

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



TESIS PARA TÍTULO PROFESIONAL

**MODELADO DE LA CINÉTICA DE SECADO POR CONVECCIÓN FORZADA DE
LA SEMILLA DE PAJURO (*Erythrina edulis* Triana)**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

ELABORADO POR

ESPERANZA SALAZAR RAMIRES

TINGO MARÍA – PERÚ

2020



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
FACULTAD DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
Carretera Central Km. 1.21. Teléfono (062) 561385
Apartado Postal 156 Tingo María E.mail; fia@unas.edu.pe

"Año de la Universalización de la Salud"


ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 001-2020


Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos en acto público el 08 de enero del 2020, a horas 05:00 p.m., en la Sala de Grados de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada en la ciudad de Tingo María, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco, para calificar la tesis presentada por la Bach. **SALAZAR RAMIRES, Esperanza**, titulada:


"MODELADO DE LA CINÉTICA DE SECADO POR CONVECCIÓN FORZADO DE LA SEMILLA DE PAJURO (*Erythrina edulis* Triana)"

Después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las preguntas formuladas, lo declaran **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO**; en consecuencia, la sustentante, queda apta para obtener el título de **Ingeniero en Industrias Alimentarias**, de conformidad con el artículo 45° numeral 45.2, de la Ley Universitaria 30220; los artículos 132 inciso "k" y 135 inciso "f" del Estatuto de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Tingo María, 10 de enero 2020


.....
M.Sc. Williams Vicente Roldán Carbajal
Presidente


.....
M.Sc. Jaime Eduardo Basilio Atencio
Miembro


.....
M.Sc. Yolanda Jesús Ramirez Trujillo
Miembro


.....
M.Sc. Luz Milagros Follegatti Romero
Asesor


.....
M.Sc. Humberto Hugo Rivera Rojas
Asesor

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso por darme la vida y la salud. Agradecerle por la infinita bondad que tiene conmigo y por permitirme cumplir una meta más

A mi padre Calatayu Salazar Condezo por ser un ejemplo de superación y guía en cada momento de mi existencia. A mi madre y amiga Sonia Paula Ramírez Reyes, con todo mi amor por apoyarme incondicionalmente y por sus consejos durante el proceso de mi carrera profesional.

A mis hermanos: José Luis, Eduardo y Liseth por su apoyo, cariño y que nuestra unidad nunca se rompa. A mis tíos Cristina, Leovigildo Ramírez Reyes por su apoyo moral y a mi hermosa Pitu.

AGRADECIMIENTO

- A Dios por darme la vida y la oportunidad de culminar mi objetivo.
- A mi familia por su cariño y apoyo moral en todo momento.
- A la Ing. M.Sc. Follegatti Luz Romero, Asesora, por sus orientaciones, por la confianza, paciencia, los buenos consejos y tiempo durante el desarrollo de la tesis y al Ing. M.Sc. Humberto H. Rivera Rojas, por el aporte durante la investigación y la culminación de la tesis.
- Al Ing. M.Sc. Jaime Eduardo Basilio Atencio, Miembro de Jurado Calificador, por la orientación, enseñanza durante la ejecución, redacción de la tesis y su apoyo. A la Ing. M. Sc. Yolanda Jesús Ramírez Trujillo, Ing. M.Sc. Williams Vicente Roldan Carbajal por su apoyo en la conducción del presente trabajo de investigación. Al Ing. M.Sc. Hans Tafur Pereda por sus aportes y sugerencias para mejorar la presente tesis.
- A la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias por brindarme las herramientas y conocimientos necesarios para lograr culminar mis estudios y defenderme en el campo profesional.
- A mis amigos: María Chumacero Rodríguez y Ely Solis Córdova por su amistad y haber compartido buenos momentos, académicos y extras propios de la vida universitaria.

INDÍCE GENERAL

	Página
RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	2
2.1. Aspectos generales del pajuro	2
2.1.1. Pajuro (<i>Erythrina edulis</i> Triana).....	2
2.1.2. Clasificación taxonómica.....	3
2.1.3. Valor nutricional del pajuro.....	4
2.2. Secado	5
2.2.1. Cinética de secado.....	5
2.2.2. Secado de aire caliente.....	6
2.2.3. Modelado del proceso de secado	7
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
3.1. Lugar de ejecución	9
3.2. Materia prima	9
3.3. Equipo, materiales y reactivos.....	9
3.3.1. Equipos de laboratorio	9
3.3.2. Materiales de laboratorio.....	10
3.3.3. Reactivos y solventes	10
3.4. Métodos de análisis.....	10
3.4.1. Análisis fisicoquímico de la semilla de pajuro	10

3.4.2. Determinación de la Difusividad efectiva y la energía de activación.....	11
3.5. Metodología experimental	12
3.5.1. Evaluación fisicoquímica de la semilla de pajuro	12
3.5.2. Secado de las semillas de pajuro.....	12
3.5.3. Secador.....	14
3.5.4. Modelamiento de la cinética de secado	15
3.5.5. Curvas de secado	16
3.5.6. Difusividad efectiva de la humedad.....	16
3.5.7. Cálculo de la energía de activación	17
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1. Características fisicoquímicas de la semilla de pajuro	20
4.2. Cinética de secado de las semillas de pajuro.....	21
4.3. Modelado de la cinética de secado	24
4.4. Difusividad efectiva del secado de semillas de pajuro.....	33
4.5. Energía de activación para la difusividad efectiva	35
V. CONCLUSIONES	38
VI. RECOMENDACIONES.....	39
ABSTRACT	38
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXO	38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Valor nutricional de la semilla de pajuro.	4
2. Modelos matemáticos empleados para las curvas de secado	15
3. Composición fisicoquímica de la semilla de pajuro	20
4. Parámetros estimados de los modelos y parámetros estadísticos para la velocidad de aire de secado de 1,8 m/s.....	25
5. Parámetros estimados de los modelos y parámetros estadísticos para la velocidad de aire de secado de 2,2 m/s.	27
6. Parámetros estimados de los modelos y parámetros estadísticos para la velocidad de aire de secado de 2,7 m/s.	29
7. Difusividad efectiva (D_{eff}) de la semilla de pajuro.....	34
8. Energía de activación de la semilla de pajuro	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Vaina y semillas de pajuro	3
2. Flujograma para el secado de la semilla de pajuro.....	13
3. Esquema experimental para el secado a temperaturas dadas, con tres velocidades y ajustados a ocho modelos matemáticos.....	14
4. Curva de secado de la semilla de pajuro a 40, 50, 60 y 70 °C y a velocidades 1,8; 2,2 y 2,7 m/s.....	21
5. Curva de secado de la semilla de pajuro, velocidad de aire de 1,8 m/s	22
6. Curva de secado de la semilla de pajuro, velocidad de aire de 2,2 m/s.....	23
7. Curva de secado experimental de la semilla de pajuro, velocidad de aire de 2,7 m/s.....	23
8. Datos experimentales de la relación de humedad predicho por el modelo de Midilli a la velocidad de aire 1,8 m/s.....	32
9. Datos experimentales de la relación de humedad predicho por el modelo Midilli a la velocidad de aire 2,2 m/s.....	32
10. Datos experimentales de la relación de humedad predicho por el modelo Midilli a la velocidad de aire 2,7 m/s	33

NOMENCLATURA

$a,,,h,g,k,n$	Parámetros de los modelos matemáticos
MR	Moisture rate o tasa de pérdida de humedad
t	Tiempo
M	Humedad
M_t	Humedad libre en el tiempo t
M_0	Humedad inicial
M_e	Humedad de equilibrio
D_{eff}	Difusividad efectiva de la humedad
L	Medio espesor de la lámina
E_a	Energía de activación
D_0	Factor de Arrhenius
R	Constante universal de los gases (8,3143 J/mol K)
R^2	Coefficiente de determinación
T	Temperatura
X^2	Chi cuadrado
ERMS	Raíz media de la Suma de los Errores cuadrados
MBE	Suma de cuadrados de errores

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue realizar la caracterización fisicoquímica de las semilla de pajuro, modelar y evaluar el ajuste a diferentes cinéticas de secado por convección y determinar el coeficiente de difusión y la energía de activación del secado de semillas de pajuro, para ello se utilizó un secador de bandejas de aire forzado, con 12 experimentos por triplicado a las temperaturas de 40, 50, 60 y 70 ° C y velocidades de aire de 1,8; 2,2 y 2,7 m/s los datos se procesaron en Excel y el SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) v 20. Se experimentaron ocho modelos matemáticos de secado para el ajuste de los datos experimentales (Newton, Page, Logarítmico, Henderson y Pabis, Midilli, Henderson y Pabis modificado, Verma y Exponencial de dos términos). El modelo de MIDILLI representa adecuadamente las pruebas experimentales, teniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,999 a 1,000, Raíz media de la Suma de los Errores cuadrados (RMSE) de 0,003701 a 0,011820, Suma de cuadrados de errores (MBE) de 0,000017 a 0,001398. La difusividad efectiva fue $3,08015 \times 10^{-11}$ a $7,57879 \times 10^{-11}$ m²/s y la energía de activación de 14,59023 a 23,72150 kJ/mol.

I. INTRODUCCIÓN

El pajuro (*Erythrina edulis* Triana) es una leguminosa, que posee un alto contenido en proteína, aminoácidos, vitaminas y minerales. La cosecha se da dos veces al año, abril a junio y agosto a octubre, en la actualidad se encuentra en un proceso de extinción y cada vez hay menos plantas. El secado es el método más antiguo para la conservación de los alimentos, la principal función es eliminar el agua de los alimentos, evitando el crecimiento de los microorganismos y la descomposición (FERNANDEZ *et al.*, 2015). El modelamiento matemático de secado es necesario para su evaluación, determinación de parámetros y optimización, por ello los modelos validados deben describir, cuantificar y predecir el proceso de secado (GARCIA *et al.*, 2016).

