

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS**  
**ALIMENTARIAS**



**TESIS**  
**MODELAMIENTO DE CINÉTICA DE SECADO DEL JERGÓN SACHA**  
**(*Dracontium lorentense* K.) POR CONVECCIÓN FORZADA**

EJECUTOR: EDGARD MALLQUI OSCO  
ASESOR: MSc. WILLIAMS VICENTE ROLDAN CARBAJAL  
PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA DE ALIMENTOS  
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA DE ALIMENTOS  
EJE TEMÁTICO: Desarrollo y Simulación de procesos y/o  
operaciones

Tingo María - Perú

2021



**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;  
[fiia@unas.edu.pe](mailto:fiia@unas.edu.pe)

---

"Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional".

## **ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 006-2022**

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos en acto público en forma virtual a las 09:00 horas del día 12 de mayo del 2022, en el equipo: Sustentación de Tesis de Pregrado FIIA-UNAS en la Plataforma Ms Teams, para calificar la tesis presentada por el Bach. **EDGARD MALLQUI OSCO**, titulada:

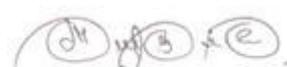
### **“MODELAMIENTO DE CINÉTICA DE SECADO DEL JERGÓN SACHA (*Dracontium lorentense* K.) POR CONVECCIÓN FORZADA”**

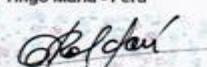
Después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las preguntas formuladas, lo declaran **APROBADO** con el calificativo de **BUENO**, en consecuencia, el sustentante, queda apto para obtener el título de **Ingeniero en Industrias Alimentarias**, de conformidad con el artículo 45º numeral 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 12 de mayo de 2022

  
**Dr. Jaime Eduardo Basilio Atencio**  
Presidente

  
**Dr. Roberto Dávila Trujillo**  
Miembro

  
**Ing. M.sC. Luz Milagros Follegatti Romero**  
Miembro

  
*Universidad Nacional Agraria de la Selva*  
Tingo María - Perú  
  
**Williams V. Roldán Carbajal**  
Asesor



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL**  
(RIDUNAS)

Correo: [repositorio@unas.edu.pe](mailto:repositorio@unas.edu.pe)



“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”

**CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 248 - 2022 - CP-RIDUNAS**

El Coordinador de la Oficina de Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

**CERTIFICA QUE:**

El trabajo de investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Facultad:

Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias

Tipo de documento:

|       |   |                          |  |
|-------|---|--------------------------|--|
| Tesis | X | Trabajo de investigación |  |
|-------|---|--------------------------|--|

| TÍTULO  | AUTOR              | PORCENTAJE DE SIMILITUD         |
|---|--------------------|---------------------------------|
| MODELAMIENTO DE CINÉTICA DE SECADO DEL JERGÓN SACHA ( <i>Dracontium lorentense</i> K.) POR CONVECCIÓN FORZADA | EDGAR MALLQUI OSCO | <b>23%</b><br><b>Veintitrés</b> |

Tingo María, 23 de diciembre de 2022

  
**Mg. Ing. García Villegas, Christian**  
Coordinador del Repositorio Institucional  
Digital (RIDUNAS)



# VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

## OFICINA DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRO, INVESTIGACIÓN DOCENTE y TESISISTA

### I. DATOS GENERALES DE POSGRADO

Universidad : Universidad Nacional Agraria de la Selva

Escuela : Escuela Profesional en ciencia y tecnología de alimentos

Título de Tesis: **MODELAMIENTO DE CINÉTICA DE SECADO DEL  
JERGÓN SACHA (*Dracontium lorentense* K.) POR  
CONVECCIÓN FORZADA**

Autor: Edgard Mallqui Osco

Asesor de Tesis: MSc. Williams Vicente Roldan Carbajal

Programa de Investigación: Ingeniería de Alimentos

Línea (s) de Investigación: Ingeniería de Alimentos

Eje temático de investigación: Desarrollo y Simulación de procesos y/o  
operaciones

Lugar de Ejecución: Tingo María

Año: 2021

Financiamiento : Propio

## ÍNDICE

|   | Página    |
|---|-----------|
| <b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>II. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2.1 Antecedentes.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>2.2 Breve historia y origen del Jergón sachá (<i>Dracontium loretense krause</i>).....</b>                         | <b>4</b>  |
| <b>2.3 Estudios experimentales de secado.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2.4 Deshidratación y modelado matemático.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>III. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>  | <b>12</b> |
| <b>3.1 Lugar de ejecución.....</b>  | <b>12</b> |
| <b>3.2 Materiales y métodos .....</b>   | <b>12</b> |
| <b>3.2.1 Materia prima .....</b>  | <b>12</b> |
| <b>3.2.2 Metodología .....</b>  | <b>13</b> |
| <b>3.2.3 Del secado de los cormos del Jergón Sachá .....</b>  | <b>13</b> |
| <b>3.2.4 Selección.....</b>   | <b>14</b> |
| <b>3.2.5 Lavado y desinfección.....</b>   | <b>14</b> |
| <b>3.2.6 Oreado.....</b>  | <b>15</b> |
| <b>3.2.7 Secado.....</b>  | <b>15</b> |
| <b>3.2.8 Enfriado. ....</b>   | <b>15</b> |
| <b>3.2.9 Empacado .....</b>   | <b>15</b> |
| <b>3.2.10 Experimentos para la obtención de las curvas de secado;Error! Marcador no<br/>                definido.</b> |           |
| <b>3.2.11 Del modelamiento matemático..... ;Error! Marcador no definido.</b>  |           |
| <b>3.2.12 De la Difusividad efectiva y la energía de activación;Error! Marcador no<br/>                definido.</b>  |           |
| <b>3.2.13 De la evaluación del secado por aire caliente .....</b>   | <b>15</b> |
| <b>3.2.14 De los análisis estadísticos .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>19</b> |

|               |   |           |
|---------------|---|-----------|
| <b>4.1</b>    | <b>Análisis químico proximal del jergón sachá.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>4.2</b>    | <b>Perdida de humedad durante el secado. ....</b>   | <b>20</b> |
| <b>4.3</b>    | <b>De los modelos matemáticos.....</b>  | <b>25</b> |
| <b>4.3.1</b>  | <b>Newton .....</b>   | <b>25</b> |
| <b>4.3.2</b>  | <b>Page .....</b>   | <b>26</b> |
| <b>4.3.3</b>  | <b>Henderson.....</b>   | <b>27</b> |
| <b>4.3.4</b>  | <b>Logarítmico: .....</b>   | <b>27</b> |
| <b>4.3.5</b>  | <b>Midilli .....</b>  | <b>28</b> |
| <b>4.3.6</b>  | <b>Dos términos .....</b>   | <b>29</b> |
| <b>4.3.7</b>  | <b>Henderson modificado:.....</b>   | <b>29</b> |
| <b>4.3.8</b>  | <b>Verma: .....</b>   | <b>30</b> |
| <b>4.3.9</b>  | <b>Wang Sing.....</b>   | <b>31</b> |
| <b>4.4</b>    | <b>Criterios estadísticos de ajuste.....</b>  | <b>39</b> |
| <b>4.5</b>    | <b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>) en la aplicación de los modelos experimentales<br/>a los modelos matemáticos en la cinética de secado de los cormos del Jergón<br/>Sachá. ....</b> | <b>43</b> |
| <b>4.6</b>    | <b>Difusividad efectiva de humedad (<math>Deff</math>), Energía de activación (<math>Ea</math>) y <math>Do</math> .</b>   | <b>49</b> |
| <b>V.</b>     | <b>CONCLUSIONES .....</b>   | <b>55</b> |
| <b>VI.</b>    | <b>PROPUESTA A FUTURO .....</b>   | <b>56</b> |
| <b>VII.</b>   | <b>REFERENCIAS .....</b>  | <b>57</b> |
| <b>ANEXOS</b> | <b>.....</b>  | <b>60</b> |

## Índice de tablas

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Tabla 1: Identificación taxonómica del Jergón sachá ( <i>Dracontium lorentense Krause</i> ) .....  | 4                                    |
| Tabla 2: Modelos matemáticos utilizados para evaluar el ajuste de diferentes cinéticas de secado.....  | 7                                    |
| Tabla 3: Modelos matemáticos utilizados para evaluar el ajuste de diferentes cinéticas de secado.....  | 19                                   |
| Tabla 4: Porcentaje de humedad y de materia seca del corno del Jergón Sachá ( <i>Dracontium lorentense K.</i> ) contenido en 100 g de muestra .....  | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Tabla 5: Contenido de Humedad (x) y Velocidad de secado con 1,5 m/s de velocidad del aire .....  | 23                                   |
| Tabla 6: Contenido de Humedad (x) y Velocidad de secado con 2,0 m/s de velocidad del aire .....  | 23                                   |
| Tabla 7: Contenido de Humedad (x) y Velocidad de secado con 2,5 m/s de velocidad del aire .....  | 24                                   |
| Tabla 8: Modelos matemáticos y sus parámetros en la cinética de secado de los cormos del Jergón Sachá ( <i>Dracontium lorentense K.</i> ), a temperatura de 40°C con 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s de velocidad del aire de secado. ....  | 33                                   |
| Tabla 9: Modelos matemáticos y sus parámetros en la cinética de secado de los cormos del Jergón Sachá ( <i>Dracontium lorentense K.</i> ), a temperatura de 50°C con 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s de velocidad del aire de secado. ....  | 35                                   |
| Tabla 10: Modelos matemáticos y sus parámetros en la cinética de secado de los cormos del Jergón Sachá ( <i>Dracontium lorentense K.</i> ), a temperatura de 60°C con 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s de velocidad del aire de secado. .... | 37                                   |
| Tabla 11: Error porcentual absoluto medio (MAE) a 40, 50 y 60 oC de secado de los cormos del Jergón Sachá, a velocidad del aire de 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s.....   | 40                                   |
| Tabla 12: Cuadrado medio del error (MAE) a 40, 50 y 60 oC de secado de los cormos del Jergón Sachá, a velocidad del aire de 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s.....  | 42                                   |
| Tabla 13: Coeficiente de Determinación a diferentes temperaturas de secado, a diferentes velocidades de aire y por modelos matemáticos .....   | 44                                   |
| Tabla 14: Análisis de Varianza de la factorial de las variables Modelos matemáticos, Velocidad de aire de secado y temperatura con interacción entre las variables   | 70                                   |
| Tabla 15: Pruebas de Múltiple Rangos para R <sup>2</sup> por modelos matemáticos, Velocidades y temperatura de secado según Tukey HSD .....  | 70                                   |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 16: Optimización de respuesta para maximizar $R^2$ con un Valor óptimo = 0.99015<br>evaluado en los tres factores .....                                  | 45 |
| Tabla 17: Determinación de $D_{eff}$ , Energía de Activación y $D_o$ a 1,5 m/s la velocidad de<br>secado a 40 °C , 50 °C y 60 °C de temperatura de secado..... | 54 |
| Tabla 18: Determinación de $D_{eff}$ , Energía de Activación y $D_o$ a 2,0 m/s la velocidad de<br>secado a 40 °C , 50 °C y 60 °C de temperatura de secado..... | 54 |
| Tabla 19: Determinación de $D_{eff}$ , Energía de Activación y $D_o$ a 2,0 m/s la velocidad de<br>secado a 40 °C , 50 °C y 60 °C de temperatura de secado..... | 54 |

## RESUMEN

El objetivo fue determinar el mejor modelo en la cinética de secado por convección forzada del *Dracontinium lorentense* K. (Jergón sachá) a tres temperaturas (40; 50 y 60 °C), a tres velocidades (1,5; 2,0 y 2,5 m/s), describiendo el comportamiento de deshidratación de cormos del Jergón Sachá. Las muestras fueron sometidas a un deshidratador con aire forzado incluido una balanza digital interconectada a una computadora con un aplicativo en Visual Basic para obtener la pérdida de peso a través del tiempo. Se estabilizaron las pérdidas de humedad después de 3,4; 3,2 y 2,9 horas a las temperaturas de 40, 50 y 60 °C respectivamente. Las experimentaciones fueron sometidos a 9 modelos matemáticos (Newton, Page; Henderson, Logarítmico, Midilli, Dos términos, Henderson modificado, Verma y Wang Sing ) con 81 tratamientos con tres replicas. Se obtuvo la razón de humedad (MR) experimental y procesadas mediante el software IBM SPSS Statistics para analizar la regresión no lineal y obtener los parámetros de cada uno de los modelos matemáticos para la simulación de curvas de secado. Se realizaron los análisis de varianza entre los R<sup>2</sup> que se ajustan a las curvas por los 9 modelos matemáticos, determinando que el modelo de Midilli se ajusta a los datos experimentales con el menor valor del cuadrado medio del error (RMSE) y el menor error porcentual absoluto (MAE) y un alto valor del coeficiente de determinación R<sup>2</sup> próximo a la unidad, concluyendo que es posible modelar el comportamiento cinético de secado de los cormos del Jergón sachá.

## ABSTRACT

The objective was to determine the best model in the kinetics of drying by forced convection of *Dracontinium lorentense* K. (Sacha sedge) at three temperatures (40; 50 and 60 °C), at three speeds (1,5; 2,0 and 2,5 m/s), describing the dehydration behavior of corms of Sacha sedge. The samples were subjected to a dehydrator with forced air including a digital scale interconnected to a computer with an application in Visual Basic to obtain weight loss over time. Moisture losses were stabilized after 3,4; 3,2 and 2,9 hours at temperatures of 40, 50 and 60 °C, respectively. The experiments were subjected to 9 mathematical models (Newton, Page; Henderson, Logarithmic, Midilli, Two terms, modified Henderson, Verma and Wang Sing ) with 81 treatments with three replicates. The experimental moisture ratio (MR) was obtained and processed using IBM SPSS Statistics software to analyze the nonlinear regression and obtain the parameters of each of the mathematical models for the simulation of drying curves. The analysis of variance between the  $R^2$  fitted to the curves by the 9 mathematical models was performed, determining that the Midilli model fits the experimental data with the lowest value of the root mean square error (RMSE) and the lowest absolute percentage error (MAE) and a high value of the coefficient of determination  $R^2$  close to unity, concluding that it is possible to model the drying kinetic behavior of the corms of Jergón sachá

## I. INTRODUCCIÓN

Una de las operaciones unitarias de los alimentos es la eliminación de agua y la calidad del alimento deshidratado dependerán de tres aspectos fundamentales: El producto debe cortarse en proporciones que faciliten el secado antes de cocinarlo, estropearlo, rellenarlo con moho, lo que es recomendable para cortar o plastificar un tubérculo en cuñas y no escurrirlas por completo. El segundo aspecto es el de la temperatura de secado, que se trata de lograr un ambiente seco y cálido que provoque que el alimento se seque y pierda el agua que contiene por evaporación. El tercer aspecto es el tiempo de secado del alimento, debido a que esta operación transcurre un periodo largo alcanzando hasta en días dependiendo del corte, forma, grosor y tipo de alimento, su contenido en agua y su tamaño (DOYMAZ, 2004)

El problema fundamental con el proceso de secado de los tubérculos de Jergón Sacha y la modelación de la cinética de secado es actualmente una información limitada ya que no existe bibliografía que facilite el proceso de deshidratación.

Las razones que nos llevaron a estudiar la modelización de la cinética de secado de los tubérculos de Jergón Sacha se centran en el hecho de que estas unidades son importantes para la conservación de plantas medicinales y aromáticas después de la cosecha, reducen el contenido de agua y reducen el límite de deterioro. Por estos motivos se justifica dominar el proceso de secado para optimizarlo. Conocer las variables que intervienen en la cinética del secado nos permite asegurar un producto que se adapta a su finalidad. Con los métodos de secado habituales, las plantas, hojas, frutos y raíces se secan casi inmediatamente después de la cosecha.

Con el fin de conservar estas plantas de temporada y ponerlas a disposición de los consumidores durante todo el año que son sometidos a un tratamiento de secado. El uso del proceso de secado tiene varias ventajas, desde la preservación del producto hasta la distribución del mismo.

TASSANEEYAKUL et al., (2004), mencionan que otras ventajas son: inhibición contra la degradación oxidativa y enzimática, reducción de peso, exención de enfriamiento durante el transporte y almacenamiento, disponibilidad del producto en cualquier época del año y valor agregado para el producto secador, secador solar de método directo e indirecto; pero

ninguno del modelado de la cinética de secado utilizando un secador de bol de aire caliente forzado para los cuernos de Jergón Sacha.

Otras ventajas mencionadas son: inhibición de la oxidación y degradación enzimática, reducción de peso, enfriamiento durante el transporte y almacenamiento, disponibilidad del producto en cualquier época del año y valor agregado al secar el producto, métodos directos e indirectos de secadores solares; pero no existe modelamiento de la cinética de secado en cormos de Jergon Sacha usando un secador de cabina con aire caliente forzado.

Por estas razones, la presente investigación se ha propuesto los siguientes objetivos:

Modelar la cinética de secado por convección forzada del *Dracontinium loretense* K. (Jergón sachá)

Modelar y determinar las curvas de secado de los cormos del Jergón sachá en función de la temperatura y velocidad del aire de secado.

Determinar la difusividad efectiva y la energía de activación durante el secado de los cormos del Jergón sachá.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Antecedentes

En el estudio "Modelado de la cinética del secado por convección forzada de semillas de *Erythrina pajuro* (pajuro) por convección, las tareas fueron caracterizar las semillas de pajuro, modelar y evaluar varias correcciones cinéticas por convección y determinar los coeficientes de secado de semillas de pajuro, difusividad másica y energía de activación, para lo cual se utilizó el secador de bandejas de aire convectivo para 12 tratamientos por triplicado a temperaturas de 40, 50, 60 y 70 °C y velocidades de aire de 1,8; 2,2 y 2,7 m/s. Se utilizaron 8 modelos matemáticos de secado para simular el ajuste de secado obtenidos en el laboratorio (Logarítmico, Page, Exponencial binomial, Newton, Henderson y Pabis, Midilli, Verma y Henderson y Pabis modificado). El que simula mejor la cinética de secado es el modelo matemático de Medilli a las respuestas experimentales, con ( $R^2$ ) de 0,999 a 1,000, (RMSE) de 0,003701 a 0,011820, (MBE) de 0,000017 a 0,001398. La Deff fue  $3,08015 \times 10^{-11}$  a  $7,57879 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s y la energía de activación de 14,590 a 23,721 kJ/mol. (SALAZAR, 2020).

En la investigación "Modelado de las cinéticas de secado de tres variedades de mandioca industrial", utilizando tres variedades, se utilizó un deshidratado modelo túnel; se calificó la importancia de la temperatura, variedad y velocidad de aire forzado a través del tiempo, se practicó DCA en arreglo factorial a temperaturas 45, 55 y 70 °C, velocidad de aire de secado 1; 3 y 4 m/s y variedad (*Corpoica Tai*, *Gines* y *Veronica*), con tres replicas por experimento. Con los resultados obtenidos se diseñaron las curvas de pérdida de agua, observándose el periodo decreciente. El modelo matemático de Page obtuvo la mejor simulación mediante el  $R^2$  y SSE. (TORREGROZA et al., 2014)

ŚLEDZ et al., (2013), realizaron el estudio para describir la cinética de secado por microondas de convección de la albahaca (*Ocimum basilicum*), apio de montaña (*Levisticum officinale*), menta (*Mentha sp.*), El orégano (*Origanum vulgare*), perejil (*Petroselinum crispum*), y roqueta (*Eruca vesicaria*) por medio de diferentes modelos matemáticos, así como para describir los cambios de propiedades de contenido de polifenoles, de color y de sorción después del secado

## 2.2 Breve historia y origen del Jergón sachá (*Dracontium lorentense* K).

El Jergón sachá, planta que puede medir hasta de 4 m de largo; el tronco y la raíz tienen pequeñas féculas, con numerosos cormelos; parénquima reservante con cristales ámbar, rafidios y la raíz en forma de papa que puede pesar hasta 8 kilos (MEJIA y RENGIFO, 2000). Su denominación científica es (*Dracontium lorentense* k.), en la Amazonia Peruana se conoce vulgarmente como Jergón sachá. La planta se usa como antibiótico, antirreumático, así como para el tratamiento de las hernias y tumores malignos y úlceras gastrointestinales. (MEJIA y RENGIFO, 2000)

Tabla 1: Identificación taxonómico del Jergón sachá (*Dracontium lorentense* K.)

|                   |                                 |
|-------------------|---------------------------------|
| División XVII     | Angiospermae                    |
| Reino             | Plantae                         |
| Clase             | Monocotiledoneo                 |
| Orden             | Alismatales                     |
| Familia           | Araceae                         |
| Sub familia       | Lasioideas                      |
| Género            | <i>Dracontium</i>               |
| Especie           | <i>Dracontium spruceanum</i>    |
| Nombre común      | Jergón sachá                    |
| Nombre científico | <i>Dracontium lorentense</i> k. |

Fuente: MEJIA y RENGIFO, (2018)

Shano Yorao Ani Ronon Rao (según lengua nativa) es mencionada en la selva peruana, lo describe la tribu Shipibo-Conibo del departamento de Ucayali, significa jergón y “Y R A” significa Cuerpo, quiere decir “jergón Cuerpo”; dicho de otra forma, Cuerpo de jergón o Piel de jergón; “ANI” significa Grande o Alto; “RONON” significa víbora, y “RAO” significa Remedio; lo que quiere decir, Grande Víbora Remedio o Remedio muy eficaz para mordedura de Víbora . (MEJIA y RENGIFO, 2000)

### 2.3 Estudios experimentales de secado

En el estudio de optimización del proceso de secado infrarrojo de arándanos, el objetivo fue deshidratar e investigar el efecto de los parámetros y las condiciones de secado en la calidad de las pasas de arándano. Las variedades Blue Cuinex , Georgia Gem , Reveille y O'Neal, Misty presentes en la región de Salto Grande (Argentina) fueron secados luego de la poscosecha en un secador infrarrojo (IRC) con una energía infrarroja de 400 W y una velocidad del viento de 0,3 m/s. Como variables fue los grados Brix del fruto, las fases de pretratamiento por inmersión en solución de NaOH (concentración 0,0 – 0,75 – 1,5%, tiempo de remojo 0 – 15 - 30 s (baño a temperatura ambiente) y temperatura de secado (105-110 – 115 °C). Las variables de respuesta a las diferentes condiciones de operación fueron la retención de antocianinas, la textura y el tiempo de secado. Según el modelo de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) corresponde a un alto índice de correlación para isothermas de humedad de equilibrio a 25, 45 y 105 °C. Difusión de humedad efectiva, los valores obtenidos a 105, 110 y 115 °C fueron 6,54; 7,27 y 7,75 x 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s, respectivamente. La energía de activación calculada a partir de la difusión efectiva media según la ecuación de Arrhenius es de 20,73 kJ/mol y de 34,30 kJ/mol cuando se calcula según el parámetro K (min<sup>-1</sup>) de Page (Vuarant, 2013).

