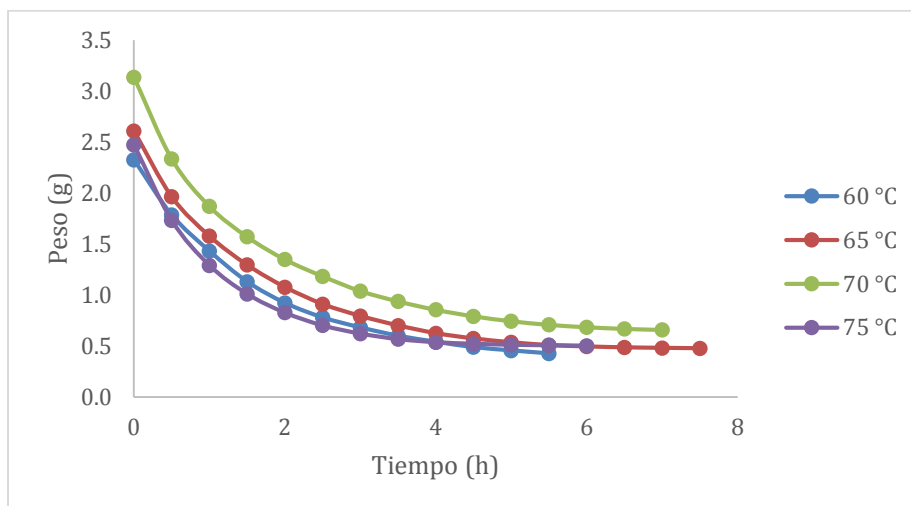


Figura 16

Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, segunda repetición.

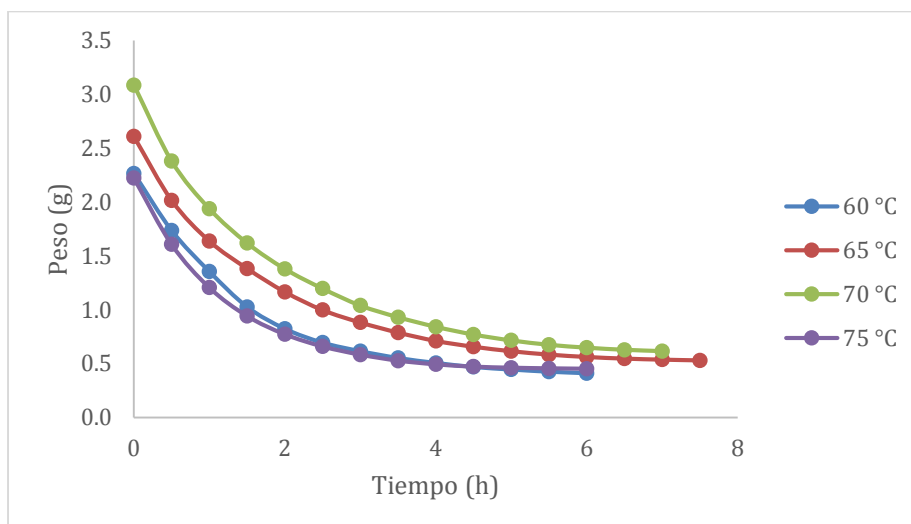
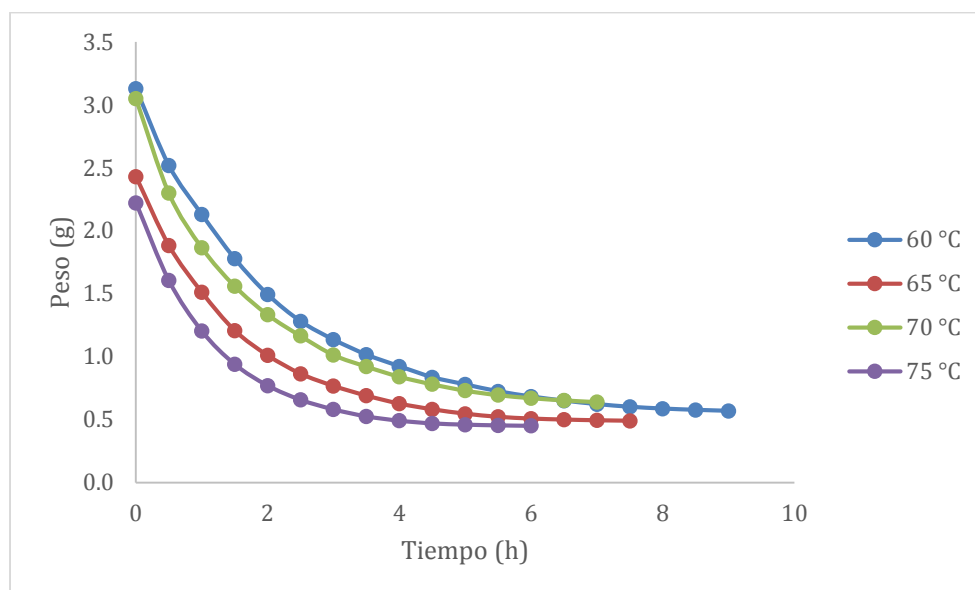


Figura 17

Pérdida de peso durante el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición.



Las Figuras 15 y 16 ilustran que todas las curvas presentan un descenso rápido al inicio, especialmente en la primera hora, lo que indica una alta velocidad de secado inicial por la eliminación del agua libre. Posteriormente, la pendiente se reduce, reflejando una etapa más lenta. En la figura 17 se observa que las curvas para 75°C y 65°C se mantienen por debajo de la de 70°C durante el proceso, lo que se atribuye a variaciones iniciales de peso.

Se evidencian diferencias significativas en el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio. En el presente estudio el tiempo de secado más rápida fue de 360 minutos con una temperatura de 75°C en comparación a los 150 minutos con una temperatura de 35°C presentado por Angel Quispe y Nelly Catro (2018), esta diferencia se atribuye principalmente a la diferencia de pelado del aguaymanto (pelado químico) y a una mayor temperatura en el proceso de deshidratación osmótica pese a una misma concentración (50° Brix).

4.2.2 Curvas de secado

En las siguientes Figuras 18, 19 y 20 se presentan las diferentes curvas de humedad en base seca en (g de agua/g ss) con respecto al tiempo en (h) de los datos experimentales obtenidos para el secado de aguaymanto con cáscara (Apéndice 1) a temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, para la primera repetición, segunda repetición y tercera repetición.

Figura 18

Humedad en base seca vs tiempo durante el secado de aguaymanto con cáscara, primera repetición.

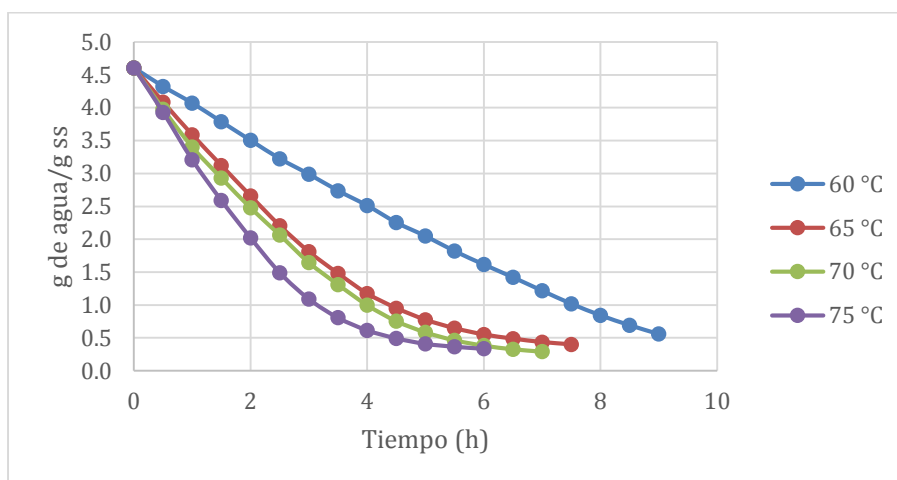


Figura 19

Humedad en base seca vs tiempo durante el secado de aguaymanto con cáscara, segunda repetición.

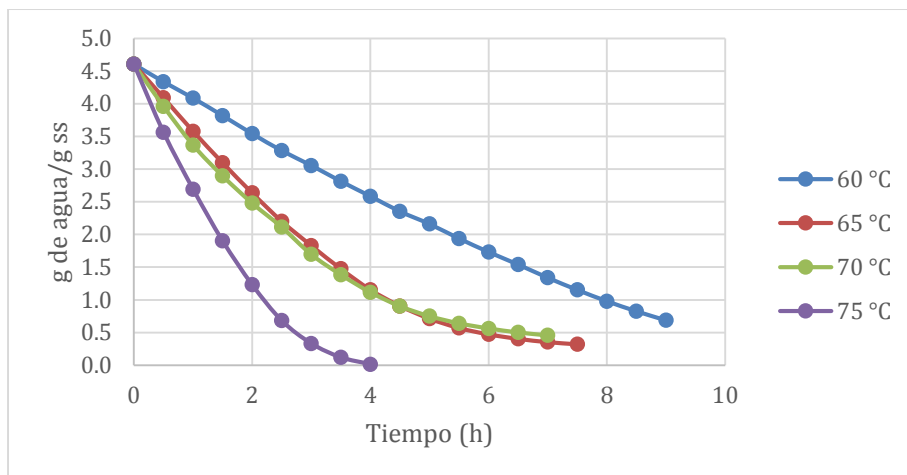
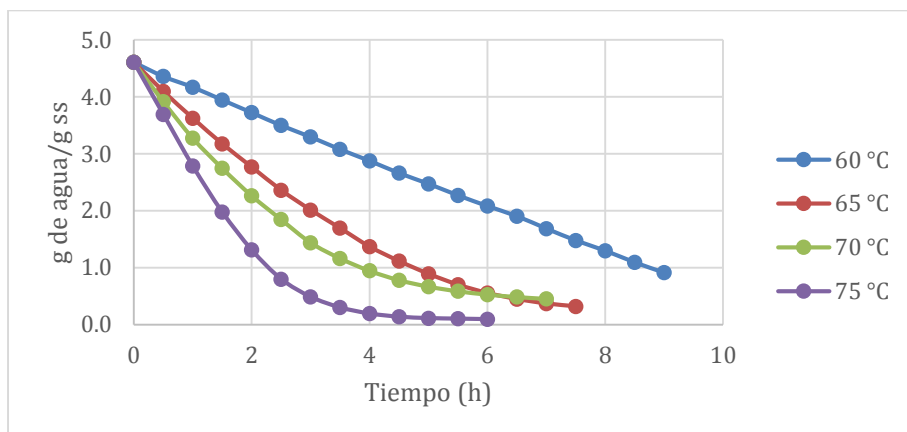


Figura 20

Humedad en base seca vs tiempo durante el secado de aguaymanto con cáscara, tercera repetición.



En las Figuras 18, 19 y 20 se observa que a medida que aumenta la temperatura de secado, la humedad del aguaymanto con cáscara disminuye considerablemente. En particular, a 75°C se alcanza más rápidamente la humedad de equilibrio, lo que indica un proceso de secado más eficiente en comparación con las temperaturas más bajas, se observa una pérdida de humedad más rápida en las 3 primeras horas.

En las siguientes Figuras 21, 22 y 23 se presentan las diferentes curvas de humedad en base seca (g de agua/g ss) con respecto al tiempo (h) de los datos experimentales obtenidos

para el secado de aguaymanto sin cáscara (Apéndice 2) a temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, para la primera repetición, segunda repetición y tercera repetición.

Figura 21

Humedad en base seca vs el tiempo durante el secado de aguaymanto sin cáscara, primera repetición.