Teniendo en consideración lo indicado, se plantearon los siguientes objetivos:

- Realizar la caracterización fisicoquímica de las semillas de pajuro.
- Modelar y evaluar el ajuste a diferentes cinéticas de secado por convección del pajuro.
- Determinar el coeficiente de difusión efectiva de masa y la energía de activación de secado de semillas de pajuro.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Aspectos generales del pajuro

2.1.1. Pajuro (*Erythrina edulis* Triana)

Esta especie de leguminosa, produce semillas comestibles (Figura 1), muy ampliamente usada en la alimentación humana, animal y la recuperación de suelos degradados (fija nitrógeno en el suelo) (INTIQUILLA *et al.*, 2016). Existen cerca de 113 especies en diversas regiones del mundo, crece en gran parte en las regiones andinas de Colombia, Ecuador y Perú (GUEVARA *et al.*, 2013; INTIQUILLA *et al.*, 2016; CARDENAS *et al.*, 2018). En Suramérica el pajuro es encontrado en zonas de clima frío moderado adaptándose entre los 1200 a 2600 m.s.n.m y dependiendo de su ubicación procede su nombre; en Perú se ubica en los departamentos de Amazonas, Pasco, Huánuco, Loreto, Madre de Dios, Ancash, Apurímac, Ayacucho, Cajamarca, y San Martín (SILVA *et al.*, 2015). La cosecha se realiza dos veces al año, abril y junio y otra en agosto y octubre. La producción del pajuro por cada planta es de 180 kg a 200 kg de frutos, pasa los 100 años de vida y sigue produciendo frutos. El árbol de pajuro mide más de 8 m de altura y su tronco mide más de 22 cm. Las hojas contienen 24% de proteínas, 29% de fibra, 14% de almidón, 9% de ceniza, 3% grasa, 83% humedad y 21% de carbohidratos. Las vainas tienen 30 a 55 cm de longitud por 3 a 3,5 cm de ancho, con 9 a 11 semillas, contiene 21% de proteínas, 23% de fibra, 24% de

carbohidratos y 91% de humedad. La semilla es de forma cóncava-convexa, de 3,5 a 7 cm de largo y de 2 a 3 cm de diámetro. La planta juega un papel importante no solo como alimento por su aporte de aminoácidos y proteínas, se refiere, también porque soporta sequías prolongadas, se provee de nitrógeno (sus hojas descompuestas aportan nitrógeno al suelo), controla la degradación del suelo, no requiere fertilizantes, es semicultivado, no requiere cuidados de plaguicidas, fertilizantes u otros agroquímicos. En la actualidad se encuentra en proceso de extinción y cada vez hay menos plantas (ESCAMILO, 2012).



Figura 1. Vaina y semillas de pajuro

2.1.2. Clasificación taxonómica

La distribución taxonómica de la *Erythrina edulis* Triana, según BARRERA y MEJIA (1998) es la siguiente:

Reino : Vegetal
División : Magnoliophyta
Clase : Magnoliopsida
Subclase : Rosidae
Orden : Fabales
Subfamilia: Faboideae (Papilionoideae)

Género : Erythina

Especie : *Erythrina edulis*, Triana, ex M Micheli.

2.1.3. Valor nutricional del pajuro

Las leguminosas son fuente de gran contenido de proteínas y muy ricas en lisina, mayormente se utiliza como ingredientes en muchos alimentos formulados, mezclados en distintos cereales que son bajos en lisina y ricos en metionina, alimento con gran contenido de proteínas de origen vegetal (AUQUIÑIVIN *et al.*, 2015). La semilla de pajuro (*Erythrina edulis* Triana) es mejor que otros granos de leguminosas, presentándose en muchas recetas alimenticias como: coladas, dulces, tortas, arepas, cremas, sancocho, y postres (ACERO, 2000; DELGADO y ALBARRACIN, 2012; INTIQUILLA *et al.*, 2016).

El Cuadro 1, se detalla la composición proximal de la semilla del pajuro en base húmeda y seca.

Cuadro 1. Valor nutricional de la semilla de pajuro.

Determinación	Base húmeda (%)	Base seca (%)
Humedad	80,50	0,00
Proteína	4,00	20,50
Grasa	0,10	0,51
Carbohidratos	13,30	68,20
Cenizas	1,00	5,64

Fuente: BARRERA y MEJIA, (1998)

2.2. Secado

El secado es el método antiguo que se utiliza para la preservación de los alimentos, ampliamente utilizado en la preservación de frutas y verduras, la principal función es eliminar el agua de los alimentos, preveniendo la descomposición y el crecimiento de microorganismos . El agua es eliminada con el fin de asegurar la estabilidad del producto, la seguridad microbiana del producto, minimizando los cambios químicos, físicos y prologando largos periodos de almacenamiento manteniendo la calidad del producto (FERNANDEZ *et al.*, 2015; KAVEH *et al.*, 2018), en los procesos de secado el agua se elimina por la evaporación por el suministro de aire caliente (IRIARTE y BISTONI, 2018; IGLESIAS *et al.*, 2018).

Los método secado influyen mucho en las características fisicoquímicas del producto, tales como la apariencia, el color, las propiedades físicas siendo la contracción y porosidad que definen la calidad del secado (GAMBOA *et al.*, 2014).

Los tratamientos previos al secado, detienen el metabolismo del tejido cortado, ya sea dañando las células o las conexiones enzimáticas. También son importantes para minimizar los cambios adversos que ocurren con el contacto del aire durante el proceso de deshidratación y su posterior almacenamiento (IRIARTE y BISTONI, 2018).

2.2.1. Cinética de secado

Es un fenómeno muy complejo que requiere de modelos confiables para predecir dicho proceso (IGLESIAS *et al.*, 2018). Esta viene simbolizada por

una curva que muestra la variación de la humedad con respecto al tiempo, obteniendo resultados para la determinación del tiempo necesario para estimar el tamaño del secador y fijar las condiciones de la operación (ROBERTI, 2011).

2.2.2. Secado de aire caliente

El secado convectivo, es un método que se basa en la evaporación del agua, utilizando una corriente de aire para la evaporación del agua; a partir de la evaporación se elimina el contenido de agua y se logra impedir el crecimiento bacteriano que no puedan vivir en medios secos (ESTRADA *et al.*, 2018).

La calidad de los alimentos secos disminuye la sensibilidad de los compuestos nutrientes y los cambios desfavorables en las propiedades fisicoquímicas de los alimentos (GAMBOA *et al.*, 2014).

El secado por convección se aplica como un proceso general para el secado de alimentos agrícolas (TAHER *et al.*, 2018), este trae una reducción de peso y volumen, minimizando los costos de empaque, almacenamiento y transporte (MIRANDA *et al.*, 2018; IRIARTE *et al.*, 2018).

Durante el secado por aire caliente se dan dos procesos al mismo tiempo para determinar la velocidad del proceso:

- Transferencia de calor: El aire rodea al producto que permite la evaporación del agua.
- Transferencia del agua: Se da en el interior del producto hasta la superficie para su evaporación.

La transferencia de calor puede ocurrir por convección, conducción, radiación o una combinación de estos mecanismos. La eliminación de agua en apariencia de vapor va desde la superficie del material que depende fundamentalmente de las condiciones externas de temperatura, humedad, velocidad, dirección del flujo de aire caliente y la geometría del sólido (RUIZ *et al.*, 2015).

2.2.3. Modelado del proceso de secado

El modelado matemático de secado es necesario para su evaluación, determinación de parámetros y optimización, por ello, los modelos validados deben describir, cuantificar y predecir el proceso de secado (GARCIA *et al.*, 2016).

Los modelos pueden clasificarse ampliamente como modelos empíricos, teóricos y semi-empíricos (MOSQUERA *et al.*, 2019); siendo estos, conocidos también como modelos de capa fina, que permiten el pronóstico de la transferencia de masa durante la deshidratación y se utiliza para la simulación de las curvas de secado. Un modelo empírico es una ecuación matemática que tiene parámetros que deben ajustarse en función de los resultados experimentales, y la definición de su forma matemática no requiere la consideración de la teoría que describe el fenómeno complejo de transferencia de calor y masa, la geometría y las características fisicoquímicas del producto para estar seco (JIANG *et al.*, 2017).

La predicción de los diferentes procesos de secado (por ejemplo, secado por convección, liofilización, secado por microondas, secado por

infrarrojos, etc.) mediante el uso de modelos matemáticos es una herramienta importante y eficiente para prevenir el deterioro del producto (cambios de calidad), consumo excesivo de energía, estrés del equipo y disminuciones en los rendimientos del producto (GÁLVEZ *et al.*, 2011).

La mayoría de las ecuaciones derivadas de los modelos teóricos utilizados en los alimentos se basan generalmente en las leyes de Fick (LOPEZ *et al.*, 2019). Las ecuaciones empíricas que se utilizan con frecuencia para modelar la cinética de secado, como Newton, Henderson-Pabis, Página, Página modificada, Logarítmica, Dos términos, Midilli – Kucuk, etc. aunque la mayoría de los modelos son empíricos, se basan principalmente en el modelo de difusión de segunda ley de Fick (PEREZ *et al.*, 2016).

Los modelos matemáticos son útiles para poder estimar el tiempo necesario, reducir el contenido de agua del producto en diferentes condiciones y la temperatura idónea, mejorando de esta manera la eficiencia del proceso (IGLESIAS *et al.*, 2018).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El trabajo de investigación se ejecutó en los laboratorios de Ingeniería de Alimentos, Nutrición Animal y Análisis Sensorial de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicado en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco; a una altitud de 660 m.s.n.m. a 09° 17' 08" de Latitud Sur, a 75° 59' 52" de Longitud este, con clima tropical húmedo y con una humedad relativa media de 84% y temperatura media anual de 25 °C.

3.2. Materia prima

Las semillas de pajuro (*Erythrina edulis* Triana) fueron recolectadas a una altitud de 1750 m.s.n.m a 9° 48' 53" de latitud y 75° 47' 13" de longitud, situada en el caserío de la Rinconada, distrito de Chaglla, provincia de Huánuco, Región Huánuco.

3.3. Equipo, materiales y reactivos

3.3.1. Equipos de laboratorio

Secador de bandejas de aire forzado automatizado. Balanza analítica sensibilidad 0,0001 g Germany. marca OHAUS GALAXY 160 USA. Máquina de moler marca Corona. Estufa Ecocell Eco line. Selladora manual

IMPULAE SEALER, modelo PFS-300. Digestor de proteína marca DIGEST AUTOMAT K-438 BÜCHI LABORTECHNIK. AG. Destilador Unit K-350 marca BUCHI. Mufla temperatura regulable de 250 °C a 900 °C marca MÜSZERIPARI MÜVE y Extractor de grasa (ANKOM XT10, XT1 Extractor).

3.3.2. Materiales de laboratorio

Vasos de precipitación (100 mL 50 mL y 1000 marca Pirex). Probetas de 10, 100 y 500 mL. Campana de desecación con perlas de sílica gel marca Duran. Crisoles de porcelana, 50 mL Haldenwanger Berlín. Pinza de metal. Filtros bolsas (XT4). Desecador kit bolsa flexible ziploc. Marcadores (resistente a solventes). Placas de petri de vidrio de 90 a 100 mm de diámetro. Pipetas de 10 mL. Bolsas de polipropileno de alta densidad. Cocina semiindustrial a gas de dos hornillas marca surge. Ollas de acero inoxidable.

3.3.3. Reactivos y solventes

Agua destilada. Fenolftaleína. Hidróxido de sodio (NaOH). Hipoclorito de sodio. Ácido sulfúrico (H₂SO₄). Éter de petróleo concentrado al 65%. Ácido bórico (H₃BO₃) al 4%. Catalizador sulfato de potássio. Sulfato de cobre y Ácido clorhídrico (HCl) de 0,1 N.

