

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TESIS**

**“PROCESO DE SECADO DE ARRACACHA (*Arracacia xanthorrhiza*) PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS EN UN SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO”**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

**SEGURA PAREDES CLAUDIA CECILIA**  
**OSORIO ROSARIO CARIN DANIELA**

**ASESOR**

**ING° LUÍS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS**

**CALLAO – DICIEMBRE – 2018**

**PERÚ**

## **DEDICATORIA**

**A Dios por ser nuestro guía y fortaleza; a nuestro asesor de tesis el Ing° Luis Américo Carrasco Venegas, por su asesoría, apoyo y tiempo dedicado durante la realización de este trabajo de Tesis**

**Y en especial dedicamos el presente trabajo a nuestros padres : Adolfo Segura y Olinda Paredes; Roly Osorio y María Rosario, por su sacrificio, amor y apoyo incondicional, que con sus consejos y disciplinas nos inspiran a ser mejores personas y grandes profesionales**

## **AGRADECIMIENTO**

**Queremos agradecer a Dios por su protección durante toda la vida, dándonos la fortaleza y oportunidad de culminar exitosamente una etapa importante de nuestras vidas**

**Nuestro agradecimiento a todas aquellas personas que nos brindaron su apoyo y conocimiento para el desarrollo del presente trabajo de investigación, en especial a nuestro Asesor de Tesis, Ing° Luis Américo Carrasco Venegas, quien nos asesoró y brindo de sus conocimientos permitiéndonos la concreción del objetivo propuesto y por su colaboración en la discusión de los resultados encontrados durante el desarrollo de este trabajo**

**A nuestros padres que creyeron en nosotras y nos sacaron adelante dándonos ejemplos de superación y entrega porque gracias a ellos hoy podemos alcanzar nuestras metas, ya que siempre estuvieron impulsándonos en nuestros momentos más difíciles de nuestra carrera y porque el orgullo que sienten por nosotros son la motivación de seguir hasta el final de nuestros objetivos**

**A la Universidad Nacional del Callao, presente a través del Laboratorio de Investigación de Pre-grado de la Facultad de Ingeniería Química por la facilidad de sus instalaciones del centro y permitirnros culminar con el desarrollo del trabajo de tesis**

**A todas aquellas personas amigos, colegas, familiares que de una u otra manera han contribuido con sus apoyos, conocimientos y colaboración en la realización de este trabajo de tesis**

## PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Sustentada por los Bachilleres **SEGURA PAREDES CLAUDIA CECILIA** y **OSORIO ROSARIO CARIN DANIELA** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

ING° HUGO AVALOS JACOBO	PRESIDENTE
ING° ÓSCAR MANUEL CHAMPA HENRÍQUEZ	SECRETARIO
ING° FABIO MANUEL RANGEL MORALES	VOCAL
ING° LUÍS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS	ASESOR

Tal como está asentado en el Libro de Actas N° 2 de Tesis sin Ciclo de Tesis **Folio N° 118** y Acta N° 301 de fecha **TREINTA DE OCTUBRE DE 2018**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 309–2017–CU de fecha 24 de octubre de 2017 y su Cuarta Disposición Transitoria.

# INDICE

	Pag.
<b>RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>10</b>
1.1. Determinación del problema	10
1.2. Formulación del problema	10
1.2.1. Problema General	10
1.2.2. Problemas específicos	10
1.3. Objetivos de la investigación	11
1.3.1. Objetivo General	11
1.3.2. Objetivos Específicos	11
1.4. Justificación	11
<b>II. MARCO TEÓRICO</b>	<b>12</b>
2.1. Antecedentes del estudio	12
2.2. Marco teórico	14
2.2.1. La Arracacha	14
2.2.2. Proceso de Secado	25
2.2.3. Tipos de Secado	30
2.2.4. Secadores Rotatorios	31
2.2.5. Generalidades de las curvas de secado	35
2.2.6. Curva de Secado	36
2.2.7. Efecto de las variables del proceso sobre la velocidad de secado	41
2.2.8. Determinación matemática del modelo cinético de secado	43
2.3. Glosario	43
<b>III. VARIABLES E HIPÓTESIS</b>	<b>46</b>
3.1. Variables de la investigación	46
3.1.1. Variable Dependiente	46
3.1.2. Variables Independientes	46
3.2. Operacionalización de variables	46
3.3. Hipótesis	46
3.3.1. Hipótesis general	46
3.3.2. Hipótesis Específicas	46
<b>IV. METODOLOGÍA</b>	<b>48</b>
4.1. Tipo de investigación	48
4.2. Diseño de la investigación	49
4.3. Etapas de la Investigación	50