PANTOJA et al., (2016), estudiaron el secado de arvejas de las variedades Obonuco Andina y Sureña a temperaturas entre 45 y 60 °C con una velocidad del viento de 1,5 m/s. Un aumento de la temperatura redujo el tiempo de procesamiento de ambos cultivares. El modelo de Verma describió satisfactoriamente el proceso en términos de coeficientes de bondad de ajuste, error relativo medio e intervalos de confianza para los parámetros del modelo. El coeficiente de difusión efectivo (Deff) y la energía de activación (Ea) se calcularon utilizando la respuesta mediante la segunda ley de Fick para forma esférica y despreciando la resistencia externa. La difusividad efectiva Deff se creció con el aumento de la temperatura, entre 1,649×10<sup>-10</sup> y 2,585\*10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s para variedad Obonuco Andina y entre 1,752\*10<sup>-10</sup> y 2,586×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s para la variedad Sureña. La energía de activación Ea para la variedad Obonuco Andina fue de 26,87 kJ/mol y para la variedad Sureña fue de 25,29 kJ/mol

DELGADO et al., (2016), determinaron los efectos de la edad de cosecha y la sequedad de las hojas sobre la composición y concentración de aceites esenciales en tres especies de *Lippia origanoides* K. (Patía, Cítrica, Tépica) y dos accesiones de *Lippia alba* (Mill.) N.E.Br. ex Britton & P. Wilson (Cítrica y Tépica), cultivada en campo abierto en el campus de Palmyra de la Universidad Nacional de Columbia. Se evaluaron dos factores de secado y tres tiempos de cosecha en un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones. Se determinó que el secado aumentó la concentración de los constituyentes principales de las especies en estudio y que la edad de la planta en el momento de la cosecha no tuvo efecto sobre la concentración o composición de los aceites esenciales.

GÓMEZ-DAZA y OCHOA-MARTÍNEZ (2016), modelaron el comportamiento matemático de capa fina para deshidratar rodajas de *daucus carota* (zanahoria) utilizando un secador con disipador de calor (HPD). Con el afán de encontrar el mejor ajuste a la curva de secado, se estudiaron diez tipos de modelaje. Los parámetros de los modelos matemáticos se obtuvieron mediante el software Sigma-Plot y la proximidad de su ajuste se determinó mediante el  $R^2$ ; Chi-cuadrado; error estándar del estimado (SEE) y raíz del error cuadrado medio (RMSE). Se estudió el efecto de la HR, el espesor de la muestra y la velocidad del aire de secado sobre la Deff del proceso usando la teoría de superficie de respuesta. Todos los ajustes fueron aceptados correctamente y se calificó al modelo de Wang-Singh como el superior, demostrados estadísticamente

#### **2.4 Deshidratación y modelado matemático.**

La operación unitaria de la eliminación de agua logra el decremento de costos en el transporte reduciendo el peso y el volumen, así como la conservación del alimento al reducir la movilidad de agua (DARVISHI, 2014)

Todos los alimentos contienen nutrientes de alto, medio o bajo valor energético, proteico y biológico, que a presiones altas y temperaturas extremas, con mucha acidez, pueden alterar la operación de secado por lo tanto no todos los experimentos de secado pueden aplicarse con igual razón sobre cualquier alimento. Deben considerarse, los fenómenos de transporte de masa, de calor y de ímpetu en las operaciones y/o procesos de secado, convirtiéndose la transferencia por convección, radiación (IBARZ et al., 2005).

La deshidratación de los alimentos está en función de las operaciones de transferencia de masa y energía, entre otros, según los modelos: Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis modificado, Verma, Two term exponential, Wang and Singh, Henderson y Pabis, Difusional, Midilli y Logaritmico (ERTEKIN y YALDIZ, 2004)

El fenómeno de secado está enmarcado por el modelado matemático siendo necesario cuantificar la determinación de las variables y su optimización, por lo tanto, los modelos matemáticos deben simular el proceso de secado (FERREIRA y COSTA, 2010)

Las hojas de *Lippia alba* fueron sometidos a secado con temperaturas de aire de 40, 50, 60, 70, y 80 °C y una velocidad de  $0,29 \pm 0,03$  m/s para observar la cinética de secado concluyendo que el modelo de Medilli representaba el mejor modelo (MIDILLI, KUCUK, y YAPAR , 2002. Para describir la cinética de secado de las hojas de tomillo el modelo de Page fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales (ROCHA et al., 2012). CARTERI et al., (2014) concluyeron que modelo matemático de “two terms” es adecuado para describir el proceso de secado de las hojas de hierba luisa (*Cymbopogon citratus* S).

Tabla 2: Ecuaciones matemáticas que describen la cinética de secado

| Nombre                          | Modelo                                    | Referencia              |
|---------------------------------|---|-------------------------|
| <b>Newton</b>                   | $MR = e^{-kt}$                            | (Togrul, 2004)          |
| <b>Page</b>                     | $MR = e^{-kt^n}$                          | (Saeed et al., 2006)    |
| <b>Henderson</b>                | $MR = a.e^{-kt}$                          | (Saeed et al., 2006)    |
| <b>Logarítmico</b>              | $MR = a.e^{-kt} + b$                      | (Akpınar y Bicer, 2005) |
| <b>Midilli</b>                  | $MR = a.e^{-kt^n} + bt$                   | (Midilli., 2002)        |
| <b>Dos términos</b>             | $MR = ae^{-kt} + b.e^{-gt}$               | (Lahsasni et al., 2004) |
| <b>Henderson modificado</b>     | $MR = ae^{-kt} + b.e^{-gt} + c.e^{-ht+c}$ | (Kaya et al., 2007)     |
| <b>Verma</b>                    | $MR = a.e^{-kt} + (1-a).e^{-gt}$          | (Doymaz, 2004)          |
| <b>Dostérminos exponencial</b>  | $MR = a.e^{-kt} + (1-a).e^{-kat}$         | (Sacilik et al., 2006)  |
| <b>Aproximado a la difusión</b> | $MR = a.e^{-kt} + (1-a).e^{-kbt}$         | (Wang et al., 2007)     |
| <b>Wang Singh</b>               | $MR = 1 + a.t + b.t^2$                    | (Wang et al., 2007)     |
| <b>Page modificado</b>          | $MR = e^{(-kt)^n}$                        | (Arslan y Musa, 2010)   |

Fuente: (AKPINAR y BICER, 2005)

Donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $g$ ,  $n$  y  $h$  son variables de ajuste de los modelos,  $t$  significa el tiempo de deshidratación y  $\mu$  significa el cociente sin dimensiones de humedad.

MR, comprende la cantidad de la humedad libre en función del tiempo ( $t$ ) con el contenido de humedad inicial ( $M_0$ ). Para determinar las humedades libres se inicia del valor del contenido de agua en el equilibrio ( $M_e$ ); en este punto, la presión de vapor de agua al interior del alimento habrá igualado la presión de vapor en el medio secante.

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

#### **2.4.1 Experimentos para la obtención de las curvas de secado**

Los análisis de laboratorio de secado consistieron en una capa fina acoplado por un sistema de ventilación forzada obligado a la entrada del aire a velocidades controlables hacia el centro o cabina donde se encuentra los cormos del Jergón Sacha cortados a 3 cm de espesor aproximadamente se muestra en la Figura 2. El secador se adaptó a una balanza que administra la pérdida de humedad en función al tiempo mediante un software que permite obtener datos del tiempo en función de pesos o disminución de la humedad de los cormos del Jergón sachá. La velocidad del aire fue conceptuada por medio de un anemómetro digital.



**Figura 2:** Secador por convección, interconectado a una computadora.

#### 2.4.2 Del modelamiento matemático

Teniendo conocimiento la segunda ley de Fick, y como variables relaciona a la difusividad másica o pérdida de humedad según el modelo difusional desarrollado en la Ecuación (2), para placas infinitas para tiempos largos, como se muestra:

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

De la sumatoria de la ecuación 2, se toma solo un termino:

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

*Tambien:*

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

Luego:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (5)$$

Se registraron las temperaturas mediante un sensor térmico, DATA TRACE con su respectivo software, luego los datos son transferidos a una hoja electrónica y procesándolos a una base de datos de eliminación de humedad en calculado en base seca. Luego, se calculo la razón de humedad (MR) según la Ecuación 1 con el objetivo de ajustar a las 9 ecuaciones matemáticas mencionados en la Tabla 2, estas ecuaciones matemáticas fueron mencionados por diferentes estudios experimentales en materias agrícolas.

El modelo matemático que se muestra en la Tabla 3 utiliza la variable dependiente (MR) mencionada en la Ecuación 2, que relaciona la diferencia de gradiente de humedad en tiempo real de la muestra con la humedad inicial y de equilibrio. Entonces se supone que el coeficiente de difusión (Deff) es constante de acuerdo con la Ecuación 1. Donde:  $M_t$  es el contenido de humedad en tiempo real ( $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{m.s.}}$ );  $M_o$  es el contenido de humedad inicial ( $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{m.s.}}$ ),  $M_{eq}$  es el contenido de humedad de equilibrio ( $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{m.s.}}$ ), MR es la fuerza impulsora (adimensional); Deff es el coeficiente de difusión efectivo del agua ( $\text{m}^2/\text{s}$ ); t es el tiempo (segundos), L es la mitad del espesor de la última hoja (m), y n es el número de series a sumar.

### 2.4.3 De la Difusividad efectiva y la energía de activación

La difusión efectiva se calcula utilizando la ecuación integral de la segunda ley de Fick en tiempo indefinido a través de una placa infinita propuesta por (KOUKOUCH, et al., 2017). Esto se tabula trazando el logaritmo natural de la relación de humedad (MR) frente al tiempo (segundos), ajustando este gráfico a un modelo lineal y usando la pendiente de la ecuación del modelo para calcular la difusión (Ecuación 6).

Se calcula la difusividad efectiva mediante la siguiente ecuación (KOUKOUCH, y otros, 2017)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{ef}}{L^2} t \quad (6)$$

Donde:

L: Mitad del espesor del espesor de las muestras (m)

t: tiempo (s)

Difusividad efectiva ( $D_{ef}$ )

La energía de activación se describe mediante el modelo de Arrhenius, que relaciona la difusividad con la temperatura.

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT} \quad \text{Ec (7)}$$

Dónde:

$D_{ef}$  : Difusividad efectiva (m<sup>2</sup>/s)

$D_0$  : Variable de Arrhenius (m<sup>2</sup>/s)

$E_a$  : Energía de activación

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

$T$  : Temperatura (K)

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Lugar de ejecución**

Los experimentos del trabajo de investigación se realizaron en los laboratorios de ingeniería de alimentos, análisis de alimentos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada a una altitud de 660 m, a una temperatura de 25°C, en la región Andrés Bello, provincia de Leoncio Prado, distrito de Rupa Rupa, localidad de Tingo María, . Utilizando el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Agraria La Cerva: Laboratorio de Ingeniería y Análisis de Alimentos.

#### **3.2 Materiales y métodos**

##### **3.2.1 Materia prima**

Se utilizó los cormos del Jergón sachá proveniente del Instituto de Investigación de la Amazonia (INIIA) del departamento de Ucayali.

##### Materiales

- Termómetros
- Vasos de precipitación (10 mL a 1000 mL)
- Fiolas (10 mL a 1000 mL)
- Tubos con tapa de 15 y 20 mL.
- Tubos de ensayo Pírex USA.
- Gradillas
- Matraz 250 mL. Kimax USA.
- Probetas de 500,100 y 10 mL.
- Equipo de desecación con silicagel.
- Platos de porcelana, Haldenwanger Berlín.
- Papel filtro Watman N° 42
- Escalímetro
- Malla metálica moldeable
- Paños absorbentes
- Franelas

- Bolsas plásticas y de aluminio

#### Equipos

- Anemómetro
- Secador de bandejas de aire forzado
- Estufas de laboratorio: TOMOS, ODHG 9076 A, Heating Drying Oven
- Selladora de bolsas
- Mufla
- Cámara fotográfica
- Reactivos
- Fenolftaleína

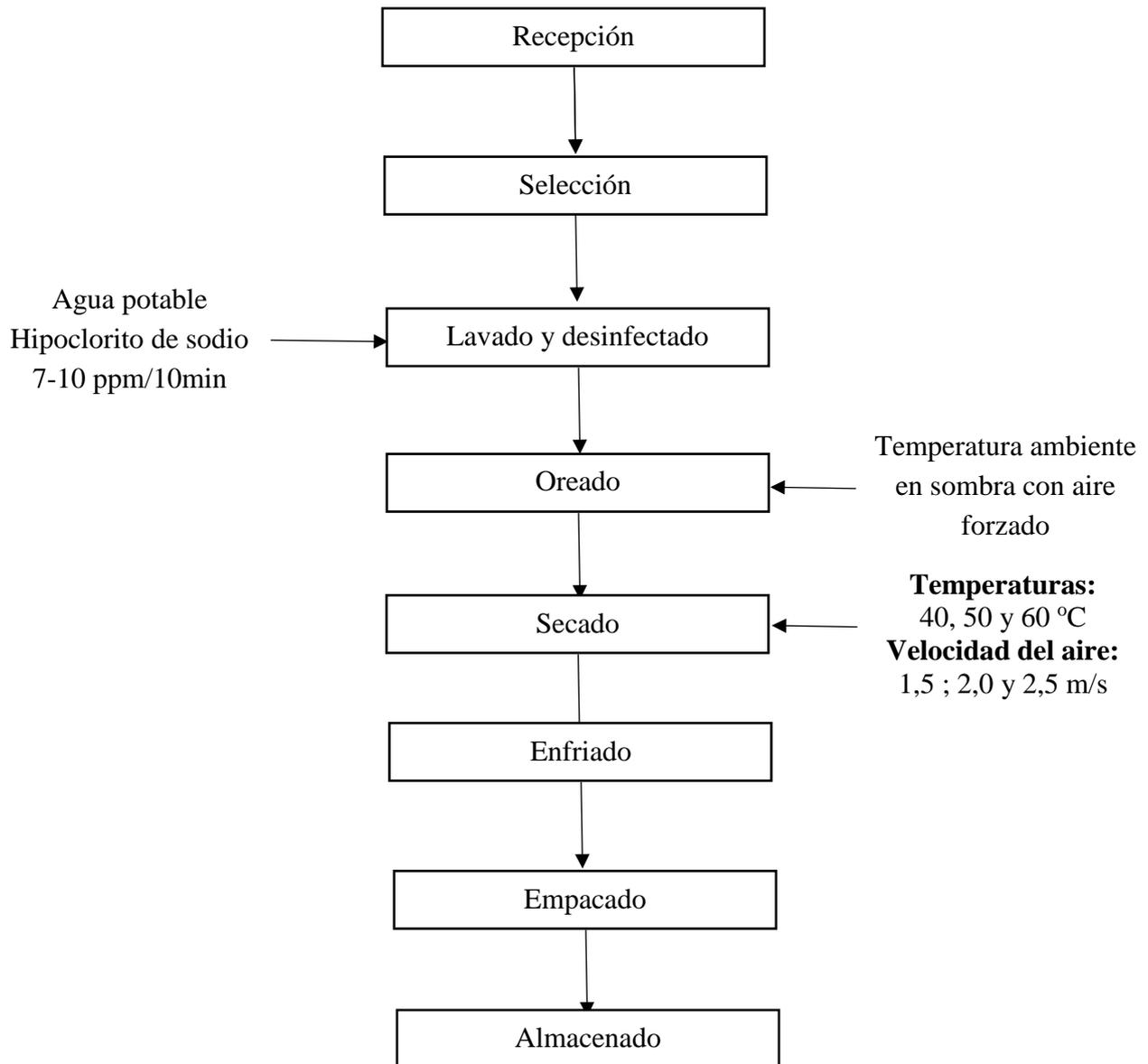
### 3.2.2 Metodología

Se realizaron análisis diferenciales de grasa, humedad, cenizas, proteína, fibra y carbohidratos de acuerdo con los métodos estándar de la AOAC. Se lleva a cabo en el laboratorio de la Universidad Nacional Agraria la selva.

- Grasa, método 935.60 AOAC. (1997).
- Proteína, método 991.29 AOAC (1997).
- Humedad, método 23.003 AOAC (1997).
- Ceniza, método 942.50 de calcinación directa AOAC (1997).
- Carbohidratos por diferencia entre los demás componentes del análisis fisicoquímico
- .pH; método (AOAC, 1995).
- 

### 3.2.3 Del secado de los cormos del Jergón Sacha

El secado del Jergón sachá se realizará según LA FIGURA 1:



**Figura 1.** Flujograma para la deshidratación de los cormos del Jergón sachá

### 3.2.4 Selección

Se seleccionan los mejores tubérculos que estén bien formados, de tamaño uniforme y sin signos de daño físico y luego se separan del tallo y las raíces.

### 3.2.5 Lavado y desinfección

Se lavaron con agua limpia, eliminando los residuos de tierra y suciedad adheridos a los cormos, que recogen durante la cosecha y transporte; luego los cormos

lavados se dejaron en inmersión en una solución de 7 a 10 ppm de hipoclorito de sodio por 10 minutos para su desinfección.

Se lavan con agua limpia para eliminar los residuos de tierra y suciedad de los bulbos recolectados durante la cosecha y el transporte. Luego, los cormos lavados se desinfecta sumergiéndolo en una solución de hipoclorito de sodio de 7 a 10 ppm durante 10 minutos.

### **3.2.6 Oreado**

Esta operación se realiza con la finalidad de eliminar el agua superficial de los cormos del lavado y desinfección, para minimizar el deterioro de la muestra se orea a temperatura ambiente con aire forzado.

### **3.2.7 Secado.**

Se llevo los cormos previamente preparados al secador de bandeja por arrastre de aire caliente dándole 3mm de espesor, a las temperaturas de 40, 40, 50 y 60°C cada una a las velocidades de 1,5; 20 y 2,5 m/s, el tiempo de secado será una variable dependiente.

### **3.2.8 Enfriado.**

Operación que se llevo a cabo con el objetivo de bajar la temperatura y adaptarse para el empaclado y almacenamiento.

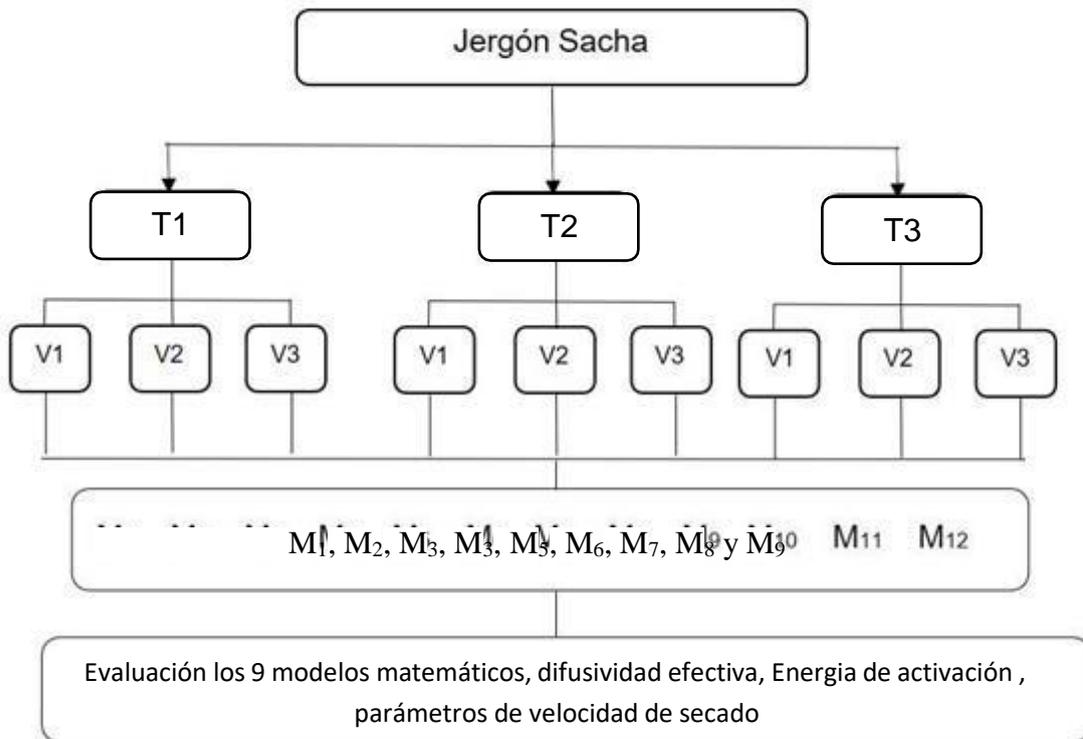
### **3.2.9 Empacado**

Los cormos secos se empacaron en bolsas de polietileno y almacenado en condiciones ambientales.

### **3.2.10 De la evaluación del secado por aire caliente**

El secado de los cormos del Jergón sachá se realizó considerando como variables independiente las temperaturas del aire:  $T_i$ : 40; 50 y 60 °C, las velocidades del aire:  $V_i$ : 1,5 ; 2,0 y 2,5 m/s, los modelos que se encuentran citados en el Tabla 1;  $M_i$ :  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_3$ ,  $M_5$ ,  $M_6$ ,  $M_7$ ,  $M_8$  y  $M_9$  y como variables dependientes los coeficientes de los 9 ecuacionese

matemáticos, difusividad efectiva, energía de activación y los parámetros de velocidad de secado, como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Esquema experimental para la evaluación del modelado del secado del jergón Sacha

**Temperaturas del aire:**  $T_i$ : 40; 50 y 60 °C

**Velocidades del aire:**  $V_i$ : 1,5 ; 2,0 y 2,5 m/s

**Modelos matemáticos:**  $M_1, M_2, M_3, M_3, M_5, M_6, M_7, M_8$  y  $M_9$

### 3.2.11 De los análisis estadísticos.

Las variables independientes en consideración son el tiempo, velocidad del aire y la temperatura del aire; por otro lado, las variables dependientes son la velocidad de secado y difusividad efectiva, energía de activación.