3.4. Métodos de análisis

3.4.1. Análisis fisicoquímico de la semilla de pajuro

- Humedad, método 23.003 AOAC (1997).
- Proteínas, método 991.29 AOAC (1997)

- Ceniza, método 942.50 de calcinación directa AOAC (1997)
- Grasa, método 935, 60 AOAC. (1997).
- Carbohidratos (HART, 1991).

3.4.2. Determinación de la Difusividad efectiva y la energía de activación

Se estimó mediante la ecuación (GIRALDO *et al.*, 2010).

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t$$

Donde:

L: Media del espesor de las muestras (m)

t : tiempo (s)

D_{eff} : Difusividad efectiva (m²/s)

La energía de activación se expresa por medio del modelo de Arrhenius, que relaciona la difusividad con la temperatura (FU *et al.*, 2019).

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT}$$

Dónde:

D_{eff} : Difusividad efectiva (m²/s)

D_0 : Factor de Arrhenius (m²/s);

E_a : Energía de activación (kJ/mol)

R: Constante universal de los gases (8,3143 J/mol K)

T: Temperatura (K)

3.5. Metodología experimental

3.5.1. Evaluación fisicoquímica de la semilla de pajuro

Se realizaron las evaluaciones fisicoquímicas de las semillas de pajuro descritos en el ítem 3.4.1.

3.5.2. Secado de las semillas de pajuro

El secado de las semillas de pajuro se realizó siguiendo las operaciones indicadas en el flujograma de la Figura 2, que se describe a continuación:

- Selección: Se seleccionaron las semillas maduras.
- Desvainado: Se extrajeron las semillas de la vaina manualmente.
- Lavado: Se realizó por inmersión, eliminando las impurezas de la superficie acerada.
- Pelado: Se realizó manualmente con la ayuda de un cuchillo.
- Escaldado: Se realizó a una temperatura de 82 °C por 2 minutos.
- Molido: Se realizó con una máquina de moler manualmente.
- Secado: Se secaron en horno por convección a temperaturas de 40, 50, 60 y 70 °C y a velocidades de aire caliente de 1,8; 2,2 y 2,7 m/s y con un espesor de cama de 2 mm.
- Enfriado: Se enfriaron antes de envasar.
- Envasado: Se realizó de forma manual en bolsas de polietileno.
- Sellado: Se realizó con una selladora eléctrica.

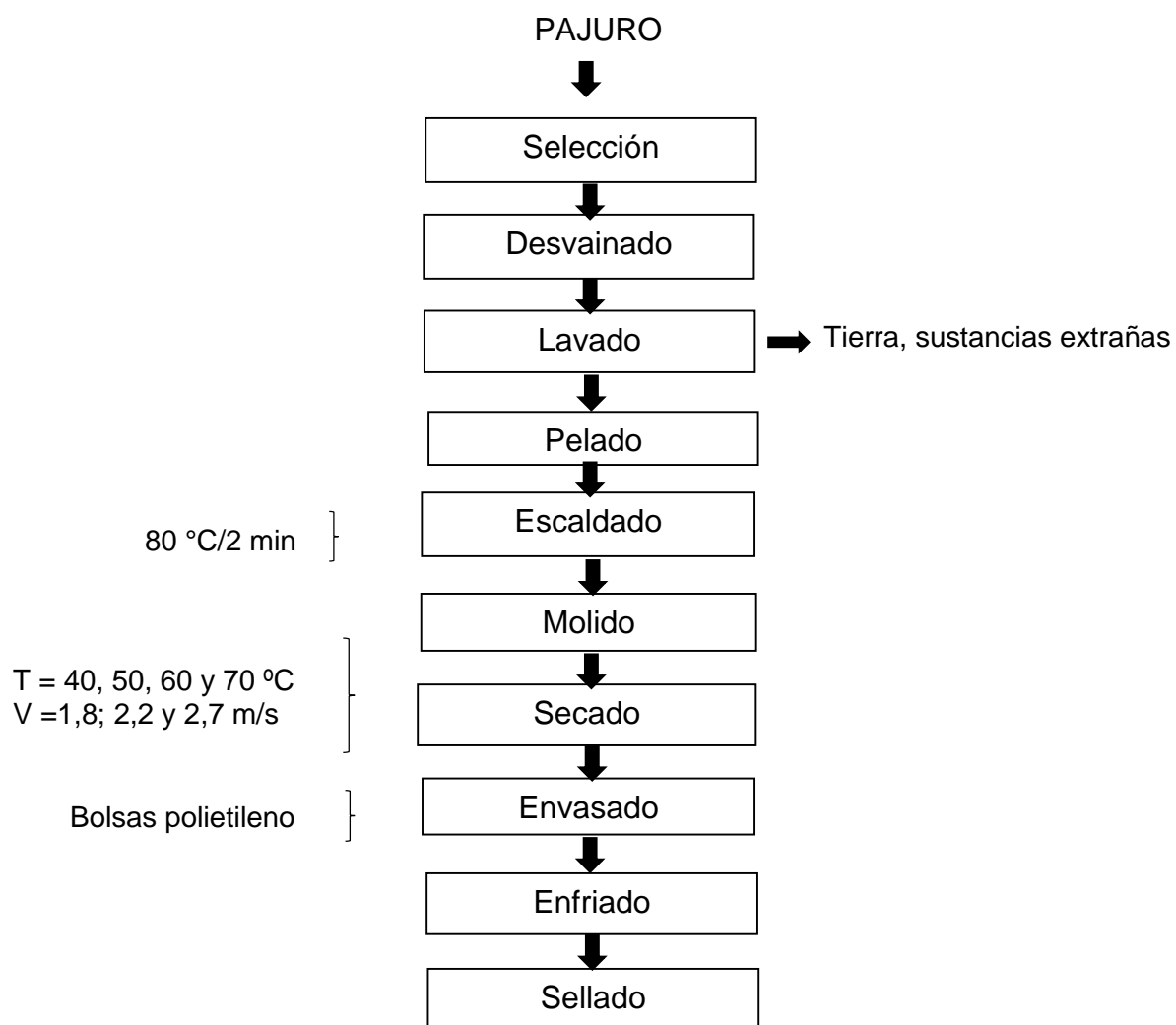


Figura 2. Flujograma para el secado de la semilla de pajuero

3.5.3. Secador

Se utilizó un secador de bandejas de aire forzado que tiene tres partes fundamentales, un ventilador regulada a las velocidades de 1,8; 2,2 y 2,7 m/s, un sistema de calentamiento por resistencias eléctricas en el interior del equipo provisto de un controlador digital de temperatura, y una cámara de secado. El equipo se prendió 5 min antes de iniciar, con el fin de poner alcanzar las condiciones estables de trabajo y luego se cargó con 200 g de semillas de pajuro para cada prueba experimental.

En la Figura 3 se muestra el diseño experimental empleado en la cinética de secado.

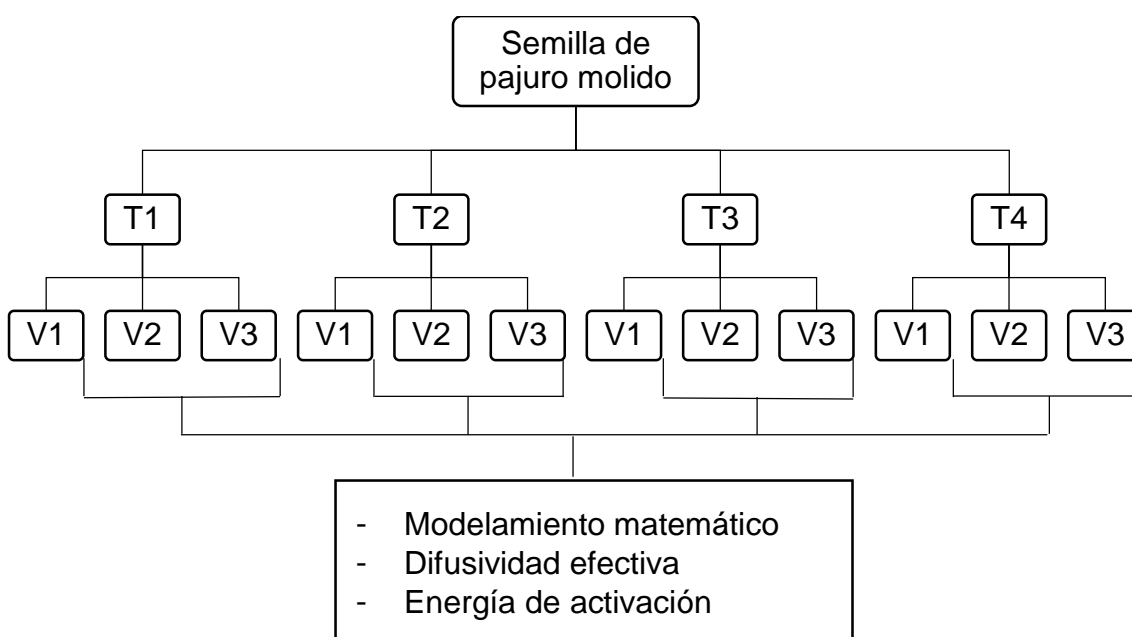


Figura 3. Esquema experimental para el secado a temperaturas dadas, con tres velocidades y ajustados a ocho modelos matemáticos.

T1, T2, T3, T4 = Temperatura, 40 °C, 50 °C, 60 °C y 70 °C

V1, V2, V3 = Velocidades del aire, 1,8 m/s; 2,2 m/s y 2,7 m/s

3.5.4. Modelamiento de la cinética de secado

Los datos obtenidos del secado a diferente temperatura y velocidad de aire fueron evaluados a través de 8 modelos matemáticos de capa delgada, que se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Modelos matemáticos empleados para las curvas de secado.

Nombre	Modelo	Referencia
Newton	$MR = e^{-kt}$	LEWIS (1921)
Page	$MR = e^{-kt^n}$	PAGE (1949)
Henderson y Pabis	$MR = a \cdot e^{-kt}$	WESTERMAN (1973)
Logarítmico	$MR = a \cdot e^{-kt} + c$	TOGRUL Y PEHLIVAN (2004)
Midilli	$MR = a \cdot e^{-kt^n} + bt$	MIDILLI <i>et al.</i> (2002)
Henderson y Pabis modificado	$MR = ae^{-kt} + b \cdot e^{-gt} + c \cdot e^{-ht}$	KARATHANOS <i>et al.</i> (1999)
Verma	$MR = a \cdot e^{-kt} + (1 - a) \cdot e^{-gt}$	VERMA <i>et al.</i> (1985)
Exponencial de dos términos	$MR = a \cdot e^{-kt} + (1 - a) \cdot e^{-kat}$	SHARAF <i>et al.</i> (1980)

MR es la razón de humedad, t es el tiempo de secado (s), k (s^{-n}) para Midilli, k (s^{-1}) para los demás modelos, a, b, c, g, h y n constantes de los modelos.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

MR: Humedad libre

M_t : Humedad en el tiempo

M_0 : Humedad inicial

M_e : Humedad de equilibrio (kg agua/kg masa seca).