4.4.	Población y muestra	50
4.4.1.	Población	50
4.4.2.	Muestra	50
4.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	50
4.5.1.	Materiales	50
4.5.2.	Método	52
V.	RESULTADOS	58
5.1.	Especificaciones del Secador Rotatorio	58
5.2.	Curvas de Secado	58
5.3.	Ajuste de curvas a modelos matemáticos	65
5.4.	Condición optima de secado	66
5.5.	Tiempo de secado a las condiciones optimas	67
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
5.6.	Contrastación de hipótesis con los resultados	69
5.7.	Contrastación de resultados con otros estudios similares	69
VII.	CONCLUSIONES	72
VIII.	RECOMENDACIONES	73
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	ANEXOS	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1</b>	<b>Arracacha</b>	<b>16</b>
<b>FIGURA 2.2</b>	<b>Distribucion Geográfica de la Arracacha</b>	<b>17</b>
<b>FIGURA 2.3</b>	<b>Hoja, tallo y raiz de la Arracacha</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 2.4</b>	<b>Clasificación de secados por su modelo de Operación</b>	<b>29</b>
<b>FIGURA 2.5</b>	<b>Clasificacion de secadores según su escala de produccion</b>	<b>29</b>
<b>FIGURA 2.6</b>	<b>Secador de Aire caliente Raggle Scoble SXW</b>	<b>31</b>
<b>FIGURA 2.7</b>	<b>Secador Rotatorio con su respectivo ciclón</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 2.8</b>	<b>Secador Rotatorio calentado con aire en contracorriente</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 2.9</b>	<b>Algunos Secadores Rotatorios</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 2.10</b>	<b>Curva de tiempo y contenido de Humedad</b>	<b>37</b>
<b>FIGURA 2.11</b>	<b>Curva de velocidad de Secado y contenido de Humedad</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 4.1</b>	<b>Diseño de la investigación</b>	<b>49</b>
<b>FIGURA 4.2</b>	<b>Equipo Secador Rotatorio</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 4.3</b>	<b>Balanza</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 4.4</b>	<b>Utensilios</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 4.5</b>	<b>Insumo – Arracacha</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 4.6</b>	<b>Adaptación del tubo rotatorio</b>	<b>54</b>
<b>FIGURA 4.7</b>	<b>Ensamblaje del equipo</b>	<b>54</b>
<b>FIGURA 4.8</b>	<b>Equipo Secador Rotatorio</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 4.9</b>	<b>Conexión Data Q en el equipo</b>	<b>56</b>
<b>FIGURA 4.10</b>	<b>Corridas del Secado de la Arracacha</b>	<b>56</b>
<b>FIGURA 4.11</b>	<b>Diagrama de bloques para el proceso de secado de la Arracacha (Arracacia Xanthorrhiza) en un secador rotatorio discontinuo</b>	<b>57</b>
<b>FIGURA 5.1</b>	<b>Curva de Secado de la humedad en base seca de la Arracacha en función del tiempo para los parametros de 55°C, 480 L/min y espesores de 1,5; 3,0 y 5,0 mm</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 5.2</b>	<b>Curva de secad de la humedad en base seca de la arracacha en función del tiempo para los parámetros de 65°C, 480 L/min y espesores de 1,5; 3,0 y 5,0 mm</b>	<b>60</b>
<b>FIGURA 5.3</b>	<b>Curva de Secado de la humedad en base seca de la arracacha en unción del tiempo para los parámetros de 75°C, 480 L/min y espesores de 1,5; 3,0 y 5,0 mm</b>	<b>61</b>
<b>FIGURA 5.4</b>	<b>Curva de Secado de la humedad en base seca de la arracacha en función del tiempo para los parámetros de 55°C, 750 L/min y espesores de 1,5; 3,0 y 5,0 mm</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 5.5</b>	<b>Curva de secado de la humedad en base seca de la arracacha en función del tiempo para los parámetros de 55°C, 750 L/min y espesores de 1,5; 3,0 y 5,0 mm</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 5.6</b>	<b>Curva de Secado de la humedad en base seca de la arracacha en función del tiempo para los parámetros de 65°C, 750 L/min y espesores de 1,5; 3,0 y 5,0 mm</b>	<b>64</b>

**FIGURA 5.7** Curva de Secado de la humedad en base seca de la arracacha en función del tiempo para los parámetros de 75°C, 750 L/min y espesores de 1,5; 3,0 y 5,0 mm

**68**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 2.1</b>	<b>Composición química proximal de la Arracacha</b>	<b>21</b>
<b>TABLA 2.2</b>	<b>Composición de raíces tuberosas de Arracacha blanca y arracacha morada</b>	<b>22</b>
<b>TABLA 2.3</b>	<b>Composición química proximal entre Arracacha amarilla, yuca y papa amarilla</b>	<b>23</b>
<b>TABLA 2.4</b>	<b>Principales vitaminas presentes en la Arracacha</b>	<b>24</b>
<b>TABLA 2.5</b>	<b>Características generales de operación en Secadores Directos e Indirectos</b>	<b>30</b>
<b>TABLA 2.6</b>	<b>Modelo matemático para la determinación de la cinética del secado</b>	<b>44</b>
<b>TABLA 3.1</b>	<b>Operacionalización de Variables</b>	<b>46</b>
<b>TABLA 5.1</b>	<b>Modelos Matemáticos Empleados</b>	<b>65</b>
<b>TABLA 5.2</b>	<b>Constantes obtenidos para el Modelo de Midilli</b>	<b>66</b>
<b>TABLA 6.1</b>	<b>Condiciones de operación y resultados obtenidos de estudios similares</b>	<b>70</b>

## RESUMEN

El secado de Arracacha (*Arracacia Xanthorriza*) fue realizado en un Secador Rotatorio Discontinuo a escala de laboratorio. Las muestras de Arracacha con espesores de 1,5 mm, 2 mm y 5 mm fueron colocadas en el equipo en contacto directo con un flujo de aire caliente, bajo distintas condiciones de operación. Se evaluó el efecto de la temperatura (55°C, 65°C y 75°C) y flujo del aire (480 y 750 L/min) trabajando a una velocidad de rotación constante de 13,20 rpm, pesando las muestras en intervalos de 10 min hasta obtener un peso constante. Los resultados obtenidos indicaron que, a un espesor de 1,5 mm, temperatura de 65°C y flujo de aire de 480 L/min, el tiempo de secado fue de 45,5 min para obtener una humedad de 10%. Los datos derivados de las curvas de secado fueron ajustados a los modelos de Newton, Page, Henderson, Logarítmica, Dos términos exponencial, Wang y Singh, el de Henderson y Pabis modificado, Verma y el de Midilli.

De acuerdo con los resultados el modelo matemático que describió mejor el comportamiento de las curvas de secado fue el modelo de Midilli con una regresión no lineal con  $R^2 = 0,9997933$  y Varianza = 0,0001154, obteniendo una mejor calidad de ajuste en cada curva de secado, representando así un excelente modelo para estimar el tiempo de secado de este producto, así como la velocidad de secado.

## ABSTRACT

The drying of Arracacha (*Arracacia Xanthorriza*) was done in a Discontinuous Rotary Dryer at laboratory scale. The samples of Arracacha with thicknesses of 1,5 mm, 2 mm and 5 mm were placed in the equipment in direct contact with a flow of hot air, under different operating conditions. The effect of temperature (55°C, 65°C and 75°C) and air flow (480 and 750 L/min) working at a constant rotation speed of 13,20 rpm was evaluated, weighing the samples in 10 – minute intervals until obtaining a weight constant. The results obtained indicated that, at a thickness of 1,5 mm, temperature of 65°C and air flow of 480 L/min, the drying time was 45,5 min to obtain a humidity of 10%. The data derived from the drying curves were adjusted to the models of Newton, Page, Henderson, Logarithmic, Two terms, Two exponential terms, Wang and Singh, Henderson and modified Pabis, Verma and Midilli.

According to the results, the mathematical model that best described the behavior of the drying curves was the Midilli model with a non linear regression with  $R^2 = 0,9997933$  and Variance = 0,0001154, obtaining a better quality of adjustment in each drying curve, thus representing an excellent model to estimate the drying time of this product, as well as the speed of drying.