La elección del mejor modelo matemático para estimar la dinámica de secado de los cormos Jergón Sacha está en función de varios parámetros estadísticos,

como el coeficiente determinante ( $R^2$ ), la tasa de error, la reducción del error cuadrático medio, la base del error cuadrático medio, la desviación media y el cuadrado medio (AVHAD y MARCHETTI, 2016)

La variación de la masa húmedad del producto  $MR(t)$  como una función del tiempo se determina al hacer pesadas sucesivas dentro de un período de 60 s con la ayuda de un aparato de pesaje digital. Al final de cada experimento, se procede a modelar los datos obtenidos con 9 modelos empíricos propuestos en el Tabla 2.

El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) es uno de los principales criterios para elegir el mejor modelo. Además, la evaluación del ajuste del modelo también está determinada por varios parámetros estadísticos ampliamente utilizados, el error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE) (AVHAD & MARCHETTI, 2016). Las expresiones de parámetros anteriores se escriben de la siguiente manera:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre,i}) * (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre,i})^2 * \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre,i})^2}} \quad (8)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (9)$$

$$E_{RMS} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i}) \quad (11)$$

Donde,  $MR_{exp,i}$  es la proporción de humedad experimental;  $MR_{pre,i}$  es la proporción de humedad experimental predicho por el modelo; N: número de observaciones; Z número de constantes del modelo.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Análisis químico proximal del jergón sachá.

En la Tabla 03, se presenta la composición químico proximal del corno del *D. lorentense* K. (Jergon Sacha) por cada 100 g de muestra, La humedad promedio es de 71,45 %, La proteína es de 1,97%, la grasa es de 0,13 %, la ceniza es de 0,83 % , la fibra es de 0,16 %, y los carbohidratos es de 25,47% del contenido en 100 g de muestra. El contenido de humedad así como los carbohidratos son los que presentan el mayor porcentaje.

Tabla 3: Ecuaciones matemáticos utilizados para evaluar el ajuste de diferentes cinéticas de secado

| <b>Variables Cuantitativas</b> | R1 (%) | R2 (%) | R3 (%) | Promedio (%) | Desviación estándar |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------------|---------------------|
| Humedad                        | 71,45  | 71,48  | 71,42  | 71,45        | 0,030               |
| Proteína                       | 1,98   | 1,95   | 1,97   | 1,97         | 0,015               |
| Grasa                          | 0,12   | 0,13   | 0,13   | 0,13         | 0,006               |
| Ceniza                         | 0,81   | 0,86   | 0,82   | 0,83         | 0,026               |
| Fibra                          | 0,16   | 0,17   | 0,14   | 0,16         | 0,015               |
| Carbohidratos                  | 25,3   | 25,4   | 25,7   | 25,47        | 0,208               |

En la Tabla 04 (anexo), se muestra el porcentaje de humedad  $75,450 \pm 0,030$ , también se muestra el porcentaje de materia seca  $12,935 \pm 0,837$ ; obteniéndose la humedad en base seca de  $5,539 \pm 0,346$ ; estos valores coinciden con lo reportado por (RAMIREZ, 2004), con 75,2 % de humedad; 22,40 % de carbohidratos; proteína 0,8 %, grasa 0,2 %.

YUMBATO y ALOMIA (2018), reportaron un  $2,89 \pm 0,07$  g de agua por cada 100 g de muestra en harina de los cormos del Jergón Sacha , lo cual difiere con nuestra investigación, reconociendo que las muestras analizadas en este trabajo fueron muestras frescas, extraídas un día antes del suelo.

## **4.2 Pérdida de humedad durante el secado.**

En los análisis experimentales del secado, el aire del medio ambiente mantenía una temperatura en un margen de 21 a 32 °C y humedad relativa de 60% a 85%, mientras que la temperatura del aire de secado de 40 a 60 °C y humedad relativa de 37% a 62%.

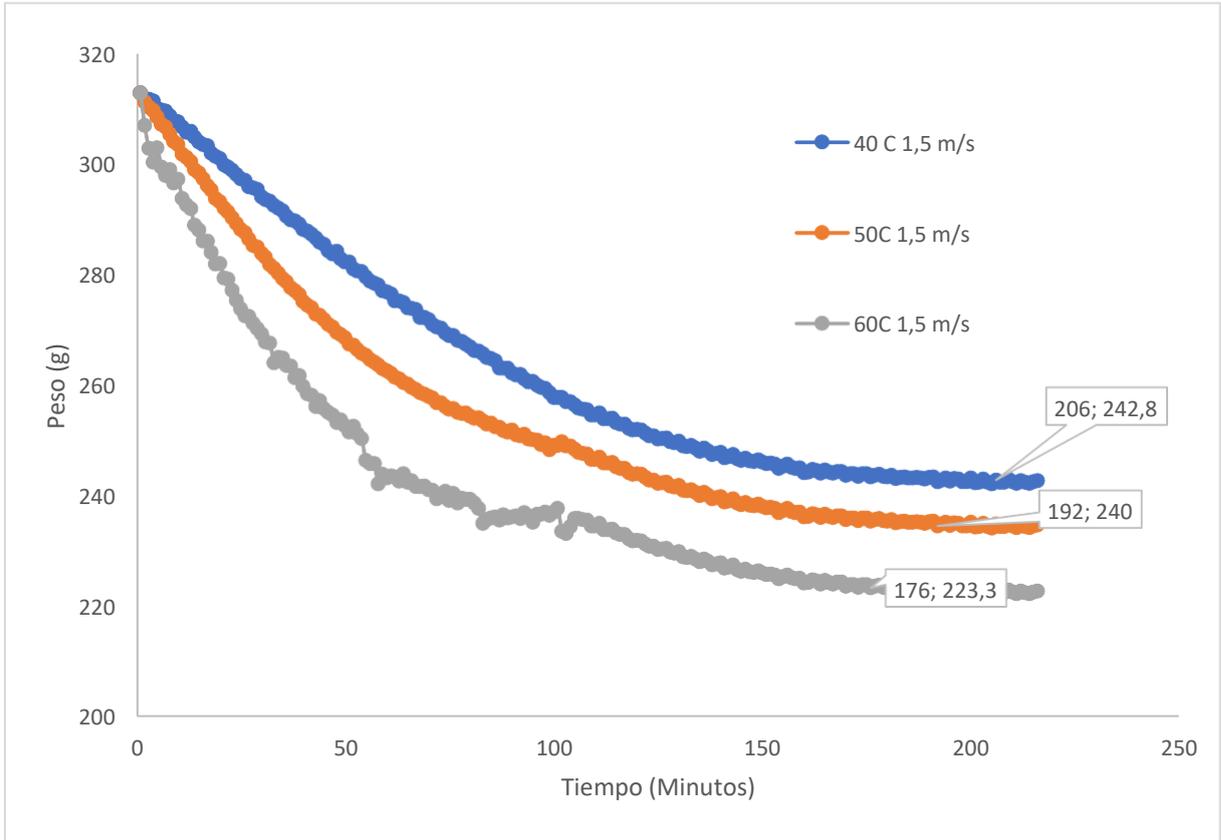
En el Anexo 01, se detallan los datos de la pérdida de humedad a las temperaturas de 40, 50 y 60 °C con velocidades de aire de 1,5: 2,0 y 2,5 m/s.

En las Figura 03 se detallan las curvas de secado a 1,5 m/s de velocidad del aire a 40°C, 50 °C y 60 °C, observándose que a 206, 192 y 176 minutos respectivamente alcanzaron humedades de equilibrio.

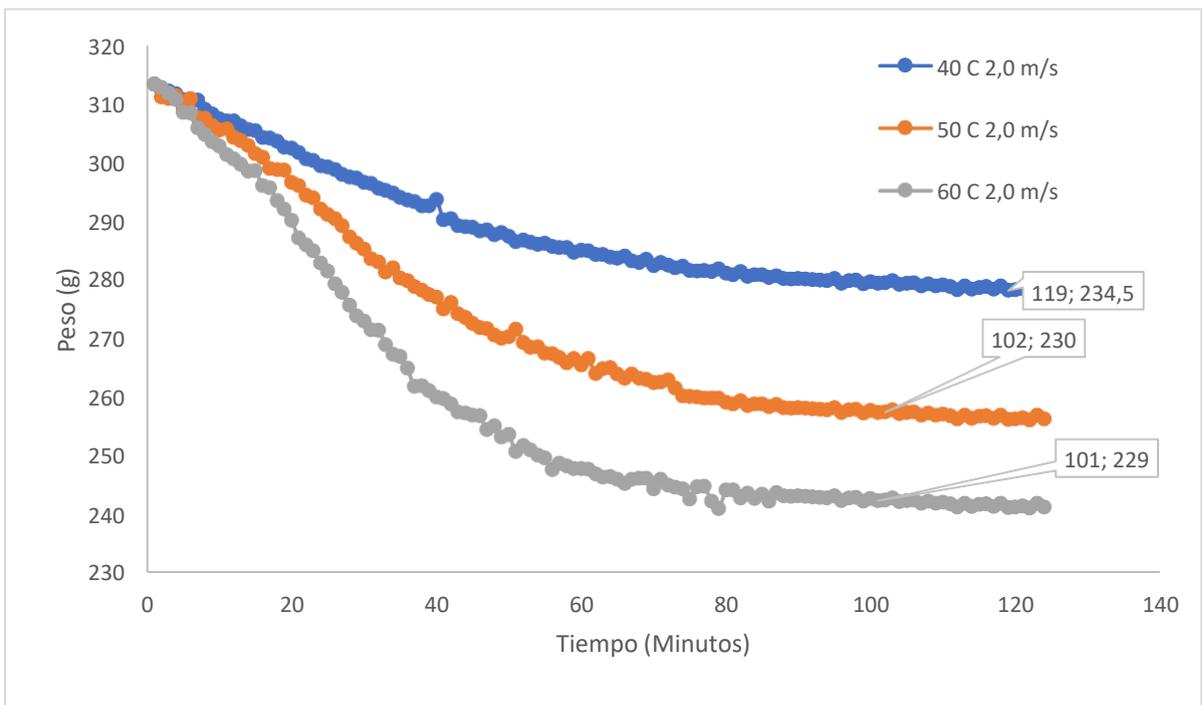
En la Figura 04, se detallan las curvas de secado a 2,0 m/s de velocidades del aire a 40°C, 50 °C y 60 °C, observándose que a 119, 102 y 101 minutos respectivamente alcanzaron humedades de equilibrio.

En la Figura 05, se muestran las curvas de secado a 2,5 m/s de velocidades del aire a 40°C, 50 °C y 60 °C observándose que a 118, 101 y 100 minutos respectivamente alcanzaron humedades de equilibrio.

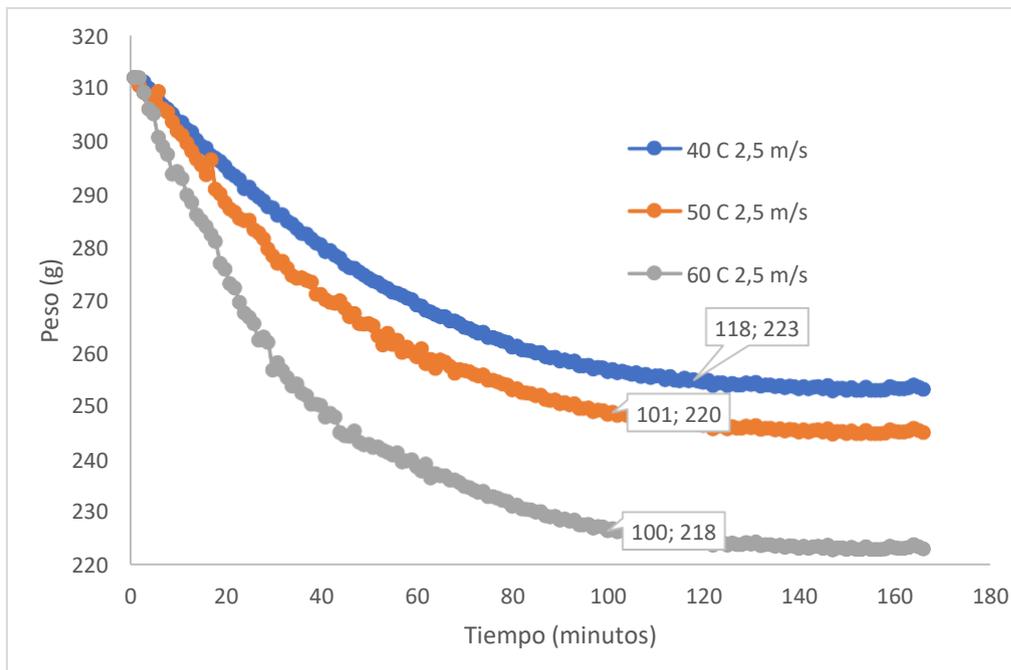
En el estudio del secado de maqui, a la temperatura de 40 °C fue determinado un tiempo de secado hasta la humedad de equilibrio de 10,5 horas, mientras que a 60 y 80 °C ese tiempo de secado correspondió a 6 y 3 horas, respectivamente. (GATICA, 2015)



**Figura 03:** Curvas de secado a 1,5 m/s de velocidades del aire a 40°C, 50 °C y 60 °C



**Figura 04:** Curvas de secado a 2,0 m/s de velocidades del aire a 40°C, 50 °C y 60 °C



**Figura 05:** Curvas de secado a 2,5 m/s de velocidades del aire a 40°C, 50 °C y 60 °C

De las Figuras 03; 04 y 05, se muestra que, a mayor velocidad del aire inferiores serán los tiempos de secado.

En la Tabla 05, muestra el contenido de Humedad (x) y Velocidad de secado a 1,5 m/s de velocidad del aire de secado a las temperaturas de 40, 50 y 60 °C, observándose que a 40 °C de temperatura de secado se tiene una pérdida de humedad de 1,32506890 g<sub>agua</sub>/g<sub>ms</sub> y la velocidad de secado de 0,0001851852 g<sub>agua</sub>/scm<sup>2</sup>; a 50 °C de temperatura de secado se tiene una pérdida de humedad de 1,24922488 g<sub>agua</sub>/g<sub>ss</sub> y la velocidad de secado de 0,0002237037 g<sub>agua</sub>/scm<sup>2</sup> así como a 60 °C de temperatura de secado se tiene una pérdida de humedad de 1,1506714 g<sub>agua</sub>/g<sub>ms</sub> y la velocidad de secado de 0,0002469136 g<sub>agua</sub>/scm<sup>2</sup>.

En la Tabla 06, muestra el contenido de Humedad (x) y Velocidad de secado a 2,0 m/s de velocidad del aire de secado a las temperaturas de 40, 50 y 60 °C, observándose que a

40 °C de temperatura de secado se tiene una pérdida de humedad de 1,233886526 gH<sub>2</sub>O/g<sub>ss</sub> y la velocidad de secado de 0,0002056757 g<sub>agua</sub>/scm<sup>2</sup>, a 50 °C de temperatura de secado se tiene una pérdida de humedad de 1,01956800 g<sub>agua</sub>/g<sub>ss</sub> y la velocidad de secado de y la velocidad de secado de 0,0002534563 g<sub>agua</sub>/scm<sup>2</sup>, así como a 60 °C de temperatura de secado se tiene una pérdida de humedad de 1,00923076 g<sub>agua</sub>/g<sub>ms</sub> y la velocidad de secado de y la velocidad de secado de 0,0003245675 g<sub>agua</sub>/scm<sup>2</sup>.

En la Tabla 07, muestra el contenido de Humedad (x) y Velocidad de secado a 2,5 m/s de velocidad del aire de secado a las temperaturas de 40, 50 y 60 °C, observándose que a 40 °C de temperatura de secado se tiene una pérdida de humedad de 1,13547668 g<sub>agua</sub>/g<sub>ss</sub> y la velocidad de secado de 0,0002756842 g<sub>agua</sub>/scm<sup>2</sup>, a 50 °C de temperatura de secado se tiene una pérdida de humedad de 1,00195475 g<sub>agua</sub>/g<sub>ms</sub> y la velocidad de secado de 0,0003156757 g<sub>agua</sub>/g<sub>ss</sub>, así como a 60 °C de temperatura de secado se tiene una pérdida de humedad de 1,00023548 g<sub>agua</sub>/g<sub>ss</sub> y la velocidad de secado de 0,0003675676 g<sub>agua</sub>/scm<sup>2</sup>.

De las Tablas 05, 06 y 07, se puede concluir que a la misma velocidad de aire de secado al aumentar la temperatura disminuye el tiempo en alcanzar la humedad de equilibrio, también disminuye la humedad (x), sin embargo incrementa las velocidades de aire a la misma temperatura, se incrementa la pérdida de Humedad (x) g<sub>agua</sub>/g<sub>ss</sub>, ocurre lo mismo con la velocidad de secado (W) (g<sub>agua</sub>/scm<sup>2</sup>)

Mediante los experimentos se aprecia que el tiempo para obtener el contenido de humedad deseado, cambia notablemente con la temperatura del aire.

Tabla 4: Contenido de Humedad (x) y Velocidad de secado con 1,5 m/s de velocidad del aire

| Temperatura | Velocidad del aire de secado 1,5 m/s |          |   |   |
|-------------|--------------------------------------|----------|---|---|
|             | Tiempo (minutos)                     | Peso (g) | Humedad (x) (g <sub>agua</sub> /g <sub>ss</sub> ) | Velocidad (W) (g <sub>agua</sub> /s*cm <sup>2</sup> ) |
| 40 °C       | 206                                  | 242,8    | 1,32506890  | 0,0001851852  |
| 50 °C       | 124                                  | 240,2    | 1,24922488  | 0,0002237037  |
| 60 °C       | 122                                  | 223,3    | 1,15706714  | 0,0002469136  |

Tabla 5: Contenido de Humedad (x) y Velocidad de secado con 2,0 m/s de velocidad del aire

| Temperatura | Velocidad del aire de secado 2,0 m/s |          |                           |   |
|-------------|--------------------------------------|----------|---------------------------|---|
|             | Tiempo (minutos)                     | Peso (g) | Humedad (x) (g agua/g ss) | Velocidad (W) (g agua/s cm <sup>2</sup> ) |
| 40 °C       | 192                                  | 234,5    | 1,23386526                | 0,0002056757                              |
| 50 °C       | 124                                  | 230,2    | 1,01956800                | 0,0002534563                              |
| 60 °C       | 121                                  | 229,1    | 1,00923076                | 0,0003245675                              |

Tabla 6: Contenido de Humedad (x) y Velocidad de secado con 2,5 m/s de velocidad del aire

| Temperatura | Velocidad del aire de secado 2,5 m/s |          |                           |   |
|-------------|--------------------------------------|----------|---------------------------|---|
|             | Tiempo (minutos)                     | Peso (g) | Humedad (x) (g agua/g ss) | Velocidad (W) (g agua/s cm <sup>2</sup> ) |
| 40 °C       | 176                                  | 223,3    | 1,13547668                | 0,0002756842                              |
| 50 °C       | 118                                  | 220,1    | 1,00195475                | 0,0003156757                              |
| 60 °C       | 117                                  | 218,1    | 1,00023548                | 0,0003675676                              |

En las Tablas 5, 6 y 7 muestra la humedad y la velocidad de secado en los diferentes tratamientos; para todas las condiciones de secado se observa una gran influencia de las condiciones de temperatura y velocidad de aire sobre el tiempo de secado donde el tiempo de secado aumenta significativamente a bajos niveles de temperatura y velocidad del aire. La velocidad del aire es un factor determinante debido a que el fenómeno de transferencia de calor del aire hacia la muestra aumenta con la temperatura y como consecuencia incrementa la transferencia de masa (AGHBASIO et al., 2009), fenómenos que se reflejan en el incremento de la velocidad de pérdida de humedad libre. Los resultados son acordes a lo encontrado en yuca y sus derivados (AJALA et al., 2012); (SALCEDO et al., 2014) y otros productos agroalimentarios (ERTEKIN et al., 2004); (ERTEKIN & YALDIZ, 2004) (VEGA et al., 2014). Los menores tiempos de secado fueron 11 y 12 h que se obtuvieron a 50 °C a 3.4 m/s y 64.1 °C a 2 m/s respectivamente.

Las tablas 5, 6 y 7 muestran el contenido de humedad y velocidades de secado de los diferentes tratamientos; Para todas las condiciones de secado, las condiciones de temperatura y la velocidad del aire tienen un impacto significativo en el tiempo de secado y el tiempo de secado aumenta considerablemente a temperaturas y velocidades del aire más bajas. La velocidad del aire es un factor crítico porque la transferencia de calor del aire a la muestra aumenta con el aumento de la temperatura y, por lo tanto, aumenta la transferencia de masa

(AGHBASIO et al., 2009), lo que se refleja en una mayor tasa de pérdida de humedad libre. Los resultados son consistentes con los de la yuca y sus derivados (Ajala et al., 2012); (SALCEDO et al., 2014) y otros productos agroalimentarios (ERTEKIN et al., 2004); (ERTEKIN y YALDIZ, 2004) (VEGA et al., 2014). Los tiempos de secado más cortos fueron de 11 y 12 h, obtenidos a 50 °C a 3,4 m/s y 64,1 °C a 2 m/s, respectivamente.

### **4.3 De los modelos matemáticos.**

#### **4.3.1 Newton:**

En la Tabla 08 muestran la variable “k” del modelo matemático Newton. A la temperatura de 40 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,2830; 0,2770 y 0,4150 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba.

En la Tabla 09 muestran la variable “k” del modelo matemático Newton. A la temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,4790; 0,4780 y 0,4910 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba.

En las Tablas 10 muestran la variable “k” del modelo matemático Newton. A la temperatura de 60 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,780; 0,6680 y 1,0430 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba.

De las Tablas 08, 09 y 10 podemos observar que a la velocidad del aire de secado de 1,5 m/s a las temperaturas de secado de 40, 50 y 60 c los valores de “k” aumentan, similar efecto sucede a las velocidades de 2,0 m/s y a 2,5 m/s.