Cuando la humedad de equilibrio es muy pequeña en comparación con el rango de humedad que se tiene en el proceso de secado, la ecuación se simplifica (VIRGEN *et al.*, 2016)

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

3.5.5. Curvas de secado

Los datos de las curvas de secado y del modelamiento matemático, se realizaron mediante el modelo difusional de la segunda ley de Fick para una geometría de lámina infinita y tiempos largos que se muestran en el Cuadro 2, utilizando la tasa de pérdida de la humedad (MR) (Ecuación 2).

3.5.6. Difusividad efectiva de la humedad

Para el cálculo del coeficiente de difusividad efectiva, se utilizó la solución analítica de la segunda ecuación de Fick, que resulta adecuada para fenómenos difusivos durante la transferencia de masa en el alimento durante el secado hasta alcanzar el equilibrio de humedad.

La solución dada por CRANK (1975), para una placa plana infinita, la difusividad efectiva constante, sin considerar el encogimiento de la muestra y la ausencia de cualquier resistencia al transporte de masa se da en la siguiente ecuación (GIRALDO *et al.*, 2010).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \exp \left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (3)$$

L: medio espesor de la lámina finita (m)

n: número de series de la sumatoria

Utilizando el primer término ($n=1$) de la serie cuando los tiempos de secado son considerables, esta ecuación se reduce a (MGHAZLI *et al.*, 2017).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (4)$$

Aplicando logaritmo natural a ambos términos de la ecuación (4), se logra obtener la expresión matemática para determinar la difusividad efectiva de la humedad.

$$\ln(MR) = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) + \left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \right) t \quad (5)$$

$$\ln(MR) = -0,21 + \left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \right) t$$

Al realizar un gráfico con los datos experimentales, donde el eje de las ordenadas tomará los valores de $\ln(MR)$ y el eje de las abscisas el tiempo en segundos, entonces la ecuación lineal sería:

$$K = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$$

K es la pendiente de la línea, y al despejar la D_{eff} se obtiene la difusividad efectiva.

$$D_{eff} = -\frac{4L^2 K}{\pi^2} \quad (6)$$

3.5.7. Cálculo de la energía de activación

La energía de activación en el proceso de secado, es la cantidad mínima de energía requerida para poder iniciar la difusión de humedad durante el secado. El valor está relacionado con el coeficiente de la difusividad efectiva y su dependencia de la temperatura puede expresarse mediante el modelo de Arrhenius (KOUKOUCH *et al.*, 2017).

Mediante la ecuación de Arrhenius se determinó la energía de activación aparente (FU *et al.*, 2019).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

Dónde:

D_{eff} : Difusividad efectiva (m²/s)

D_0 : Factor de Arrhenius (m²/s)

E_a : Energía de activación (kJ/mol)

R : Constante universal de los gases (8,3143 J/mol K)

T : Temperatura (K)

3.6. Análisis estadístico

A partir de las curvas de MR se evaluaron los modelos matemáticos (Cuadro 2) a fin de predecir el mejor modelo de la cinética de secado de las semillas de pajuro con el coeficiente de determinación (R^2) y así seleccionar el mejor modelo. Además, para determinar el mejor ajuste estadístico se utilizaron los índices de la raíz media de la suma de los errores cuadrados (ERMS) y suma de cuadrados de errores (MBE) (AVHAD y MARCHETTI, 2016; IRIARTE y BISTONI, 2018).

$$ERMS = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{EXP} - MR_{PRE})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{EXP} - MR_{PRE}) \quad (9)$$

Donde:

MR_{exp.}: Humedad obtenida de los datos experimentalmente.

MR_{pre.}: Predicciones hechas por los modelos matemáticos.

N: Número de datos.

z: Número de parámetros de cada modelo.

Los cálculos de los análisis estadísticos se realizaron con el programa Microsoft Excel 2016.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características fisicoquímicas de la semilla de pajuro

El análisis fisicoquímico de la semilla de pajuro se detalla en el Cuadro 3, se puede apreciar que la humedad fue $79,059 \pm 0,323\%$, proteína $6,563 \pm 0,001\%$, grasa $1,056 \pm 0,071\%$, ceniza $0,060 \pm 0,003\%$ y carbohidratos $3,262\%$, coincidiendo con BARRERA y MEJIA (1998) quienes encontraron $78,53\%$ humedad, $0,10\%$ grasa, $4,00\%$ proteína, $1,00\%$ ceniza y $13,30\%$ carbohidratos. ZVALETA *et al.*, (2010) por su parte encontró $78,53\%$ humedad y $29,53\%$ proteína.

Cuadro 3. Composición fisicoquímica de la semilla de pajuro.

Determinación	Base húmeda (%)
Humedad	$79,059 \pm 0,323$
Proteína	$6,563 \pm 0,001$
Grasa	$1,056 \pm 0,071$
Cenizas	$0,060 \pm 0,003$
Carbohidratos	13,262

4.2. Cinética de secado de las semillas de pajuro

En la Figura 4, se muestran las curvas de secado de las semillas de pajuro a 40, 50, 60 y 70 °C y velocidades de 1,8, 2,2 y 2,7 m/s.

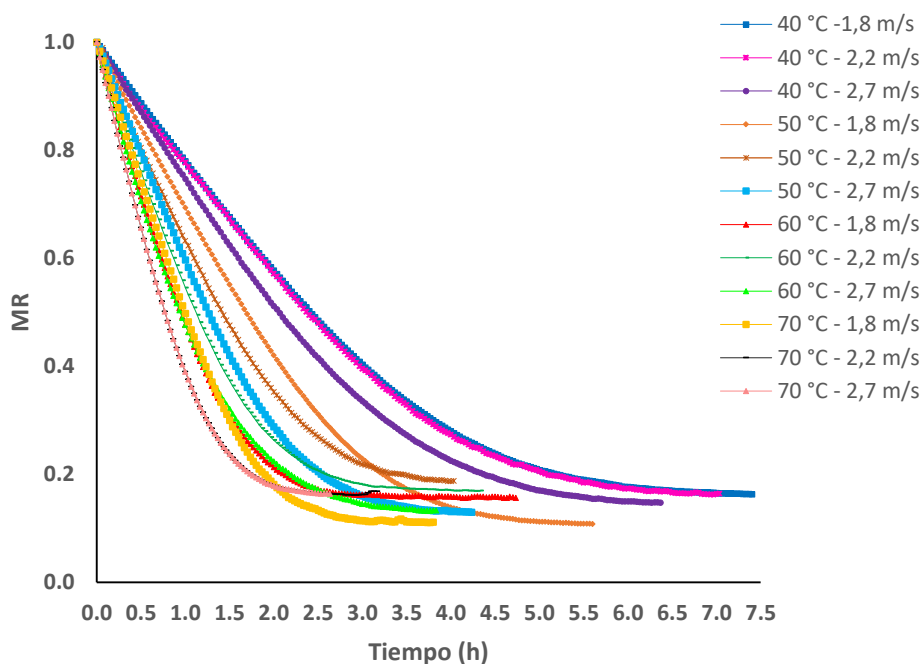


Figura 4. Curva de secado de la semilla de pajuro a 40, 50, 60 y 70 °C y velocidades de aire de 1,8; 2,2 y 2,7 m/s.

De la Figura 4, se observa que el tiempo de secado es inversamente proporcional al aumento de la temperatura y la velocidad de aire (LOPEZ *et al.*, 2019). SALCEDO *et al.*, (2016) mencionan que el factor importante es la temperatura, debido a que la transferencia de calor del aire hacia la muestra aumenta con la temperatura y como consecuencia incrementa la transferencia de masa. Ante esto algunas investigaciones hechas en los alimentos como es el caso de la papa (ALONSO *et al.*, 2014), pimienta (BISTONI *et al.*, 2016), melón (ESPINOSA *et al.*, 2016), brócoli (MAHN *et al.*, 2016), afrecho de yuca

(SALCEDO *et al.*, 2016), semilla de lupinus (VEGAS *et al.*, 2017), uchuva (HINCAPIE y ZAPATA, 2018), yuca (MIRANDA *et al.*, 2018), moringa (IGLESIAS *et al.*, 2018), jalapeño rojo (ALVAREZ *et al.*, 2019) mencionan que el factor principal en una curva de secado es la temperatura.

Las curvas de secado de las Figuras 5, 6 y 7, describen que el incremento de la temperatura del aire de secado tiene gran influencia en el tiempo y velocidad de aire tal como indican FRIAS *et al.* (2015); PANTOJA *et al.* (2016); SILVA *et al.* (2015) y TORREGROZA *et al.* (2014). La velocidad de evaporación y el tiempo de secado incrementan la presión de vapor del agua y esta aumenta con el incremento de la temperatura (FRIAS *et al.*, 2015).

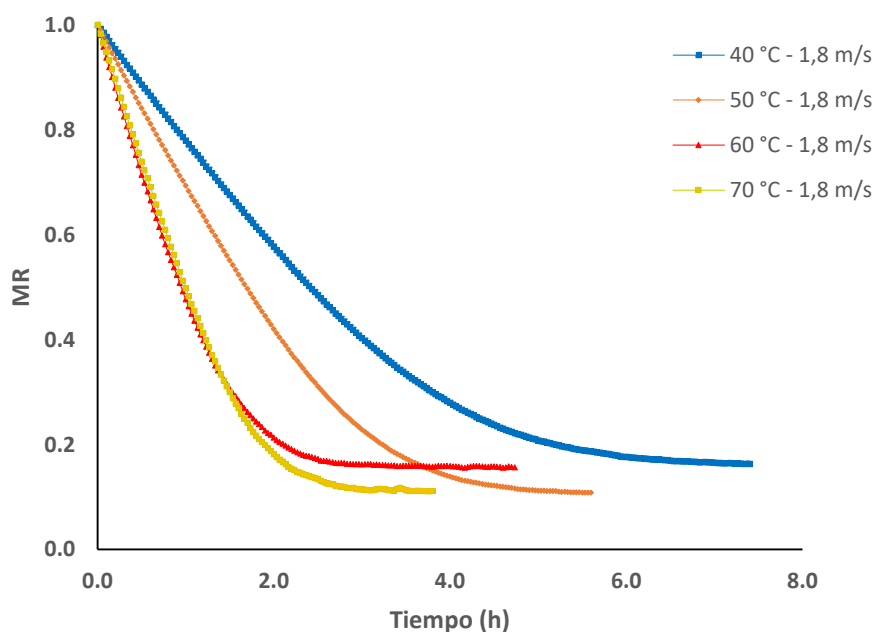


Figura 5. Curva de secado de la semilla de pajuro, velocidad de aire de 1,8 m/s.