## INTRODUCCIÓN

La Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) es considerada una de las plantas domesticadas más antiguas de América en virtud de su gran variabilidad. Las raíces de la arracacha constituyen uno de los alimentos nativos más agradables y alimenticios, destacando su almidón, el cual se caracteriza por tener diminutos gránulos, empleados generalmente como un alimento altamente digerible de niños y ancianos.

La producción de esta está destinada en su mayoría en el mercado interno y por lo general es comercializado sin ningún procesamiento industrial; este hecho, sumado a su perecibilidad y al alto contenido de humedad que posee la arracacha, provoca importantes pérdidas durante el pos cosecha.

El secado, definido como un proceso simultáneo de transferencia de calor y masa entre el producto y el aire de secado, consiste en la remoción de humedad excesiva contenida en el producto por medio de la evaporación de la que se obtiene un producto sólido; es un método clásico de preservación de alimentos y se convierte en una excelente alternativa para prolongar el periodo de vida útil del tubérculo, así como para disminuir el peso para el transporte y reducir el espacio requerido para su almacenamiento.

Desde entonces, varios modelos matemáticos sobre la cinética de secado se han aplicado en diversos productos agrícolas. Existen en la actualidad gran variedad de modelos matemáticos empíricos, semiempíricos y teóricos, para el secado de alimentos, entre los que se encuentran los modelos de: Newton, Page, Midilli, Henderson y Pabis, Henderson y Pabis modificado, Logarítmico, De dos términos, De dos términos exponencial, el de Wang y Singh Thompson y Verme.

La conservación del alimento es muy importante para evitar el desperdicio, entre las técnicas de conservación de alimentos el proceso de secado representa una alternativa tecnológica para la reducción de las

pérdidas pos-cosecha, pues el secado es un método simple y relativamente barato cuyo principio básico es el de reducir el contenido de agua del alimento, ocasionando una reducción drástica de la actividad de agua de los productos alimenticios, aumentando el tiempo de conservación y la vida de anaquel del producto, facilitando su transporte y almacenamiento.

En esta investigación se utilizó un Secador Rotatorio Discontinuo, se obtuvieron curvas de secado y se ajustaron los valores a modelos cinéticos para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Determinación del problema**

La comercialización de la Arracacha en fresco presenta problemas como la alta perecibilidad y la falta de técnicas adecuadas de conservación que resulta una gran preocupación para los productores, aumentando así su costo en el mercado y su escasez.

La conservación de los alimentos es muy importante para evitar el desperdicio de estos, entre las técnicas de la conservación de los alimentos el proceso de secado representa una alternativa tecnológica, pues reducen el contenido de humedad de estos, previniendo el crecimiento de microorganismos y minimizando las demás reacciones que lo deterioran.

También el secado de los alimentos reduce su volumen y peso lo que influye en una reducción importante de los costos de empaque, almacenamiento y transporte. Los productos secos además permiten ser almacenados a temperatura ambiente por largos periodos de tiempo.

Por ende, existe la necesidad de desarrollar un proceso para el secado de la Arracacha (Arracacia Xanthorriza) en un Secador Rotatorio Discontinuo facilitando un secado uniforme del producto en menor tiempo y mejorar sus condiciones de conservación debido a su perecibilidad.

### **1.2. Formulación del problema**

#### **1.2.1. Problema General**

¿Cómo debe ser el proceso de secado de Arracacha para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo?

#### **1.2.2. Problemas específicos**

- 1) ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas de la Arracacha?
- 2) ¿Cuáles son los parámetros óptimos para el proceso de secado de Arracacha en un secador rotatorio discontinuo?

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Desarrollar el proceso de secado de Arracacha para la obtención de parámetros en un secador rotatorio discontinuo.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- 1) Evaluar las propiedades fisicoquímicas de la Arracacha.
- 2) Obtener los parámetros óptimos para el proceso de secado de Arracacha

### **1.4. Justificación**

Las razones que justifican la investigación propuesta son las siguientes :

- a) **Tecnológica.-** Permitirá emplear una tecnología para el mejoramiento en la conservación, producción e impacto ambiental.
- b) **Económico.-** Permitirá un ahorro de energía, tiempo, costos y conservación de las propiedades fisicoquímicas con el proceso de secado de la Arracacha mediante un Secador Rotatorio Discontinuo.
- c) **Social.-** Al realizarse esta alternativa no solo permitirá disminuir los costos sino también beneficiará a los agricultores, ya que existirá una mayor demanda de cultivo de arracacha y una mejor alternativa en su proceso de secado y conservación.
- d) **Práctica.-** Una vez obtenido el producto se podrá emplear directamente en beneficio de la población y al aumentar la productividad de arracacha se puede pensar en formas de comercialización a nivel industrial.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes del estudio**

Idarraga, Alcocer, Salazar y Bernal (2011), realizaron una evaluación de la calidad de la harina de arracacha cultivada en el corregimiento de Anaime (Tolima, Colombia), a partir del método de secado por conducción. Se logró optimizar el proceso de secado de la arracacha mediante el método de secado por conducción, a su vez identificar las variedades del corregimiento de Anaime. Concluyendo que se pueden alcanzar mayores rendimientos con un alto grado de calidad y valor nutritivo.

Carranza, Sánchez (2002), emplearon un horno secador de bandejas por convección forzada para el secado de plátano y yuca con una temperatura de funcionamiento de 30°C a 250°C. Realizaron varias pruebas, con temperaturas de 40°C, 50°C, 60°C, conjugando cada temperatura con diferentes velocidades de aire : 5,08 m/s, 7,62 m/s, 9,65 m/s y variando el espesor del producto a secar : 0,2 cm de espesor con 2,0 cm de ancho y 3,0 cm de largo, 0,4 cm de espesor con 2,0 cm de ancho y 3,0 cm de largo. El plátano y la yuca con temperatura de 50°C y velocidad de aire de 7,62 m/s y materia prima de 0,2 cm de espesor, 2,0 cm de ancho y 3,0 cm de largo, presentando las siguientes características : secado a velocidad constante con un tiempo corto de duración de 0,325 h para el plátano y 0,330 h para la yuca; secado a velocidad decreciente, por un tiempo de 2,67 h para el plátano y la yuca. Ambos productos fueron molidos y transformados en harinas, tras el cual se les realizó un análisis físico – químico, que permitió observar las óptimas condiciones de conservación.