El parámetro “k” esta en función de la temperatura, es decir a condiciones convencionales de fritura se obtiene un mayor “k”. Estas conclusiones son similares con algunos trabajos de investigación de secado para berenjena, cebolla, higo, pimiento rojo, papaya chilena y ñame (MONTES et al., 2008). El factor k no solo depende de la temperatura sino que esta en función de la humedad inicial del producto; este factor ajustó adecuadamente el secado de la papa y la pitahaya, debido a que ambas presentaron un bajo contenido de humedad libre (TAFUR, 2018. )

El parámetro "k" es una función de la temperatura. Esto significa que las condiciones típicas de secado darán valores 'k' más altos. Estas conclusiones son similares a varios estudios sobre el secado de berenjenas, cebollas, higos, pimientos rojos, papaya y ñame (MONTES et al., 2008). El coeficiente "k" varía no solo en función de la temperatura sino también en función del contenido de humedad inicial del producto. Este factor regula bien el proceso de secado de la patata y la pitahaya, ya que ambas tienen menos agua libre, También en hojas de sachaculantro (TAFUR, 2018 ).

#### 4.3.2 Page:

En la Tabla 08 muestran la variable "k" del modelo matemático Page. A la temperatura de 40 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,3330; 1,000 y 0,4460 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de "n" muestran de 0,7870; -0,3820 y 0,7570 respectivamente.

En la Tabla 09 muestran la variable "k" del modelo matemático Page. A la temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,4830; 0,4770 y 0,4920 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de "n" muestran de 0,7870; -0,3820 y 0,7570 respectivamente.

En las Tablas 10 muestran la variable "k" del modelo matemático Page. A la temperatura de 60 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,7730; 0,6590 y 0,9650 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de "n" muestran de 0,7900; -0,8720 y 0,8370 respectivamente. La variable "n" del modelo de Page y del modelo de Henderson-Pabis, muestran valores promedios de  $1,11 \pm 0,05$  y  $1,05 \pm 0,03$ , respectivamente, no presentan dependencia de la temperatura y se consideran parámetros constantes como se describió anteriormente (SENADEER et al. ., 2003).

De las Tablas 08, 09 y 10 podemos observar que a la velocidad del aire de secado de 1,5 m/s a las temperaturas de secado de 40, 50 y 60 °C, los valores de "k" aumentan, similar efecto sucede a las velocidades de 2,0 y a 2,5 m/s. En investigaciones el factor n del modelo de Page tiene un comportamiento constante, entre valores de 1,06 y 2,05 así como lo menciona (SIMAL et al., 2005) (KARATHANOS y BELESSIOTIS, 1999). indican que n de Page está en función del producto que se va a deshidratar más no de la temperatura

de secado. Otros investigadores experimentaron que  $n$  está en relación de la velocidad del aire y la cascara o piel (SENADEER et al., 2003).

Para el factor  $k^2$  de la ecuación de Page, éste se incrementa su valor al incrementar la temperatura del fluido (aire de secado), de igual similitud con estudios de (VELIC, PLANINIC, TOMAS, & BILIS, 2004), (SIMAL et al., 2005) (DOYMAZ, 2004), esta conclusión puede considerarse como lo mencionan (AZZOUZ et al., 2002) el factor  $k^2$  está en coordinación con la temperatura del aire de secado y el contenido de humedad inicial.

### 4.3.3 Henderson:

En la Tabla 08 muestran la variable “ $k$ ” del modelo matemático Henderson. A la temperatura de 40 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,2580; 0,2260 y 0,3690 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “ $a$ ” muestran de 0,9540; 0,9390 y 0,9470 respectivamente.

En la Tabla 09 muestran la variable “ $k$ ” del modelo matemático Henderson. A la temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,4510; 0,4800 y 0,4430 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “ $a$ ” muestran de 0,9730; 1,002 y 0,9570 respectivamente.

En las Tablas 10 muestran la variable “ $k$ ” del modelo matemático Henderson. A la temperatura de 60 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,6970; 0,6500 y 0,9730 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “ $a$ ” muestran de 0,9320; 0,9860 y 0,9620 respectivamente.

De las Tablas 08, 09 y 10 podemos observar que a la velocidad del aire de secado de 1,5 m/s a las temperaturas de secado de 40, 50 y 60 c los valores de “ $k$ ” aumentan, similar efecto sucede a las velocidades de 2,0 y a 2,5 m/s.

### 4.3.4 Logarítmico:

En la Tabla 08 muestran la variable “ $k$ ” del modelo matemático logarítmico. A la temperatura de 40 oC y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,6960; 1,3970 y 1,0960 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “ $a$ ” muestran de 0,6490; 0,4010 y 0,5990 respectivamente. También se muestran los valores de “ $b$ ” de 0,3840; 0,6190 y 0,4220 respectivamente.

En la Tabla 09 muestran la variable “k” del modelo matemático Logarítmico. A la temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,9840; 0,7670 y 1,4550 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 0,645; 0,7440 y 0,5520 respectivamente. También se muestran los valores de “b” de 0,3670; 0,273 y 0,4720 respectivamente.

En las Tablas 10 muestran la variable “k” del modelo matemático Logarítmico. A la temperatura de 60 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 1,276; 1,546 y 1,9200 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 0,7270; 0,693 y 0,7150 respectivamente. También se muestran los valores de “b” de 0,2520; 0,3610 y 0,2960 respectivamente.

De las Tablas 08, 09 y 10 podemos observar que a la velocidad del aire de secado de 1,5 m/s a las temperaturas de secado de 40, 50 y 60 c los valores de “k” aumentan, similar efecto sucede a las velocidades de 2,0 m/s y a 2,5 m/s.

#### **4.3.5 Midilli:**

En la Tabla 08 muestran la variable “k” del modelo matemático Midilli. A 40 °C y a velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,4700; 0,6790 y 0,7390 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 0,9910; 1,0040 y 1,0030 respectivamente. Los valores de “b” de 0,0980; 0,2050 y 0,1400 respectivamente. También se muestran los valores de “n”, de 1,1980; 1,096 y 1,067 respectivamente.

En la Tabla 09 muestran la variable “k” del modelo matemático Midilli. A temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,7910; 0,7890 y 0,9920 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 0,9960; 1,0000 y 1,0050 respectivamente. Los valores de “b” de 0,1530; 0,1610 y 0,221 respectivamente. También se muestran los valores de “n”, de 1,1050; 1,1560 y 1,0910 respectivamente.

En la Tabla 10 muestran la variable “k” del modelo matemático Midilli. A la temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 1,0850; 1,4950 y 1,7810 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 0,9640; 0,9940 y 0,9840 respectivamente. Los valores de “b” de 0,1240; 0,2670 y 0,2470 respectivamente. También se muestran los valores de “n”, de 1,0740; 1,3530 y 1,1500 respectivamente

De las Tablas 08, 09 y 10 podemos observar que la velocidad del aire de secado de 1,5 m/s a las temperaturas de secado de 40, 50 y 60 °C los valores de “k” aumentan, similar efecto sucede a las velocidades de 2,0 y a 2,5 m/s.

#### **4.3.6 Dos términos:**

En la Tabla 08 muestran la variable “k” del modelo matemático “Dos términos”. A la temperatura de 40 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,2580; 0,2260 y 0,3690 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 5,2790; 6,9180 y 6,6050 respectivamente. Los valores de “b” de -4.3250; -5,8780 y -5,6580 respectivamente. También se muestran los valores de “g”, de 0,2580; 0,2260 y 0,3690 respectivamente.

En la Tabla 09 muestran la variable “k” del modelo matemático Dos términos. A la temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,4510; 0,4800 y 0,4430 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 07,5160; 8,2160 y 7,5140 respectivamente. Los valores de “b” de -6,5420; -7,2140 y -6,5570 respectivamente. También se muestran los valores de “g”, de 0,4510; 0,4800 y 0,4430 respectivamente.

En la Tabla 10 muestran la variable “k” del modelo matemático Dos términos. A la temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,6970; 0,6500 y 0,9720 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 0,73640; 7,905 y 9,3850 respectivamente. Los valores de “b” de -6,4320; -6,9190 y -8,4230 respectivamente. También se muestran los valores de “g”, de 0,6970; 0,6500 y 0,9730 respectivamente.

De las Tablas 08, 09 y 10 podemos observar que a la velocidad del aire de secado de 1,5 m/s a las temperaturas de secado de 40, 50 y 60 °C los valores de “k” aumentan, similar efecto sucede a las velocidades de 2,0 m/s y a 2,5 m/s.

#### **4.3.7 Henderson modificado:**

En la Tabla 08 muestran la variable “k” del modelo matemático Henderson Modificado. A la temperatura de 40 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,0880; 0,4000 y 0,3320 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 1,0270; 6,8800 y 4,9400 respectivamente. Los valores de “b” de -51,3080; -8,2910 y -6,5000 respectivamente. Los valores de “c” de 25,6490; 1,2110 y 1,2850 respectivamente. Los valores de “g”, de 0,0400;

0,2890 y 0,1560 respectivamente. También se muestran los valores de “h”, de 0,09100; 0,0920 y -0,510 respectivamente.

En la Tabla 09 muestran la variable “k” del modelo matemático Henderson Modificado. A la temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,2230; 0,1670 y 0,3700 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 5,5410; 6,0530 y 5,603 respectivamente. Los valores de “b” de -6,9480; -8,0910 y -7,7700 respectivamente. Los valores de “c” de 1,2060; 1,5260 y 1,5910 respectivamente. Los valores de “g”, de 0,0550; 0,0110 y 0,1530 respectivamente. También se muestran los valores de “h”, de -0,2470; -0,2560 y -0,1250 respectivamente.

En la Tabla 08 muestran la variable “k” del modelo matemático Henderson Modificado. A la temperatura de 60 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,3880; 0,0410 y 0,3760 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de 5,6610; 6,3720 y 7,0870 respectivamente. Los valores de “b” de -7,8710; -11,9440 y -10,4540 respectivamente. Los valores de “c” de 1,588; 3,3010 y 2,1820 respectivamente. Los valores de “g”, de 0,1520; 0,01770 y 0,0700 respectivamente. También se muestran los valores de “h”, de -0,1140; -0,4800 y -0,3560 respectivamente.

De las Tablas 08, 09 y 10 podemos observar que a la velocidad del aire de secado de 1,5 m/s a las temperaturas de secado de 40, 50 y 60 °C los valores de “k” aumentan, similar efecto sucede a las velocidades de 2,0 y 2,5 m/s.

#### **4.3.8 Verma:**

En la Tabla 08 muestran la variable “k” del modelo matemático Verma. A la temperatura de 40 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,2830; -0,4150 y 0,4150 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de -0,2210; 0,1830 y -0,1910 respectivamente. También se muestran los valores de “g” de 0,2830; 0,6220 y 0,4150 respectivamente.

En la Tabla 09 muestran la variable “k” del modelo matemático Verma. A la temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,4790; 0,-3,070 y 0,4910 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de -0,089; 0,0000 y -0,0680

respectivamente. También se muestran los valores de “g” de 0,4790; 0,4960 y 0,4910 respectivamente.

En la Tablas 10 muestran la variable “k” del modelo matemático Verma. A la temperatura de 60 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de 0,7800; 0,6680 y 1,043 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “a” muestran de -0,2940; -0,2260 y -0,2420 respectivamente. También se muestran los valores de “g” de 0,7800; 0,6680 y 1,0430 respectivamente.

De las Tablas 08, 09 y 10 podemos observar que a la velocidad del aire de secado de 1,5 m/s a las temperaturas de secado de 40, 50 y 60 c los valores de “k” aumentan, similar efecto sucede a las velocidades de 2,0 y 2,5 m/s.

#### **4.3.9 Wang Sing**

En la Tabla 08 muestran la variable “a” del modelo matemático Wang Sing. A la temperatura de 40 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de -0,3360; -0,8040 y 0,5050 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “b” muestran de 0,0520; 0,4300 y 0,1260 respectivamente.

En la Tabla 09 muestran la variable “a” del modelo matemático Wang Sing. A la temperatura de 50 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de -0,7490; -0,4920 y -0,6190 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. Los valores de “b” muestran de 0,3200; 0,1100 y 0,2100 respectivamente.

En la Tablas 10 muestran la variable “a” del modelo matemático Wang Sing. A la temperatura de 60 °C y a las velocidades del aire de 1,5; 2,0 y 2,5 m/s se muestran valores de -0,8660; -0,7680 y -1,1510 (1/s) respectivamente, observándose que existe una tendencia cóncava hacia arriba. También se muestran los valores de “b” de 0,3100; 0,2700 y 0,5700 respectivamente.

De las Tablas 08, 09 y 10 podemos observar que a la velocidad del aire de secado de 1,5 m/s a las temperaturas de secado de 40, 50 y 60 c los valores de “k” aumentan, similar efecto sucede a las velocidades de 2,0 m/s y a 2,5 m/s.

Todos los modelos, mediante las observaciones y resultados se aproxima los modelos matemáticos a los experimentales, mantiene una interacción entre aire y partículas.

Tabla 7: Modelos matemáticos y sus parámetros en la cinética de secado de los cormos del Jergón Sacha, a temperatura de 40 °C con 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s de velocidad del aire de secado.

| Modelo Matemático | Ecuación                   | Parámetros     | 40°C<br>1,5 m/s | 40 °C<br>2,0 m/s | 40 °C<br>2,5 m/s |
|-------------------|----------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Newton            | $MR = e^{-kt}$             | K=             | 0,2830          | 0,2770           | 0,4150           |
|                   |                            | R <sup>2</sup> | 0,9890          | 0,8420           | 0,9380           |
|                   |                            |                |                 |                  |                  |
| Page              | $MR = e^{-kt}^n$           | K=             | 0,3330          | 1,0000           | 0,4460           |
|                   |                            | n=             | 0,7870          | -0,3820          | 0,7570           |
|                   |                            | R <sup>2</sup> | 0,9750          | 0,9610           | 0,9830           |
| Henderson         | $MR = a \cdot e^{-kt}$     | K=             | 0,2580          | 0,2260           | 0,3690           |
|                   |                            | a=             | 0,9540          | 0,9390           | 0,9470           |
|                   |                            | R <sup>2</sup> | 0,9550          | 0,9070           | 0,9590           |
| Logarítmico       | $MR = a \cdot e^{-kt} + b$ | K=             | 0,6960          | 1,3970           | 1,0960           |
|                   |                            | a=             | 0,6490          | 0,4010           | 0,5990           |
|                   |                            | b=             | 0,3840          | 0,6190           | 0,4220           |
|                   |                            | R <sup>2</sup> | 0,9940          | 0,9950           | 0,9980           |
| Midilli           | $MR = a \cdot e^{-kt} + b$ | K=             | 0,4700          | 0,6790           | 0,7390           |
|                   |                            | a=             | 0,9910          | 1,0040           | 1,0030           |
|                   |                            | b=             | 0,0980          | 0,2050           | 0,1400           |
|                   |                            | n=             | 1,198           | 1,0960           | 1,0670           |
|                   |                            | R <sup>2</sup> | 1,0000          | 0,9970           | 0,9080           |

|                      |   |                |          |         |         |
|----------------------|---|----------------|----------|---------|---------|
| Dos términos         | $MR = ae^{-kt} + b.e^{-gt}$             | K=             | 0,2580   | 0,2260  | 0,3690  |
|                      |   | a=             | 5,2790   | 6,8180  | 6,6050  |
|                      |   | b=             | -4,3250  | -5,8780 | -5,6580 |
|                      |   | g=             | 0,2580   | 0,2260  | 0,3690  |
|                      |   | R <sup>2</sup> | 0,9550   | 0,9070  | 0,9590  |
| Henderson Modificado | $MR = ae^{-kt} + b.e^{-gt} + c.e^{-ht}$ | K=             | 0,0880   | 0,4000  | 0,3320  |
|                      |   | a=             | 1,0270   | 6,8800  | 4,9400  |
|                      |   | b=             | -51,3080 | -8,2910 | -6,5000 |
|                      |   | c=             | 25,6490  | 1,2110  | 1,2850  |
|                      |   | g=             | 0,0400   | 0,2890  | 0,1560  |
|                      |   | h=             | 0,0910   | 0,0920  | -0,0510 |
|                      |   | R <sup>2</sup> | 0,9990   | 0,9970  | 1,0000  |
| Verma                | $MR = a.e^{-kt} + (1 - a).e^{-gt}$      | k=             | 0,2830   | -0,4150 | 0,4150  |
|                      |   | a=             | -0,2210  | 0,1830  | -0,1910 |
|                      |   | g=             | 0,2830   | 0,6220  | 0,4150  |
|                      |   | R <sup>2</sup> | 0,9430   | 0,9960  | 0,9380  |
| Wang Sing            | $MR = 1 + a.t + b.t^2$                  | a=             | -0,3360  | -0,8040 | -0,5050 |
|                      |   | b=             | 0,0520   | 0,4300  | 0,1260  |
|                      |   | R <sup>2</sup> | 0,9900   | 0,9810  | 0,9990  |

Tabla 8: Modelos matemáticos y sus parámetros en la cinética de secado de los cormos del Jergón Sacha a temperatura de 50°C con 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s de velocidad del aire de secado.

| Modelo Matemático | Parámetros                    | 50 °C<br>1,5 m/s | 50 °C<br>2,0 m/s | 50 °C<br>2,5 m/s |
|-------------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Newton            | $MR = e^{-kt}$                |                  |                  |                  |
|                   | K=                            | 0,479            | 0,478            | 0,491            |
|                   | R <sup>2</sup>                | 0,98             | 0,982            | 0,945            |
| Page              | $MR = e^{-kt}$                |                  |                  |                  |
|                   | K=                            | 0,483            | 0,477            | 0,492            |
|                   | n=                            | 0,852            | 0,975            | 0,769            |
|                   | R <sup>2</sup>                | 0,999            | 0,982            | 0,982            |
| Henderson         | $MR = a \cdot e^{-kt}$        |                  |                  |                  |
|                   | K=                            | 0,451            | 0,48             | 0,443            |
|                   | a=                            | 0,973            | 1,002            | 0,957            |
|                   | R <sup>2</sup>                | 0,986            | 0,982            | 0,961            |
| Logarítmico       | $MR = a \cdot e^{-kt} + b$    |                  |                  |                  |
|                   | K=                            | 0,984            | 0,767            | 1,455            |
|                   | a=                            | 0,645            | 0,744            | 0,552            |
|                   | b=                            | 0,367            | 0,273            | 0,472            |
|                   | R <sup>2</sup>                | 0,999            | 0,985            | 0,996            |
| Midilli           | $MR = a \cdot e^{-kt^n} + bt$ |                  |                  |                  |
|                   | K=                            | 0,791            | 0,789            | 0,992            |
|                   | a=                            | 0,996            | 1,000            | 1,005            |
|                   | b=                            | 1,1530           | 0,161            | 0,221            |
|                   | n=                            | 1,105            | 1,156            | 1,091            |
|                   | R <sup>2</sup>                | 0,954            | 0,966            | 0,998            |

|              |   |            |        |        |        |
|--------------|---|------------|--------|--------|--------|
|              |   | $\kappa =$ | 0,451  | 0,48   | 0,443  |
|              | $MR = ae^{-kt} + b.e^{-gt}$             | $a =$      | 7,516  | 8,216  | 7,514  |
| Dos términos |   | $b =$      | -6,542 | -7,214 | -6,557 |
|              |   | $g =$      | 0,451  | 0,48   | 0,443  |
|              |   | $R^2$      | 0,986  | 0,982  | 0,961  |
|              |   | $K =$      | 0,223  | 0,167  | 0,37   |
|              | $MR = ae^{-kt} + b.e^{-gt} + c.e^{-ht}$ | $a =$      | 5,541  | 6,053  | 5,603  |
| Henderson    |   | $b =$      | -6,948 | -8,091 | -7,77  |
| Modificado   |   | $c =$      | 1,206  | 1,526  | 1,591  |
|              |   | $g =$      | 0,055  | 0,011  | 0,153  |
|              |   | $h =$      | -0,247 | -0,256 | -0,125 |
|              |   | $R^2$      | 1      | 0,985  | 0,997  |
|              | $MR = a.e^{-kt} + (1 - a).e^{-gt}$      | $k =$      | 0,479  | -3,07  | 0,491  |
| Verma        |   | $a =$      | -0,089 | 0      | -0,068 |
|              |   | $g =$      | 0,479  | 0,496  | 0,491  |
|              |   | $R^2$      | 0,98   | 0,984  | 0,945  |
|              | $MR = 1 + a.t + b.t^2$                  | $a =$      | -0,749 | -0,492 | -0,619 |
| Wang Sing    |   | $b =$      | 0,3200 | 0,11   | 0,21   |
|              |   | $R^2$      | 0,938  | 0,984  | 0,997  |

Tabla 9: Modelos matemáticos y sus parámetros en la cinética de secado de los cormos del Jergón Sacha, a temperatura de 60 °C con 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s de velocidad del aire de secado.

| Nombre      | Parámetros                    | 60 °C<br>1,5 m/s | 60 °C<br>2,0 m/s | 60 °C<br>2,5 m/s |
|-------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Newton      | $MR = e^{-kt}$                | K=               | 0,780            | 0,668            |
|             |                               | R <sup>2</sup>   | 0,963            | 0,957            |
| Page        | $MR = e^{-kt^n}$              | K=               | 0,773            | 0,659            |
|             |                               | n=               | 0,79             | 0,872            |
|             |                               | R <sup>2</sup>   | 0,993            | 0,966            |
| Henderson   | $MR = a \cdot e^{-kt}$        | K=               | 0,697            | 0,65             |
|             |                               | a=               | 0,932            | 0,986            |
|             |                               | R <sup>2</sup>   | 0,984            | 0,958            |
| Logarítmico | $MR = a \cdot e^{-kt} + b$    | K=               | 1,276            | 1,546            |
|             |                               | a=               | 0,727            | 0,693            |
|             |                               | b=               | 0,252            | 0,361            |
|             |                               | R <sup>2</sup>   | 0,996            | 0,986            |
| Midilli     | $MR = a \cdot e^{-kt^n} + bt$ | K=               | 1,085            | 1,495            |
|             |                               | a=               | 0,964            | 0,994            |
|             |                               | b=               | 0,124            | 0,267            |
|             |                               | n=               | 1,074            | 1,352            |
|             |                               | R <sup>2</sup>   | 0,996            | 0,997            |

|                         |   |     |        |         |         |
|-------------------------|---|-----|--------|---------|---------|
|                         |   | K=  | 0,697  | 0,65    | 0,973   |
|                         |   | a=  | 7,364  | 7,905   | 9,385   |
| Dos terminos            | $MR = ae^{-kt} + b. e^{-gt}$              | b=  | -6,432 | -6,919  | -8,423  |
|                         |   | g=  | 0,697  | 0,65    | 0,973   |
|                         |   | R^2 | 0,984  | 0,958   | 0,98    |
|                         |   | K=  | 0,388  | 0,041   | 0,376   |
|                         |   | a=  | 5,661  | 6,372   | 7,087   |
| Henderson<br>Modificado | $MR = ae^{-kt} + b. e^{-gt} + c. e^{-ht}$ | b=  | -7,871 | -11,944 | -10,454 |
|                         |   | c=  | 1,589  | 3,301   | 2,182   |
|                         |   | g=  | 0,152  | -0,177  | 0,07    |
|                         |   | h=  | -0,114 | -0,48   | -0,356  |
|                         |   | R^2 | 0,996  | 0,994   | 0,998   |
|                         |   | k=  | 0,78   | 0,668   | 1,043   |
| Verma                   | $MR = a. e^{-kt} + (1 - a). e^{-gt}$      | a=  | -0,294 | -0,226  | -0,242  |
|                         |   | g=  | 0,78   | 0,668   | 1,043   |
|                         |   | R^2 | 0,963  | 0,957   | 0,973   |
|                         |   | a=  | -0,866 | -0,768  | -1,151  |
| Wang Sing               | $MR = 1 + a. t + b. t^2$                  | b=  | 0,31   | 0,27    | 0,57    |
|                         |   | R^2 | 0,992  | 0,988   | 0,998   |

De la Tabla 8 y 9 se observa que los valores  $R^2$  altos y  $X^2$ , lo describe los modelos de Midilli, exponencial de dos términos, dos términos, page, page modificado y logarítmico, sucede similar en el secado de yuca (TORREGROZA et al., 2014), secado de hojas de tomillo (ROCHA et al., 2012), secado de descartes de limón (Citrus limón) (PUENTE et al., 2013) de la operación unitaria de deshidratación bajo diferentes esquemas de secado.