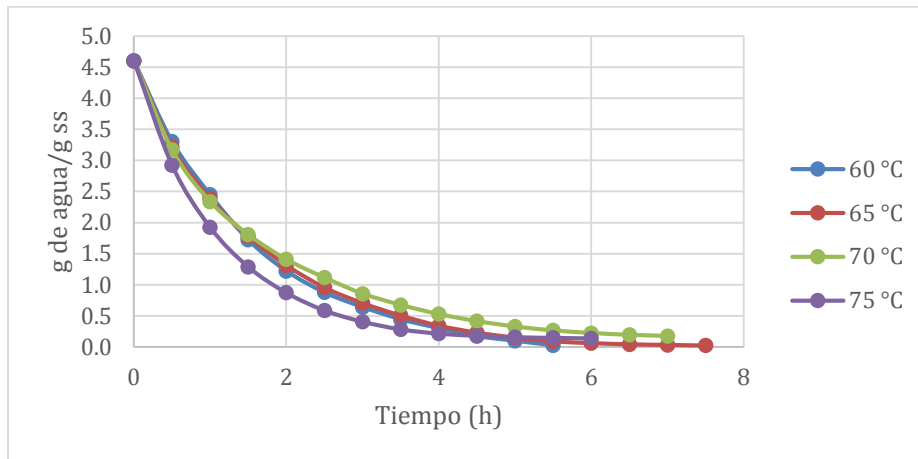


Figura 22

Humedad en base seca vs el tiempo durante el secado de aguaymanto sin cáscara, segunda repetición.

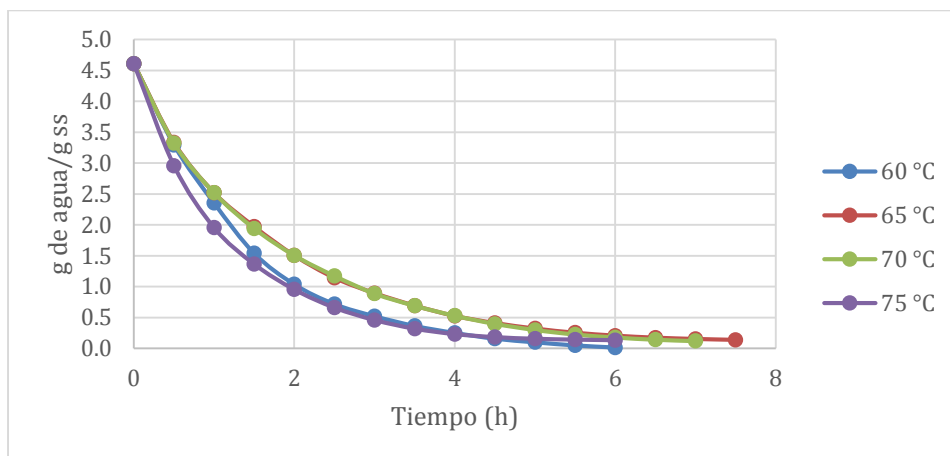
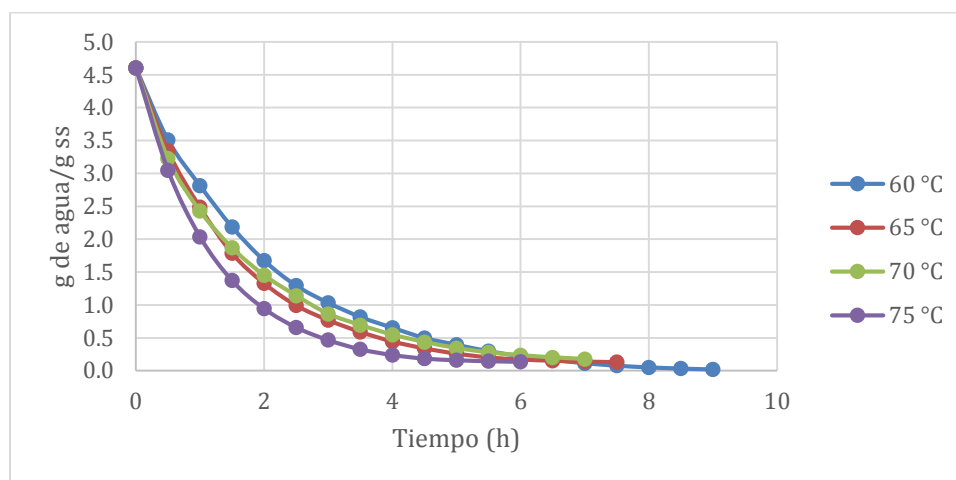


Figura 23

Humedad en base seca vs el tiempo durante el secado de aguaymanto sin cáscara, segunda repetición.



Las curvas de secado presentadas en las Figuras 21, 22 y 23 muestran un descenso rápido al inicio, especialmente en la primera hora, lo que indica una alta velocidad de secado inicial por la eliminación del agua libre. Posteriormente, la pendiente se reduce, reflejando una etapa donde la humedad llega al equilibrio. Se observa que las curvas a diferentes temperaturas tienen similitud esto se debe a la ausencia de cáscara en el aguaymanto, sin ella, el calor penetra de manera más directa, favoreciendo una pérdida de humedad más rápida.

Aunque existen normas que establecen metodologías estandarizadas, en el desarrollo experimental del presente trabajo no se alcanzó de manera estricta el criterio clásico de peso constante definido en métodos gravimétricos de referencia, como los propuestos por AOAC International (AOAC 952.10) y la International Organization for Standardization (ISO 712:2009) para la determinación de humedad mediante secado en estufa bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo. Este criterio establece que la variación entre pesadas consecutivas debe ser mínima, garantizando así la eliminación de la mayor parte del agua removible.

No obstante, en este estudio se observó una clara tendencia hacia la estabilización del peso, particularmente a temperaturas más elevadas, lo cual resulta coherente con los principios de dichas metodologías. La desviación respecto al criterio de peso constante puede atribuirse a diversos factores, entre ellos la naturaleza higroscópica del aguaymanto, la presencia de humedad ligada, la existencia de gradientes internos de humedad y ciertas limitaciones instrumentales.

Por ello, en lugar de aplicar un criterio rígido, se adoptó un enfoque más representativo del comportamiento real del sistema, basado en la tendencia asintótica de los datos y en la estabilización práctica de la pérdida de peso en los últimos intervalos experimentales.

Adicionalmente, es importante resaltar que marcos de referencia internacionales como los compilados por la Codex Alimentarius Commission (CXS 234) reconocen la necesidad de adaptar los métodos analíticos a la naturaleza del producto y a las condiciones del proceso, priorizando la coherencia y reproducibilidad de los resultados por encima de la rigidez operativa. En este sentido, la notable consistencia observada entre las tres repeticiones, así como la clara diferenciación del comportamiento de secado en función de la temperatura, constituyen evidencia suficiente de la robustez experimental del estudio. Las tendencias obtenidas no solo son congruentes entre sí, sino que además se alinean con los fundamentos teóricos del secado.

4.2.3 Coeficiente de difusión efectiva

Las difusividades efectivas fueron calculadas de acuerdo a la segunda ley de Fick para esferas (Ecuación 38). Al graficar $\ln(MR)$ vs tiempo, a partir de la pendiente se halla el coeficiente de difusión efectiva (D_{ef}).

Los datos experimentales que se presentan en el Apéndice 1 permitieron calcular el valor de MR y después se graficó las curvas que se muestran en la Figura 24 (primera repetición), la Figura 25 (segunda repetición) y la Figura 26 (tercera repetición) para la

determinación del coeficiente de difusividad efectiva del aguaymanto con cáscara a temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, luego se graficó una línea de tendencia lineal con su respectiva ecuación para cada temperatura y junto con la pendiente se determina la difusividad efectiva.

Figura 24

Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición.

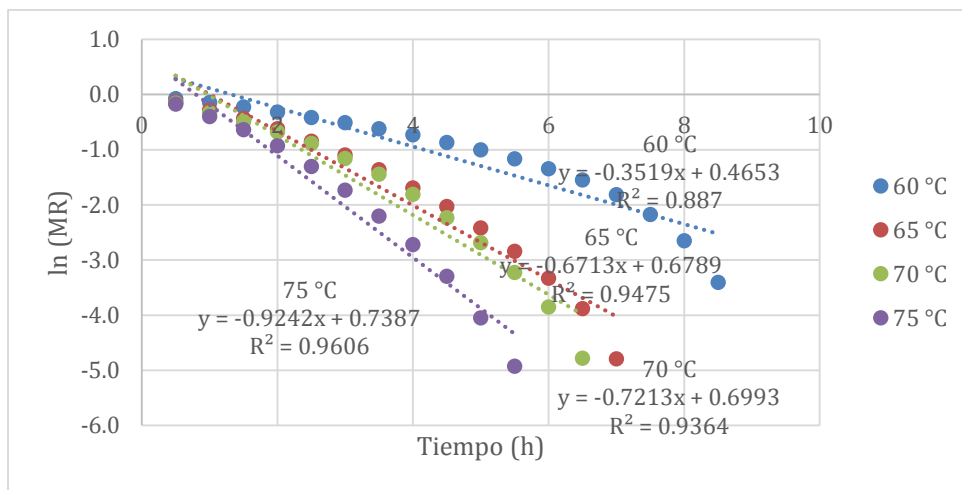


Figura 25

Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, segunda repetición.

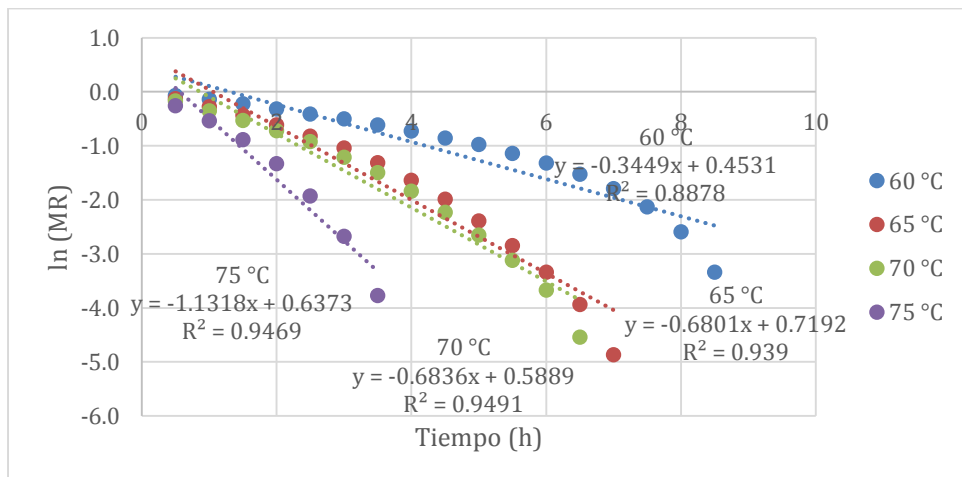
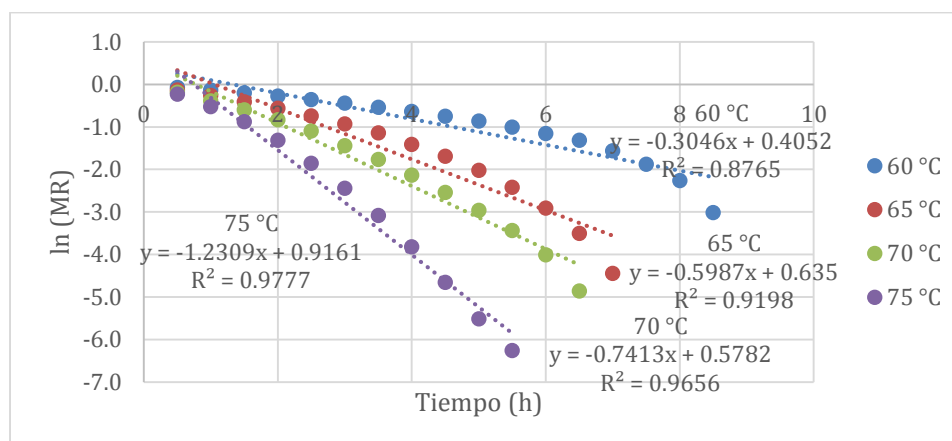


Figura 26

Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición.



En la Tabla 9 se presenta un resumen de los valores de las difusividades efectivas durante el secado de aguaymanto a 60, 65, 70 y 75°C con cáscara.

Tabla 9

Difusividad efectiva en el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C.