Montes, Torres, Andrade, Perez, Marimon y Meza (2008) se evaluó el secado de ñame en un secador de laboratorio tipo bandeja a temperaturas de 45°C, 55°C y 70°C y velocidad de aire promedio de 1 m/s, las muestras fueron adecuadas en rodajas de radio 3,19 cm y espesor de 0,5 cm y láminas de 0,5 x 3 x 5 cm. Se evaluó el efecto de la

temperatura, variedad y geometría en el tiempo de secado, empleando un diseño completamente al azar en arreglo factorial con tres factores : temperatura, geometría y variedad, realizando tres repeticiones por tratamiento, dando como resultado una disminución en el tiempo de secado del 28,15% para la temperatura de 70°C. Con los resultados obtenidos fueron construidas las curvas de secado ajustadas a los modelos matemáticos de Page, difusión, Thompsom, Newton, Page modificado, Henderson y Pabis y el modelo logarítmico, determinando mediante el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), error medio estimado (SE) y desvío medio relativo (%P)

Salcedo, Mercado, Vanega, Fernandez y Vernel (2014) realizaron el secado de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) variedad CORPOICA M – tai en un secador de bandejas a escala de laboratorio, con espesor de 0,2 cm y diámetro de 0,4 cm fueron colocadas en el equipo en contacto directo con aire caliente, bajo distintas condiciones de operación. Se evaluó el efecto de la temperatura (35°C, 45°C y 55°C) y la velocidad del aire (1,0, 2,0 y 3,0 m/s) sobre el tiempo de secado y la difusividad efectiva. Los resultados obtenidos indicaron que a una temperatura y flujo de aire de 55°C y 3,0 m/s respectivamente, el tiempo de secado fue de 4,5 h, alcanzándose una humedad de 4,87%. Los datos derivados de las curvas de secado fueron ajustados a los modelos de Newton, el de Dos términos exponencial, el de Wang y Singh, el de Henderson y Pabis modificado y el Difusión aproximal. De acuerdo con los resultados el modelo matemático que describió mejor el comportamiento cinético de las curvas de secado fue el modelo Difusión aproximal con una regresión lineal ( $0,958 \leq R^2 \leq 0,993$ )

Vega y Lemus (2006) estudiaron y modelaron el secado de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*) a diferentes temperaturas (40°C, 50°C, 60°C, 70°C y 80° C) con velocidad de aire de  $2,0 \pm 0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Los modelos matemáticos aplicados fueron el modelo de Newton, Henderson-Pabis y Page. Además, se evaluó la calidad de ajuste de

estos modelos por medio del coeficiente de regresión lineal, suma de errores cuadrados, raíz media de los errores cuadrados y Chi – cuadrado. Los parámetros cinéticos de cada modelo presentaron la dependencia usual con la temperatura, y fueron evaluadas con la ecuación de Arrhenius. Al comparar los valores experimentales con los calculados, se demostró que el modelo de Page obtuvo la mejor calidad de ajuste en cada curva de secado, representando una excelente herramienta para estimar el tiempo de secado de este producto.

Torres y Sper (2009), diseñaron una planta deshidratadora de banano usando un secador rotatorio. Lográndose deshidratar obteniendo un producto con una humedad promedio del 8%. Seguidamente el producto paso al sistema de molienda, el cual consiste de un molino de martillo que se diseñó en función de las características del producto, tamaño de partícula y flujo másico requerido. Para el proceso de secado se utilizó gas licuado de petróleo para su mejor combustión.

Sawhney et al. (1999), realizaron experimentos para determinar las constantes de secado de capa delgada de la cebolla y su dependencia con los parámetros del aire de secado, aplicando la ecuación de Henderson y Pabis. Los experimentos se realizaron en un secador de flujo continuo, con un rango de temperatura y velocidad del aire de 50°C a 80°C y a 0,25 a 1 m/s, respectivamente. La influencia de las variables de secado en las constantes del modelo de capa delgada fue explicada por la ecuación de tipo Arrhenius. Los resultados demostraron que el modelo describe con buena exactitud el comportamiento de secado en capa delgada de la cebolla.

## **2.2. Marco teórico**

### **2.2.1. La Arracacha**

**a) Arracacha en el Perú.-** Actualmente en el Perú las familias urbanas consumen en una mayor proporción alimentos importados que provienen de vegetales y animales no oriundos de la región andina. Algunos de estos alimentos foráneos desde hace mucho tiempo han

sido introducidos e incorporados en los sistemas de producción del Perú, otros son importados anualmente de otros centros de producción en el mundo. En el pasado factores de orden histórico y en la actualidad de orden tecnológico, económico y cultural llevan al desaprovechamiento de nuestros recursos y potencial alimenticio.

La arracacha, planta cultivada más antigua de América, es una umbelífera sin clasificación taxonómica oficial con un origen controversial, sin embargo, existen estilizaciones en cerámica nazca que parecerían ser raíces de arracacha, lo que sustentaría su procedencia peruana, por lo que actualmente en muchos países es conocida como "Peruvian Carrot"

Las raíces de la arracacha constituyen uno de los alimentos nativos más agradables y alimenticios, destacando su almidón, el cual se caracteriza por tener diminutos gránulos, empleados generalmente como un alimento altamente digerible de niños y ancianos.

Por ello, son imperantes las investigaciones futuras que posibiliten su desarrollo como un alimento alternativo con amplias y prometedoras perspectivas.

**b) Origen e historia.**- Su área original de dispersión son las cordilleras andinas; desde Venezuela a Bolivia, es posible que su domesticación ocurriera en Colombia (León, 1964). Esta zona particular de los andes comprendió los antiguos límites de la cultura inca, sugiriéndose que hayan sido sus pobladores quienes domesticaron por primera vez esta planta (Hodge, 1949)

Bancroft citado por Bukasov, 1930 indica que esta planta es originaria de Jamaica, sin embargo, Bukasov cree que el área de origen está ubicada en los andes del norte de Sudamérica, porque allí están la mayoría de las especies de este género. El cultivo se ha extendido a las tierras altas de Centroamérica, Antillas, África y Ceilán, y a la región Subtropical de Brasil (León, 1968)

## FIGURA Nº 2.1

### ARRACACHA



**Fuente :** Tesis Características  
nutricionales de la  
arracacha (arracacia  
xanthorrhiza) y sus  
perspectivas en la  
alimentación

La arracacha también ha sido llevada a Europa con éxito de adaptación en algunos casos y en otros un total fracaso. En Colombia las zonas de cultivo estarían entre las áreas dedicadas a la papa y yuca; en Bolivia se observa cultivos de arracacha en Chojlla, Yungas de la Paz, Charazani, Camacho, Lorecaja (Cárdenas, 1989); mientras que en el Perú su cultivo está distribuido en los departamentos de Amazonas, Cajamarca, La Libertad, Ancash, Huánuco, Cerro de Pasco, Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Arequipa, Moquegua, Tacna, Cuzco y Puno (Arbizu y Robles, 1986)

Actualmente, gracias a la introducción de la arracacha en el banco de germoplasma de raíces y tubérculos andinos del Centro Internacional de la Papa, los estudios de esta especie se están incrementando, habiendo ensayos de adaptación en costa (Lima y Lambayeque)

#### c) **Nominaciones y clasificación botánica :**

##### 1) **Nominaciones**

- Quechua : laquchu, rakkacha, huiasampilla
- Aymara : lakachu, lecachu
- Español : arrecate (América Latina), zanahoria blanca (Ecuador), arracacha, racacha, virraca (Perú), arracacha, racacha, apio criollo (Venezuela)
- Inglés : arracacha, racacha, white carrot, peruvian carrot, peruvian parsnip.
- Francés : arracacha, paneme, pomme de terre céleri.