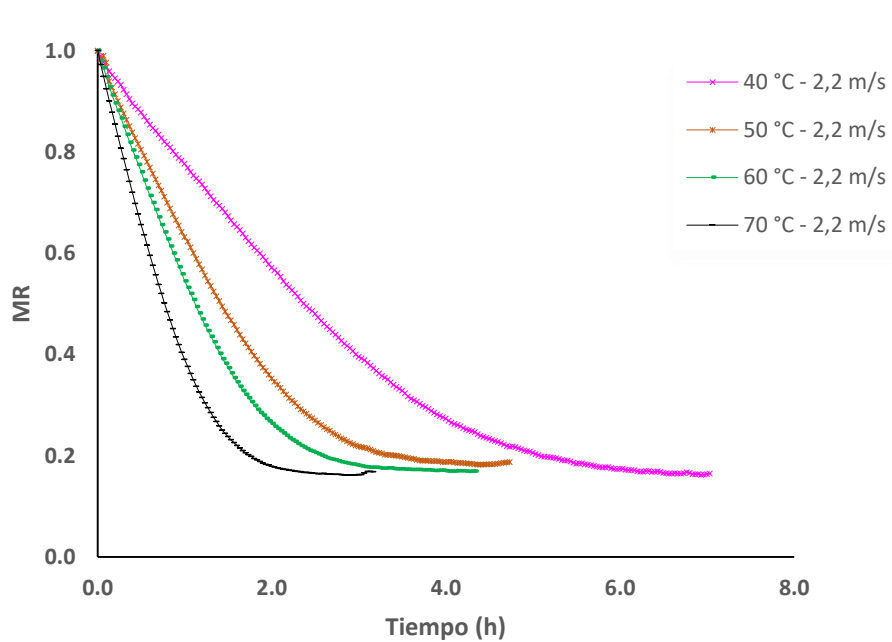


Figura 6. Curva de secado de la semilla de pajuro, velocidad de aire de 2,2 m/s.

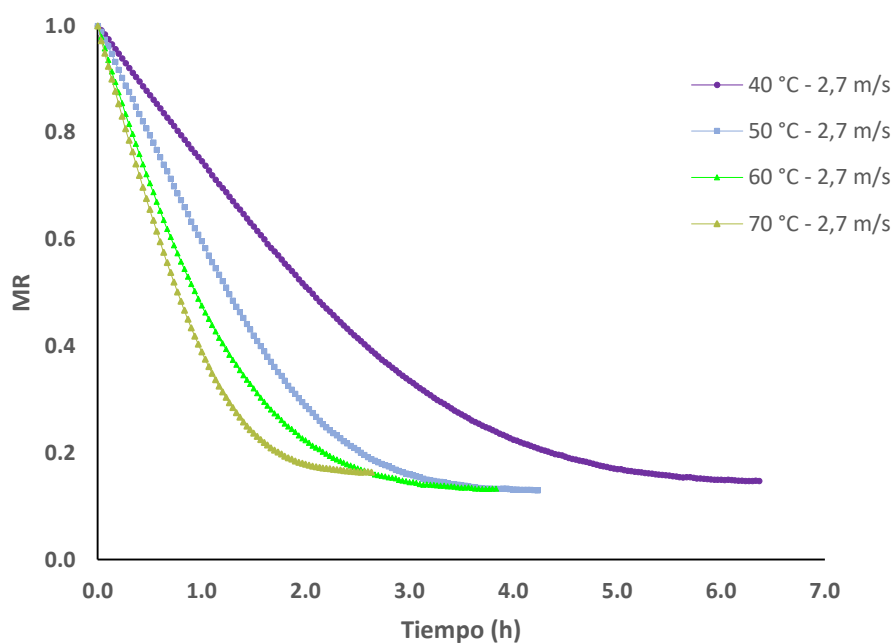


Figura 7. Curva de secado de la semilla de pajuro, velocidad de aire de 2,7 m/s.

4.3. Modelado de la cinética de secado

En los Cuadros 4, 5 y 6 se muestran los parámetros estimados de los 8 modelos y estadísticos para la velocidad de aire de secado de 1,8; 2,2 y 2,7 m/s respectivamente y a las temperaturas de estudio (50, 60 y 70 °C) que permiten predecir la tasa de pérdida de humedad (MR) en función al tiempo.

Los modelos matemáticos: Logaritmo, Midilli, Henderson y Pabis y Verma, aplicados a la cinética de secado, presentaron coeficientes de determinación (R^2) mayores a 0,98 para todas las temperaturas evaluadas. ARAÚJO *et al.* (2017) mencionan que los valores del coeficiente de determinación (R^2) superiores a 0,98 indican satisfactoriamente el comportamiento de secado. También menciona que el coeficiente de determinación (R^2) no constituye un criterio único de evaluación para la selección de modelos de secado como parámetro para representar el fenómeno de secado, siendo necesario el análisis de otros parámetros estadísticos, como los valores de la raíz media de la suma de los errores cuadrados (RMSE) y suma de cuadrados de errores (MBE). Estos parámetros estadísticos indica la capacidad de un modelo para describir con precisión un proceso físico. Cuanto menor sea este, mejor será la calidad de ajuste del modelo en relación con los datos experimentales (BARROS *et al.*, 2017).

En los cuadros 4, 5 y 6 se observa que todos los modelos presentan valores inferiores a 0,1 para todas las condiciones de aire de secado.

Cuadro 4. Parámetros estimados de los modelos y estadísticos para la velocidad de aire de secado de 1,8 m/s.

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico			
		A	b	c	G	h	K	N	R ²	RMSE	MBE
Newton	40						0,293		0,991	0,024377	0,004256
	50						0,445		0,988	0,030210	0,002814
	60						0,575		0,943	0,056267	0,010355
	70						0,774		0,985	0,035569	0,016098
Page	40						0,274	1,052	0,992	0,022898	0,003137
	50						0,388	1,154	0,995	0,019035	0,002695
	60						0,642	0,824	0,961	0,046637	0,007785
	70						0,715	1,101	0,988	0,030047	0,006737
Henderson y Pabis	40	1,032					0,303		0,993	0,022024	0,001294
	50	1,062					0,475		0,993	0,023372	-0,000568
	60	0,958					0,546		0,946	0,054927	0,011014
	70	1,055					0,787		0,988	0,029584	0,002972
Logaritmo	40	1,004		0,046			0,340		0,994	0,020161	-0,000219
	50	1,072		-0,016			0,456		0,993	0,023093	-0,000348
	60	0,920		0,148			0,936		0,991	0,022193	-0,000070
	70	1,040		0,033			0,865		0,990	0,027777	0,000299

Continua...

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico			
		a	b	C	g	h	k	N	R ²	RMSE	MBE
Midilli	40	0,971	0,018				0,234	1,352	1,000	0,005502	-0,000288
	50	0,966	0,015				0,350	1,404	0,999	0,006922	0,000258
	60	0,99	0,041				0,709	1,231	0,999	0,007377	-0,000963
	70	0,969	0,028				0,744	1,426	0,999	0,006787	0,000673
Henderson y Pabis modificado	40	7,040	-3,004	-3,004	0,303	0,303	0,303		0,993	0,022024	0,001294
	50	0,385	0,363	0,314	0,475	0,475	0,475		0,993	0,023372	-0,000568
	60	0,514	0,513	0,020	0,745	-0,461	0,745		0,996	0,015087	-0,001727
	70	7,981	-3,457	-3,469	0,787	0,787	0,787		0,988	0,029584	0,002972
Verma	40	-7,322			0,262		0,258		0,991	0,024352	0,004693
	50	-12,866			0,292		0,283		0,991	0,027189	-0,001718
	60	0,01			0,68		-0,604		0,994	0,018998	0,000368
	70	0,325			0,744		0,744		0,985	0,033729	0,005434
Exponencial de dos términos	40	1,446					0,340		0,991	0,023764	0,003808
	50	1,703					0,598		0,995	0,014959	0,000428
	60	0,326					1,285		0,965	0,043977	0,006944
	70	1,622					0,951		0,987	0,030535	0,007345

Cuadro 5. Parámetros estimados de los modelos y estadísticos para la velocidad de aire de secado de 2,2 m/s.

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico			
		A	b	C	g	h	k	N	R ²	RMSE	MBE
Newton	40						0,299		0,992	0,022588	0,003042
	50						0,537		0,990	0,026508	0,002513
	60						0,572		0,951	0,010809	0,052984
	70						0,826		0,988	0,027628	-0,001481
Page	40						0,277	1,064	0,994	0,020218	0,002684
	50						0,492	1,136	0,996	0,016401	0,001361
	60						0,633	0,843	0,964	0,045303	0,007863
	70						0,812	1,059	0,989	0,023233	-0,001010
Henderson y Pabis	40	1,030					0,309		0,994	0,020381	0,000456
	50	1,050					0,567		0,994	0,020895	-0,001358
	60	0,965					0,549		0,952	0,052061	0,011570
	70	1,042					0,863		0,990	0,023005	-0,003487
Logaritmo	40	1,013		0,025			0,328		0,994	0,019899	0,000027
	50	1,074		-0,035			0,525		0,994	0,020032	0,000056
	60	0,933		0,132			0,888		0,991	0,022650	0,000341
	70	1,020		0,045			0,981		0,992	0,024421	-0,006728

Continua...

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico			
		a	b	c	g	h	k	N	R ²	RMSE	MBE
Midilli	40	0,961	0,018				0,230	1,374	0,999	0,006243	0,000017
	50	0,968	0,020				0,479	1,353	0,999	0,010003	0,001049
	60	0,983	0,035				0,670	1,250	0,999	0,006908	0,001398
	70	0,979	0,033				0,898	1,347	1,000	0,011820	-0,006229
Henderson y Pabis modificado	40	7,632	-3,301	-3,301	0,309	0,309	0,309		0,994	0,020381	0,000456
	50	8,348	-3,597	-3,715	0,384	0,384	0,402		0,995	0,019561	-0,002073
	60	0,516	0,515	0,014	0,716	-0,484	0,716		0,996	0,015331	0,000684
	70	8,540	-3,743	-3,755	0,863	0,863	0,863		0,990	0,023005	-0,003487
Verma	40	-8,615			0,242		0,237		0,992	0,024271	-0,006283
	50	0,503			0,537		0,537		0,990	0,026508	0,002513
	60	0,007			0,660		-0,618		0,994	0,018706	0,002710
	70	-0,910			0,778		0,803		0,992	0,041458	-0,026189
Exponencial de dos términos	40	1,503					0,359		0,993	0,020949	0,002500
	50	1,665					0,711		0,996	0,016318	0,001887
	60	0,346					1,199		0,969	0,042183	0,007125
	70	0,998					0,826		0,988	0,027629	-0,001482

Continua...

Cuadro 6. Parámetros estimados de los modelos y estadísticos para la velocidad de aire de secado de 2,7 m/s.