Temperatura (C°)	Repetición	Pendiente	D_{ef} (cm ² /h)	D_{ef} (m ² /s)	Media D_{ef} (m ² /s)	Desviación estándar
60	1	-0.3519	0.02888035	8.0223E-10	7.6097E-10	5.81989E-11
	2	-0.3449	0.02830587	7.8627E-10		
	3	-0.3046	0.02499845	6.9440E-10		
65	1	-0.6713	0.04353062	1.2092E-09	1.1709E-09	8.04679E-11
	2	-0.6801	0.04410126	1.2250E-09		
	3	-0.5987	0.03882285	1.0784E-09		
70	1	-0.7213	0.05280220	1.4667E-09	1.4547E-09	5.9578E-11
	2	-0.6836	0.05004240	1.3901E-09		
	3	-0.7413	0.05426628	1.5074E-09		
75	1	-0.9242	0.05992998	1.6647E-09	1.6410E-09	7.13475E-11
	2	-1.1318	0.05619064	1.5609E-09		
	3	-1.2309	0.06111067	1.6975E-09		

Con la finalidad de evaluar si existe diferencia significativa en los valores encontrados de la difusividad efectiva (diferente temperatura) se procedió a realizar el análisis de varianza (ANOVA) correspondiente, cuyo resultado se muestra en el Apéndice 5.1 del cual se deduce

que el coeficiente de difusión efectivo en el secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, presentan diferencia significativa a medida que aumenta la temperatura de secado. Mediante el análisis de comparaciones múltiples de Tukey se determinó la existencia de diferencias significativas entre los distintos pares de medias evaluados; los resultados detallados se presentan en el Apéndice 7.1. Del análisis se desprende que, para todos los pares de temperaturas comparados (60–65 °C, 60–70 °C, 60–75 °C, 65–70 °C, 65–75 °C y 70–75 °C), el valor de p fue inferior al nivel de significancia del 5 % ($p < 0,05$), lo que confirma la presencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias. Reforzando la evidencia de que la temperatura ejerce un efecto significativo sobre el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto con cáscara.

Los coeficientes de difusión efectiva obtenidos en este estudio muestran una concordancia con los valores reportados por Vásquez *et al.* (2013), quienes evaluaron el efecto de distintos pretratamientos en el secado convectivo de aguaymanto a 60°C durante 10 horas y con una velocidad de aire de 2 m/s, reportaron valores de difusividad efectiva del agua entre 0.66 a 0.74×10^{-10} m²/s. De manera similar, los valores de difusividad efectiva publicados por Doymaz (2006) para el secado de uva negra esta entre $3,82 \times 10^{-10}$ a $1,28 \times 10^{-9}$ m²/s. Esta coincidencia entre estudios nos indica que los coeficientes de difusión estimados son coherentes con los reportados para productos con características estructurales y composicionales semejantes. No obstante, las ligeras diferencias observadas entre estudios pueden atribuirse a variaciones en el grado de maduración de las frutas, diferencias morfológicas (tamaño, espesor de la cáscara, estructura interna) y a las condiciones experimentales específicas empleadas durante el proceso de secado.

Los datos experimentales que se presentan en los Apéndice 2 permitieron graficar la Figura 27 (primera repetición), Figura 28 (segunda repetición) y la Figura 29 (tercera repetición) para la determinación del coeficiente de difusividad efectiva del aguaymanto sin

cáscara a temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, luego se linealiza y con la pendiente se determina la difusividad efectiva.

Figura 27

Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, primera repetición.

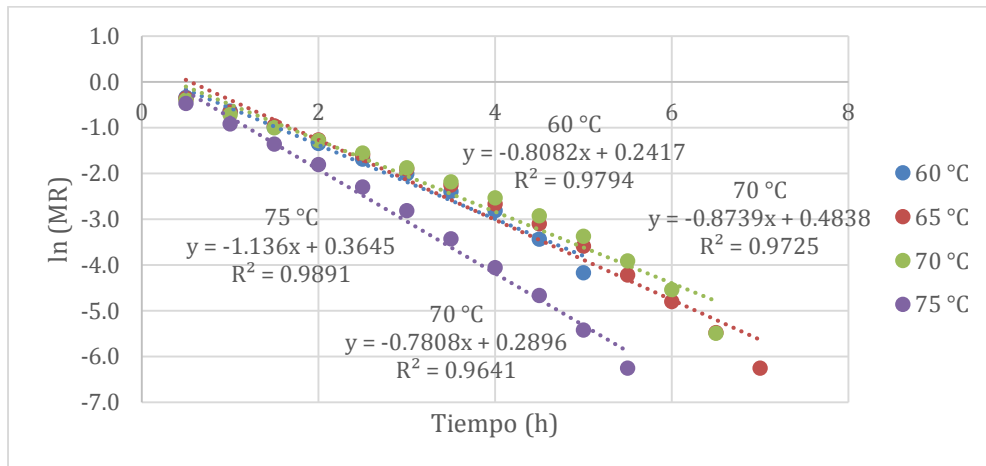


Figura 28

Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, segunda repetición.

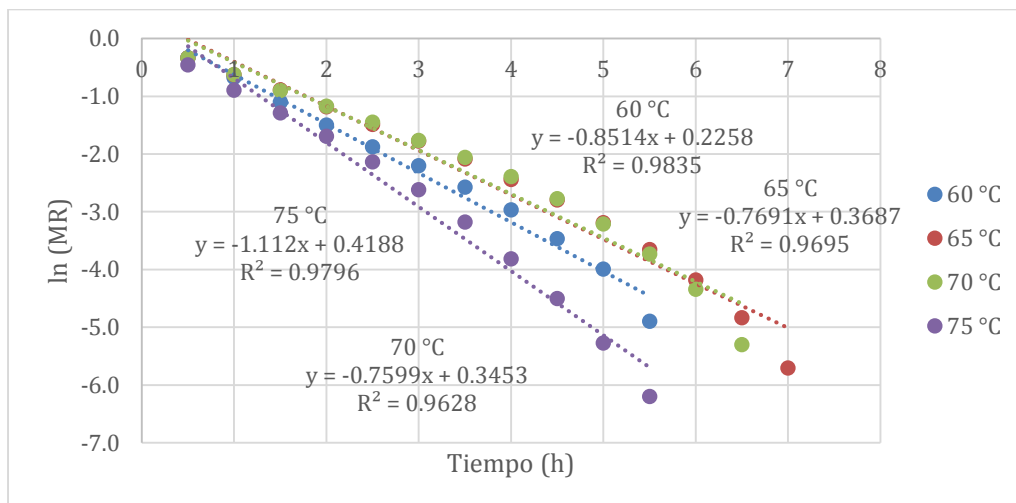
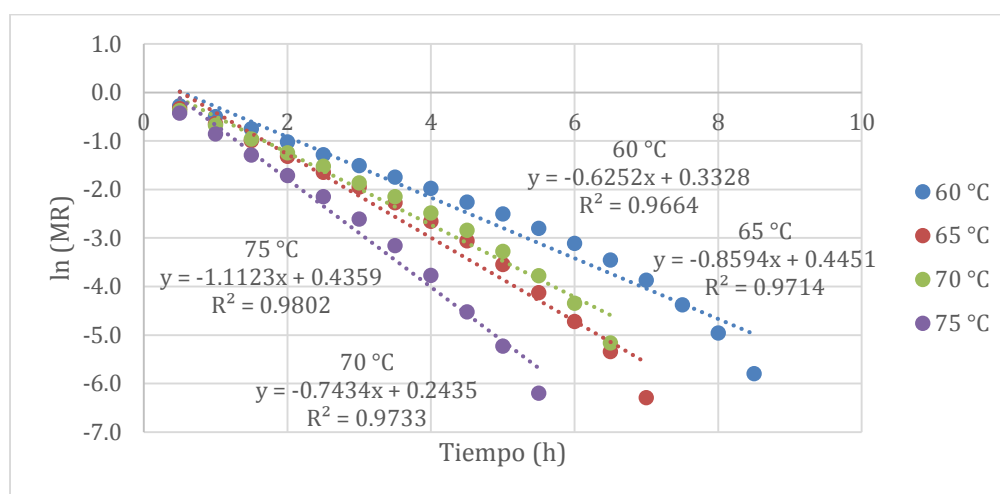


Figura 29

Ln (MR) vs. Tiempo en el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, tercera repetición.



En la Tabla 10 se presenta un resumen de los valores de las difusividades efectivas durante el secado de aguaymanto a 60, 65, 70 y 75°C sin cáscara.

Tabla 10

Difusividad efectiva en el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C.

Temperatura (C°)	Repetición	Pendiente	D _{ef} (cm²/h)	D _{ef} (m²/s)	Media D _{ef} (m²/s)	Desviación estándar
60	1	-0.8082	0.05240793	1.4558E-09	1.4715E-09	5.58519E-11
	2	-0.8514	0.05520925	1.5336E-09		
	3	-0.6252	0.05131002	1.4253E-09		
65	1	-0.8739	0.06397316	1.7770E-09	1.6297E-09	1.27882E-10
	2	-0.7691	0.05630136	1.5639E-09		
	3	-0.8594	0.05572801	1.5480E-09		
70	1	-0.7808	0.06408008	1.7800E-09	1.7357E-09	4.27289E-11
	2	-0.7599	0.06236482	1.7324E-09		
	3	-0.7434	0.06101067	1.6947E-09		
75	1	-1.1360	0.08315999	2.3100E-09	2.2777E-09	2.80019E-11
	2	-1.1120	0.08140308	2.2612E-09		
	3	-1.1123	0.08142505	2.2618E-09		

Con la finalidad de evaluar si existe diferencia significativa en los valores encontrados de la difusividad efectiva (diferente temperatura) se procedió a realizar el análisis de varianza

(ANOVA) correspondiente, cuyo resultado se muestra en el Apéndice 5.2 del cual se deduce que la difusividad efectiva en el secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C, presentan diferencia significativa a medida que aumenta la temperatura de secado. Mediante el análisis de comparaciones múltiples de Tukey se evaluaron las diferencias entre los pares de medias correspondientes a las distintas temperaturas estudiadas; los resultados se presentan en el Apéndice 7.2. Del análisis se observa que no todos los pares de medias presentan diferencias estadísticamente significativas. En particular, las comparaciones entre 60–65 °C y 65–70 °C no mostraron diferencias significativas, ya que los valores de p obtenidos ($p > 0,05$) superan el nivel de significancia establecido del 5 %. Por el contrario, se identificaron diferencias significativas en las comparaciones entre 60–70 °C, 60–75 °C, 65–75 °C y 70–75 °C, donde los valores de p fueron inferiores a 0,05 y el estadístico q superó el valor crítico correspondiente. Estos resultados indican que los incrementos de temperatura más amplios generan cambios estadísticamente significativos en el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto sin cáscara, mientras que variaciones térmicas menores no producen diferencias significativas. Lo que indica que, en ausencia de la cáscara, el efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión efectiva se manifiesta de manera significativa solo cuando los incrementos térmicos son mayores.

Sin embargo, considerando que el coeficiente de difusión efectiva también podría estar afectado por la presencia de la cáscara, se aplicó un ANOVA de dos factores (bidireccional), incorporando tanto el tipo de muestra (con y sin cáscara) como la temperatura. Este análisis presentado en el Apéndice 6 permitió identificar no solo los efectos principales de cada factor, sino también la posible interacción entre ellos. El análisis de varianza mostró que existe una interacción significativa entre la condición de la cáscara (con y sin cáscara) y la temperatura (60, 65, 70 y 75°C) en el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto. Esto significa que el

efecto de la temperatura sobre la difusión no es igual en ambas muestras, sino que depende de si el fruto conserva la cáscara o no.

En otras palabras, cuando la temperatura aumenta, el coeficiente de difusión también se incrementa, pero la magnitud de ese aumento es diferente para las muestras con cáscara y para las sin cáscara. En las muestras sin cáscara, la difusión ocurre más fácilmente, por lo que el incremento de la temperatura produce un aumento más marcado del coeficiente de difusión efectiva.