#### **4.4 Criterios estadísticos de ajuste**

##### **4.4.1 Error porcentual absoluto medio**

En la Tabla 11, se aprecia el error porcentual absoluto medio (MAE) como criterio estadístico de ajuste, éste se utilizó con el fin de determinar qué modelo describe mejor la cinética de secado a las temperaturas de 40, 50 y 60 °C de secado de los cormos del Jergón Sacha, a velocidad del aire de 1,5; 2,0; y 2,5 m/s.

El modelo matemático Midilli, es el que obtiene el menor error porcentual absoluto medio tanto para las temperaturas de 40 °C con un 1,8358 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,6320 para la velocidad de 2,00 m/s y 2,1909 para la velocidad de 2,5 m/s. Para las temperaturas de 50 °C con un 0,2835 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,3013 para la velocidad de 2,00 m/s y 0,5169 para la velocidad de 2,5 m/s. Para las temperaturas de 60 °C con un 0,2916 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,3803 para la velocidad de 2,00 m/s y 0,9952 para la velocidad de 2,5 m/s.

El modelo Logarítmico es el que obtiene el segundo menor error porcentual absoluto medio tanto para las temperaturas de 40 °C con un 1,9584 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,9901 para la velocidad de 2,00 m/s y 3,6668 para la velocidad de 2,5 m/s. Para las temperaturas de 50 °C con un 0,9240 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,20182 para la velocidad de 2,00 m/s y 0,9035 para la velocidad de 2,5 m/s. Para las temperaturas de 60 °C con un 0,2916 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,3803 para la velocidad de 2,00 m/s y 0,9952 para la velocidad de 2,5 m/s.

Todos los modelos presentan menor que el 10% de error porcentual absoluto medio, considerándose validos para todos los modelos a excepción del modelo Wang Sing a 40 °C a la velocidad de 2,0 m/s de velocidad de aire y el Modelo Newton y Verma, con un error porcentual absoluto medio 11,732269 y 11,732269 respectivamente.

Tabla 10: Error porcentual absoluto medio (MAE) a 40, 50 y 60 °C de secado de los cormos del Jergón Sacha, a velocidad del aire de 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s

| Temperatura de secado a 40 °C |                        |  |          |           |           |
|-------------------------------|------------------------|--|----------|-----------|-----------|
| Modelos matemáticos           | Criterios estadísticos |  | 1,5 m/s  | 2,0 m/s   | 2,5 m/s   |
| Midilli                       | MAE                    |  | 1,835648 | 0,632072  | 2,190917  |
| Wang Sing                     | MAE                    |  | 1,847785 | 16,080644 | 2,522209  |
| Logaritmico                   | MAE                    |  | 1,958484 | 0,990114  | 3,666850  |
| Page                          | MAE                    |  | 4,048120 | 2,446459  | 5,835915  |
| H modificado                  | MAE                    |  | 5,536642 | 3,745109  | 9,248537  |
| Dos terminos                  | MAE                    |  | 5,536958 | 3,748954  | 9,14806   |
| Henderson                     | MAE                    |  | 5,536958 | 3,742571  | 9,14806   |
| Newton                        | MAE                    |  | 6,357075 | 4,988829  | 11,732269 |
| Verma                         | MAE                    |  | 6,357075 | 0,991326  | 11,732269 |
| %E Máximo                     |                        |  | 6,357075 | 16,080644 | 11,732269 |
| %E Mínimo                     |                        |  | 1,835648 | 0,632072  | 2,190917  |
| Temperatura de secado a 50 °C |                        |  |          |           |           |
| Modelos matemáticos           | Criterios estadísticos |  | 1,5 m/s  | 2,0 m/s   | 2,5 m/s   |
| Midilli                       | MAE                    |  | 0,283546 | 0,301382  | 0,516908  |
| Logaritmico                   | MAE                    |  | 0,924099 | 2,018235  | 0,903510  |
| Page                          | MAE                    |  | 1,652955 | 2,335564  | 2,379362  |
| Henderson                     | MAE                    |  | 2,454665 | 2,372421  | 3,765858  |
| Dos terminos                  | MAE                    |  | 2,461166 | 2,372421  | 3,765858  |
| Verma                         | MAE                    |  | 2,922357 | 2,632708  | 4,488417  |
| Newton                        | MAE                    |  | 2,922357 | 2,375359  | 4,488417  |
| H modificado                  | MAE                    |  | 4,905138 | 3,177952  | 3,765707  |
| Wang Sing                     | MAE                    |  | 7,244804 | 2,101937  | 0,862220  |
| %E Máximo                     |                        |  | 7,244804 | 3,177952  | 4,488417  |
| %E Mínimo                     |                        |  | 0,283546 | 0,301382  | 0,516908  |
| Temperatura de secado a 60 °C |                        |  |          |           |           |
| Modelos matemáticos           | Criterios estadísticos |  | 1,5 m/s  | 2,0 m/s   | 2,5 m/s   |
| Midilli                       | MAE                    |  | 0,291602 | 0,380334  | 0,995209  |
| Logaritmico                   | MAE                    |  | 1,587392 | 2,743984  | 1,575949  |
| Wang Sing                     | MAE                    |  | 2,249413 | 2,333881  | 1,185568  |
| Page                          | MAE                    |  | 2,321004 | 4,935818  | 2,936111  |
| H modificado                  | MAE                    |  | 3,857869 | 5,789617  | 4,088576  |
| Dos terminos                  | MAE                    |  | 3,163091 | 5,78800   | 4,0195    |
| Henderson                     | MAE                    |  | 3,163091 | 5,78800   | 4,0195    |
| Newton                        | MAE                    |  | 6,330342 | 5,82695   | 4,893203  |
| Verma                         | MAE                    |  | 6,330342 | 5,82695   | 4,893203  |
| %E Máximo                     |                        |  | 6,330342 | 5,826951  | 4,893203  |
| %E Mínimo                     |                        |  | 0,291602 | 0,380334  | 0,995209  |

#### 4.4.2 Cuadrado medio del error (RMSE)

En la Tabla 12, se aprecia el cuadrado medio del error (RMES) como criterio estadístico de ajuste, éste se utilizó con el fin de determinar qué modelo describe mejor la cinética de secado a las temperaturas de 40, 50 y 60 °C de secado de los cormos del Jergón Sacha, a velocidad del aire de 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s.

El modelo matemático Midilli, es el que obtiene el menor cuadrado medio del error (RMES) tanto para las temperaturas de 40 °C con un 0,004795 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,005816 para la velocidad de 2,00 m/s y 0,01452 para la velocidad de 2,5 m/s. Para la temperatura de 50 °C con un 0,009290 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,009266 para la velocidad de 2,00 m/s y 0,003484 para la velocidad de 2,5 m/s. . Para la temperatura de 60 °C con un 0,001522 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,005997 para la velocidad de 2,00 m/s y 0,003570 para la velocidad de 2,5 m/s.

El modelo Logarítmico es el que obtiene el segundo menor cuadrado medio del error (RMES) tanto para las temperaturas de 40 °C con un 0,01238 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,007732 para la velocidad de 2,00 m/s y 0,011959 para la velocidad de 2,5 m/s. Para las temperaturas de 50 °C con un 0,014997 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,017558 para la velocidad de 2,00 m/s y 0,016403 para la velocidad de 2,5 m/s. Para las temperaturas de 60 °C con un 0,009132 para la velocidad de 1,5 m/s; 0,020475 para la velocidad de 2,00 m/s y 0,011487 para la velocidad de 2,5 m/s. Estudios similares presenta en el secado del pimiento (VEGA y FITO. 2005), así como en el secado convectivo del plátano (SANDOVA et al., 2006). En el modelamiento de la cinética de secado de las hojas de sachaculantro por convección forzada, los valores de  $R^2$  fueron superiores a 0,8614 y Los valores EMRS y  $\chi^2$  fueron inferiores a 0,0641 y 0,0044, respectivamente. (TAFUR, 2018. )

Tabla 11: Cuadrado medio del error (RMSE) a 40, 50 y 60 °C de secado de los cormos del Jergón Sacha, a velocidad del aire de 1,5; 2,0 ; y 2,5 m/s

| Temperatura de secado a 40 °C |                        |          |          |          |  |
|-------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|--|
| Modelos matemáticos           | Criterios estadísticos | 1,5 m/s  | 2,0 m/s  | 2,5 m/s  |  |
| Midilli                       | RMSE                   | 0,004795 | 0,005816 | 0,014522 |  |
| Wang Sing                     | RMSE                   | 0,005952 | 0,177405 | 0,020935 |  |
| Logaritmico                   | RMSE                   | 0,012389 | 0,007732 | 0,011959 |  |
| Page                          | RMSE                   | 0,026180 | 0,020534 | 0,037818 |  |
| H modificado                  | RMSE                   | 0,035061 | 0,031737 | 0,055576 |  |
| Henderson                     | RMSE                   | 0,035062 | 0,031739 | 0,055381 |  |
| Dos terminos                  | RMSE                   | 0,035062 | 0,031742 | 0,055381 |  |
| Newton                        | RMSE                   | 0,039593 | 0,041462 | 0,066843 |  |
| Verma                         | RMSE                   | 0,039593 | 0,006369 | 0,066843 |  |
| % RMSE Máximo                 |                        | 0,039593 | 0,177405 | 0,066843 |  |
| % RMSE Mínimo                 |                        | 0,004795 | 0,005816 | 0,011959 |  |
| Temperatura de secado a 50 °C |                        |          |          |          |  |
| Modelos matemáticos           | Criterios estadísticos | 1,5 m/s  | 2,0 m/s  | 2,5 m/s  |  |
| Midilli                       | RMSE                   | 0,009290 | 0,009266 | 0,003484 |  |
| Page                          | RMSE                   | 0,012033 | 0,018880 | 0,018753 |  |
| Logaritmico                   | RMSE                   | 0,014997 | 0,017558 | 0,016035 |  |
| Henderson                     | RMSE                   | 0,017692 | 0,019021 | 0,027327 |  |
| Dos terminos                  | RMSE                   | 0,017693 | 0,019021 | 0,027327 |  |
| Verma                         | RMSE                   | 0,020920 | 0,020986 | 0,32563  |  |
| Newton                        | RMSE                   | 0,020920 | 0,019031 | 0,32563  |  |
| H modificado                  | RMSE                   | 0,036380 | 0,028684 | 0,027327 |  |
| Wang Sing                     | RMSE                   | 0,055350 | 0,018040 | 0,007900 |  |
| % RMSE Máximo                 |                        | 0,055350 | 0,028684 | 0,032563 |  |
| % RMSE Mínimo                 |                        | 0,009290 | 0,009266 | 0,003484 |  |
| Temperatura de secado a 60 °C |                        |          |          |          |  |
| Modelos matemáticos           | Criterios estadísticos | 1,5 m/s  | 2,0 m/s  | 2,5 m/s  |  |
| Midilli                       | RMSE                   | 0,001522 | 0,005997 | 0,003570 |  |
| Logaritmico                   | RMSE                   | 0,009132 | 0,20475  | 0,011487 |  |
| Page                          | RMSE                   | 0,014695 | 0,032317 | 0,018489 |  |
| Wang Sing                     | RMSE                   | 0,015876 | 0,19483  | 0,008795 |  |
| H modificado                  | RMSE                   | 0,022198 | 0,036163 | 0,025000 |  |
| Dos terminos                  | RMSE                   | 0,22199  | 0,036163 | 0,05000  |  |
| Henderson                     | RMSE                   | 0,22199  | 0,036163 | 0,05000  |  |
| Newton                        | RMSE                   | 0,033924 | 0,036606 | 0,029238 |  |
| Verma                         | RMSE                   | 0,033924 | 0,036606 | 0,02938  |  |
| % RMSE Máximo                 |                        | 0,033924 | 0,036606 | 0,029238 |  |
| % RMSE Mínimo                 |                        | 0,001522 | 0,005997 | 0,003570 |  |

#### **4.5 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) en la aplicación de los modelos experimentales a los modelos matemáticos en la cinética de secado de los cormos del Jergón Sacha.**

En la Tabla 13, se muestran los coeficiente de determinación a diferentes temperaturas de secado de 40; 50 y 60 °C, a velocidades de aire de secado de 1,5 ; 2,0 y 2,5 m/s y por modelos matemáticos.

En el proceso de secado de los cormos del Jergón Sacha; el modelo Medilli es el que muestra el ajuste del modelo cinético que mejor representó a los datos experimentales durante el proceso de secado de los cormos del Jergón Sacha, siendo el modelo matemático de Medilli que presenta la mejor regresión ( $0,9860 \leq R^2 \leq 0,999$ ) al igual que el menor error potencial absoluto (MAE) (Tabla 11) y menor cuadrado medio del error (RMSE) (Tabla 12). Podemos considerar que los otros modelos matemáticos también mostraron un buen ajuste mostrando un un  $R^2 \geq 95\%$ .

Estudios similares presentan los modelos de Newton-Lewis, Page, Page modificado y Hernderson-Pabis donde se ajustan satisfactoriamente a los datos experimentales obtenidos para la construcción de las curvas de secado de las tres variedades de yuca a las temperaturas estudiadas (TORREGROZA et al., 2014)

Tabla 12: Coeficiente de determinación a diferentes temperaturas de secado, a diferentes velocidades de aire y por modelos matemáticos.

| Temperatura de secado | Modelo matemático | Newton         | Page           | Henderson      | Logarítmico    | Midilli        | Dos términos   | Henderson Modificado | Verma          | Wang Sing      |
|-----------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|
|                       | Velocidad de aire | R <sup>2</sup>       | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> |
| 40 °C                 | 1,5 m/s           | 0,9890         | 0,9750         | 0,9550         | 0,944          | 0,9999         | 0,9550         | 0,9990               | 0,9430         | 0,9900         |
|                       | 2,0 m/s           | 0,8420         | 0,9610         | 0,9070         | 0,9950         | 0,9970         | 0,9070         | 0,9970               | 0,9960         | 0,9810         |
|                       | 2,5 m/s           | 0,9380         | 0,9830         | 0,9590         | 0,9980         | 0,9999         | 0,9590         | 1,0000               | 0,9380         | 0,9990         |
| 50 °C                 | 1,5 m/s           | 0,9800         | 0,9930         | 0,9860         | 0,999          | 0,9999         | 0,9860         | 1,0000               | 0,9800         | 0,9380         |
|                       | 2,0 m/s           | 0,9820         | 0,9820         | 0,9820         | 0,9850         | 0,9860         | 0,9820         | 0,9850               | 0,9840         | 0,9840         |
|                       | 2,5 m/s           | 0,9450         | 0,9820         | 0,9610         | 0,9960         | 0,9980         | 0,9610         | 0,9970               | 0,9450         | 0,9970         |
| 60 °C                 | 1,5 m/s           | 0,9630         | 0,9930         | 0,9840         | 0,996          | 0,9960         | 0,9840         | 0,9960               | 0,9630         | 0,9920         |
|                       | 2,0 m/s           | 0,9570         | 0,9660         | 0,9580         | 0,9860         | 0,9970         | 0,9580         | 0,9940               | 0,9570         | 0,9880         |
|                       | 2,5 m/s           | 0,9730         | 0,9890         | 0,9800         | 0,9960         | 0,9980         | 0,9800         | 0,9980               | 0,9730         | 0,9980         |

En la Tabla 14, (Anexo) se observa que para las temperaturas de secado y los modelos matemáticos existe diferencia altamente significativa debido a que el valor-P es menor que 0,05, por ello fue necesario hacer las Pruebas de Múltiple Rangos para  $R^2$  por modelos matemáticos, velocidades y temperatura de secado, según Tukey HSD de la Tabla 15. Donde se observa que el mejor promedio para los modelos corresponde al Modelo Midilli (7) el que es similar estadísticamente a Herson Modificado (7), Logarítmico (4), Wang Sing (9), Page (2) y Verma (8), pero difiere de los demás es decir de Henderson (3), Dos términos (6) y Newton (1)..

Las velocidades de secado son iguales estadísticamente pero el que tiene el mejor promedio es 1,5 m/s, seguido de 2,0 m/s y estando al final 2,5 m/s.

Con respecto a las temperaturas el mejor promedio corresponde a 60 °C, el que es similar estadísticamente 50°C, pero difiere a la temperatura de 40°C.

En la Tabla 13, (Anexo) con respecto a las Pruebas de Múltiple Rangos para  $R^2$  por modelos matemáticos, Velocidades y temperatura de secado según Tukey HSD, se observa que existen tres grupos diferenciados,

Tabla 14: Optimización de respuesta para maximizar  $R^2$  con un Valor óptimo = 0.99015 evaluado en los tres factores

| <b>Factor</b>       | <b>Bajo</b> | <b>Alto</b> | <b>Óptimo</b> |
|---------------------|-------------|-------------|---------------|
| Modelos matemáticos | 1,0         | 9,0         | 7,0           |
| Velocidades         | 1,5         | 2,5         | 1,5           |
| Temperatura         | 40,0        | 60,0        | 49,9921       |

La superficie de respuesta nos proporciona la Tabla 16 de la Optimización de respuesta para maximizar  $R^2$  con un Valor óptimo = 0.99015 evaluado en los tres factores donde vemos que los óptimos coinciden con las Pruebas de Múltiple Rangos para  $R^2$  por modelos, velocidades y temperatura según Tukey HSD.

Figura 6. Superficie de respuesta de Modelo con velocidad

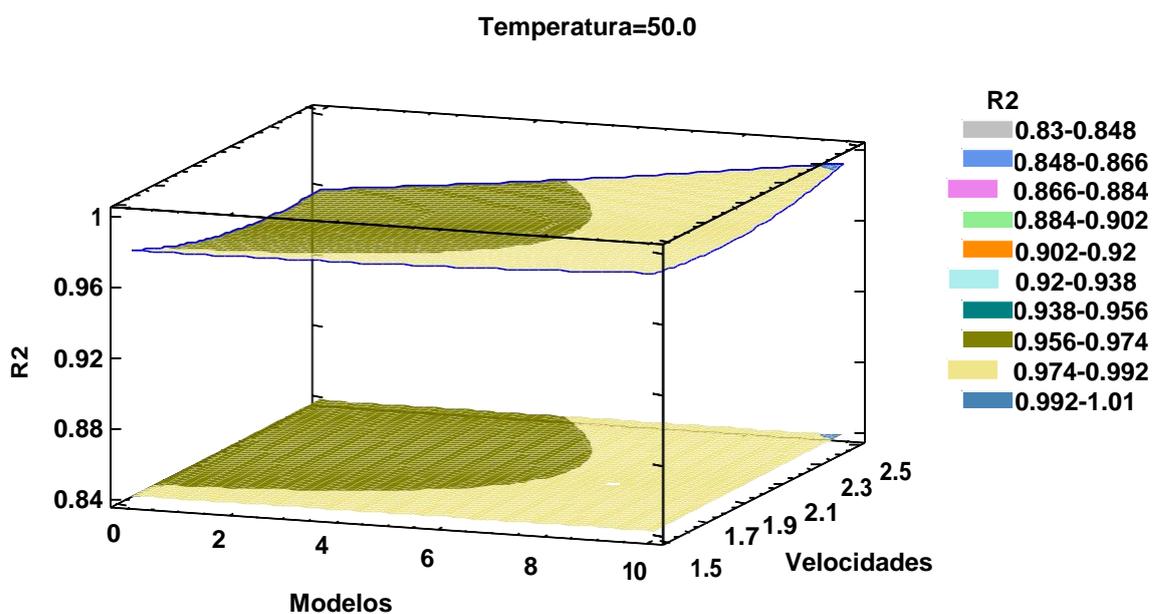


Figura 7. Contorno de Superficie de respuesta de Modelo con velocidad

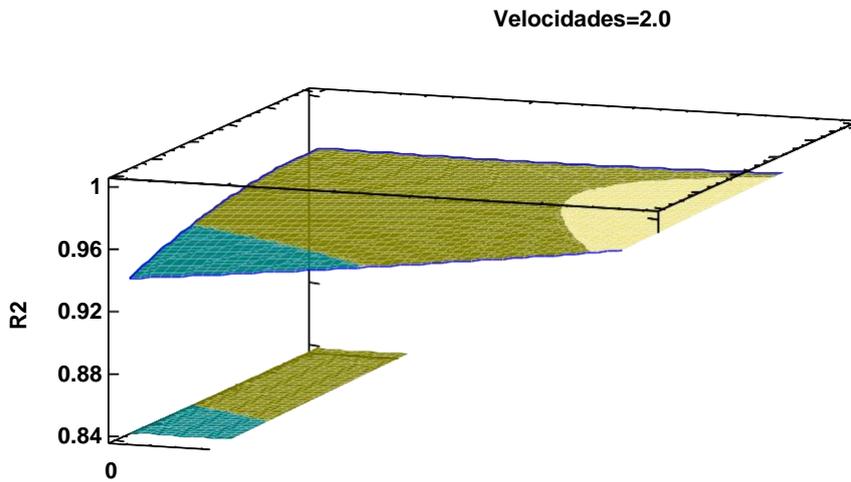


Figura 8. Superficie de respuesta de Modelo con Temperatura

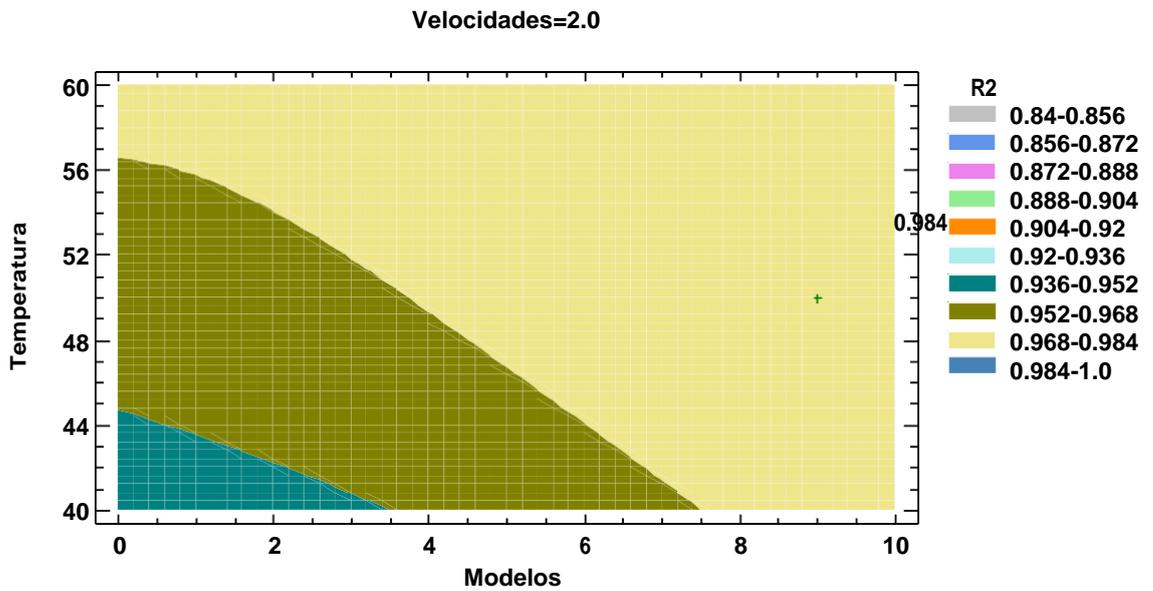


Figura 9. Contorno de Superficie de respuesta de Modelo con temperatura.