Modelos	T (°C)	Parámetros						Análisis estadístico			
		A	b	C	g	h	k	N	R ²	RMSE	MBE
Newton	40						0,345		0,993	0,022301	0,003437
	50						0,558		0,981	0,036356	0,007897
	60						0,678		0,960	0,047333	0,013536
	70						0,827		0,944	0,056009	0,012556
Page	40						0,318	1,076	0,995	0,018769	0,003196
	50						0,558	1,001	0,981	0,036355	0,008098
	60						0,739	0,834	0,974	0,038058	0,008333
	70						0,870	0,827	0,961	0,047096	0,008733
Henderson y Pabis	40	1,039					0,361		0,995	0,018367	0,001348
	50	1,029					0,576		0,982	0,035406	0,007213
	60	0,956					0,644		0,962	0,045926	0,013648
	70	0,959					0,788		0,947	0,054846	0,013199
Logaritmo	40	1,024		0,024			0,382		0,995	0,017772	-0,000081
	50	1,003		0,073			0,724		0,991	0,025183	-0,000399
	60	0,942		0,106			0,972		0,996	0,014234	-0,000523
	70	0,932		0,131			1,291		0,991	0,022658	0,000400

Continua...

Modelos	T (°C)	Parámetros							Análisis estadístico		
		A	b	C	g	h	k	n	R ²	RMSE	MBE
Midilli	40	0,978	0,017				0,291	1,317	1,000	0,003970	0,000202
	50	0,978	0,025				0,548	1,350	1,000	0,005074	-0,000901
	60	0,997	0,026				0,798	1,115	1,000	0,003701	-0,000304
	70	0,984	0,048				1,060	1,236	0,999	0,005563	0,000809
Henderson y Pabis modificado	40	6,377	-2,669	-2,669	0,36	0,360	0,361		0,995	0,019020	0,005644
	50	7,008	-2,984	-2,994	0,576	0,576	0,576		0,982	0,035407	0,006897
	60	6,961	-3,002	-3,002	0,644	0,644	0,644		0,962	0,045927	0,013350
	70	8,125	-3,562	-3,604	0,788	0,788	0,788		0,947	0,054846	0,013199
Verma	40	0,503			0,345		0,345		0,993	0,022301	0,003437
	50	-0,688			0,558		0,588		0,981	0,037819	-0,001653
	60	0,013			0,783		-0,456		0,998	0,010284	0,000433
	70	0,992			-0,819		0,964		0,995	0,068104	0,051355
Exponencial de dos términos	40	1,536					0,422		0,994	0,019747	0,003149
	50	0,543					0,748		0,982	0,034892	0,006498
	60	0,352					1,403		0,977	0,035557	0,008090
	70	0,341					1,763		0,965	0,044568	0,007906

El modelo recomendado para representar la cinética de secado de capa delgada de la semilla de pajuro es el modelo de Midilli, siendo el que mejor se ajusta a los diferentes alimentos. Numerosas investigaciones reportan como el mejor ajuste para la predicción de diversos alimentos como perejil (MORSETTO *et al.*, 2008), pulpa de yuca (CHARMONGKOLPRADIT y ALUAMPON, 2017), liofilización de Melón (MOSQUERA *et al.*, 2019), jalapeño rojo (ALVAREZ *et al.*, 2019) es con el modelo de Midilli.

En las Figuras 8, 9 y 10 se muestran los datos experimentales de la relación de humedad predicho por el modelo de Midilli a las velocidades de aire de 1,8; 2,2 y 2,7 m/s respectivamente. Los modelos propuestos para la comparación de los valores de humedad experimental con los calculados demuestran que las ecuaciones utilizadas describen adecuadamente el proceso de secado para el cálculo del tiempo (SAAVEDRA *et al.*, 2017). El modelo Midilli presenta además un buen ajuste con los valores experimentales a todas las temperaturas del aire de secado. Es posible observar gran influencia positiva en la eliminación de agua de la muestra, disminuyendo el tiempo de secado (MARTINS *et al.*, 2015; BISTONI *et al.*, 2016; GARCIA *et al.* 2016; PANTOJA *et al.*, 2016; ARAUJO *et al.*, 2017).

En el ANOVA multifactorial (Anexo 1), se observa efecto significativo del coeficiente de determinación (R^2) a 95% de confianza. Sin embargo, en la prueba de Tuckey, los modelos: Logaritmo, Verma, Henderson y Pabis modificado, Exponencial de dos términos y Midilli, podrían representar el proceso de secado de la semilla de pajuro, tal como para melón (ESPINOSA *et al.*, 2016), Liofilización de

brócoli (MAHN *et al.*, 2016), liofilización de Melón (MOSQUERA *et al.*, 2019) y jalapeño rojo (ALVAREZ *et al.*, 2019).

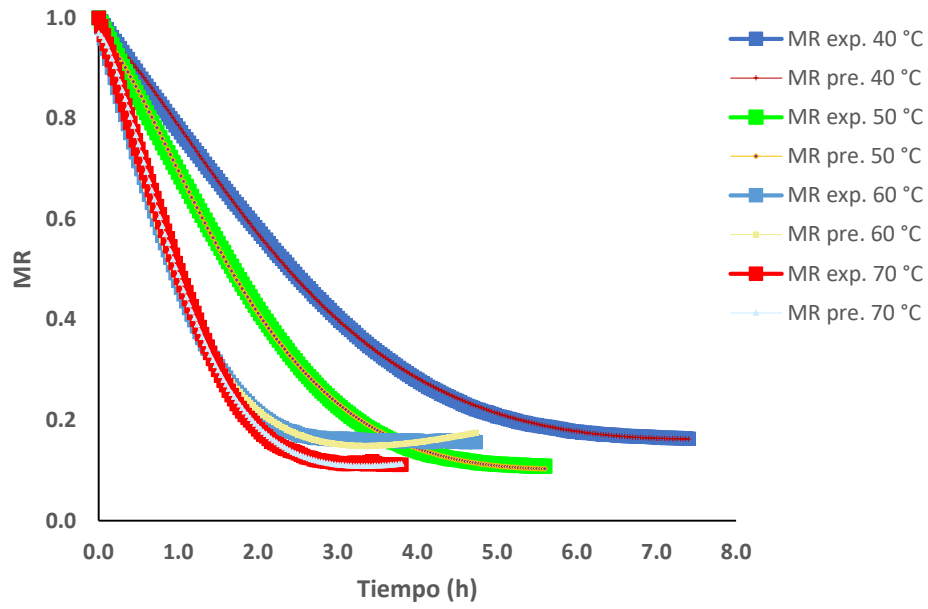


Figura 8. Datos experimentales de la relación de humedad predicho por el modelo de Midilli a la velocidad de aire 1,8 m/s.

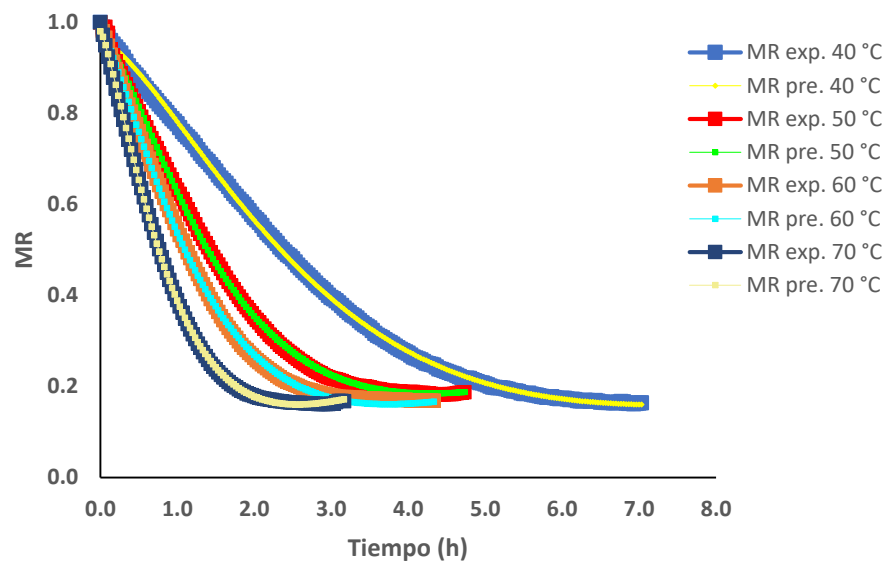


Figura 9. Datos experimentales de la relación de humedad predicho por el modelo de Midilli a la velocidad de aire 2,2 m/s.

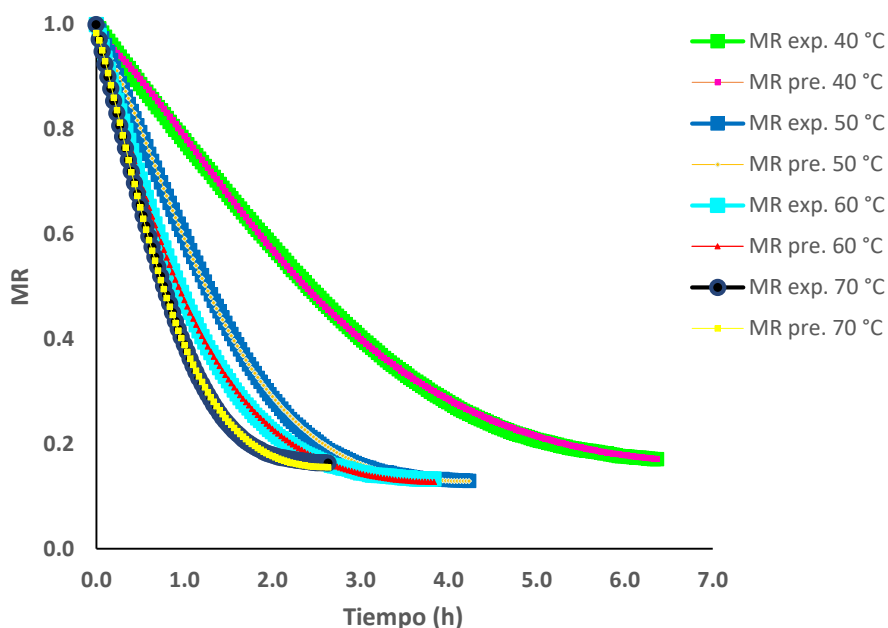


Figura 10. Datos experimentales de la relación de humedad predicho por el modelo de Midilli a la velocidad de aire 2,7 m/s.

4.4. Difusividad efectiva del secado de semillas de pajuro

En el Cuadro 7 se muestra la difusividad efectiva a las temperaturas de secado y velocidades de aire de secado de la semilla de pajuro.

Se observa que a la medida que se incrementa la temperatura, los valores de la difusividad efectiva aumentan proporcionalmente (MAHN *et al.*, 2016; IGLESIAS *et al.*, 2018; FU *et al.*, 2019; LOPEZ *et al.*, 2019). El aumento de la temperatura promueve la reducción de la viscosidad del agua, que es una medida de la resistencia, que provoca cambios en la difusión del agua en los capilares del producto, por lo que es favorable mover este fluido desde el interior hasta los extremos (ARAUJO *et al.*, 2017).