En cambio, en las muestras con cáscara, aunque la temperatura también favorece la difusión, la cáscara actúa como una barrera que limita el movimiento de la humedad, reduciendo la velocidad con la que el agua puede salir del fruto. Los resultados muestran que el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto con cáscara es menor en comparación con el fruto sin cáscara. Para la temperatura de 60 °C, se observó que el coeficiente de difusión efectiva con cáscara corresponde al 51,7 % del valor obtenido para el aguaymanto sin cáscara ($D_{ef_cáscara} = 0,517 D_{ef_sin\ cáscara}$). Asimismo, a 75 °C se calculó una relación mayor entre ambos coeficientes, siendo el coeficiente de difusión efectiva con cáscara equivalente al 72 % del correspondiente al aguaymanto sin cáscara ($D_{ef_cáscara} = 0,72 D_{ef_sin\ cáscara}$).

Khama *et al.* (2016) reportaron que la difusividad efectiva de la humedad en tomate cherry varió entre $2,56 \times 10^{-11}$ m²/s a $7,67 \times 10^{-11}$ m²/s en frutos con cáscara, mientras que en frutos sin ella los valores oscilaron entre $4,59 \times 10^{-10}$ m²/s a $6,73 \times 10^{-10}$ m²/s. Estos resultados evidencian una clara reducción de la difusión efectiva cuando el fruto mantiene su cáscara, comportamiento que coincide con lo observado en el presente estudio. Dichos resultados sugieren que el proceso de secado del aguaymanto también se ve fuertemente influenciado por la presencia o ausencia de cáscara. En frutos sin cáscara, la difusión del agua aumenta de manera más marcada conforme se incrementa la temperatura, mientras que en frutos con

cáscara el efecto de la temperatura es más gradual, debido a la resistencia adicional que ofrece la cáscara.

Rojas (2007) menciona que los valores de las difusividades en diferentes alimentos no dependen solamente de los rangos de temperaturas, sino también de las características de cada alimento (contenido de humedad inicial, presencia o no de una piel o cáscara que impida el paso del agua, geometría del producto: polvo, cubitos, esferas, cilindros, escamas, láminas, etc.), así como de otras características externas (pre tratamientos durante el proceso, variación en las características del aire, etc.).

La cáscara del aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) está compuesta por una matriz rica en celulosa, hemicelulosa, lignina y compuestos fenólicos, además de ceras y cutículas que recubren la superficie externa. Estos polímeros estructurales le confieren propiedades mecánicas de resistencia y baja permeabilidad al vapor de agua, reduciendo la velocidad de difusión interna. La cáscara actúa como una capa de alta resistencia difusiva que limita el gradiente de humedad disponible entre el interior del fruto y el aire de secado. Esta resistencia se traduce en menores coeficientes de difusión efectiva cuando el fruto conserva su cáscara, especialmente a temperaturas bajas. A estas condiciones, la energía térmica no es suficiente para ablandar o romper significativamente la estructura polimérica de la cáscara, intensificando su papel como barrera. En contraste, al retirar la cáscara, el agua se transporta directamente a través de la pulpa, donde la red celular (rica en pectinas y azúcares) presenta una permeabilidad mayor que la cutícula externa.

4.2.4 Energía de activación

La energía de activación se determinó con la pendiente hallada en la regresión lineal, con los datos del logaritmo de los coeficientes de difusión efectiva ($\ln(D_{ef})$) y la inversa de la temperatura en K ($1/T$).

En la Tabla 11 presenta los datos experimentales de los coeficientes de difusión efectiva halladas anteriormente del aguaymanto con cáscara a temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, esto nos permitió hallar $\ln(D_{ef})$ y a partir de la pendiente la energía de activación.

Tabla 11

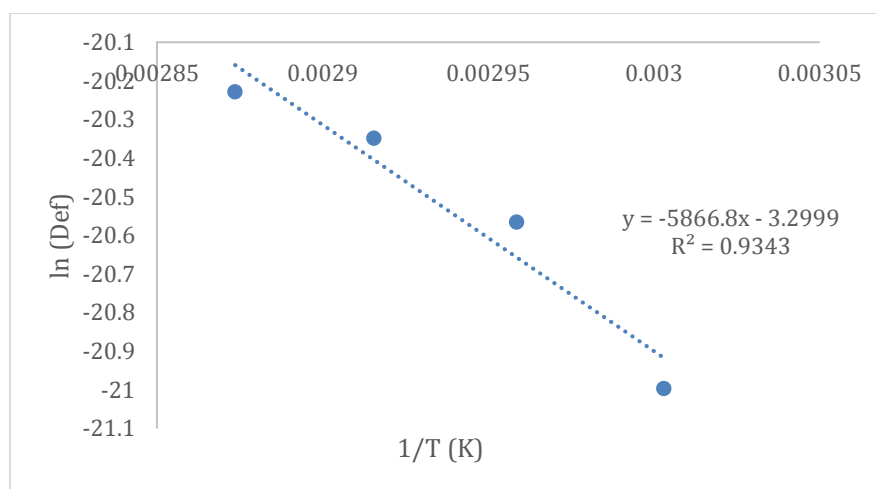
Energía de activación en secado de aguaymanto con cáscara a 60, 65, 70 y 75°C.

T (°C)	T (K)	1/T	D_{ef} (m ² /s)	$\ln(D_{ef})$	Pendiente	E_a (kJ/mol)
60	333	0.003003	7.60969E-10	-20.99642824		
65	338	0.002958	1.17088E-09	-20.56551268	-5866.8	48.78
70	343	0.002915	1.45473E-09	-20.34844526		
75	348	0.002873	1.64103E-09	-20.2279414		

En la Figura 30 se presenta la relación $\ln D_{ef}$ vs $1/T$, que permitió hallar la energía de activación para el aguaymanto con cáscara.

Figura 30

Relación $\ln(D_{ef})$ vs. $1/T$ del aguaymanto con cáscara



La Tabla 11 presenta un valor de energía de activación (E_a) de 48.78 kJ/mol el cual representa la energía requerida por las moléculas de vapor de agua para migrar durante el

proceso de secado. Este valor es ligeramente superior al reportado por Hincapié y Zapata (2019), quienes encontraron una E_a del aguaymanto de 42,903 kJ/mol en un sistema de secado en lecho fluidizado.

Asimismo, el valor obtenido se ubica cerca de los reportados por Castro *et al.* (2008) para el secado de aguaymanto con aire caliente, con y sin pretratamiento por osmodeshidratación, cuyos valores fueron 45,815 kJ/mol y 49,041 kJ/mol, respectivamente. Esto indica que la energía requerida en este estudio es consistente con la descrita en la literatura para operaciones de secado comparables.

Además, la progresión de los valores de $\ln(D_{ef})$ a medida que aumenta la temperatura muestra una clara tendencia ascendente (es decir, valores menos negativos), lo que respalda la interpretación física del modelo y evidencia que, a mayores temperaturas, la movilidad de las moléculas de agua dentro del producto es mayor.

En la Tabla 12 se presenta los datos experimentales de las difusividades halladas anteriormente del aguaymanto sin cáscara y temperaturas de 60, 65, 70 y 75°C, esto nos permitirá hallar $\ln(D_{ef})$ y a partir de la pendiente la energía de activación.

Tabla 12

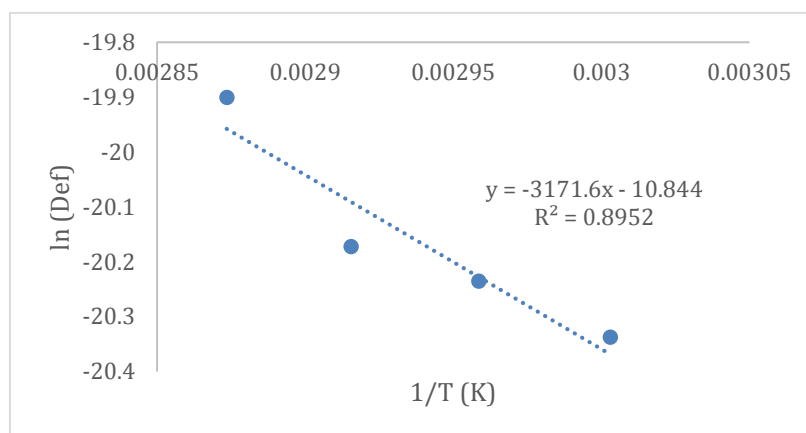
Energía de activación en secado de aguaymanto sin cáscara a 60, 65, 70 y 75°C.

T (°C)	T (K)	1/T	D_{ef} (m ² /s)	Ln (D_{ef})	Pendiente	E_a (kJ/mol)
60	333	0.003003003	1.47155E-09	-20.33695078		
65	338	0.00295858	1.62965E-09	-20.23489868	-3171.6	26.37
70	343	0.002915452	1.73570E-09	-20.17185519		
75	348	0.002873563	2.27767E-09	-19.90011384		

En la Figura 31 se presenta la relación $\ln D_{ef}$ vs $1/T$, que permitió hallar la energía de activación para el aguaymanto sin cáscara.

Figura 31

Relación $\ln(D_{ef})$ vs. $1/T$ del aguaymanto sin cáscara



En la Tabla 12 se muestra que el valor de energía de activación (26.37 kJ/mol), es considerablemente menor que el obtenido para el aguaymanto con cáscara (48.78 kJ/mol), lo que indica que el aguaymanto sin cáscara requiere menos energía para iniciar el proceso de difusión de humedad. Esto puede atribuirse a la ausencia de la cáscara, que actúa como una barrera natural al paso del vapor de agua. Sin esta barrera, el transporte de humedad hacia la superficie del fruto es más directo y menos restringido, favoreciendo una mayor eficiencia del secado.

No obstante, en la Figura 31 se muestra un bajo valor de R^2 lo que sugiere que el comportamiento del aguaymanto sin cáscara frente a la temperatura no sigue con exactitud el modelo de Arrhenius, lo cual podría implicar que otros factores, como el encogimiento del tejido, la formación de una capa externa seca o cambios en la porosidad, tienen una influencia significativa en la difusión.

Khama *et al.* (2016) obtuvieron una energía de activación de 50,43 kJ/mol para el tomate cherry con cáscara y de 17,64 kJ/mol para el tomate cherry sin cáscara, evidenciando una disminución significativa de la energía requerida para la difusión de humedad cuando se retira la cáscara del fruto. Este comportamiento coincide con lo observado en el presente

estudio para el aguaymanto, donde la ausencia de cáscara también redujo la energía de activación, indicando una menor resistencia al movimiento de agua durante el secado.

Tal como se discutió previamente, la cáscara está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosas, lignina y cutículas cerosas, lo que incrementa la resistencia difusiva. Para que las moléculas de agua atraviesen esta barrera, se requiere una mayor cantidad de energía térmica,

Por el contrario, en el aguaymanto sin cáscara, la energía de activación es menor, lo cual significa que el proceso de secado es más eficiente a menores variaciones de temperatura. Esto ocurre porque, en ausencia de la cáscara, la humedad debe atravesar únicamente la pulpa, cuya estructura celular (rica en pectinas y azúcares solubles) es más permeable y menos rígida que la cubierta externa.

CONCLUSIONES

El coeficiente de difusión efectiva (Def) del aguaymanto con y sin cáscara varía significativamente a medida que la temperatura de secado aumenta. En frutos con cáscara, los valores oscilaron entre $7.6097 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a la temperatura más baja y $1.6410 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ a la temperatura más alta. En el caso del aguaymanto sin cáscara, aumentó desde $1.4715 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ hasta $2.2777 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ en el mismo rango de temperaturas, lo que confirma la sensibilidad térmica del proceso.

El aumento de la temperatura de secado acelera la pérdida de humedad y el tiempo de secado del aguaymanto con cáscara, pasando de 9 horas en la temperatura más baja a 6 horas en la más alta. En cambio, en el aguaymanto sin cáscara, la variación del tiempo de secado con respecto a la temperatura fue menos marcada, manteniéndose en un promedio de 7 horas para todas las condiciones evaluadas.

El coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto con cáscara aumenta progresivamente a medida que la temperatura de secado es más elevada.

El aguaymanto sin cáscara presentó coeficientes de difusión más altos a medida que aumentó la temperatura. Además, dichos valores fueron superiores a los del aguaymanto con cáscara en todos los casos.

El aguaymanto sin cáscara presentó una energía de activación significativamente menor (23.78 kJ/mol) que el aguaymanto con cáscara (43.28 kJ/mol), lo cual indica que el requerimiento energético del proceso disminuye al retirar la cáscara.