**FIGURA Nº 2.2**

**DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA ARRACACHA**



**Fuente :** Tesis Características nutricionales de la arracacha (arracacia xanthorrhiza) y sus perspectivas en la alimentación

**2) Clasificación botánica**

- División : angiospermas
- Clase : dicotiledóneas
- Sub-clase : archichlamydeae
- Orden : umbelliflorae
- Familia : umbelliferae (apiáceas)

- Sub-familia : apiodae
- Tribu : smirniae
- Género : arracacia
- Especie : esculenta (variedad blanca); xanthorrhiza bancroft (variedad amarilla)

**d) Germoplasma.**- Siendo los andes una de las regiones del mundo con mayor diversidad genética y con el objeto de preservar su variabilidad y mantener el acervo de genes, se han efectuado colecciones en muchos lugares de la zona andina.

En el Perú, Franco (1988), mencionado por Mujica (1990), efectuó una colección en la sierra norte consistente en 110 accesiones que se mantuvieron evaluaron y caracterizaron en el INIAA – Cajamarca (Franco y Rodríguez, 1988). Sin embargo, para el año 1967, el germoplasma más rico de arracacha de Sudamérica consistía de 50 introducciones procedentes de Colombia, Ecuador, Bolivia y Perú (Rea, 1984), el cual se mantenía en Cajamarca y que después de más de 20 años alcanza un porcentaje de preservación del 75%, este material fue distribuido a Venezuela, Colombia y Brasil con resultados no muy satisfactorios.

Para la arracacha en el Perú, Arbizu y Robles (1986), indican que existen dos centros definidos de diversidad genética: la sierra norte y la sierra sur oriental del Perú, en las cuales se puede encontrar amplia variabilidad para rendimiento, calidad, periodo vegetativo, usos así como en características morfológicas y químicas, habiéndose colectado, mantenido y evaluado 88 entradas en la Universidad Nacional de Cajamarca – Perú, las cuales fueron colectadas de regiones Chala, Quechua y Selva Alta.

**e) Descripción de la planta.**- Planta herbácea caulescente ramificada con 0,5 a 1,20 m. De altura, follaje escuamuloso, hojas ampliamente ovaladas de 10 a 15 cm de largo y ancho.

Es una umbelífera perenne, con cierto parecido al apio, especialmente por sus hojas, que tiene una gran raíz comestible ramificada en 8 a 10 partes, cada una de las cuales tiene la forma de una zanahoria corta. El peso total de la raíz y sus ramas llega a veces hasta 4 Kg, el color es blanco o amarillo, rara vez púrpura. La altura de la planta es de 60 a 100 cm., las flores son pequeñas, amarillas o purpúreas. (Bukasov, 1981)

El tallo se compone de una cepa llamada “madre” de forma cilíndrica corta de 3 a 10 cm de largo por 2 a 8 cm de diámetro, y cubierta por numerosos surcos transversales que forman una superficie rugosa. De la cepa parten ramificaciones cortas o brotes una vez separadas de la cepa, emiten raíces en sus extremidades inferiores y forman una planta nueva, en estructura similar a la cepa. Las hojas son pinnadas, largamente pecioladas y tienen de 3 a 7 foliolos a su vez muy recortados (León, 1964)

El cuerpo de la raíz es recto o encorvado, aplanado a menudo en su parte superior por la presión de otras raíces y terminado en un ápice delgado que emite fibras de escasa longitud. Su superficie casi lisa, está cubierta por una delgada película que presenta cicatrices transversales, como las raíces de la zanahoria. Aunque las raíces más jóvenes tienen una epidermis lisa, las raíces viejas desarrollan unas capas corchosas de color pardo, que dan a las raíces cosechadas una ligera apariencia de yucas (Jimenez, F. 2005)

f) **Clasificación.**- Según Higuítia, 1977; las diferentes formas hortícolas se reconocen por el color del follaje y el color externo e interno de la raíz, así tenemos :

- 1) **Amarilla.**- Esta arracacha produce raíces amarillas de muy buen sabor y el follaje es verde
- 2) **Blanca.**- Produce raíces blancas y presenta follaje verde
- 3) **Morada.**- El follaje es de color carmín y las raíces son amarillas

En general, existen unas nueve diferentes formas hortícolas resultantes de la combinación de color de la raíz y del follaje.

**FIGURA N° 2.3**

**HOJAS, TALLO Y RAÍZ DE LA ARRACACHA**



**Fuente :** [www.google.com/](http://www.google.com/) imagen

**g) Valor nutritivo :**

**1) Composición química.-** Son muy pocos los trabajos desarrollados en el campo alimenticio sobre la arracacha, pues la mayoría de ellos han sido dirigidos a evaluar la composición química del fruto.

En la **Tabla N° 2.1 (Ver pag. N° 21)** se muestran los hallazgos obtenidos al respecto; aquí observamos que un bloque interesante lo constituyen los carbohidratos totales, conformados en su mayoría por los azúcares y almidones que el organismo utiliza de un modo completo, así como fisiológicamente menos aprovechables, pentosanas, ácidos orgánicos, entre otros.

En la **Tabla N° 2.2 (Ver pag. N° 22)**, se comprueba una gran diferencia en contenido en vitamina A, entre la arracacha de

raíces blancas con 60 microgramos activos y arracacha de raíces moradas con ningún contenido. El contenido en proteínas es bastante bajo (0,8% – 1,1%)

En la **Tabla N° 2.3 (Ver pag. N° 23)**, se muestra el comparativo químico proximal entre arracacha amarilla, yuca y papa amarilla, en el cual observamos que la arracacha supera el contenido de varios nutrientes tanto de papa como de yuca, sobresaliendo su contenido de calcio y ácido ascórbico en el caso de su comparativo con papa y de hierro y de niacina en el caso de la yuca.