Figura 10. Superficie de respuesta de velocidad con temperatura

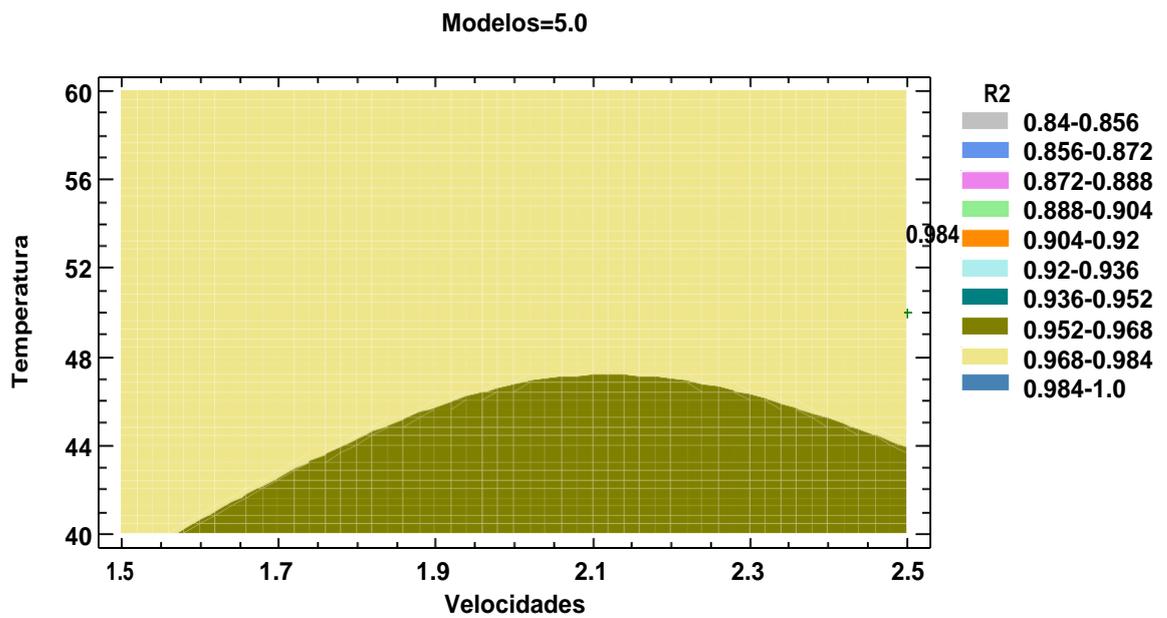


Figura 11. Contorno de Superficie de respuesta de Velocidad con temperatura.

Observamos que las Figuras del 6 al 11 confirman la tendencia de las Tablas 2 y 3 donde observamos que el mejor modelo es Medilli (5), la mejor velocidad es 1,5 m/s y la mejor temperatura 60°C.

#### **4.6 Difusividad efectiva de humedad (Deff), Energía de activación (Ea) y Do**

Para encontrar las constantes de secado, se presume que el sistema de transferencia de masa es específicamente por difusión, sin encogimiento y con temperatura constante, como lo sugiere (HERNÁNDEZ et al., 2014) (MOSQUEDA et al., 2017).

La difusividad efectiva de humedad (Deff) se fue determinada para cada experimento de secado representando gráficamente los datos obtenidos en el laboratorio en términos de Ln(MR) frente al tiempo de secado (Figura 12; 13 y 14) a 1,5 m/s; 2,0 m/s y 2,5 m/s respectivamente. Las pendientes obtenidas en las Figuras 12; 13 y 14 son utilizadas para determinar la difusividad efectiva de humedad (Deff).

En la Tabla 17 se muestra los valores de Deff a 1,5 m/s de velocidad a 40 °C se obtiene una difusividad efectiva de humedad (Deff) de  $9,1715 \cdot 10^{-8}$ ; a 50 °C se obtiene una difusividad efectiva de humedad (Deff) de  $1,2112 \cdot 10^{-7}$  y a 60 °C se obtiene una difusividad efectiva de humedad (Deff) de  $1,6400 \cdot 10^{-7}$ .

En la Tabla 18 se muestra los valores de Deff a 2,0 m/s de velocidad a 40 °C se obtiene una difusividad efectiva de humedad (Deff) de  $9,2584 \cdot 10^{-8}$ ; a 50 °C se obtiene una difusividad efectiva de humedad (Deff) de  $1,3259 \cdot 10^{-7}$  y a 60 °C se obtiene una difusividad efectiva de humedad (Deff) de  $2,0551 \cdot 10^{-7}$ .

En la Tabla 19 se muestra los valores de Deff a 2,5 m/s de velocidad a 40 °C se obtiene una difusividad efectiva de humedad (Deff) de  $1,1331 \cdot 10^{-7}$ ; a 50 °C se obtiene una difusividad efectiva de humedad (Deff) de  $1,3564 \cdot 10^{-7}$  y a 60 °C se obtiene una difusividad efectiva de humedad (Deff) de  $2,5443 \cdot 10^{-7}$ .

Los resultados de difusividad se incrementaron con el aumento de la temperatura y de la velocidad del aire de secado, mostrando un decremento de las resistencias internas del material con el incremento de la temperatura y velocidad del aire de secado. Una razón del incremento se explica por el encogimiento observado en las temperaturas y velocidades de aire

de secado más altas; cuando mas sea el encogimiento implicara una mayor porosidad por lo tanto una amplia área de transferencia de masa. (TORREGROZA et al., 2014). Otras investigaciones similares se experimentó en diferentes frutas (PARK et al., 2004), (VEGA y LEMUS R., 2006) (OCAMPO, 2006) (NICOLETI, 2011) (MONTES et al., 2008).

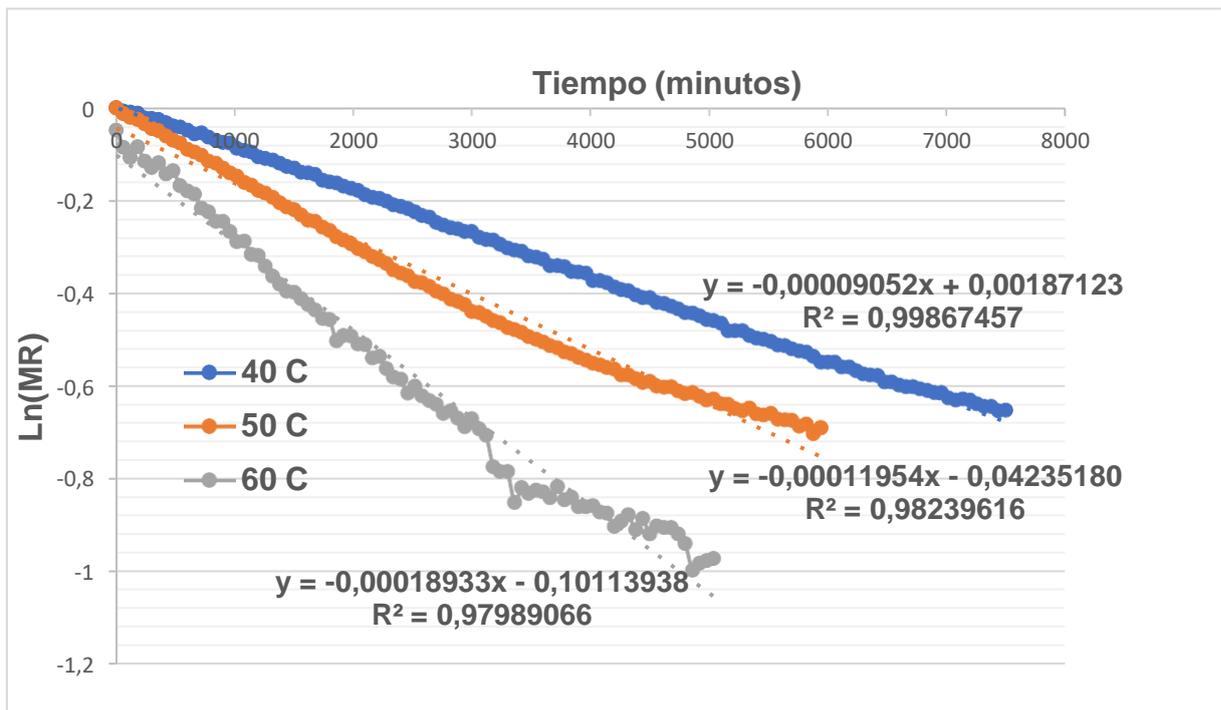


Figura 12: Ln(MR) VS Tiempo (minutos) para 1,5 m/s de velocidad de secado

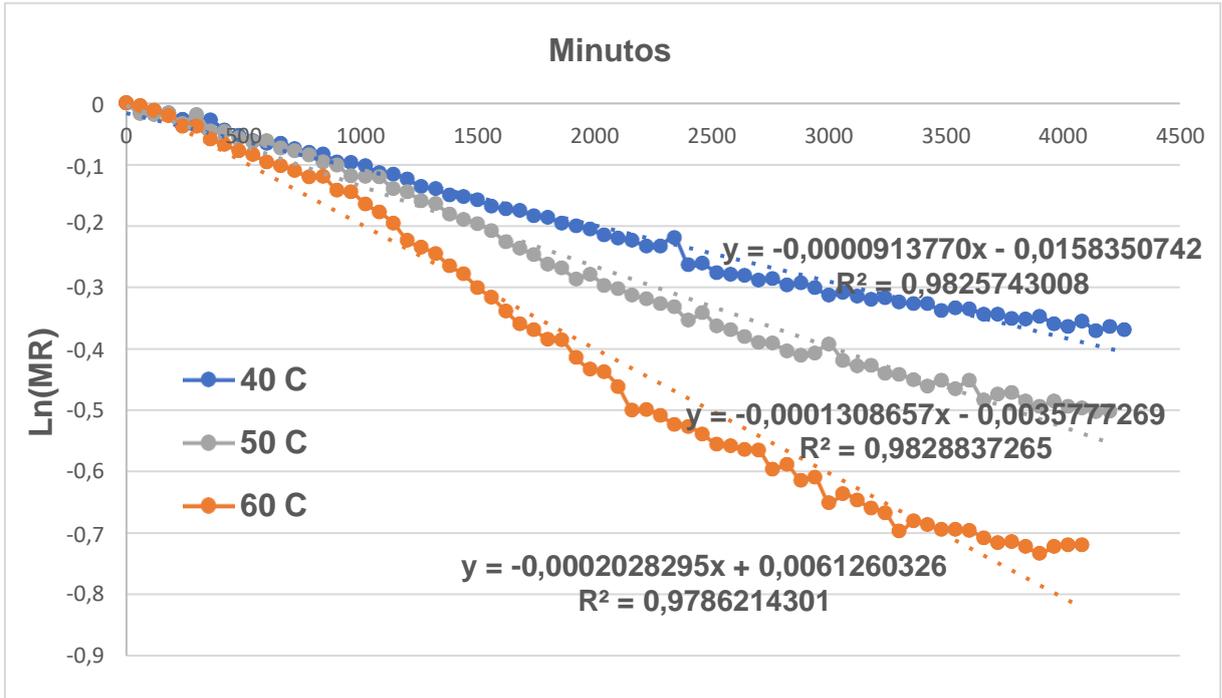


Figura 13: Ln(MR) VS Tiempo (minutos) para 2,0 m/s de velocidad de secado

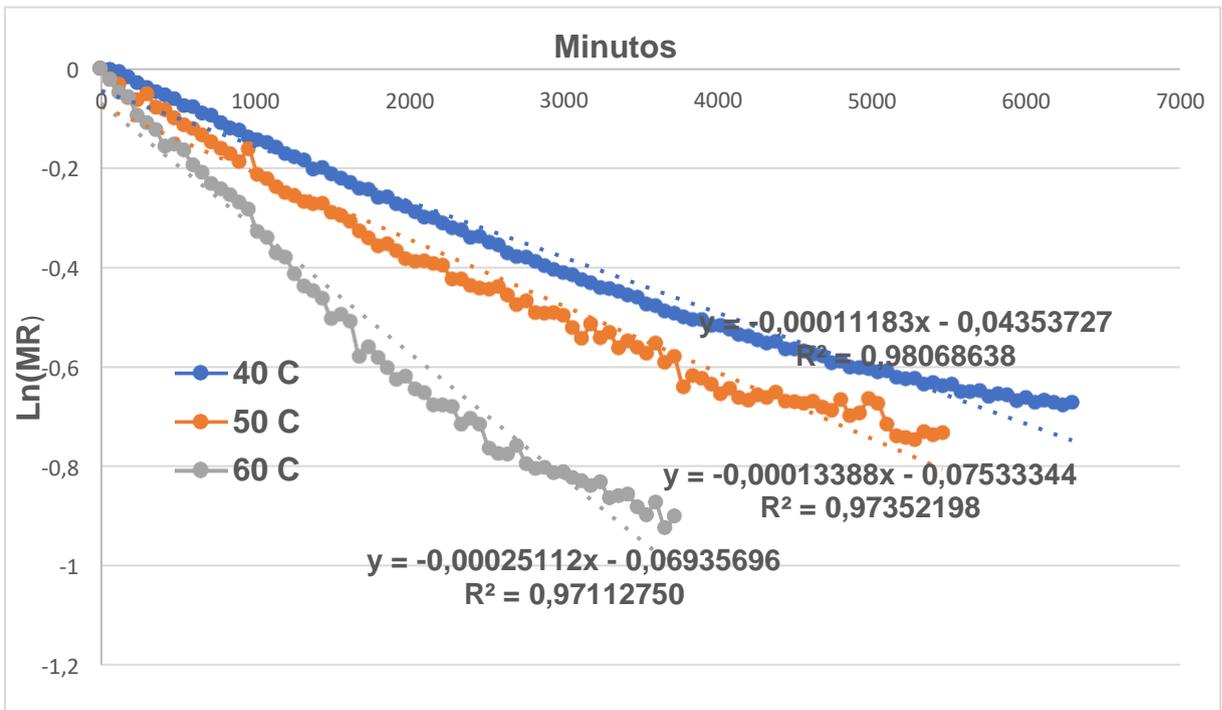


Figura 14: Ln(MR) VS Tiempo (minutos) para 2,5 m/s de velocidad de secado

En la Figura 15 se muestran los valores de los  $\ln(\text{Deff})$ , se prorrataron con inverso de la temperatura según como se muestra en la Ecuación 7, para obtener la energía de activación y el factor pre exponencial en el secado en de los cormos del Jergón Sacha,

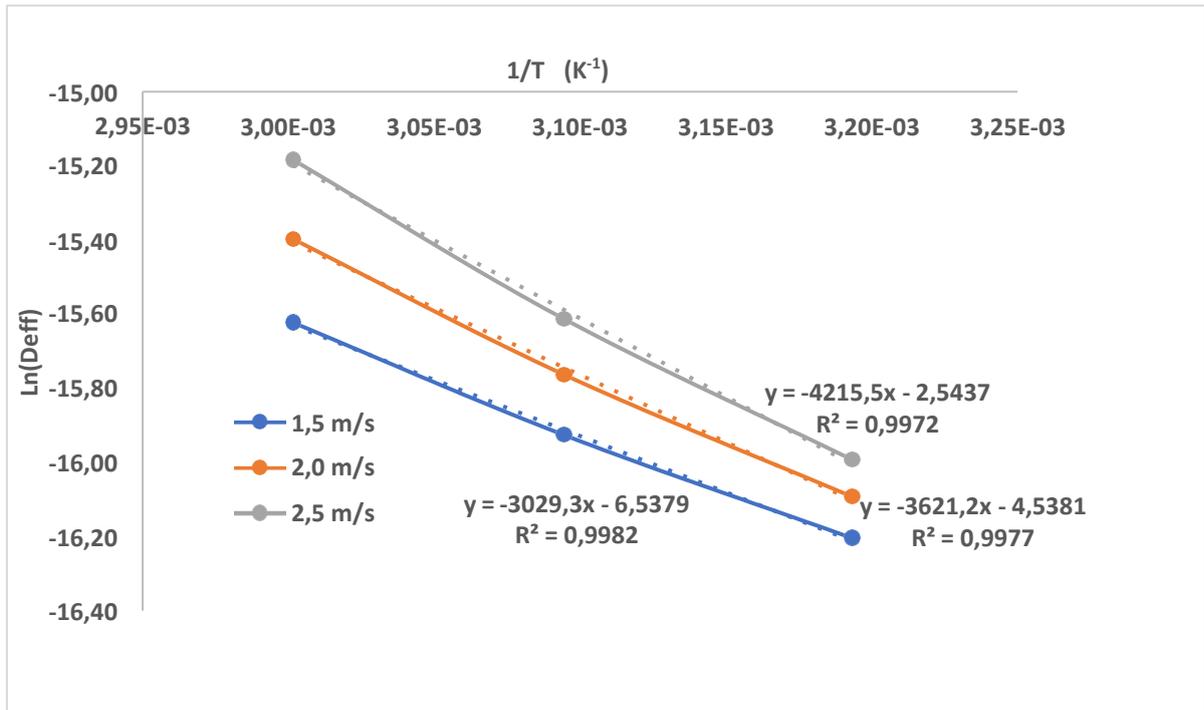


Figura 15. Contorno de Superficie de respuesta de Velocidad con temperatura

En la Tabla 17, muestra la ecuación de Arrhenius, en el cual la energía de activación ( $E_a$ ) requerida para iniciar la difusión de la humedad en los cormos del Jergón Sacha fue de 69,96256 kJ.mol<sup>-1</sup> a la velocidad de aire de secado de 1,5 m/s.

En la Tabla 18, muestra la ecuación de Arrhenius, en el cual la energía de activación ( $E_a$ ) requerida para iniciar la difusión de la humedad en los cormos del Jergón Sacha fue de 83,63296 kJ.mol<sup>-1</sup> a la velocidad de aire de secado de 2,0 m/s.

En la Tabla 19, muestra la ecuación de Arrhenius, en el cual la energía de activación ( $E_a$ ) requerida para iniciar la difusión de la humedad en los cormos del Jergón Sacha fue de 97,35707 kJ.mol<sup>-1</sup> a la velocidad de aire de secado de 2,5 m/s.

De las Tablas 17; 18 y 19 se observa que la velocidad del aire de secado influye en el consumo de energía de activación, Un incremento de la velocidad de secado obliga una mayor remoción de humedad, sin embargo no podemos afirmar que la pérdida de la humedad sea directamente proporcional, igual fenómeno ocurre en el estudio de en lo mencionado por (BAUTISTA, 2016)Ñ. Del mismo modo se observa que el  $Deff$  se aumenta considerablemente con la temperatura, a mayores temperaturas de secado exigen mayor energía de activación al producto y evaporan el agua más fácilmente.

(HINCAPIÉ y ZAPATA, 2018), encontraron en el secado en lecho fluidizado del fruto de uchuva, una energía de activación de  $42,903 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  y un factor de frecuencia de  $8,23 \cdot 10^{-6}$ , similar a nuestros resultados. (CASTRO et al., 2008), el cual evaluó el secado de uchuva por aire caliente con y sin pretratamiento de osmodeshidratación, con valores de  $45.815 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  y  $49.041 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  respectivamente. Mientras que el factor pre exponencial obtenido está dos órdenes de magnitud por debajo del reportado por (VEGA et al., 2014) ( $5.53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) para secado convectivo de uchuva.