RECOMENDACIONES

Estandarizar las condiciones iniciales del producto (peso, tamaño, contenido de humedad) para asegurar resultados más homogéneos.

Realizar un análisis comparativo de la composición fisicoquímica del aguaymanto fresco y del producto seco, con el fin de evaluar los cambios en sus propiedades nutricionales y funcionales durante el proceso de secado.

Registrar fotografías o videos de las muestras a lo largo del secado facilita analizar cambios de textura, color y forma, y puede enriquecer el análisis de resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Agromercado. (2021). *Análisis de mercado del aguaymanto 2015-2020*. Obtenido de Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1720425/An%C3%A1lisis%20de%20Mercado%20del%20Aguaymanto.pdf>
- Agustí, M. (2000). Crecimiento y desarrollo del fruto. En *Fundamentos de fisiología vegetal* (pág. 522). Madrid: McGraw – Hill/Intramericana de España.
- Angel Quispe Talla, N. C. (2018). Osmo deshidratacion del aguaymanto (*Physalis peruviana*). *Aporte Santiaguino*, 55-68.
- Araujo, G. (2009). El cultivo de aguaymanto o tomatillo (*Physalis peruviana* L.): Manejo Técnico en los Andes del Perú. Cultivos Andinos. Guía técnica de recopilación bibliográfica. Cajamarca, Perú.
- Arumuganathan, T., Manikantan, M., Rai, R., Anandakumar, S., & Khare, V. (2009). Mathematical modeling of drying kinetics of milky mushroom in a fluidized bed dryer. *International Agrophysics*, 23.
- Babalís, S., & Belessiotis, V. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of food Engineering*, 65.
- Badui, S. (2006). *Química de los alimentos* (Cuarta ed.). Mexico: Pearson-educación.
- Balmaceda, M., Bochetto, A., Zaniolo, S., Fernandez, O., Bomben, R., & Malka, M. (2015). Determinación del coeficiente de difusión del agua en semillas de *Amaeanthus cruentus* rehumectadas. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 6(2). Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323639772005>
- Baquerizo Bacilio, A. J. (marzo de 2023). Modelado de la cinética de secado e isothermas de adsorción de agua de oca amarilla (*Oxalis tuberosa* variedad amarilla) y oca roja (*Oxalis*

- tuberosa variedad roja). Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/37930/1/CAL%20055.pdf>
- Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Mundi-Prensa. España.
- Bautista, M., Reyma, L., Bravo, M., & Aguirre, R. (2014). Obtención de aguaymanto (*Physalis peruviana*) liofilizado. *Revista Peruana De Química E Ingeniería Química*, 17(1). Obtenido de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/11313>
- Beigi, O. (2016). Effects of air temperature and velocity on energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. *Food Sci. Technol (Campinas)*, 36 (1). doi:<https://doi.org/10.1590/1678-457X.0068>
- Bergman, T., & Lavine, A. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8va Edición. John Wiley & Sons. USA.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1982). *Fenómenos de transporte: un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento*. Reverté.
- Brack Egg, A. (1999). *Diccionario enciclopédico de plantas útiles del Perú*. Centro de Estudios Regionales Andinos Bartolomé de las Casas.
- Cáceres H, B. N. (2022). *Secado Convectivo de Alimentos y Productos Agrícolas*. Alpha Servicios Gráficos S.R.L. Cusco, Perú.
- Castañeda, G., & Paredes, R. (2003). *Estudio del proceso respiratorio, principales acidos organicos, azucars y algunos cambios fisico-quimicos en el desarrollo del fruto de uchuva (Physalis Peruviana L.)*. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia.

- Castro, A., Rodríguez, L., & Vargas, E. (2008). Secado de Uchuva (*Physalis peruviana* L) por aire caliente con pretratamiento de Osmodeshidratación. *Vitae*, 15(2), 226-231.
- Çengel, Y. A. (2011). *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L. Obtenido de <https://pavisva.files.wordpress.com/2016/01/transferencia-de-calor-y-masa-yunus-cengel.pdf>
- Chong, C., Law, C., Cloke, M., Abdullah, L., & Daud, W. (2008). Drying Kinetics, Texture, Color, and Determination of Effective Diffusivities During Sun Drying of Chempedak. *Drying technology*, 26.
- Cortés R, M., Chiralt B, A., & Puente D, L. (2005). Alimentos funcionales: una historia con mucho presente y futuro. *Vitae, Revista de la facultad de Química farmacéutica*.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. Clarendon Press. England.
- Doymaz, İ. (2005). Drying kinetics of black grapes treated with different solutions. *Journal of Food Engineering*, 76(2), 212–217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.009>
- Durner, E. (2019). *Goldenberry Fact Sheet [Fact sheet]*. Obtenido de Sustainable Agriculture Research and Education (SARE), Rutgers University: <https://projects.sare.org/information-product/goldenberry-fact-sheet/>
- Fischer, G., & Martínez, O. (1999). Calidad y madurez de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en relación con la coloración del fruto. *Agronomía Colombiana*.
- Fito Maupoey, P., Andrés Grau, A. M., Barat Baviera, J. M., & Albors Sorolla, A. M. (2016). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente* (primera edición ed.). Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/e8b523c5-4970-4ae6-b2a3-86f576e81359/TOC_4092_02_01.pdf?guest=true
- Galvis, J., Fischer, G., & Gordillo, O. (2005). Cosecha y poscosecha de la uchuva. *Universidad Nacional de Colombia*, 165-190.

- Herrera , A. (2000). *Manejo poscosecha de la uchuva en producción, poscosecha y exportación de la uchuva (Physalis peruviana L.)*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. Colombia.
- Hincapie, M., & Zapata, J. (2019). Estudio de la Cinética de Deshidratación de Uchuva (*Physalis peruviana L*) en un Secador de Lecho Fluidizado. *Inf. tecnol*, 30(2), 115-124.
- Khama, R., Aissani, F., Alkama, R., Bennamoun, L., Fraikin, L., Salmon, T., . . . Léonard, A. (2016). Convective drying of cherry tomato: study of skin effect. *Journal of Engineering Science and Technology*, 11(3), 443-457.
- Khan, M., Kumar, C., Joardder, M., & Karim, M. (2016). Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials. *Drying Technology*, 35.
- López, N., Morales, N., & Lobatón, H. (2022). Convective drying kinetics of squash epicarp of Cucurbita Maxima and its uses in developing gluten-free bread. *Mutis*, 12(2).
- Mari, A. P. (2024). Exploring osmotic dehydration for food preservation: Methods, modelling, and modern applications. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, <https://doi.org/10.3390/foods13172783>.
- Martínez, P. J., & Rus Martínez, E. (2004). *Operaciones de separacion en ingeniería*. Pearson Educación.
- Microsoft Corporation. (2021). Microsoft Excel. Obtenido de <https://office.microsoft.com/excel>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2020). *Análisis de mercado de aguaymanto*. Lima. Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1720425/An%C3%A1lisis%20de%20Mercado%20del%20Aguaymanto.pdf>

- Mohammadi, A., Rafieea, S., Keyhani, A., & Emam-Djomeh, Z. (2008). Measuring moisture diffusivity and activation energy of kiwifruit (cv. Hayward) during convective hot air drying. *10th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture*.
- Rafiee, S., Sharifi, M., Keyhani, A., Omid, M., Jafari, A., Mohtasebi, S., & Mobli, H. (2010). Modeling Effective Moisture Diffusivity of Orange Slice (Thompson Cv.). *International Journal of Food Properties*, 13.
- Ramadan, M., & Moersel, J. (2003). Oil Goldenberry (*Physalis peruviana* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(4).
- Rangel Morales, F. (2019). *Transferencia de masa convectiva*[Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ingeniería Química]. Obtenido de Callao, Peru.
- Rodríguez Espinoza, R., Alfaro Cruz, S., & Jamanca Gonzáles, N. (2017). Transferencia de masa. *Editorial UNAB*. Universidad Nacional de Barranca.
- Rodríguez Ulloa, S., & Rodríguez Ulloa, E. (2007). Efecto de la ingesta de *Physalis peruviana* L. (aguaymanto) sobre la glicemia postprandial en adultos jóvenes. *Revista Médica Vallejana*, 4(1), 43-53.
doi:<https://doi.org/10.18050/revistamedicavallejana.v4i1.2222>
- Rojas, A. A. (2007). Estudio de la cinética de transferencia de materia durante el secado convectivo del pimiento rojo Variedad húngaro (*Capsicum annum*): evaluación de La influencia de la temperatura sobre la calidad del producto terminado. *Memoria para optar al título de ingeniero en alimentos y licenciado en ciencias de los alimentos*. Universidad de la Serena. Facultad de ingeniería en alimentos. La Serena. .
- Rueda, I., Buenrostro, J., & Caballero, F. (2009). Determinación del coeficiente de difusión para la cáscara de manzana Red delicious. *Revista de Investigación de la Universidad Simón Bolívar*(8).

- Serratos Álvarez, I. N. (2022). *Introducción a la cinética química y catálisis (1ª ed.)*. Obtenido de Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Colección CBI.: <https://librosobi.izt.uam.mx/index.php/lcbi/catalog/view/33/81/518>
- Suárez Quirumbay, R. D. (2009). *Estudio comparativo de la incidencia de la forma geométrica del Alimento en la Velocidad de Secado aplicado al Melón Cantaloupe*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8670/1/D-39829.pdf>
- Tacanga Ramírez, W. A. (2015). Características y propiedades funcionales de Physalis peruviana "Aguaymanto". Tesis Profesional. Escuela Académico profesional de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Nacional de Trujillo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14414/4307>
- Torki Harchegan, M., Ghasemi Varnamkhasti, M., Ghanbarian, D., Sadeghi, M., & Tohidi, M. (2015). Dehydration characteristics and mathematical modelling of lemon slices drying undergoing oven treatment. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 52, 281–289. doi:<https://doi.org/10.1007/s00231-015-1546-y>.
- Treybal, R. E. (1981). *Operaciones de Transferencia de Masa (2da ed.)*. McGraw-Hill.
- Vásquez, J., Ochoa, M., & Bustos, M. (2013). Effect of chemical and physical pretreatments on the convective drying of cape gooseberry fruits (*Physalis peruviana*). *Journal of Food Engineering*, 119(3), 648–654. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.037>
- Vega, A., Andrés, A., & Fito, P. (2005). Modelado de la Cinética de Secado del Pimiento Rojo (*Capsicum annum* L. cv Lamuyo). *Información tecnológica*, 16(6), 3-11.
- Vega, A., Puente, L., Lemus, R., Miranda, M., & Torres, M. (2014). Mathematical Modeling of Thin-Layer Drying Kinetics of Cape Gooseberry (*Physalis peruviana* L). *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(2).