**TABLA N° 2.1**

**COMPOSICIÓN QUÍMICO PROXIMAL DE LA ARRACACHA – PARA 100 g DE PRODUCTOS COMESTIBLES**

<b>Componente</b>	<b>Ecuador</b>	<b>Guatemala</b>	<b>A.Latina</b>	<b>Perú</b>	<b>Perú</b>	<b>Perú</b>
Calorías	112.00	104.00	102.00	97.00	137.00	109.00
Humedad	71.00	73.00	74.40	75.10	65.91	71.90
Proteínas	1.00	0.08	0.08	0.70	2.15	1.20
Ext. Etéreo	0.10	0.02	0.02	0.02	1.27	0.20
Carb. Total	26.90	24.90	24.40	23.00	28.63	25.80
Fibra total	0.60	0.60	1.00	1.10	0.82	0.80
Cenizas	0.90	1.10	1.20	1.00	1.22	0.00
Calcio (mg)	19.00	29.00	26.00	28.00	7.53	37.00
Fósforo	55.00	58.00	52.00	52.00	7.95	43.00
Hierro	0.90	1.20	0.09	1.10	0.25	1.20
Caroteno	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tiamina	0.70	0.60	0.07	0.09	0.00	0.06
Riboflavina	0.02	0.04	0.06	0.08	0.00	0.12
Niacina	3.67	3.40	2.80	2.84	0.00	0.00
Ac. Ascórbico	31.00	28.00	23.00	27.10	0.00	18.00

**Fuente :** Tomado de Rodas, 1992

**TABLA N° 2.2**

**COMPOSICIÓN DE RAÍCES TUBEROSAS DE ARRACACHA BLANCA  
Y ARRACACHA MORADA – PARA 100 g DE PRODUCTO  
COMESTIBLE, BASE HUMEDA**

<b>Composición</b>	<b>Arracacha Blanca (1)</b>	<b>Arracacha Morada (1)</b>	<b>Arracacha Morada (2)</b>
Valor energético (Cal)	104.00	102.00	104.00
Humedad (%)	73.00	73.40	71.90
Proteína (g)	0.80	0.80	1.10
Grasa (g)	0.20	0.20	0.10
Carbohidratos (g)	24.90	24.40	24.90
Fibra (g)	0.60	1.00	0.80
Calcio (mg)	29.00	26.00	0.00
Fósforo (mg)	58.00	52.00	0.00
Hierro (mg)	1.20	0.90	0.00
Tiamina (mg)	0.06	0.07	0.00
Riboflavina (mg)	0.04	0.06	0.00
Niacina (mg)	3.40	2.80	0.00
Ac. Ascórbico (mg)	28.00	23.00	0.00

**Fuente :** (1) Según Leung y Flores, 1961, Fuente (2) Según Higuítia, 1968

**TABLA N° 2.3**

**COMPARATIVO QUÍMICO PROXIMAL ENTRE ARRACACHA AMARILLA, YUCA Y PAPA AMARILLA – PARA 100 g DE PRODUCTO COMESTIBLE**

<b>Componentes</b>	<b>Arracacha</b>	<b>Yuca</b>	<b>Papa</b>
Valor energético (Cal)	97.00	161.00	103.00
Agua (g)	75.10	59.00	73.20
Proteína (g)	0.70	0.60	2.00
Grasa (g)	0.30	0.20	0.40
Carbohidratos (g)	22.90	39.10	23.30
Fibra (g)	1.10	0.90	0.70
Ceniza (g)	1.00	1.10	1.10
Calcio (mg)	27.00	35.00	6.00
Fósforo (mg)	50.00	62.00	52.00
Hierro (mg)	1.10	0.40	0.40
Retinol (mcg)	0.00	15.00	0.00
Tiamina (mg)	0.09	0.03	0.07
Riboflavina (mg)	0.08	0.04	0.06
Niacina (mg)	2.84	0.66	1.85
Ácido ascórbico (mg)	27.10	38.30	9.00

**Fuente** : Tabla de composición de los alimentos peruanos de mayor consumo. MINSA. 1993

**2) Principales nutrientes.-** La investigación nutricional de la arracacha no ha tenido aún un desarrollo adecuado que posibilite su total caracterización; sin embargo, de acuerdo a su composición química proximal destacan su contenido de calcio y fósforo, con un contenido aproximado de 10% – 25% (National Academy of Sciences, 1975)

Nutricionalmente, además destaca el almidón de la arracacha, más que por su contenido por la calidad del mismo. Según León (1964), el almidón de la arracacha se caracteriza por ser muy fino y uniforme acompañado de un aroma propio de las umbelíferas debido a la presencia de un aceite espeso y amarillento característico de la planta.

De las raíces de la planta se extrae un almidón muy fino principalmente de la xilema para fines industriales y preparación de sopas para bebés y enfermos (Mujica, 1990)

De las principales vitaminas presentes en raíces de arracacha, la más importante es la Niacina, cuyos valores varían de 1,0 a 4,5 mg en 100 g de raíces frescas y la Vitamina A, que pueden alcanzar niveles de hasta 6,800 U.I. (2,040 umg de carotenoides en 10 g)

**TABLA Nº 2.4**

**PRINCIPALES VITAMINAS PRESENTES EN LA ARRACACHA**

<b>Vitaminas</b>	<b>100 gr. de material fresco</b>
Vitamina A	1.759
Tiamina	0.08
Riboflavina	0.04
Niacina*	4.5
Piridoxina	0.03

**Fuente :** Santos y Pereyra (1994), Tapia (1990)

### **2.2.2. Proceso de Secado**

El objetivo principal del secado es remover agua del producto hasta un nivel en donde el crecimiento microbiológico y la deterioración del mismo sean minimizadas, aumentar la vida de anaquel y la calidad de los alimentos, reducir los costos de almacenamiento y de transporte y darle un valor agregado al producto (Khattab, 1996 Ekechukwu, 1999)

Se entiende por secado la eliminación parcial del agua y a menudo esta operación sigue a la evaporación, la filtración o cristalización; en los procesos industriales el secado se lleva a cabo por una o más de las siguientes razones :

- 1) Para reducir el costo del transporte
- 2) Para obtener un material más manejable, por ejemplo, jabón en polvo, colorantes, fertilizante.
- 3) Para proporcionar unas determinadas propiedades, por ejemplo, la fluidez de la sal común.
- 4) Para evitar la presencia de la humedad, que podría provocar la corrosión; dado es el caso del secado del secador del gas procedente de la gasificación del carbón, o del benceno antes de la cloración. (J.M. Coulson,2003)

#### **a) Factores involucrados en el secado :**

##### **1) Transferencia de calor :**

- Transferencia de calor desde el medio calefactor a la superficie líquida.
- Transferencia de calor en la película de líquido adherida al sólido.
- Transferencia de calor directa del sólido al líquido.
- Transferencia de calor del sólido al líquido a través de la película superficial y dentro de los intersticios y poros de la masa sólida.
- Transferencia de calor desde el medio calefactor a la zona de sólido seco.