Tabla 15: Determinación de  $Deff$  , Energía de Activación y  $Do$  a 1,5 m/s la velocidad de secado a 40 , 50 y 60 °C de temperatura de secado

| Velocidad | Temperatura °C | Estimación Lineal | Pendiente  | $Deff$ (m <sup>2</sup> /s) | $Ln(Deff)$ | 1/T       | Pendiente | R <sup>2</sup> | Ea (Kj/mol) | $Ln(Do)$   | $Do$ (m <sup>2</sup> /s) |
|-----------|----------------|-------------------|------------|----------------------------|------------|-----------|-----------|----------------|-------------|------------|--------------------------|
| 1,5 m/s   | 40             | -9,052E-05        | -9,052E-05 | 0,000000092                | -16,2045   | 0,0031933 |           |                |             |            |                          |
|           | 50             | -1,195E-04        | -1,195E-04 | 0,000000121                | -15,9264   | 0,0030945 | -3029,302 | 0,998          | 69,96256    | -6,5378614 | 0,00145                  |
|           | 60             | -1,619E-04        | -1,619E-04 | 0,000000164                | -15,6233   | 0,0030016 |           |                |             |            |                          |

Tabla 16: Determinación de  $Deff$  , Energía de Activación y  $Do$  a 2,0 m/s la velocidad de secado a 40 , 50 y 60 °C de temperatura de secado

| Velocidad | Temperatura oC | Estimación Lineal | Pendiente  | $Deff$ (m <sup>2</sup> /s) | $Ln(Deff)$ | 1/T      | Pendiente | R2     | Ea (Kj/mol) | $Ln(Do)$ | $Do$ (m <sup>2</sup> /s) |
|-----------|----------------|-------------------|------------|----------------------------|------------|----------|-----------|--------|-------------|----------|--------------------------|
| 2,0 m/s   | 40             | -5,823E-05        | -9,138E-05 | 0,000000103                | -16,0925   | 0,003193 |           |        |             |          |                          |
|           | 50             | -1,311E-04        | -1,309E-04 | 0,000000143                | -15,7632   | 0,003094 | -3621,215 | 0,9977 | 83,63296    | -4,53806 | 0,01069                  |
|           | 60             | -1,606E-04        | -2,028E-04 | 0,000000206                | -15,3977   | 0,003001 |           |        |             |          |                          |

Tabla 17: Determinación de  $Deff$  , Energía de Activación y  $Do$  a 2,0 m/s la velocidad de secado a 40 , 50 y 60 °C de temperatura de secado

| Velocidad | Temperatura oC | Estimación Lineal | Pendiente  | $Deff$ (m <sup>2</sup> /s) | $Ln(Deff)$ | 1/T      | Pendiente | R2     | Ea (Kj/mol) | $Ln(Do)$  | $Do$ (m <sup>2</sup> /s) |
|-----------|----------------|-------------------|------------|----------------------------|------------|----------|-----------|--------|-------------|-----------|--------------------------|
| 2,5 m/s   | 40             | -7,389E-05        | -1,118E-04 | 0,000000113                | -15,99313  | 0,003193 |           |        |             |           |                          |
|           | 50             | -1,052E-04        | -1,339E-04 | 0,000000166                | -15,61342  | 0,003094 | -4215,454 | 0,9972 | 97,35707    | -2,543701 | 0,07857                  |
|           | 60             | -2,511E-04        | -2,511E-04 | 0,000000254                | -15,18423  | 0,003001 |           |        |             |           |                          |

## V. CONCLUSIONES

El modelo matemático descrito por Midilli  $MR = a * exp^{-kt} + bt$ ; representa estadísticamente la operación de secado en los cormos del Jergón Sacha, los parámetros k, a y b se incrementa a medida que se aumenta la velocidad de secado, por lo tanto a un incremento de temperatura genera un incremento de rapidez de la operación, disminuyendo el tiempo de secado.

El comportamiento de las velocidades de secado (W) (gH<sub>2</sub>O/scm<sup>2</sup>) depende de la temperatura con un efecto significativo (p-value < 0,05) en las curvas de secado, siendo esta proporcional a medida que se incrementa la temperatura.

La difusividad efectiva del agua (Deff ) durante el fenómeno de secado de los cormos del Jergón Sacha, se incrementa de  $9,23 \cdot 10^{-8}$  a  $1,21 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> a la velocidad de secado de 1,5 m/s en el intervalo de 40 a 60°C; se incrementa de  $1,03 \cdot 10^{-7}$  a  $2,06 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> a la velocidad de secado de 2,0 m/s en el intervalo de 40 a 60°C; se incrementa de  $1,13 \cdot 10^{-7}$  a  $2,54 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> a la velocidad de secado de 2,5 m/s en el intervalo de 40 a 60°C; indicando que la temperatura y la velocidad de secado tiene efecto significativo (p-value < 0,05) en la difusividad efectiva del agua.

La energía de activación para el secado de las los cormos del Jergón Sacha, se incrementa de 69,962 a 97,357 kJ/mol en un intervalo de 1,5 a 2,5 m/s de velocidad de secado.

## **VI. PROPUESTA A FUTURO**

De los hallazgos en la investigación realizada nos permite realizar las siguientes propuestas a futuro:

- Diseñar modelos matemáticos en la cinética de secado en alimentos con variables dependientes relacionados a la deformación del material en función del tiempo.
- Modelar la cinética de secado de los cormos del jergón Sacha, considerando como variable la humedad relativa del aire.

## VII. REFERENCIAS

- AGHBASIO, M., KLANMEHR, M. H., KHANI, S., GHASEMI, M. 2009. Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. *Polish Academy of Sciences Journal*, 23: 313-317.
- AJALA, A. S., ABOIYE, A. O., POPOOLA, J. O., ADEYANJU, J. 2012. Drying Characteristics and Mathematical Modelling of Cassava Chips. *Chemical and Process Engineering Research*, 4:1-9.
- AKPINAR, E. K., BICER, Y. 2005. Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. *International Journal of Food Science Technology*, 40(3):273-281.
- ALEHOSSEINI, E., MOHAMMADI, Z., MAHDI JAFARI, S. 2021. *Engineering Principles of Unit Operations in Food Processing*. Woodhead Publishing .
- ARSLAN, D., MUSA ÖZCAN, M. 2010. Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *LWT - Food Science and Technology*, 43(7):1121-1127.
- AVHAD, M. R., MARCHETTI, J. 2016. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. *Industrial Crops and Products*, 91:76-87.
- AZZOUZ, S., GUIZANI, A., JOMAA, W., BELGHITH, A. 2002. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*. 55( 4): 323-330. .
- BAUTISTA, A. 2016. Desempeño de deshidratador tipo túnel con dependencia de la temperatura y humedad para productos agrícolas” Universidad Autónoma de Nuevo León, . México. Tesis: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. .
- CARTERI CORADI, P., DE CASTRO MELO, E., PEREIRA DA ROCHA, R. 2014. Mathematical modeling of the drying kinetics of the leaves of lemon grass (*Cymbopogon citratus* Stapf) and its effects on quality. *Idesia (Arica)*, 32:43-56.
- CASTRO, A., RODRIGUEZ, L., VARGAS, E. 2008. Secado de Uchuva (*Physalis peruviana* L) por Aire Caliente con Pretratamiento de Osmodeshidratación, *Vitae*, 15(2):226–231.
- DARVISHI, H. A. 2014. Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 130-138.
- DOYMAZ, I. (2004). Drying kinetics of white mulberry. *Journal of food engineering*, 61(3):341-346.
- ERTEKIN, C., YALDIZ, O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63(3): 349-359.
- FERREIRA, S. R., COSTA, A. 2010. Parámetros de Transferencia de Materia en el Secado de Frutas, sin Necesidad de Datos de Disminución de Volumen. *Información tecnológica*, 21:87-98.
- HARSHIT, P. B., CHETANKUMAR, M. 2021. Performance investigation of natural and forced convection cabinet solar dryer for ginger drying . *Materials Today: Proceedings*, 6128–6133.
- HERNANDEZ R., FERNANDEZ C.; BAPTISTA P. 2014. *Metodología de la Investigación*. (Sexta edición. ed.). Mexico: Editorial Mc Graw Hill,.
- HINCAPIÉ, A. M., ZAPATA, E. 2018. Estudio de la Cinética de Deshidratación de Uchuva (*Physalis peruviana* L) en un Secador de Lecho Fluidizado. Medellín, Colombia.: Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias, Dpto. de Alimentos, Univ. de Antioquia.

- IBARZ, A., BARBOSA-CÁNOVAS, G. 2005. Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Madrid: Grupo Mundi-prensa. Madrid España, Grupo Mundi-prensa.
- KARATHANOS, V., BELESSIOTIS, V. 1999. Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 74(4):335-361.
- KAYA, A., AYDIN, O., DEMIRTAŞ, C. 2007. Drying Kinetics of Red Delicious Apple. *Biosystems Engineering*, 96(4):517-524.
- KOUKOUCH, A., IDLIMAM, A., ASBIK, M., SARH, B., IZZAR, B., BOSTYN, S., AMINE, A. 2017. Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste. *Renewable Energy*, 101.
- LAHSASNI, S., KOUHILA, M., MAHROUZ, M., & JAOUHARI, J. 2004. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of food engineering*, 61(2):173-179.
- MEJIA, K., RENGIFO R. 2018. Plantas medicinales de uso popular en la Amazonia Peruana. IIAP, 286.
- MIDILLI, A., KUCUK, H., & YAPAR, Z. 2002. A New Model For Single-Layer Drying. *Drying Technology*, 20(7):1503-1513
- MONTES, E., TORRES, R., ANDRADE, R., PÉREZ, O., MARIMON, J., MEZA, I. 2009. Modelado de las isotermas de desorción del ñame (*Dioscorea rotundata*),. *DYNA*, 76(157):145-152, .
- MOSQUEDA SÁNCHEZ, G. S., ABRAHAM JUÁREZ, M. D., GÓMEZ SALAZAR, J. A., SOSA MORALES, M. E. 2017. Modelación de las cinéticas de deshidratación de jitomate y nopal por dos métodos de secado (aire caliente y radiación infrarroja). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y tecnología de alimentos*, 537-543.
- NICOLETI, F. 2011. Cinética de secado y encogimiento de rodajas de Piña, -Brasil, 2001. Campus San José de Río Prieto: Departamento de Ingeniería de Alimentos, Universidad Estatal Paulista,.
- OCAMPO, A. 2006. Modelo cinético del secado de la pulpa de mago.,. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquía EIA*, 5:119-128,.
- PARK, K., VOHNIKOVA, Z., REISBROS, F. 2004. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering*. 187-193, .
- PUENTE-DIAZ, L., ECHEGARAY-PACHECO, E., CASTRO-MONTERO, E., DI SCALA, K. 2013. Application of mathematical models to infrared assisted drying process of lemon waste (citrus limon (L.) burm. f. cv. genova). *Dyna*, 80(181): 91-97.
- RAMIREZ VELAZQUEZ, M. J. 2004. Obtención y caracterización del almidón del Jergón Sacha (*Dracondium lorentense*). T. San Martín, Tarapoto Perú: esis, Universidad nacional de San Martín Perú.
- ROCHA, R. P., MELO, E. D., CORBÍN, J. B., BERBERT, P. A., DONZELES, S. M., TABAR, J. A. 2012. Drying kinetics of thyme. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, , 16(6):675-683.
- SACILIK, K., KESKIN, R., ELICIN, A. K. 2006. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*,, 73(3):231- 238. .
- SAEED, I., SOPIAN, K., ZAINOL ABIDIN, Z. 2006. Drying kinetics of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.): dried in constant temperature and humidity chamber. *Proc. SPS* , 143-148.
- SALCEDO-MENDOZA, J., MERCADO, J., FERNÁNDEZ, A., VERTEL, M. L., RUIZ, L. E. 2014. Cinética de secado de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) variedad CORPOICA Mtai en función de la temperatura y de la velocidad de aire. *Rev. Ion.*, 27: 29 - 42.

- SANDOVAL, S., RODRÍGUEZ, J., MÉNDEZ, L., SÁNCHEZ, J. 2006. Rapidez de secado reducida: Una aplicación al secado convectivo de Plátano Roatán., . Revista Mexicana de Ingeniería Química, , 5 (1):35-38,.
- SENADEER, W., BHANDARI, B., YOUNG, G., WIJESINGHE, B. 2003. Influence of shapes of selected vegetable material son drying kinetics during fluidized bed drying. Journal of Food Engineering. 58(3):277-283. .
- SIMAL, S., FEMENIA, A., GARAU, M., ROSELLÓ, C. 2005. Use of exponential, Page's and difusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruits. Journal of Food Engineering. Vol. 66 N° 3., Journal of Food Engineering. 66(3):323-328.
- TAFUR, H. J. 2018. Modelamiento de la cinética de secado de las hojas de sachaculantro (*Eryngium foetidum* L.) por convección forzada Tesis Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo Maria Perú: Tesis. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Tassaneeyakul, W. R.-F. 2004. Contamination of Aflatoxins in Herbal Medicinal Products in Thailand. . Mycopathologia, 158(2):239-244. .
- TINOCO, H., OSPINA, D. Y. 2010. Análisis del proceso de deshidratación de cacao para la disminución del tiempo de secado. Revista EIA, 13:53-63.
- TOGRUL, İ. T. 2004. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process . Journal of Food Engineering , 65(3):413-425.
- TORREGROZA, E., MONTES, E., ÁVILA, G., REMOLINA, J. 2014. Modelado de las cinéticas de secado de tres variedades de yuca industrial. Cordoba Colombia: Facultad de Ingeniería, Universidad de Córdoba, Colombia. Tesis.
- VÁSQUEZ, P., COJEAN, S., RENGIFO, E., SUYYAGH-ALBOUZ, S., AMASIFUEN, C., GUERRA, S., 2018. Antiprotozoal activity of medicinal plants used by Iquitos-Nauta road communities in Loreto (Perú). . Journal of Ethnopharmacology. 372 -285.
- VEGA, 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., LEMUS R. 2006. Modelado de la cinética de secado de papaya chilena (*basconcella pubescens*),. . Información teconológica., 17(3):23-31.
- VEGA-GÁLVEZ, A., PUENTE-DÍAZ, L. 2014. Mathematical Modeling of Thin-Layer Drying Kinetics of Cape Gooseberry (*Physalis peruviana*L),.
- VELIC, D., PLANINIC, M., TOMAS, S., BILIS, M. 2004. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. J. ournal of Food Engineering. 64(1):97-102.
- WANG, Z., SUN, J., CHEN, F., LIAO, X., HU, X. (2007). Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. Journal of Food Engineering,, 80(2): 536-544.
- YUMBATO, P., RENGIFO, P. D., ALOMIA, L. I. 2018. Efectos de la harina del *Dracontium lorentense* (Jergón sachá). Lima Perú: Universidad Peruana Unión. Tesis.

**ANEXOS**

## Anexos 1. Perdida de humedad a 40, 50 y 60 °C de temperatura de secado

| $\theta$<br>min | 40 °C<br>1,5 m/s | 50 °C<br>1,5 m/s | 60 °C<br>1,5 m/s | 40 °C<br>2,0 m/s | 50 °C<br>2,0 m/s | 60 °C<br>2,5 m/s | 40 °C<br>2,5 m/s | 50 °C<br>2,5 m/s | 60 °C<br>2,5 /s |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 1               | 312,7            | 282,1            | 296              | 310,2            | 310,9            | 311,9            | 305,6            | 313,2            | 307,6           |
| 2               | 311,8            | 281,2            | 295,8            | 308,6            | 308,7            | 310,4            | 299,8            | 312,7            | 307,6           |
| 3               | 311,6            | 280,9            | 295,2            | 307,6            | 308,5            | 309,1            | 295,6            | 311,7            | 304,8           |
| 4               | 311,3            | 280,5            | 294              | 307,1            | 308,9            | 308,4            | 293,1            | 310,6            | 301,7           |
| 5               | 309,9            | 279,5            | 292,7            | 305,9            | 306,7            | 307,8            | 295,7            | 308,4            | 300,7           |
| 6               | 309,7            | 279,1            | 291,7            | 304,6            | 308,5            | 309,3            | 292,2            | 308,3            | 296,3           |
| 7               | 309,5            | 279,4            | 290,8            | 304,1            | 305,2            | 306              | 290,7            | 305,8            | 294,6           |
| 8               | 308,6            | 277,8            | 290,1            | 302,7            | 305,1            | 305,4            | 291,8            | 304,7            | 293,1           |
| 9               | 307,7            | 277              | 289,2            | 301,5            | 303,8            | 303,5            | 289,3            | 303,4            | 289,4           |
| 10              | 307,5            | 276,2            | 287,8            | 300,9            | 303,1            | 301,8            | 290              | 302,7            | 289,9           |
| 11              | 306,6            | 275,8            | 287,5            | 299,2            | 303,3            | 301              | 286,6            | 301,2            | 288,6           |
| 12              | 305,6            | 275,8            | 286,2            | 298,6            | 301,8            | 299,5            | 285,4            | 300,5            | 285,5           |
| 13              | 305,8            | 275              | 285,7            | 297,8            | 301,3            | 298              | 284,7            | 299,6            | 284             |
| 14              | 304,7            | 274,4            | 284,2            | 296,4            | 300,5            | 296,5            | 281,7            | 298,4            | 281,7           |
| 15              | 303,9            | 274,2            | 283,1            | 295,8            | 299,1            | 295,4            | 280,9            | 298,5            | 280,6           |
| 16              | 303,4            | 273              | 282,7            | 294,7            | 298,5            | 293,6            | 278,8            | 295,9            | 279,5           |
| 17              | 303,2            | 272,9            | 281,3            | 293,5            | 296,5            | 296,4            | 278,8            | 295,6            | 278             |
| 18              | 301,8            | 272,4            | 280,8            | 292,7            | 296,4            | 290,9            | 276,8            | 293,4            | 276,7           |
| 19              | 301,3            | 271,4            | 280,2            | 291,2            | 296,3            | 290              | 274,7            | 291,9            | 272,6           |
| 20              | 300,9            | 271,2            | 279,3            | 290,6            | 294,2            | 288,3            | 274,8            | 290              | 271,5           |
| 21              | 299,7            | 270,5            | 278,1            | 289,4            | 293,6            | 287,1            | 272,2            | 287              | 268,8           |
| 22              | 299,3            | 269,4            | 277,5            | 288,7            | 292              | 286,5            | 272              | 285,8            | 268             |
| 23              | 298,8            | 269,1            | 276,8            | 287,7            | 291,5            | 285,3            | 270              | 284,8            | 265,2           |
| 24              | 298              | 268,2            | 275,1            | 286,6            | 289,6            | 284,9            | 268,1            | 282,7            | 263,2           |
| 25              | 297,2            | 268              | 275,4            | 285,6            | 288,7            | 285              | 266,6            | 281,4            | 262,4           |
| 26              | 296,9            | 267,6            | 274,2            | 285              | 288              | 283,2            | 265,3            | 279,2            | 261,2           |
| 27              | 295,8            | 266,7            | 273,5            | 283,8            | 286,8            | 282,6            | 265,2            | 277,7            | 258,1           |
| 28              | 295,6            | 266,3            | 272,7            | 282,7            | 284,9            | 281,5            | 264              | 275,6            | 258,7           |
| 29              | 295,3            | 266,1            | 271,6            | 282,4            | 283,8            | 279,6            | 263              | 273,7            | 257,7           |
| 30              | 293,9            | 265,4            | 271,4            | 281,2            | 282,8            | 278,3            | 262,1            | 272,8            | 252,5           |
| 31              | 293,5            | 265,2            | 270              | 280,5            | 281,2            | 276,9            | 260,6            | 271,4            | 253,9           |
| 32              | 293,2            | 264,4            | 270,1            | 279,2            | 280,6            | 277,3            | 260,4            | 271,3            | 252,4           |
| 33              | 292,4            | 264              | 268,9            | 278,5            | 278,9            | 276              | 256,9            | 268,8            | 251             |
| 34              | 291,9            | 263,6            | 268,4            | 277,7            | 279,6            | 274,6            | 257,8            | 267,2            | 249,4           |
| 35              | 291,4            | 262,8            | 267,5            | 276,7            | 277,9            | 274,1            | 257,7            | 266,8            | 249,8           |
| 36              | 290,5            | 262,4            | 266,6            | 276,1            | 277,4            | 274,2            | 256,4            | 264,8            | 248,1           |
| 37              | 289,8            | 262,1            | 266,5            | 275,1            | 276,4            | 273,7            | 256,3            | 261,7            | 247,6           |
| 38              | 289,6            | 261,4            | 265,6            | 274,5            | 275,8            | 273,4            | 254,2            | 261,8            | 246             |
| 39              | 289              | 261,4            | 264,8            | 273,8            | 275,1            | 271              | 254,5            | 261              | 246             |
| 40              | 288,1            | 262,5            | 264,5            | 272,5            | 274,6            | 271              | 252,6            | 259,9            | 245,8           |
| 41              | 287,8            | 259              | 263,2            | 271,9            | 272,6            | 270              | 251,3            | 259,6            | 243,6           |