- Victor Aredo, A. A. (2012). Comparación entre el secado convectivo y osmoconvectivo en la pérdida de vitamina C de Aguaymanto (*Physalis peruviana*) con y sin pre-tratamiento de NaOH. *Agroindustrial Science*.
- Wu, S., Tsai, J., Chang, S., Lin, D., Wang, S., Huang, S., & Ng, L. (2006). Supercritical carbon dioxide extract exhibits enhanced antioxidant and anti-inflammatory activities of *Physalis peruviana*. *Journal of Ethnopharmacology*, 407–413.
- Zapata Montoya, J., & Castro Quintero, G. (1999). *Deshidratación osmótica de frutas y vegetales*. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/23782/24455>

APÉNDICE

APÉNDICE 1. Datos de secado de aguaymanto con cáscara

APÉNDICE 1.1 Datos de secado de aguaymanto con cáscara a 60°C

Tiempo (h)	Primera repetición Radio (cm) = 0.9				Segunda repetición Radio (cm) = 0.9				Tercera repetición Radio (cm) = 0.9			
	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)
0	3.09	4.605381166			3.163	4.605381166			2.997	4.6053812		
0.5	2.93	4.322202364	0.9300054	-0.072564911	3.012	4.336956459	0.9314975	-0.07096171	2.865	4.3583352	0.933107	-0.0692352
1	2.79	4.068936816	0.8674046	-0.142249799	2.871	4.087312622	0.8677880	-0.141807803	2.763	4.1681416	0.881608	-0.1260075
1.5	2.63	3.785032844	0.7972307	-0.226611199	2.719	3.818533558	0.7991951	-0.224150117	2.643	3.9444724	0.821045	-0.1971772
2	2.48	3.503666966	0.7276842	-0.317888154	2.564	3.542844552	0.7288388	-0.316302628	2.524	3.7217384	0.760735	-0.2734699
2.5	2.33	3.225020475	0.6588098	-0.417320371	2.417	3.283278746	0.6625972	-0.411587993	2.404	3.4971341	0.699919	-0.3567907
3	2.20	2.989340294	0.6005557	-0.50989996	2.289	3.056668052	0.6047657	-0.502914036	2.296	3.2953456	0.645280	-0.4380701
3.5	2.06	2.738068963	0.5384478	-0.619064815	2.152	2.814111337	0.5428648	-0.610894804	2.179	3.0765388	0.586034	-0.5343774
4	1.93	2.511815989	0.4825237	-0.728725137	2.024	2.586083219	0.4846717	-0.724283461	2.072	2.8756854	0.531648	-0.6317722
4.5	1.79	2.254380714	0.4188923	-0.870141493	1.892	2.353271295	0.4252577	-0.855059866	1.957	2.6609930	0.473516	-0.7475689
5	1.68	2.04806991	0.3678975	-0.999950987	1.784	2.16085596	0.3761530	-0.977759273	1.856	2.4724825	0.422473	-0.8616294
5.5	1.55	1.819278842	0.3113461	-1.166850062	1.658	1.938674717	0.3194519	-1.141148312	1.748	2.2701330	0.367682	-1.0005347
6	1.44	1.615868716	0.2610683	-1.342973251	1.542	1.732262318	0.2667751	-1.321348978	1.647	2.0818095	0.316690	-1.1498310
6.5	1.33	1.421885798	0.2131206	-1.545896931	1.433	1.540555695	0.2178513	-1.523942424	1.552	1.9039589	0.268533	-1.3147795
7	1.22	1.218113088	0.1627532	-1.815520449	1.320	1.338927103	0.1663953	-1.793388576	1.436	1.6866482	0.209692	-1.5621149
7.5	1.11	1.020141736	0.1138197	-2.173139829	1.215	1.152713	0.1188732	-2.129697783	1.325	1.4783142	0.153281	-1.8754802
8	1.01	0.84483194	0.0704875	-2.652319286	1.117	0.979787247	0.0747422	-2.59370951	1.229	1.2984064	0.104567	-2.2579220
8.5	0.93	0.693996624	0.0332049	-3.405058564	1.030	0.825819544	0.0354494	-3.339647587	1.119	1.0932516	0.049017	-3.0155754
9	0.86	0.559658921	0.0000000		0.952	0.686911973	0.0000000		1.022	0.9122217	0.000000	

APÉNDICE 1.2 Datos de secado de aguaymanto con cáscara a 65°C

Tiempo (h)	Primera repetición Radio (cm) = 0.8				Segunda repetición Radio (cm) = 0.8				Tercera repetición Radio (cm) = 0.8			
	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)
0	2.3703	4.6053812			2.2633	4.6053812			2.3734	4.6053812		
0.5	2.1507	4.0860622	0.8765113	-0.1318057	2.0568	4.0939548	0.8806289	-0.1271189	2.1579	4.0964237	0.8812280	-0.1264389
1	1.9398	3.5873174	0.7579149	-0.2771842	1.8495	3.5805472	0.7607954	-0.2733908	1.9585	3.6254904	0.7713294	-0.2596398
1.5	1.7425	3.1207344	0.6469662	-0.4354612	1.6545	3.0976022	0.6480721	-0.4337533	1.7678	3.1751044	0.6662257	-0.4061267
2	1.5468	2.6579351	0.5369173	-0.6219112	1.4681	2.6359564	0.5403202	-0.6155933	1.5952	2.7674661	0.5710979	-0.5601947
2.5	1.3560	2.2067236	0.4296238	-0.8448453	1.2933	2.2030396	0.4392739	-0.8226320	1.4226	2.3598278	0.4759700	-0.7424004
3	1.1882	1.8099033	0.3352640	-1.0928369	1.1431	1.8310481	0.3524481	-1.0428518	1.2755	2.0124141	0.3948964	-0.9291319
3.5	1.0485	1.4795351	0.2567058	-1.3598244	0.9997	1.4758978	0.2695532	-1.3109897	1.1402	1.6928691	0.3203263	-1.1384152
4	0.9193	1.1739978	0.1840522	-1.6925359	0.8702	1.1551728	0.1946933	-1.6363296	1.0031	1.3690730	0.2447641	-1.4074604
4.5	0.8254	0.9519393	0.1312489	-2.0306594	0.7700	0.9070134	0.1367709	-1.9894479	0.8955	1.1149485	0.1854608	-1.6849120
5	0.7504	0.7745762	0.0890738	-2.4182897	0.6919	0.7135878	0.0916238	-2.3900643	0.8006	0.8908183	0.1331570	-2.0162266
5.5	0.6960	0.6459289	0.0584828	-2.8390222	0.6339	0.5699426	0.0580958	-2.8456612	0.7201	0.7006973	0.0887897	-2.4214848
6	0.6557	0.5506258	0.0358207	-3.3292286	0.5947	0.4728583	0.0354356	-3.3400390	0.6583	0.5547411	0.0547288	-2.9053645
6.5	0.6288	0.4870116	0.0206939	-3.8779153	0.5671	0.4045030	0.0194809	-3.9383210	0.6135	0.4489346	0.0300375	-3.5053094
7	0.6068	0.4349851	0.0083226	-4.7887859	0.5467	0.3539795	0.0076883	-4.8680548	0.5804	0.3707606	0.0117945	-4.4401192
7.5	0.5920	0.3999855	0.0000000		0.5334	0.3210402	0.0000000		0.5590	0.3202191	0.0000000	

APÉNDICE 1.3 Datos de secado de aguaymanto con cáscara a 70°C

Tiempo (h)	Primera repetición Radio (cm) = 0.85				Segunda repetición Radio (cm) = 0.85				Tercera repetición Radio (cm) = 0.85			
	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)
0	2.5211	4.6053812			2.5738	4.6053812			2.4233	4.6053812		
0.5	2.2386	3.9772743	0.8543664	-0.1573951	2.2780	3.9611696	0.8446510	-0.1688317	2.1242	3.9135273	0.8333798	-0.1822659
1	1.9795	3.4011947	0.7207960	-0.3273992	2.0060	3.3687911	0.7018014	-0.3541049	1.8470	3.2723307	0.6789594	-0.3871940
1.5	1.7674	2.9296143	0.6114548	-0.4919143	1.7892	2.8966307	0.5879418	-0.5311273	1.6189	2.7447083	0.5518913	-0.5944042
2	1.5638	2.4769327	0.5064955	-0.6802398	1.5980	2.4802234	0.4875269	-0.7184098	1.4105	2.2626543	0.4357974	-0.8305777
2.5	1.3792	2.0664955	0.4113311	-0.8883569	1.4292	2.1126003	0.3988761	-0.9191044	1.2299	1.8449050	0.3351902	-1.0930570
3	1.1903	1.6464976	0.3139499	-1.1585219	1.2378	1.6957576	0.2983562	-1.2094673	1.0546	1.4394153	0.2375355	-1.4374381
3.5	1.0399	1.3121002	0.2364161	-1.4421618	1.0955	1.3858478	0.2236227	-1.4977950	0.9355	1.1639228	0.1711882	-1.7649915
4	0.8992	0.9992697	0.1638829	-1.8086033	0.9720	1.1168818	0.1587627	-1.8403448	0.8412	0.9457957	0.1186563	-2.1315238
4.5	0.7896	0.7555864	0.1073822	-2.2313608	0.8744	0.9043225	0.1075049	-2.2302192	0.7703	0.7817955	0.0791599	-2.5362850
5	0.7133	0.5859420	0.0680483	-2.6875382	0.8043	0.7516544	0.0706896	-2.6494573	0.7212	0.6682214	0.0518077	-2.9602165
5.5	0.6585	0.4641004	0.0397979	-3.2239407	0.7540	0.6421079	0.0442729	-3.1173829	0.6859	0.5865683	0.0321431	-3.4375588
6	0.6225	0.3840585	0.0212393	-3.8519019	0.7182	0.5641405	0.0254714	-3.6702009	0.6609	0.5287403	0.0182163	-4.0054409
6.5	0.5976	0.3286961	0.0084029	-4.7791750	0.6900	0.5027248	0.0106612	-4.5411438	0.6422	0.4854850	0.0077990	-4.8537587
7	0.5813	0.2924549	0.0000000		0.6697	0.4585142	0.0000000		0.6282	0.4531013	0.0000000	

APÉNDICE 1.4 Datos de secado de aguaymanto con cáscara a 75°C

Tiempo (h)	Primera repetición Radio (cm) = 0.8				Segunda repetición Radio (cm) = 0.7				Tercera repetición Radio (cm) = 0.7			
	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)
0	2.0255	4.6053812			1.6834	4.6053812			1.8122	4.6053812		
0.5	1.7812	3.9293038	0.8416721	-0.1723648	1.3708	3.5644865	0.7732318	-0.2571764	1.5167	3.6913595	0.7973807	-0.2264231
1	1.5199	3.2061806	0.6723266	-0.3970110	1.1094	2.6940774	0.5836054	-0.5385303	1.2232	2.7835240	0.5961327	-0.5172919
1.5	1.2966	2.5882188	0.5276086	-0.6394006	0.8716	1.9022515	0.4110990	-0.8889212	0.9625	1.9771435	0.4173752	-0.8737697
2	1.0916	2.0209006	0.3947505	-0.9295014	0.6701	1.2312973	0.2649256	-1.3283061	0.7473	1.3115006	0.2698162	-1.3100142
2.5	0.9005	1.4920492	0.2709008	-1.3060024	0.5052	0.6822137	0.1453029	-1.9289350	0.5817	0.7992772	0.1562671	-1.8561883
3	0.7558	1.0916056	0.1771225	-1.7309138	0.4001	0.3322520	0.0690606	-2.6727713	0.4811	0.4881078	0.0872874	-2.4385487
3.5	0.6529	0.8068395	0.1104342	-2.2033352	0.3367	0.1211428	0.0230686	-3.7692849	0.4207	0.3012823	0.0458722	-3.0818963
4	0.5839	0.6158885	0.0657161	-2.7224108	0.3049	0.0152553	0.0000000		0.3858	0.1933319	0.0219419	-3.8193593
4.5	0.5396	0.4932924	0.0370058	-3.2966797					0.3677	0.1373461	0.0095310	-4.6532064
5	0.5094	0.4097167	0.0174336	-4.0493576					0.3597	0.1126010	0.0040455	-5.5101429
5.5	0.4937	0.3662684	0.0072586	-4.9255701					0.3566	0.1030123	0.0019199	-6.2554758
6	0.4825	0.3352735	0.0000000						0.3538	0.0943515	0.0000000	