- Conductividad térmica del líquido
- Conductividad térmica del sólido húmedo
- Conductividad térmica de la zona cercana al sólido seco.
- Calor latente del líquido
- Calor de hidratación, cuando se elimina agua combinada al finalizar el proceso de secado.
- Relación entre la temperatura y la licuefacción del material húmedo
- Efectos de electrolisis presentes en líquido sobre las características de secado del material.

## **2) Atmosfera de secado**

- Presión y temperatura de la atmosfera de secado.
- Composición de la atmosfera de secado, incluyendo cambios en la presión parcial del líquido a través del proceso de secado.
- Velocidad relativa de la atmosfera de secado respecto de la superficie a secar.
- Presión de vapor efectivo del líquido, considerando los cambios de la eliminación de la temperatura de ebullición durante el proceso de secado.

## **3) Propiedades físicas generales del sistema sólido y líquido :**

- Tensión superficial entre el sólido y líquido
- Espesor de la película adherido al sólido
- Relación ente el área superficial y el volumen de líquido contenido en los poros.
- Coeficiente de difusión del vapor en los poros
- Sección capilar de líquidos dentro de los poros.
- Gradiente de concentración de líquidos dentro de los poros
- Tamaño de la molécula de líquido

- Contenido máximo de impurezas solubles que pueden tolerarse en el líquido residual presente en el material húmedo.

**4) Propiedades del sólido :**

- Tamaño de partícula
- Área efectiva de sólido
- Porosidad, es decir, tamaño y longitud de los poros y la extensión en que están ramificadas.
- Solubilidad del sólido en el líquido cuando el líquido es parte de la estructura del sólido húmedo.
- Dureza superficial de barros al secar y la relación de este efecto con la velocidad de secado.
- Resistencia del material seco a la fricción
- Máximo contenido del líquido tolerable en el producto seco.

**b) Tipos de secadores.-** Existen diversas categorías en las cuales se puede estudiar los distintos tipos de secadores, en la presente sección se da una clasificación general, como también clasificaciones por ciertos criterios a considerarse.

En general, los secadores pueden clasificarse en nueve categorías. Cada una se ajusta mejor a una aplicación particular.

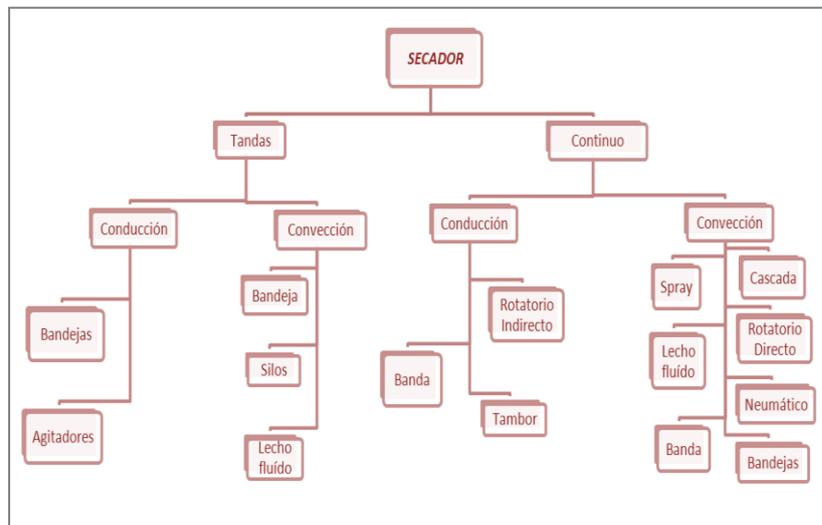
- 1) Transportador.-** El secado se efectúa mientras se traslada el material en una cinta transportadora.
- 2) Tambor.-** El secado se realiza en la superficie exterior de un tambor calentado internamente.
- 3) Flash.-** El secado se efectúa durante el transporte mediante una corriente turbulenta de aire caliente o gas.
- 4) Lecho fluido.-** El secado se lleva a cabo mientras el material está en suspensión en un ambiente fluidizado.
- 5) Rotatorio.-** El secado se realiza mientras el material está en movimiento dentro de un cilindro rotatorio.

- 6) **Spray.**- El secado se efectúa cuando el material en forma de lechada es atomizado en un medio de aire o gas.
- 7) **Bandeja.**- El secado se lleva a cabo mientras el aire o gas a baja velocidad es pasado por encima o a través del material en bandejas.
- 8) **Aspiración.**- El secado se realiza a baja temperatura mientras el material está en una cámara bajo aspiración.
- 9) **Silos secadores.**- Los silos son adaptados para que en su parte inferior tengan orificios por donde sale el aire caliente que proviene del quemador, y en su parte superior un agujero para extracción del aire.
- 10) **Secadoras de flujo continuo.**- Son aquellas en las que el grano se introduce y descarga en forma continua o intermitente, permaneciendo constantemente llenas las secciones de secado y enfriamiento. Las operaciones de secado y enfriamiento se efectúan en forma simultánea e ininterrumpida

Los tipos de secadores dependiendo de su modo de operación se encuentran clasificados (**Ver Figura N° 2.4 pag. N° 29**) y por su escala de producción (**Ver Figura N° 2.5 pag. N° 29**), teniendo en cuenta las siguientes definiciones :