|    |       |       |        |        |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 42 | 287,2 | 259,2 | 263,4  | 271,4  | 273,7 | 269,5 | 251   | 258,7 | 244,3 |
| 43 | 286,5 | 258   | 262,5  | 270,2  | 271,8 | 269,3 | 249   | 257,4 | 243,6 |
| 44 | 285,7 | 257,8 | 262    | 270    | 271,2 | 269,8 | 250   | 257,2 | 240,7 |
| 45 | 285,4 | 257,7 | 260,8  | 269,3  | 270,2 | 268,4 | 248,6 | 256,8 | 240,1 |
| 46 | 284,2 | 257,1 | 260,2  | 268,4  | 269,4 | 266,8 | 247,9 | 256,7 | 240   |
| 47 | 283,6 | 257,3 | 260,1  | 267,9  | 269,3 | 267,4 | 247,4 | 254,4 | 241   |
| 48 | 284,1 | 256,5 | 259,4  | 267    | 268,2 | 265,5 | 246,1 | 255   | 238,9 |
| 49 | 282,8 | 256,8 | 258,8  | 266,6  | 267,6 | 265,4 | 246,5 | 253,1 | 238,4 |
| 50 | 282,2 | 256,2 | 258,2  | 266    | 267,9 | 265,5 | 245,5 | 253,5 | 238,5 |
| 51 | 282,2 | 255,3 | 257,7  | 264,8  | 269,2 | 265,1 | 244,3 | 250,6 | 237,9 |
| 52 | 280,9 | 255,6 | 257,4  | 264,6  | 266,9 | 263,2 | 245,4 | 251,6 | 238   |
| 53 | 280,5 | 255,2 | 256,7  | 263,9  | 266,1 | 261,5 | 244   | 250,9 | 237,4 |
| 54 | 280,4 | 254,8 | 256,2  | 263,2  | 266,2 | 263,7 | 243,2 | 250   | 237   |
| 55 | 279,5 | 255   | 255,5  | 262,8  | 265,1 | 261,6 | 239,2 | 249,5 | 236,5 |
| 56 | 278,7 | 254,5 | 255,3  | 262    | 265   | 262,4 | 238,6 | 247,5 | 236,9 |
| 57 | 278,3 | 254,3 | 254,9  | 261,6  | 264,3 | 260,1 | 238,6 | 248,6 | 235,2 |
| 58 | 278   | 254,3 | 254,4  | 261,1  | 263,4 | 261,1 | 235   | 248,2 | 235,4 |
| 59 | 277   | 253,5 | 254,1  | 260,4  | 264,2 | 260,2 | 236,7 | 247,7 | 235,6 |
| 60 | 276,8 | 253,8 | 253,1  | 260    | 263,1 | 259,3 | 236   | 247,7 | 234,2 |
| 61 | 276,4 | 253,7 | 252,9  | 259,5  | 264,2 | 260,8 | 236,4 | 247,6 | 233,4 |
| 62 | 275,1 | 253,1 | 252,1  | 258,9  | 261,6 | 258   | 236,2 | 246,8 | 234,7 |
| 63 | 275,1 | 253,1 | 251,8  | 258,6  | 262,4 | 258,8 | 235,5 | 246,3 | 232,1 |
| 64 | 274,9 | 252,6 | 251,3  | 257,9  | 262,6 | 257,1 | 236,8 | 246,4 | 233,3 |
| 65 | 273,9 | 252,5 | 250,9  | 257,6  | 261,5 | 258,7 | 235,3 | 245,9 |       |
| 66 | 273,8 | 252,8 | 250,9  | 257    | 260,8 | 258,3 | 235,6 | 245,2 |       |
| 67 | 273,6 | 252   | 250,1  | 256,6  | 261,5 | 257,5 | 234,5 | 245,9 |       |
| 68 | 272,2 | 251,7 | 250,1  | 256,1  | 260,8 | 256,2 | 234,5 | 246,1 |       |
| 69 | 272,2 | 252,3 | 249,6  | 255,8  | 260,6 | 256,9 | 234,6 | 246,1 |       |
| 70 | 271,8 | 251,2 | 248,9  | 255,4  | 260,1 | 255,7 | 233,9 | 244,3 |       |
| 71 | 270,9 | 251,7 | 248,7  | 255,1  | 260,2 | 255,3 | 233,8 | 245,9 |       |
| 72 | 270,4 | 251,3 | 248,2  | 254,2  | 260,5 | 256   | 232,3 | 244,9 |       |
| 73 | 270,2 | 250,8 | 247,8  | 254,2  | 248,2 | 255,7 | 232,9 | 244,5 |       |
| 74 | 269,4 | 251,1 | 248    | 253,6  | 248,8 | 256,4 | 233,6 | 244,3 |       |
| 75 | 268,9 | 250,4 | 247    | 253,1  | 249,4 | 255,2 | 232   | 242,5 |       |
| 76 | 268,9 | 250,3 | 247    | 253,2  | 246,7 | 255,1 | 233,2 | 244,6 |       |
| 77 | 268   | 250,4 | 246,7  | 252,5  | 249,9 | 254,9 | 231,5 | 244,7 |       |
| 78 | 267,8 | 250,2 | 246,3  | 252,3  | 257,4 | 255,2 | 232,4 | 242,2 |       |
| 79 | 267,3 | 250,6 | 246,1  | 252,4  | 254,1 | 254,4 | 232,2 | 240,9 |       |
| 80 | 266,9 | 249,9 | 245,2  | 251,8  | 254,9 | 254   | 232,2 | 244,1 |       |
| 81 | 266,2 | 249,6 | 245,4  | 251,4  | 252,9 | 255,4 | 231,5 | 244,1 |       |
| 82 | 266,1 | 250,2 | 244,70 | 251,50 | 252,4 | 253,3 | 230,5 | 242,7 |       |
| 83 | 265,6 | 249,4 | 244,60 | 251,00 | 252,2 | 253,6 | 227,8 | 243,5 |       |
| 84 | 264,9 | 249,6 | 244,5  | 250,4  | 249,9 | 255,5 | 228,5 | 242,6 |       |
| 85 | 264,7 | 249,6 | 244,1  | 250,6  |       | 254,9 | 228,8 | 243,4 |       |
| 86 | 264,3 | 249,2 | 244,2  | 249,9  |       | 252,2 | 229   | 242,2 |       |

|     |       |       |       |       |  |       |       |       |  |
|-----|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|--|
| 87  | 263   | 249,5 | 243,4 | 249,8 |  | 253,3 | 228,4 | 242,7 |  |
| 88  | 263   | 249   | 243,2 | 249,2 |  | 253,1 | 229,4 | 241,9 |  |
| 89  | 263   | 248,9 | 243,3 | 248,9 |  | 252,8 | 228,8 | 242,9 |  |
| 90  | 262,1 | 249   | 242,6 | 249,3 |  | 253,8 | 229   | 242,8 |  |
| 91  | 261,7 | 248,9 | 242,8 | 248,4 |  | 253,4 | 229,2 | 241,4 |  |
| 92  | 261,8 | 248,8 | 242,4 | 248,3 |  | 253,7 | 228,7 |       |  |
| 93  | 261,1 | 248,7 | 242,6 | 248,5 |  | 253,3 | 229,8 |       |  |
| 94  | 260,5 | 248,6 | 241,7 | 247,7 |  | 252,9 | 229,2 |       |  |
| 95  | 260,6 | 249   | 241,7 | 247,6 |  | 253,9 | 228   |       |  |
| 96  | 259,9 | 248,2 | 241,8 | 247,5 |  | 253,2 | 229,5 |       |  |
| 97  | 259,5 | 248,6 | 241,1 | 246,7 |  | 253,4 | 229,5 |       |  |
| 98  | 259,3 | 248,7 | 241,4 | 247   |  | 254,1 | 229,9 |       |  |
| 99  | 258,6 | 248,1 | 241,3 | 245,7 |  | 254,7 | 229,3 |       |  |
| 100 | 257,7 | 248,5 | 240,6 | 246,5 |  | 252,7 | 229,9 |       |  |
| 101 | 257,7 | 248,2 | 241   | 246,5 |  | 253,7 | 230,5 |       |  |
| 102 | 257,7 | 248,3 | 240,4 |       |  |       | 226,4 |       |  |
| 103 | 256,9 | 248,6 | 240,7 |       |  |       | 226   |       |  |
| 104 | 256,9 | 248   | 240,4 |       |  |       | 227,3 |       |  |
| 105 | 256,3 | 248,2 | 240,1 |       |  |       | 228,7 |       |  |
| 106 | 255,8 | 248,3 | 240,4 |       |  |       |       |       |  |
| 107 | 255,6 | 247,7 | 239,6 |       |  |       |       |       |  |
| 108 | 255,5 | 248,1 | 240,1 |       |  |       |       |       |  |
| 109 | 254,5 | 247,7 | 239,4 |       |  |       |       |       |  |
| 110 | 254,5 | 247,9 | 239,7 |       |  |       |       |       |  |
| 111 | 254,9 | 247,6 | 239,7 |       |  |       |       |       |  |
| 112 | 253,8 | 247,1 | 239   |       |  |       |       |       |  |
| 113 | 253,8 | 247,7 | 239,6 |       |  |       |       |       |  |
| 114 | 253,9 | 247,2 | 238,9 |       |  |       |       |       |  |
| 115 | 253,2 | 247,5 | 238,8 |       |  |       |       |       |  |
| 116 | 252,9 | 247,6 | 239,3 |       |  |       |       |       |  |
| 117 | 252,9 | 247,2 | 238,8 |       |  |       |       |       |  |
| 118 | 252,1 | 247,7 | 239   |       |  |       |       |       |  |
| 119 | 251,8 | 247   | 238,7 |       |  |       |       |       |  |
| 120 | 251,9 | 247,1 | 238,5 |       |  |       |       |       |  |
| 121 | 251,8 | 247,3 | 238,9 |       |  |       |       |       |  |
| 122 | 251,2 | 246,9 | 237,9 |       |  |       |       |       |  |
| 123 | 250,8 | 247,7 | 238,4 |       |  |       |       |       |  |
| 124 | 250,8 | 247,1 | 238,4 |       |  |       |       |       |  |
| 125 | 250,2 |       | 237,9 |       |  |       |       |       |  |
| 126 | 250,3 |       | 238,3 |       |  |       |       |       |  |
| 127 | 250,4 |       | 238   |       |  |       |       |       |  |
| 128 | 249,7 |       | 238   |       |  |       |       |       |  |
| 129 | 249,5 |       | 238,4 |       |  |       |       |       |  |
| 130 | 249,8 |       | 238,1 |       |  |       |       |       |  |
| 131 | 248,9 |       | 238,5 |       |  |       |       |       |  |

|     |       |  |       |  |  |  |  |  |  |
|-----|-------|--|-------|--|--|--|--|--|--|
| 132 | 248,8 |  | 237,8 |  |  |  |  |  |  |
| 133 | 249   |  | 238   |  |  |  |  |  |  |
| 134 | 248,5 |  | 238   |  |  |  |  |  |  |
| 135 | 248   |  | 237,7 |  |  |  |  |  |  |
| 136 | 248,5 |  | 237,9 |  |  |  |  |  |  |
| 137 | 248,1 |  | 237,5 |  |  |  |  |  |  |
| 138 | 247,4 |  | 237,8 |  |  |  |  |  |  |
| 139 | 247,6 |  | 237,7 |  |  |  |  |  |  |
| 140 | 247,8 |  | 237,3 |  |  |  |  |  |  |
| 141 | 246,8 |  | 237,7 |  |  |  |  |  |  |
| 142 | 247   |  | 237,3 |  |  |  |  |  |  |
| 143 | 247,4 |  | 237,6 |  |  |  |  |  |  |
| 144 | 246,6 |  | 237,7 |  |  |  |  |  |  |
| 145 | 246,3 |  | 237,3 |  |  |  |  |  |  |
| 146 | 246,7 |  | 237,9 |  |  |  |  |  |  |
| 147 | 246,2 |  | 236,9 |  |  |  |  |  |  |
| 148 | 246,1 |  | 237,4 |  |  |  |  |  |  |
| 149 | 246,4 |  | 237,4 |  |  |  |  |  |  |
| 150 | 246   |  | 237   |  |  |  |  |  |  |
| 151 | 245,7 |  | 237,5 |  |  |  |  |  |  |
| 152 | 245,8 |  | 237   |  |  |  |  |  |  |
| 153 | 245,6 |  | 237   |  |  |  |  |  |  |
| 154 | 244,9 |  | 237,6 |  |  |  |  |  |  |
| 155 | 245,3 |  | 237   |  |  |  |  |  |  |
| 156 | 245,6 |  | 237   |  |  |  |  |  |  |
| 157 | 245,1 |  | 237   |  |  |  |  |  |  |
| 158 | 244,9 |  | 237,1 |  |  |  |  |  |  |
| 159 | 245   |  | 237,7 |  |  |  |  |  |  |
| 160 | 244,1 |  | 237,4 |  |  |  |  |  |  |
| 161 | 244,2 |  | 237,3 |  |  |  |  |  |  |
| 162 | 244,7 |  | 237,3 |  |  |  |  |  |  |
| 163 | 244,5 |  | 237,5 |  |  |  |  |  |  |
| 164 | 244   |  | 238   |  |  |  |  |  |  |
| 165 | 244,6 |  | 237,6 |  |  |  |  |  |  |
| 166 | 244,2 |  | 237,2 |  |  |  |  |  |  |
| 167 | 244   |  |       |  |  |  |  |  |  |
| 168 | 244,3 |  |       |  |  |  |  |  |  |
| 169 | 244,3 |  |       |  |  |  |  |  |  |
| 170 | 243,6 |  |       |  |  |  |  |  |  |
| 171 | 243,9 |  |       |  |  |  |  |  |  |
| 172 | 243,9 |  |       |  |  |  |  |  |  |
| 173 | 243,4 |  |       |  |  |  |  |  |  |
| 174 | 243,9 |  |       |  |  |  |  |  |  |
| 175 | 243,9 |  |       |  |  |  |  |  |  |
| 176 | 243,3 |  |       |  |  |  |  |  |  |

**Anexo 2.** Análisis de Varianza para Rcuad - Suma de Cuadrados Tipo III

| <i>Fuente</i>               | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|-----------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| <b>EFFECTOS PRINCIPALES</b> |                          |           |                       |                |                |
| A:temp                      | 0,00390674               | 2         | 0,00195337            | 4,42           | <b>0,0202</b>  |
| B:Veloc                     | 0,00174763               | 2         | 0,000873815           | 1,98           | 0,1551         |
| C:Modelo                    | 0,019024                 | 8         | 0,002378              | 5,38           | <b>0,0003</b>  |
| <b>INTERACCIONES</b>        |                          |           |                       |                |                |
| AB                          | 0,00207763               | 4         | 0,000519407           | 1,17           | 0,3404         |
| AC                          | 0,00637948               | 16        | 0,000398718           | 0,90           | 0,5739         |
| BC                          | 0,00730393               | 16        | 0,000456495           | 1,03           | 0,4516         |
| RESIDUOS                    | 0,0141481                | 32        | 0,00044213            |                |                |
| TOTAL<br>(CORREGIDO)        | 0,0545876                | 80        |                       |                |                |

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

**El StatAdvisor**

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Rcuad en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 2 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Rcuad con un 95,0% de nivel de confianza.

**Pruebas de Múltiple Rangos para Rcuad por temperatura**

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

| <i>Temp</i> | <i>Casos</i> | <i>Media LS</i> | <i>Sigma LS</i> | <i>Grupos Homogéneos</i> |
|-------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| 1           | 27           | 0,966926        | 0,00404662      | X                        |
| 2           | 27           | 0,981333        | 0,00404662      | X                        |
| 3           | 27           | 0,981963        | 0,00404662      | X                        |

| <i>Contraste</i> | <i>Sig.</i> | <i>Diferencia</i> | <i>+/- Límites</i> |
|------------------|-------------|-------------------|--------------------|
| 1 - 2            | *           | <b>-0,0144074</b> | 0,014066           |
| 1 - 3            | *           | <b>-0,015037</b>  | 0,014066           |
| 2 - 3            |             | -0,00062963       | 0,014066           |

\* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

### Pruebas de Múltiple Rangos para Rcuad por Veloc

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

| <i>Velocidad</i> | <i>Casos</i> | <i>Media LS</i> | <i>Sigma LS</i> | <i>Grupos Homogéneos</i> |
|------------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| 2                | 27           | 0,970222        | 0,00404662      | X                        |
| 3                | 27           | 0,979296        | 0,00404662      | X                        |
| 1                | 27           | 0,980704        | 0,00404662      | X                        |

| <i>Contraste</i> | <i>Sig.</i> | <i>Diferencia</i> | <i>+/- Límites</i> |
|------------------|-------------|-------------------|--------------------|
| 1 - 2            |             | 0,0104815         | 0,014066           |
| 1 - 3            |             | 0,00140741        | 0,014066           |
| 2 - 3            |             | -0,00907407       | 0,014066           |

\* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

### Pruebas de Múltiple Rangos para Rcuad por Modelo

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

| <i>Modelo</i> | <i>Casos</i> | <i>Media LS</i> | <i>Sigma LS</i> | <i>Grupos Homogéneos</i> |
|---------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| 1             | 9            | 0,952111        | 0,00700896      | X                        |
| 6             | 9            | 0,963556        | 0,00700896      | XX                       |
| 3             | 9            | 0,963556        | 0,00700896      | XX                       |
| 8             | 9            | 0,964333        | 0,00700896      | XXX                      |
| 2             | 9            | 0,980444        | 0,00700896      | XXX                      |
| 9             | 9            | 0,985222        | 0,00700896      | XX                       |
| 4             | 9            | 0,988333        | 0,00700896      | XX                       |
| 7             | 9            | 0,996222        | 0,00700896      | XX                       |
| 5             | 9            | 0,996889        | 0,00700896      | X                        |

#### El StatAdvisor

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 6 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

**Anexo 3.** Estimaciones de parámetros para el modelo matemático Midilli a 40 °C con 1,5 m/s de velocidad de secado.

| <b>Estimaciones de parámetro</b> |            |             |                                |                 |
|----------------------------------|------------|-------------|--------------------------------|-----------------|
| Parámetro                        | Estimación | Desv. Error | Intervalo de confianza de 95 % |                 |
|                                  |            |             | Límite inferior                | Límite superior |
| k                                | 0,47       | 0,001       | 0,467                          | 0,472           |
| a                                | 0,991      | 0,001       | 0,989                          | 0,993           |
| b                                | 0,098      | 0,001       | 0,097                          | 0,099           |
| n                                | 1,198      | 0,004       | 1,19                           | 1,207           |

| <b>Correlaciones de estimaciones de parámetro</b> |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|
|   | k     | a     | b     | n     |
| k   | 1,000 | ,690  | ,115  | -,384 |
| a   | ,690  | 1,000 | -,528 | -,798 |
| b   | ,115  | -,528 | 1,000 | ,851  |
| n   | -,384 | -,798 | ,851  | 1,000 |

| <b>ANOVA<sup>a</sup></b> |                   |     |                    |
|--------------------------|-------------------|-----|--------------------|
| Origen                   | Suma de cuadrados | gl  | Medias cuadráticas |
| Regresión                | 89,890            | 4   | 22,472             |
| Residuo                  | ,002              | 212 | ,000               |
| Total sin corrección     | 89,892            | 216 |                    |
| Total corregido          | 5,912             | 215 |                    |

Variable dependiente: MR

R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma de cuadrados corregida) = 1,00

**Anexo 4.** Estimaciones de parámetros para el modelo matemático Midilli a 40 °C con 2,0 m/s de velocidad de secado.

| <b>Estimaciones de parámetro</b> |            |             |                                |                 |
|----------------------------------|------------|-------------|--------------------------------|-----------------|
| Parámetro                        | Estimación | Desv. Error | Intervalo de confianza de 95 % |                 |
|                                  |            |             | Límite inferior                | Límite superior |
| k                                | 0,47       | 0,001       | 0,467                          | 0,472           |
| ,679                             | ,008       | ,664        | ,694                           | 0,993           |
| 1,004                            | ,003       | ,999        | 1,009                          | 0,099           |
| ,205                             | ,004       | ,197        | ,213                           | 1,207           |
| 1,046                            | ,014       | 1,020       | 1,073                          |                 |

| <b>Correlaciones de estimaciones de parámetro</b> |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|
|   | k     | a     | b     | n     |
| k   | 1,000 | -,259 | ,926  | ,696  |
| a   | -,259 | 1,000 | -,584 | -,814 |
| b   | ,926  | -,584 | 1,000 | ,899  |
| n   | ,696  | -,814 | ,899  | 1,000 |

| <b>ANOVA<sup>a</sup></b> |                   |     |                    |
|--------------------------|-------------------|-----|--------------------|
| Origen                   | Suma de cuadrados | gl  | Medias cuadráticas |
| Regresión                | 71,496            | 4   | 17,874             |
| Residuo                  | ,004              | 120 | ,000               |
| Total sin corrección     | 71,499            | 124 |                    |
| Total corregido          | 1,348             | 123 |                    |

Variable dependiente: MR

R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma de cuadrados corregida) = 1,00

Tabla 18: Análisis de Varianza de la factorial de las variables Modelos matemáticos, Velocidad de aire de secado y temperatura con interacción entre las variables.

| <i>Fuente</i>        | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|----------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| A: Temperatura       | 0,00390674               | 2         | 0,00195337            | 4,42           | 0,0202         |
| B: Velocidad         | 0,00174763               | 2         | 0,000873815           | 1,98           | 0,1551         |
| C: Modelo matemático | 0,019024                 | 8         | 0,002378              | 5,38           | 0,0003         |
| <b>INTERACCIONES</b> |                          |           |                       |                |                |
| AB                   | 0,00207763               | 4         | 0,000519407           | 1,17           | 0,3404         |
| AC                   | 0,00637948               | 16        | 0,000398718           | 0,90           | 0,5739         |
| BC                   | 0,00730393               | 16        | 0,000456495           | 1,03           | 0,4516         |
| RESIDUOS             | 0,0141481                | 32        | 0,00044213            |                |                |
| TOTAL (CORREGIDO)    | 0,0545876                | 80        |                       |                |                |

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

Tabla 19; Pruebas de Múltiple Rangos para R2 por modelos matemáticos, Velocidades y temperatura de secado según Tukey HSD

| <i>Modelos matemáticos</i> | <i>Casos</i> | <i>Media LS</i> | <i>Grupos Homogéneos</i> |
|----------------------------|--------------|-----------------|--------------------------|
| Newton (1)                 | 9            | 0,952111        | a                        |
| Dos Términos (6)           | 9            | 0,963556        | a b                      |
| Henderson (3)              | 9            | 0,963556        | a b                      |
| Verman (8)                 | 9            | 0,964333        | a b c                    |
| Page (2)                   | 9            | 0,980444        | a b c                    |
| Wang Sing (9)              | 9            | 0,985222        | b c                      |
| Logarítmico (4)            | 9            | 0,988333        | b c                      |
| Henderson Modificado (7)   | 9            | 0,996222        | b c                      |
| Midilli (5)                | 9            | 0,996889        | c                        |

| <b>Velocidad de secado</b>   | <b>Casos</b> | <b>Media LS</b> | <b>Grupos Homogéneos</b> |
|------------------------------|--------------|-----------------|--------------------------|
| 2,0 m/s                      | 27           | 0,970222        | a                        |
| 2,5 m/s                      | 27           | 0,979296        | a                        |
| 1,5 m/s                      | 27           | 0,980704        | a                        |
| <b>Temperatura de secado</b> | <b>Casos</b> | <b>Media LS</b> | <b>Grupos Homogéneos</b> |
| 40 °C                        | 27           | 0,966926        | a                        |
| 50 °C                        | 27           | 0,981333        | b                        |
| 60 °C                        | 27           | 0,981963        | b                        |