APÉNDICE 2. Datos de secado de aguaymanto sin cáscara

APÉNDICE 2.1 Datos de secado de aguaymanto sin cáscara a 60°C

Tiempo (h)	Primera repetición Radio (cm) = 0.8				Segunda repetición Radio (cm) = 0.8				Tercera repetición Radio (cm) = 0.9			
	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)
0	2.3270	4.6053812			2.2644	4.6053812			3.1299	4.6053812		
0.5	1.7865	3.3034007	0.7156311	-0.3345905	1.7341	3.2926565	0.7141548	-0.3366555	2.5190	3.5113119	0.7614324	-0.2725539
1	1.4316	2.4485018	0.5289104	-0.6369362	1.3535	2.3505049	0.5090017	-0.6753039	2.1302	2.8150046	0.6095989	-0.4949540
1.5	1.1307	1.7236805	0.3706003	-0.9926311	1.0248	1.5368286	0.3318241	-1.1031504	1.7789	2.1858566	0.4724099	-0.7499083
2	0.9225	1.2221591	0.2610617	-1.3429984	0.8218	1.0343147	0.2224019	-1.5032692	1.4941	1.6758043	0.3611903	-1.0183503
2.5	0.7796	0.8779352	0.1858789	-1.6826600	0.6929	0.7152308	0.1529215	-1.8778304	1.2809	1.2939815	0.2779318	-1.2803795
3	0.6812	0.6409049	0.1341085	-2.0091062	0.6137	0.5191761	0.1102307	-2.2051798	1.1353	1.0332245	0.2210724	-1.5092652
3.5	0.5999	0.4450658	0.0913348	-2.3932237	0.5503	0.3622334	0.0760565	-2.5762789	1.0159	0.8193893	0.1744445	-1.7461487
4	0.5404	0.3017396	0.0600305	-2.8129023	0.5045	0.2488583	0.0513691	-2.9687180	0.9235	0.6539089	0.1383606	-1.9778919
4.5	0.4875	0.1743117	0.0321987	-3.4358303	0.4669	0.1557819	0.0311018	-3.4704906	0.8367	0.4984576	0.1044636	-2.2589164
5	0.4557	0.0977104	0.0154680	-4.1689828	0.4434	0.0976091	0.0184347	-3.9935221	0.7792	0.3954800	0.0820088	-2.5009284
5.5	0.4263	0.0268904	0.0000000		0.4230	0.0471102	0.0074386	-4.9010792	0.7247	0.2978752	0.0607256	-2.8013902
6					0.4092	0.0129491	0.0000000		0.6833	0.2237314	0.0445581	-3.1109607
6.5									0.6503	0.1646313	0.0316710	-3.4523530
7									0.6228	0.1153811	0.0209318	-3.8664869
7.5									0.6014	0.0770556	0.0125747	-4.3760695
8									0.5872	0.0516246	0.0070293	-4.9576642
8.5									0.5770	0.0333573	0.0030460	-5.7939122
9									0.5692	0.0193881	0.0000000	

APÉNDICE 2.2 Datos de secado de aguaymanto sin cáscara a 65°C

Tiempo (h)	Primera repetición Radio (cm) = 0.85				Segunda repetición Radio (cm) = 0.85				Tercera repetición Radio (cm) = 0.8			
	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)
0	2.6095	4.6053812			2.6075	4.6053812			2.4303	4.6053812		
0.5	1.9643	3.2194483	0.6975011	-0.3602513	2.0149	3.3314602	0.7149317	-0.3355683	1.8832	3.3435188	0.7179170	-0.3314013
1	1.5776	2.3887907	0.5161986	-0.6612637	1.6363	2.5175782	0.5328074	-0.6295953	1.5118	2.4869009	0.5264243	-0.6416477
1.5	1.2944	1.7804581	0.3834216	-0.9586200	1.3817	1.9702608	0.4103329	-0.8907865	1.2077	1.7855075	0.3696313	-0.9952491
2	1.0774	1.3143275	0.2816822	-1.2669757	1.1643	1.5029129	0.3057533	-1.1849766	1.0104	1.3304436	0.2679041	-1.3171262
2.5	0.9104	0.9556003	0.2033851	-1.5926542	0.9959	1.1409009	0.2247450	-1.4927887	0.8645	0.9939316	0.1926785	-1.6467322
3	0.7939	0.7053505	0.1487646	-1.9053901	0.8805	0.8928238	0.1692322	-1.7764833	0.7675	0.7702053	0.1426656	-1.9472516
3.5	0.7005	0.5047210	0.1049744	-2.2540383	0.7866	0.6909656	0.1240620	-2.0869742	0.6903	0.5921469	0.1028616	-2.2743713
4	0.6246	0.3416827	0.0693891	-2.6680256	0.7092	0.5245777	0.0868289	-2.4438153	0.6269	0.4459176	0.0701727	-2.6567956
4.5	0.5728	0.2304128	0.0451029	-3.0988085	0.6554	0.4089230	0.0609486	-2.7977240	0.5817	0.3416657	0.0468677	-3.0604255
5	0.5354	0.1500751	0.0275681	-3.5910960	0.6139	0.3197099	0.0409852	-3.1945446	0.5469	0.2614010	0.0289250	-3.5430497
5.5	0.5080	0.0912181	0.0147217	-4.2184299	0.5824	0.2519939	0.0258322	-3.6561331	0.5221	0.2042009	0.0161382	-4.1265674
6	0.4942	0.0615748	0.0082517	-4.7973389	0.5604	0.2047001	0.0152492	-4.1832294	0.5081	0.1719105	0.0089198	-4.7194790
6.5	0.4855	0.0428866	0.0041727	-5.4791866	0.5452	0.1720245	0.0079373	-4.8361857	0.5001	0.1534589	0.0047951	-5.3401711
7	0.4807	0.0325759	0.0019223	-6.2542509	0.5356	0.1513872	0.0033192	-5.7080247	0.4944	0.1403121	0.0018561	-6.2892516
7.5	0.4766	0.0237688	0.0000000		0.5287	0.1365542	0.0000000		0.4908	0.1320088	0.0000000	

APÉNDICE 2.3 Datos de secado de aguaymanto sin cáscara a 70°C

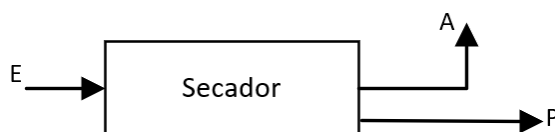
Tiempo (h)	Primera repetición Radio (cm) = 0.9				Segunda repetición Radio (cm) = 0.9				Tercera repetición Radio (cm) = 0.9			
	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)
0	3.1367	4.6053812			3.0852	4.6053812			3.0495	4.6053812		
0.5	2.3350	3.1727182	0.6765252	-0.3907856	2.3790	3.3223136	0.7141238	-0.3366990	2.2993	3.2264151	0.6886362	-0.3730422
1	1.8688	2.3396041	0.4884199	-0.7165797	1.9361	2.5176256	0.5348338	-0.6257992	1.8660	2.4299529	0.5087989	-0.6757025
1.5	1.5708	1.8070688	0.3681811	-0.9991804	1.6180	1.9396819	0.4060640	-0.9012444	1.5607	1.8687714	0.3820868	-0.9621074
2	1.3482	1.4092756	0.2783651	-1.2788218	1.3776	1.5029084	0.3087479	-1.1752301	1.3341	1.4522509	0.2880385	-1.2446611
2.5	1.1835	1.1149516	0.2119109	-1.5515893	1.1951	1.1713312	0.2348703	-1.4487220	1.1652	1.1417905	0.2179381	-1.5235443
3	1.0391	0.8569043	0.1536475	-1.8730942	1.0379	0.8857206	0.1712343	-1.7647227	1.0142	0.8642327	0.1552669	-1.8626099
3.5	0.9377	0.6756993	0.1127340	-2.1827240	0.9295	0.6887728	0.1273530	-2.0607929	0.9220	0.6947570	0.1170001	-2.1455806
4	0.8551	0.5280905	0.0794061	-2.5331805	0.8404	0.5268904	0.0912845	-2.3937747	0.8417	0.5471551	0.0836723	-2.4808475
4.5	0.7917	0.4147927	0.0538250	-2.9220163	0.7684	0.3960764	0.0621382	-2.7783943	0.7813	0.4361319	0.0586038	-2.8369557
5	0.7433	0.3283004	0.0342963	-3.3727172	0.7141	0.2974208	0.0401571	-3.2149569	0.7311	0.3438577	0.0377687	-3.2762735
5.5	0.7081	0.2653969	0.0200936	-3.9073535	0.6737	0.2240196	0.0238028	-3.7379530	0.6954	0.2782365	0.0229518	-3.7743601
6	0.6847	0.2235804	0.0106520	-4.5420045	0.6469	0.1753277	0.0129539	-4.3463590	0.6715	0.2343051	0.0130323	-4.3403251
6.5	0.6685	0.1946304	0.0041156	-5.4929807	0.6272	0.1395355	0.0049792	-5.3024956	0.6539	0.2019540	0.0057276	-5.1624644
7	0.6583	0.1764027	0.0000000		0.6149	0.1171881	0.0000000		0.6401	0.1765878	0.0000000	

APÉNDICE 2.4 Datos de secado de aguaymanto sin cáscara a 75°C

Tiempo (h)	Primera repetición Radio (cm) = 0.85				Segunda repetición Radio (cm) = 0.85				Tercera repetición Radio (cm) = 0.85			
	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)	Peso (g)	Hbs (g agua/g ss)	MR	LN(MR)
0	2.4738	4.6053812			2.3560	4.6053812			2.2221	4.6053812		
0.5	1.7328	2.9263499	0.6241250	-0.4714046	1.6629	2.9563618	0.6314474	-0.4597406	1.6057	3.0504750	0.6519874	-0.4277301
1	1.2908	1.9248225	0.3999188	-0.9164937	1.2408	1.9521040	0.4069978	-0.8989476	1.2041	2.0374148	0.4252484	-0.8550818
1.5	1.0099	1.2883315	0.2574313	-1.3570025	0.9928	1.3620638	0.2751250	-1.2905299	0.9402	1.3717112	0.2762534	-1.2864368
2	0.8265	0.8727656	0.1644009	-1.8054471	0.8201	0.9511770	0.1832926	-1.6966717	0.7708	0.9443895	0.1806120	-1.7114041
2.5	0.7010	0.5883953	0.1007406	-2.2952065	0.6967	0.6575845	0.1176752	-2.1398269	0.6578	0.6593401	0.1168135	-2.1471770
3	0.6208	0.4066702	0.0600588	-2.8124305	0.6124	0.4570184	0.0728491	-2.6193652	0.5816	0.4671211	0.0737918	-2.6065079
3.5	0.5665	0.2836318	0.0325150	-3.4260549	0.5534	0.3166460	0.0414761	-3.1826373	0.5261	0.3271190	0.0424571	-3.1592613
4	0.5365	0.2156549	0.0172974	-4.0572018	0.5168	0.2295675	0.0220143	-3.8160653	0.4917	0.2403429	0.0230352	-3.7707305
4.5	0.5210	0.1805334	0.0094349	-4.6633376	0.4962	0.1805561	0.0110603	-4.5043932	0.4702	0.1861078	0.0108966	-4.5193075
5	0.5111	0.1581010	0.0044131	-5.4231762	0.4850	0.1539091	0.0051048	-5.2775831	0.4604	0.1613867	0.0053636	-5.2281208
5.5	0.5062	0.1469981	0.0019276	-6.2514982	0.4792	0.1401098	0.0020206	-6.2043451	0.4545	0.1465036	0.0020325	-6.1984787
6	0.5024	0.1383877	0.0000000		0.4754	0.1310688	0.0000000		0.4509	0.1374224	0.0000000	

APÉNDICE 3. Balance de materia

Diagrama de flujo del proceso del secador.



El balance global es: $E = A + P$

Se usó una base de cálculo de 1 kg de aguaymanto de entrada.

Humedad en base húmeda del aguaymanto inicial es: 82.16%

Para hacer el balance de materia se usaron los datos de los apéndices 1 y 2, la primera repetición de cada caso, en el cual se halló el contenido de humedad en base húmeda.

Ejemplo:

$$\frac{0.5596 \text{ g agua}}{0.5596 \text{ g agua} + 1 \text{ g ss}} \times 100 = 35.88\%$$

Se hizo el mismo procedimiento para todas las temperaturas y también para el aguaymanto con cáscara y sin cáscara.

Datos para el aguaymanto con cáscara

T °C	Base húmeda	
	inicial	Base húmeda final
60	0.8216	0.3588
65	0.8216	0.2857
70	0.8216	0.2263
75	0.8216	0.2510

Datos para el aguaymanto sin cáscara

T °C	Base húmeda	
	inicial	Base húmeda final
60	0.8216	0.0261
65	0.8216	0.0232
70	0.8216	0.1499
75	0.8216	0.1215

El balance para el componente del agua(A):

$$1(0.8216) = P(0.3588) + A$$

Sustituyendo con: $1 = A + P$

$$0.8216 = P(0.3588) * (1 - P)$$

$$0.1784 = 0.6412P$$

$$P = 0.2782 \text{ kg}$$

$$A = 0.7217 \text{ kg}$$

Se hizo el mismo procedimiento para todas las temperaturas y también para el aguaymanto con cáscara y sin cáscara.