Cuadro 7. Difusividad efectiva (D_{eff}) del secado de semillas de pajuro en m^2/s

Temperatura °C	Velocidad de aire		
	1,8 m/s	2,2 m/s	2,7 m/s
40	$3,44490 \times 10^{-11}$	$3,20173 \times 10^{-11}$	$3,08015 \times 10^{-11}$
50	$4,37705 \times 10^{-11}$	$4,53917 \times 10^{-11}$	$4,55133 \times 10^{-11}$
60	$4,70128 \times 10^{-11}$	$4,68507 \times 10^{-11}$	$4,45811 \times 10^{-11}$
70	$5,79554 \times 10^{-11}$	$7,57879 \times 10^{-11}$	$7,53826 \times 10^{-11}$

Los valores de la difusividad en alimentos están en forma general de 10^{-6} a 10^{-11} m^2/s (ZAREIN *et al.*, 2015) por lo que los valores obtenidos en la semilla de pajuro ($3,08015 \times 10^{-11}$ a $7,57879 \times 10^{-11}$ m^2/s) están dentro del rango indicado

Algunas investigaciones coinciden con lo reportado, por ejemplo, en liofilizado de melón la difusividad efectiva esta entre $1,904 \times 10^{-9}$ y $8,000 \times 10^{-10}$ m^2/s (MOSQUERA *et al.*, 2019), brócoli entre $7,4 \times 10^{-11}$ a $1,23 \times 10^{-10}$ m^2/s (MAHN *et al.*, 2016) y en yuca entre $1,261 \times 10^{-10}$ a $4,137 \times 10^{-10}$ m^2/s (SALCEDO *et al.*, 2016).

En el caso de pajuro a las temperaturas de 50 y 60 °C y a velocidad de aire de 2,7 m/s la difusividad fue de $4,55133 \times 10^{-11}$ m^2/s y $4,45811 \times 10^{-11}$ m^2/s respectivamente. Esto se explica a que la variabilidad de la difusividad depende de las condiciones de secado, la estructura, la composición del material y los tamaños de muestra (SALCEDO *et al.*, 2016).

4.5. Energía de activación para la difusividad efectiva

La ecuación de Arrhenius permitió determinar la energía de activación, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Energía de activación de la difusividad efectiva en la semilla de pajuro.

Velocidad de aire (m/s)	Energía de activación (kJ/mol)
1,8	14,590239
2,2	23,295828
2,7	23,721505

La energía de activación de la difusividad efectiva para la semilla de pajuro secado a velocidades de aire caliente de 1,8; 2,2 y 2,7 m/s fue de 14,590239; 23,295828 y 23,721505 kJ/mol respectivamente, siendo la energía requerida por la humedad de la semilla de pajuro, para ser eliminada durante el proceso de secado por aire caliente. Los valores encontrados en los alimentos están en el rango de 12,7 a 110 kJ/mol (TORREGROZA *et al.*, 2014).

A la medida que se incrementa la temperatura, mayor será la transferencia de calor y la energía de activación necesaria para la difusión del agua (FRIAS *et al.*, 2015).

V. CONCLUSIONES

- La semilla de pajuro presentó una humedad de $79,059 \pm 0,323\%$, proteína $6,563 \pm 0,001\%$, grasa $1,056 \pm 0,071\%$, ceniza $0,060 \pm 0,003\%$ y carbohidratos $13,262\%$.
- Los modelos matemáticos los que explican bien la cinética de secado de las semillas de pajuro son: Logaritmo, Verma, Henderson y Pabis, Exponencial de dos términos y Midilli; no obstante, el que predijo con mayor precisión la cinética de secado de semilla de pajuro es el modelo Midilli, con $R^2 = 0,999$ a $1,000$, $RMSE = 0,003701$ a $0,011820$ y $MBE = 0,000017$ a $0,001398$.
- La difusividad efectiva estuvo en el rango de $3,08015 \times 10^{-11}$ a $7,57879 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ y la energía de activación de $14,59023$ a $23,72150 \text{ kJ/mol}$, parámetros que se encuentran dentro del rango para alimentos.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar investigaciones en semilla de pajuro a fin de evitar su extinción, contribuyendo a buscar alternativas para su industrialización.
- Congelar la semilla de pajuro antes del pelado para facilitar el proceso.
- Investigar la cinética de secado de las semilla de pajuro a espesores mayores de 2 mm.
- Realizar el secado de la semilla de pajuro mediante métodos diferentes como secador de lecho fluidizado, microondas, infrarrojo y otros

ABSTRACT

The objective of this research was to do a characterization of pajuro seeds, to model and evaluate the adjustments of different kinetics due to convection and to determine the diffusion coefficient of the mass and the activation energy for drying the pajuro seeds. To do this, a forced air dryer with trays was used with twelve treatments, tripled, at temperatures of 40, 50, 60 and 70 °C and air speeds of 1.8, 2.2 and 2.7 m/s; the data was processed in Microsoft Excel 2016 and SPSS v20. Eight mathematical models for drying were researched in order to adjust the experimental data (Newton, Page, Logarithmic, Henderson and Pabis, Midilli, Henderson and modified Pabis, Verma and two-term exponential). The Midilli model adequately represents the experimental tests, with a coefficient of determination (R²) of 0.999 to 1.000, a root means square deviation (RMSD; RMSE in Spanish) of 0.003701 to 0.011820, and a means bias error (MBE) of 0.000017 to 0.001398. The effective diffusivity was 3.08015×10^{-11} to 7.57879×10^{-11} m²/s and an activation energy of 14.59023 to 23.72150 kJ/mol.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACERO, L. 2000. Guía para el cultivo y aprovechamiento del chachafruto o balú: *Erythrina edulis* Triana ex Micheli. 2 ed. Bogotá, Colombia, Bogotá Convenio Andrés Bello. p.18-26.
- ALVAREZ, E., CONTRERAS, F., RODRIGO, J., ALEJANDRA DE LA ROSA, L., GARCÍA, J.A., NÚÑEZ, J.A. 2019. Cinética de secado y efecto de la temperatura sobre las características físicas y compuestos fenólicos de chile jalapeño rojo (*Capsicum annuum* L.). *Rev. de Ciencias Biológicas y de la Salud, México*. 21(1):139-147
- ALONSO, J., GARCÍA, K.Z., GONZÁLEZ, K., BENAVENTE, M. 2014. Producción de harina de papa para puré instantáneo. *Rev. Nexo, Nicaragua*. 27(2):99-114
- ARAUJO, W., DUARTE, A.L., CESAR, P., HARTMANN, C.P., SIQUEIRA, E.A. 2017. Modelado matemático de la capa delgada de secado de frutas de mani. *Rev. Ciênc. Agron., Brasil*. 48(3): 448-457
- A.O.A.C. 2008. N° 928.08. Determinación de proteínas método Kjeldhal–equipo automático.

- AUQUIÑIVIN, E.A., CASTRO, E.M. 2015. Elaboración de galletas enriquecidas a partir de una mezcla de cereales, leguminosas y tubérculos. Chachapoyas, región Amazonas. Rev. Ind. data, Perú. 18(1):84-90.
- AVHAD, M.R., MARCHETTI, J.M. 2016. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. Rev. Industrial Crops and Products, Norway. 91(1):76-87. 41
- BARRERA, N., MEJIA, M. 1998. Chachafruto, balú, sachaporoto; *Erythrina edulis*. Triana. Pasado, presente y futuro. Universidad Nacional de Colombia – UNAL. 3 ed. Bogota, Colombia. p 1-16.
- BARROS, S., BARBOSA, G., DANTA, D., SANTOS, C., SUÉLIA, F., SOARES, T., NASCIMENTO, A.R. 2017. Modelado matemático de la cinética de sacado de cortezas de kino (*Cucumis metuliferus*). Research, Society and Development, Brasil. 9(1):1-18.
- BISTONI, S., IRIARTE, A., GARCÍA, V., CALAHORRA, M. 2016. Analisis del secado de pimiento (*Capsicum annum* L.) en chilecito, la rioja. aportes para la apropiación de tecnología solar. Rev. CIZAS, Argentina. 16(1):20-44.
- CARDENAS, I.A., SARMIENTO, V.H., RAMOS, Z.R. 2018. Características productivas y tecnológicas de la carne de cuy (*Cavia porcellus*) utilizando dietas basadas en pisonay (*Erythrina* sp). Rev. investig. Altoandín, Perú. 20(4):451-460.
- CHARMONGKOLPRADIT, S., ALUAMPON, R. 2017. Estudio del modelo de secado de capa fina para pulpa de yuca. Energy Procedia, Tailand. 138(1):354–359

- CRANK, J. 1975. The mathematics of diffusion. 2 ed. Oxford University Press, Clarendon Press. UK. p. 44-68.
- DELGADO, N., ALBARRACÍN, W. 2012. Microestructura y propiedades funcionales de harinas de quinua (*Ohenopodioum quinoa w.*) y chachafruto (*Erythrina edulis*): potenciales extensores cárnicos. Rev. Vitae, Medellín, Colombia. 19(1):430-432.
- ESCAMILO, S. 2012. El Pajuro (*Erythrina edulis*) alimento andino en extinción. Rev. investigaciones sociales, Perú. 16(28):79-104.
- ESPINOSA, L.A., ORMAZA, A.M., AYALA, A.A. 2016. Evaluación del secado de melón (*Cucumis melo L.*) mediante secado convectivo y bomba de calor. Rev. Vitae, Colombia. 23(1):241-244.
- ESTRADA, H.H., RESTREPO, C.E., SAUMETT, H.G., PÉREZ, L. 2018. Deshidratación Osmótica y Secado por Aire Caliente en Mango, Guayaba y Limón para la Obtención de Ingredientes Funcionales. Rev. Inf. tecnol., Chile. 29(3):197-204.
- FERNÁNDEZ, D., MUÑIZ, S., GARCÍA, A., CERVANTES, R., FERNÁNDEZ, D. 2015. Cinética de secado de fruta bomba (*Carica papaya L.*, cv. Maradol Roja) mediante los métodos de deshidratación osmótica y por flujo de aire caliente. Rev. Cie. Téc. Agr., Cuba. 24(1):22-28.
- FRIAS, A., CLEMENTE, G., CRUZ, L., GONZALEZ, F., MULET, A. 2015. Modelación de las cinéticas de secado de cubos de papa en lecho fluidizado. Rev. Ciencia y Tecnología de Alimentos, Cuba. 25(2):5-9.

- FU, B.A., CHEN, M.Q., LI, Q.H. 2019. Heat transfer characteristics and drying kinetics of hematite thin layer during hot air convection. *Rev. Thermochemica Acta, China*. 1(1):1-7.
- GÁLVEZ, A., URIBE, E., PEREZ, M.A., TABILO, G., VERGARA, J., GARCIA, P., LARA, E., DI-SCALA, K. 2011. Effect of high hydrostatic pressure pretreatment on drying kinetics, antioxidant activity, firmness and microstructure of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel. *Rev. LWT - Food Science and Technology, Chile*. 44(1):384-391 43
- GAMBOA, D., BÁÑEZ, D., MELÉNDEZ, M., PAREDES, E., SICHE, R. 2014. Secado de lúcuma (*Pouteria obovata*) empleando la técnica de Ventana Refractante. *Rev. Scientia Agropecuaria, Perú*. 5(2):103-108.
- GARCÍA, C., SIERRA, M., MIRANDA, L. 2016. Modelado de la Cinética de Secado en Microondas de Ñame. *Inf. tecnol., Chile*. 27(1):61-68.
- GIRALDO, A.D., ARÉVALO, A., SILVA, A., FERREIRA, A., VALDES, J.C., MENEZES, M.C. 2010. Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Rev. Ciênc. Tecnol. Aliment, Brasil*. 30(1):179-182.
- GUEVARA, J., DÍAZ, P., BRAVO, N., VERA, M., CRISÓSTOMO, O., BARBACHÁN, H., HUAMÁN, D. 2013. Uso de harina de pajuro (*Erythrina edulis*) como suplemento en la alimentación de cuyes – lima. *Rev. Per. Quím. Ing. Quím., Perú*. 16(2):21-28.

- HINCAPIE, M., ZAPATA J. 2018. Estudio de la Cinética de Deshidratación de Uchuva (*Physalis peruviana* L.) en un Secador de Lecho Fluidizado. Rev. Información Tecnológica, Colombia. 30(2):115-124.
- IGLESIAS, R., GRIMALDI, R.V., VILLANUEVA, B.E., HERNÁNDEZ, J.M., PASCUAL, P., LASTRES O. 2018. Cinética de secado de Moringa oleífera. Rev. Mex. Cienc. Agríc., México. 9(5):935-947.
- INTIQUILLA, A., JIMÉNEZ, K., ZAVALA, A., ARNAOA, I., PEÑA, C., CHÁVEZ, E.L., HERNÁNDEZ, B. 2016. *Erythrina edulis* (Pajuro) Seed Protein: A New Source of Antioxidant Peptides. Rev. Natural Product Communications, Perú. 11(1):1-6.
- IRIARTE, A., BISTONI, S. 2018. Secado de manzana en secadero túnel de laboratorio y en secadero solar en convección natural. modelización de la cinética de secado. Rev. Asades, Argentina. 6(1):97-107.
- JIANG, J., DANG, L., YUENSIN, C., TAN, H., PAN, B., WEI, H. 2017. Simulation of microwave thin layer drying process by a new theoretical model. Chemical Engineering Science. Beijing, China. 162(1): 69-76.
- KARATHANOS, V. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. Journal of Food Engineering, Grecia. 39(4):337–344.
- KAVEH, M., RASOOLI, V., CHAYJAN, R., TAGHINEZHAD, E., ABBASPOUR, Y., GOLPOUR, I. 2018. ANFIS and ANNs model for prediction of moisture diffusivity and specific energy consumption potato, garlic and cantaloupe drying under convective hot air dryer. Rev. Info Proc Agri., Irán. 5(3):372-387.

- KOUKOUCH, A., IDLIMAM, A., ASBIK, M., SARH, B., IZRAR, B., BOSTYN, S., AMINE, A. 2017. Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste. *Rev. Renewable Energy*, Zitoune, Morocco. 101(1):565-574.
- LEWIS, W., 1921. The rate of drying of solid materials. *Industrial Engineering Chemistry*, Cambridge. 13(1):427–443.
- LOPEZ, N., ANDRADE, M.M., MARTÍNEZ, H.A. 2019. Modelamiento matemático de la cinética de secado de espagueti enriquecido con pulpa de zapallo deshidratada (*Cucurbita moschata*). *Rev. U.D.C.A., Colombia*. 22(1):1-11.
- MAHN, A.V., ROMAN, J.I., REYES, A.E. 2016. Efecto de la liofilización de Brócoli Pre-Procesado sobre la cinética de secado y el contenido de sulforafano. *Rev. Información tecnológica*, Chile. 27(6):95-106.
- MARTINS, E., LAGE, E., GONELI, A., HARTMANN, C., LOPES, J. 2015. Cinética de secado de hojas de madera (*Serjania marginata* Casar). *Rev. bras. eng. agricola ambiente*, Brasil. 19(3):238–244.
- MIDILLI, A., KUCUK, H., YAPAR. Z. 2002. A New model for single layer drying. *Drying Technology*. p. 1503-1513.
- MIRANDA, P.J., MARTÍNEZ, K.A., TORRES, R., MENDOZA, J.M., GÓMEZ, R.D. 2018. Evaluación experimental del secado de yuca variedad venezolana por medio de un sistema híbrido de calentamiento de aire. *Rev. chil. ing., Chile*. 26(2):329-338.
- MGHAZLI, S., OUHAMMOU, M., HIDAR, N., LAHNINE, L., IDLIMAM, A., MAHROUZ, M. 2017. Drying characteristics and kinetics solar drying of

- Moroccan rosemary leaves. *Rev. Renewable Energy, Morocco*. 108(1):303-310.
- MOSQUERA, E.S., AYALA, A.A., SERNA, L. 2019. Ultrasonido y Deshidratación Osmótica como Pretratamientos a la Liofilización de Melón (*Cucumis melo* L.). *Rev. Información Tecnológica, Colombia*. 30(3):179-188.
- MORSETTO, J., LEMA, A., PONTIN, M., PAISIO, G. 2008. Estudio preliminar sobre la cinética de secado para perejil en condiciones de secado solar. *Rev. Asades, Argentina*. 12(1):329-518.
- PAGE, G. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, USA.
- PANTOJA, D., OSORIO, O., MEJIA, D., VAQUIRO, H. 2016. Procesamiento de Arvejas (*Pisum sativum* L.). Parte 1: Modelado de la Cinética de Secado por Capa Delgada de Arveja, Variedades Obonuco Andina y Sureña. *Rev. Información Tecnológica, Colombia*. 27(1):69-80. 46
- PÉREZ, M., LEMUS, R., TABILO, G., PIZARRO, S., NOMA, S., IGURA, N., SHIMODA, M. 2016. Modelling of red abalone (*Haliotis rufescens*) slices drying process: Effect of osmotic dehydration under high pressure as a pretreatm. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. *Rev. La Serena, Chile*. 34(1):127-134.
- ROBERTI, D.E. 2011. Cinética del secado convectivo del camarón dulceacuícola (*Macrobrachium jelskii*) a dos temperaturas y dos velocidades de aire. *Rev.*

- Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Venezuela. 2 (1): 158-172.
- RUIZ, L., CASTRO, L., QUICAZÁN, M. 2015. Influencia de las condiciones de secado en el color de fresas variedad. Rev. chilena de nutrición, Colombia. 1(1): 17-22.
- SAAVEDRA, J., PUENTE, L., GONZALES, G., CAMOUSSEIGT, I. 2017. Automatización de un Secador Convectivo de Aire Caliente para fines de Docencia en Ingeniería de Alimentos. Rev. Inf. tecnol., Chile. 19(4):3-11.
- SALCEDO, J.G., CONTRERAS, K., GARCÍA, A., FERNANDEZ, A. 2016. Modelado de la cinética de secado del afrecho de yuca (*Manihot esculenta crantz*). Rev. Mexicana de Ingeniería Química, México. 15(3):883-891.
- SILVA, S., CRISÓSTOMO, O., ÁLVAREZ, E., MENDOZA, G., RONDAN, L., RUBIO, J. 2015. Evaluación de propiedades tecno-funcionales que provee la harina de pajuro (*Erythrina edulis*) a las redes estructurales de Muffins. Ciencia, Tecnología y Desarrollo Peru. 1(1): 77-88.
- TAHER, A., MEDA, V., NADERLOO, L. 2018. Artificial neural Network–Genetic algorithm modeling for moisture content prediction of savory leaves drying 47 process in different drying conditions. Engineering in Agriculture, Environment and Food. Khorramabad, Irán. 11(4):232-238.
- TOGRUL, I.T., PEHLIVAN, D. 2004. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. Journal of Food Engineering, Turquía. 65(3):413–425.

- TORREGOZA, A.M., MONTES, E.J., ÁVILA, A.E., REMOLINA, J.F. 2014. Modelado de las cinéticas de secado de tres variedades de yuca industrial. Rev. DYNA, Colombia. 81(186):184-192
- VEGAS, R., IRIS, A., VEGAS C. 2017. Efecto de la temperatura sobre la cinética de secado y el color de la pasta desgrasada de las semillas de *Lupinus mutabilis* variedad criolla. Rev. Sciéndo, Trujillo. 20(1):39-45.
- VERMA, L.R., BUCKLIN, R.A., ENDAN, J.B., WRATTEN, F.T. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. Transactions of the ASAE, 28(1):296–301.
- VIRGEN, L., HERRERA, E.J., ESPINOSA, H., GUATEMALA, G.M., CORONA, R.I., ARRIOLA, E. 2016. Estimación del coeficiente de difusividad durante el tostado de café en un lecho fuente utilizando un modelo difuso. Rev. Mexicana de Ingeniería Química, México. 15(2):513-524.
- ZAREIN, M., SAMADI, S.H., GHOBADIAN, B. 2015. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, Irán. 14(1):41-47.
- ZAVALETA, W., MILLONES, C.E., TORRES, E.V., VÁSQUEZ, E.R. 2010. Sustitución parcial de harina de trigo (*Triticum aestivum* L.) con harina y pasta de pajuro (*Erythrina edulis* Triana) para la elaboración de pan enriquecido. Rev. Aporte Santiaguino, Perú. 3(1):75-85.

ANEXO

Anexo 1.

Análisis de Varianza para R² - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	SC	GI	CM	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:MODELOS	0,005347	7	0,000764	4,38	0,0003
RESIDUOS	0,015352	88	0,000174		
TOTAL (CORREGIDO)	0,020699	95			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para R² por MODELOS

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

MODELOS	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
NEWTON	12	0,9755	0,0038129	X
HENDERSON Y PABIS	12	0,978	0,0038129	XX
PAGE	12	0,9825	0,0038129	XX
EXPONENCIAL DE DOS TERMINOS	12	0,9835	0,0038129	XXX
HENDERON Y PABIS MODIFICADO	12	0,985917	0,0038129	XXX
VERMA	12	0,991333	0,0038129	XXX
LOGARITMO	12	0,992667	0,0038129	XX
MIDILLI	12	0,999417	0,0038129	X

Anexo 2. Vistas fotográficas del procedimiento para el secado de la semilla



Recepción del pajuro



Lavado y pelado



Escaldado



Enfriado



Sellado y guardado



Molido



Espesor de pajuro



Secado



Enfriado



Sellado