Datos para el aguaymanto con cáscara

T °C	P(aguaymanto)	
	seco)	A(agua)
60	0.2782	0.7218
65	0.2498	0.7502
70	0.2306	0.7694
75	0.2382	0.7618

Datos para el aguaymanto sin cáscara

T °C	P(aguaymanto)	
	seco)	A(agua)
60	0.1832	0.8168
65	0.1826	0.8174
70	0.2099	0.7901
75	0.2031	0.7969

APÉNDICE 4. Balance de energía

Se realizó el balance de energía con consideración de los siguientes datos:

Presión atmosférica: $P=68.4$ kPa

Temperatura de entrada del aire: $T_{e,1}=15^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa del aire de entrada: 60%

Temperatura de salida del aire: $T_{a2}=30^{\circ}\text{C}$

Velocidad del aire: $v=2.5$ m/s

Calor específico de sólidos secos: $C_{p,ss}=1.5$ kJ/(kg·K) $C_{p,ss}$

Calor específico del agua líquida: $C_{p,agua}=4.18$ kJ/(kg·K) $C_{p,agua}$

Calor latente de vaporización: $\lambda(T)=2508-2.42 \times T$ kJ/kg

Temperatura inicial del producto: $T_{inicial}=20^{\circ}\text{C}$

Temperatura final del producto: $T_{final}=60^{\circ}\text{C}$, 65°C , 70°C y 75°C

La ecuación general es :

$$Q_{\text{producto}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

Donde:

$$Q_1 = m_{ss} * C_{p,ss} * (T_f - T_i)$$

$$Q_2 = m_{\text{agua},p} * C_{p,l} * (T_f - T_i)$$

$$Q_3 = m_{\text{agua},\text{evap}} * C_{p,l} * (T_f - T_i)$$

$$Q_4 = m_{\text{agua},\text{evap}} * \lambda(T_f)$$

El agua que queda y el que se evapora suman el agua total inicial por lo tanto:

$$Q_2 + Q_3 = (m_{\text{agua},P} + m_{\text{agua},\text{evap}}) * C_{p,l} * (T_f - T_i)$$

$$Q_2 + Q_3 = 0.8216 * 4.18 * (T_f - 15)$$

Quedando como ecuación final:

$$Q_{\text{Producto}} = m_{ss} * C_{p,ss} * (T_f - 15) + m_{\text{agua},\text{total}} * C_{p,l} * (T_f - 15) + m_{\text{agua},\text{evap}} * \lambda(T_f)$$

Donde:

$$m_{ss}: 0.1784 \text{ kg}$$

$$m_{\text{agua},\text{total}} = 0.8216 \text{ kg}$$

$$m_{\text{agua},\text{evap}} = A \text{ (calculado en el balance de materia y propio para cada vaso)}$$

Entonces se tiene:

$$Q_{\text{Producto}} = 0.1784 * 1.5 * (T_f - 15) + 0.8216 * 4.18 * (T_f - 15) + m_{\text{agua},\text{evap}} * \lambda(T_f)$$

$$Q_{\text{Producto}} = 3.7019 * (T_f - 15) + A * (2508 - 2.42 * T_f)$$

Donde:

$$Q_{\text{Sensible}}: 3.7019 * (T_f - 15)$$

$$Q_{\text{Latente}}: A * (2508 - 2.42 * T_f)$$

Datos para el aguaymanto con cáscara

T_f °C	A	Q_{Sensible} (kJ/kg)	Q_{Latente} (kJ/kg)	Q_{Producto} (kJ/kg)
60	0.7218	166.59	1705	1871.6
65	0.7502	185.10	1763.3	1948.4
70	0.7694	2033.60	1799.1	2002.7
75	0.7618	222.11	1772.4	1994.5

Datos para el aguaymanto sin cáscara

T_f °C	A	Q_{Sensible} (kJ/kg)	Q_{Latente} (kJ/kg)	Q_{Producto} (kJ/kg)
60	0.8168	166.59	1929.7	2096.3
65	0.8174	185.10	1921.1	2106.2
70	0.7901	2033.60	1847.8	2051.4
75	0.7969	222.11	1854.3	2076.4

APÉNDICE 5. ANOVA unidireccional para la evaluación del coeficiente de difusión efectiva

APÉNDICE 5.1 ANOVA para el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto con cáscara a las diferentes temperaturas de secado

HIPÓTESIS ESTADÍSTICA:

Para las medias:

Ho (Hipótesis nula): $\bar{u}_1 = \bar{u}_2 = \bar{u}_3 = \bar{u}_4$ No hay diferencia entre las medias de la difusividad a las diferentes temperaturas de secado ($p > 0.05$).

H1 (Hipótesis alternante): $\bar{u}_1 \neq \bar{u}_2 \neq \bar{u}_3 \neq \bar{u}_4$ hay diferencia entre las medias de la difusividad a las diferentes temperaturas de secado ($p \leq 0.05$).

Resumen estadístico

T °C	N	Suma	Promedio	Varianza
60	3	2.2829E-09	7.6097E-10	3.3871E-21
65	3	3.5126E-09	1.1709E-09	6.4751E-21
70	3	4.3642E-09	1.4547E-09	3.5495E-21
75	3	4.9231E-09	1.641E-09	5.0905E-21

Prueba de medias

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.3201E-18	3	4.4004E-19	95.1326131	1.3454E-06	4.06618055
Dentro de los grupos	3.7004E-20	8	4.6255E-21			
Total	1.3571E-18	11				

Como $F_{tab} > F_{cal}$ se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay diferencia entre las medias de la difusividad a las diferentes temperaturas de secado.

APÉNDICE 5.2 ANOVA para el coeficiente de difusión efectiva del aguaymanto sin cáscara a las diferentes temperaturas de secado

HIPÓTESIS ESTADÍSTICA:

Para las medias:

Ho (Hipótesis nula): $\bar{u}_1 = \bar{u}_2 = \bar{u}_3 = \bar{u}_4$ No hay diferencia entre las medias de la difusividad a las diferentes temperaturas de secado ($p > 0.05$).

H1 (Hipótesis alternante): $\bar{u}_1 \neq \bar{u}_2 \neq \bar{u}_3 \neq \bar{u}_4$ hay diferencia entre las medias de la difusividad a las diferentes temperaturas de secado ($p \leq 0.05$).

Resumen estadístico

T °C	N	Suma	Promedio	Varianza
60	3	4.4146E-09	1.4715E-09	3.1194E-21
65	3	4.889E-09	1.6297E-09	1.6354E-20
70	3	5.2071E-09	1.7357E-09	1.8258E-21
75	3	6.833E-09	2.2777E-09	7.841E-22

Prueba de medias

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.1021E-18	3	3.6738E-19	66.5438577	5.3393E-06	4.06618055
Dentro de los grupos	4.4166E-20	8	5.5208E-21			
Total	1.1463E-18	11				

Como $F_{tab} > F_{cal}$ se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay diferencia entre las medias de la difusividad a las diferentes temperaturas de secado.

APÉNDICE 6. ANOVA bidireccional para la evaluación del coeficiente de difusión efectiva

HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS:

Para la temperatura:

Ho (Hipótesis nula): $\bar{u}_1 = \bar{u}_2 = \bar{u}_3 = \bar{u}_4$ La temperatura no influye en la difusión efectiva del aguaymanto ($p > 0.05$).

H1 (Hipótesis alternante): $\bar{u}_1 \neq \bar{u}_2 \neq \bar{u}_3 \neq \bar{u}_4$ La temperatura influye en la difusión efectiva del aguaymanto ($p \leq 0.05$).

Para el tipo de muestra:

Ho (Hipótesis nula): $\bar{u}_1 = \bar{u}_2$ La condición de la cáscara no influye en la difusión efectiva del aguaymanto ($p > 0.05$).

H1 (Hipótesis alternante): $\bar{u}_1 \neq \bar{u}_2$ La condición de la cáscara influye en la difusión efectiva del aguaymanto ($p \leq 0.05$).

Para la interacción:

Ho: No hay un efecto significativo de interacción entre la temperatura y la condición de la cáscara sobre el coeficiente de difusión efectiva.

H1: Hay un efecto significativo de interacción entre la temperatura y la condición de la cáscara sobre el coeficiente de difusión efectiva.

Origen de variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Temperatura	1.63328E-18	1	1.6333E-18	321.9442	5.0657E-12	4.49399848
Condición de cáscara	2.25605E-18	3	7.5202E-19	148.234138	6.9556E-12	3.23887152
Interacción	1.66195E-19	3	5.5398E-20	10.9198467	0.0003776	3.23887152
Dentro del grupo	8.11707E-20	16	5.0732E-21			
Total	4.1367E-18	23				

Se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay efecto significativo de interacción entre la temperatura y la condición de la cáscara sobre el coeficiente de difusión efectiva.

APÉNDICE 7. Prueba estadística Tukey

APÉNDICE 7.1 Prueba estadística Tukey para el aguaymanto con cáscara

TUKEY HSD/KRAMER			alpha	0.05	
<i>group</i>	<i>mean</i>	<i>n</i>	<i>ss</i>	<i>df</i>	<i>q-crit</i>
60	7.60969E-10	3	6.77422E-21		
65	1.17088E-09	3	1.29502E-20		
70	1.45473E-09	3	7.09908E-21		
75	1.64103E-09	3	1.01809E-20		
		12	3.70044E-20	8	4.529

Q TEST

<i>group 1</i>	<i>group 2</i>	<i>mean</i>	<i>std err</i>	<i>q-stat</i>	<i>lower</i>	<i>upper</i>	<i>p-value</i>	<i>mean-crit</i>	<i>Cohen d</i>	
60	65	4.09908E-10	3.92664E-11	10.43915569	2.3207E-10	5.87745E-10	0.00035535	1.7784E-10	6.02704935	Si hay diferencias
60	70	6.93761E-10	3.92664E-11	17.66806733	5.15924E-10	8.71599E-10	7.4011E-06	1.7784E-10	10.2006634	Si hay diferencias
60	75	8.80061E-10	3.92664E-11	22.4125875	7.02224E-10	1.0579E-09	1.1933E-06	1.7784E-10	12.9399134	Si hay diferencias
65	70	2.83853E-10	3.92664E-11	7.228911638	1.06016E-10	4.61691E-10	0.0040394	1.7784E-10	4.17361408	Si hay diferencias
65	75	4.70153E-10	3.92664E-11	11.9734318	2.92316E-10	6.47991E-10	0.00013396	1.7784E-10	6.91286408	Si hay diferencias
70	75	1.863E-10	3.92664E-11	4.744520166	8.4627E-12	3.64138E-10	0.0403663	1.7784E-10	2.73925	Si hay diferencias

APÉNDICE 7.2 Prueba estadística Tukey para el aguaymanto sin cáscara

TUKEY HSD/KRAMER			alpha	0.05		
group	mean	n	ss	df	q-crit	
60	1.47155E-09	3	6.23887E-21			
65	1.62965E-09	3	3.27078E-20			
70	1.7357E-09	3	3.65152E-21			
75	2.27767E-09	3	1.56821E-21			
		12	4.41664E-20	8	4.529	

Q TEST

group 1	group 2	mean	std err	q-stat	lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d	
60	65	1.58105E-10	4.28983E-11	3.685573274	-3.61816E-11	3.5239E-10	0.11590379	1.9429E-10	2.12786672	No hay diferencias
60	70	2.64152E-10	4.28983E-11	6.157620797	6.98651E-11	4.5844E-10	0.01043321	1.9429E-10	3.55510402	Si hay diferencia
60	75	8.0612E-10	4.28983E-11	18.7914047	6.11833E-10	1.0004E-09	4.6204E-06	1.9429E-10	10.8492226	Si hay diferencia
65	70	1.06047E-10	4.28983E-11	2.472047523	-8.82398E-11	3.0033E-10	0.36177618	1.9429E-10	1.4272373	No hay diferencias
65	75	6.48015E-10	4.28983E-11	15.10583143	4.53728E-10	8.423E-10	2.4197E-05	1.9429E-10	8.72135584	Si hay diferencia
70	75	5.41968E-10	4.28983E-11	12.6337839	3.47682E-10	7.3625E-10	9.0744E-05	1.9429E-10	7.29411854	Si hay diferencia