**FIGURA Nº 2.4**

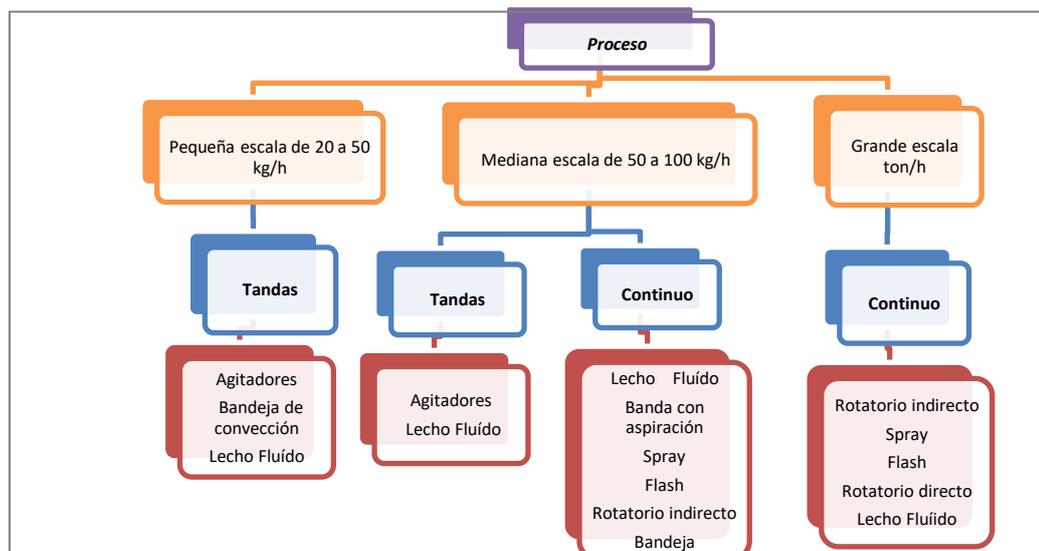
**CLASIFICACIÓN DE SECADORES POR SU MODO DE OPERACIÓN**



**Fuente :** Tesis Diseño de una planta Deshidratadora de Banano usando Secador Rotatorio

**FIGURA Nº 2.5**

**CLASIFICACIÓN DE SECADORES SEGÚN SU ESCALA DE PRODUCCIÓN**



**Fuente :** Tesis Diseño de una planta Deshidratadora de Banano usando Secador Rotatorio

### 2.2.3. Tipos de Secado

El Secado puede ser directo o indirecto :

- a) **Secado Directo.**- Los gases calientes están en flujo paralelo o contraflujo con respecto al sentido de dirección del material. La transferencia de calor para la desecación se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. La transferencia de calor es por convección.
- b) **Secado Indirecto.**- El calor de desecación se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de desecación depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto.

**TABLA Nº 2.5**

#### **CARACTERISTICAS GENERALES DE OPERACIÓN EN SECADORES DIRECTOS E INDIRECTOS**

<b>SECADORES DIRECTOS</b>	<b>SECADORES INDIRECTOS</b>
El contacto directo entre gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor	El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre de índole metálica.
Las temperaturas de secado pueden ser hasta de 1000K que es la temperatura limitante para casi todos los materiales estructurales de uso común.	Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de congelación, en el caso de secadores de este tipo, hasta mayores de 800K para secadores indirectos calentados por medio de productos de combustión.
El equipo de recuperación del polvo puede ser muy grande y costoso cuando se trata de secar partículas muy pequeñas	La recuperación de polvos y materiales finamente pulverizados se maneja de un modo más satisfactorio en los secadores indirectos que en los directos.
La velocidad de secado depende de la temperatura, velocidad de flujo y humedad relativa del aire.	La velocidad de secado depende del contacto que se establezca entre el material mojado y la superficie caliente.

**Fuente :** Elaboración propia

#### 2.2.4. Secadores Rotatorios

Forman un grupo muy importante de secadores; son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre que pueden arrojarse sin temor de romperlos. En la **Figura N° 2.6** se muestra uno de estos secadores, un secador de aire caliente directo a contracorriente. El sólido por secar se introduce continuamente en uno de los extremos de un cilindro giratorio, como se muestra, mientras que el aire caliente fluye por el otro extremo. El cilindro está instalado en un pequeño ángulo con respecto a la horizontal; en consecuencia, el sólido se mueve lentamente a través del aparato. Dentro del secador, unos elevadores que se extienden desde las paredes del cilindro en la longitud total del secador levantan el sólido y lo riegan en una cortina móvil a través del aire; así lo exponen completamente a la acción secadora del gas. Esta acción elevadora también contribuye al movimiento hacia adelante del sólido.

**FIGURA N° 2.6**

#### **SECADOR DE AIRE CALIENTE RAGGLESCOLESXW**



**Fuente :** José Charles

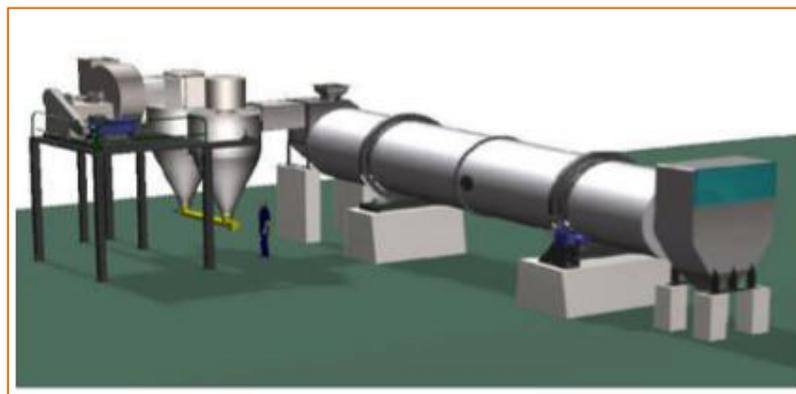
En el extremo de alimentación del sólido, unos cuantos elevadores espirales pequeños ayudan a impartir el movimiento inicial del sólido hacia adelante, antes de que este llegue a los elevadores principales. Es obvio que el sólido no debe ser pegajoso ni chicloso, puesto que podría pegarse a las paredes del secador o tendería a apelotonarse. En estos

casos, la recirculación de una parte del producto seco puede permitir el uso de un secador rotatorio.

El secador puede alimentarse con gas de combustible caliente y no con aire; además, si el gas sale del secador a una temperatura lo suficientemente alta, al ser descargado a través de un montón de aire puede proporcionar una corriente de aire natural adecuada que proporcione el gas suficiente para el secado. Sin embargo, de ordinario, se utiliza un ventilador de extracción para jalar el gas a través del secador, porque así se obtiene un control más completo del flujo de gas. Se puede interponer un recolector de polvo, del tipo de ciclón, filtro o de lavado entre el ventilador y el gas saliente como se muestra en la **Figura Nº 2.7**

**FIGURA Nº 2.7**

**SECADOR ROTATORIO CON SU RESPECTIVO CICLÓN**



**Fuente** : José Charles

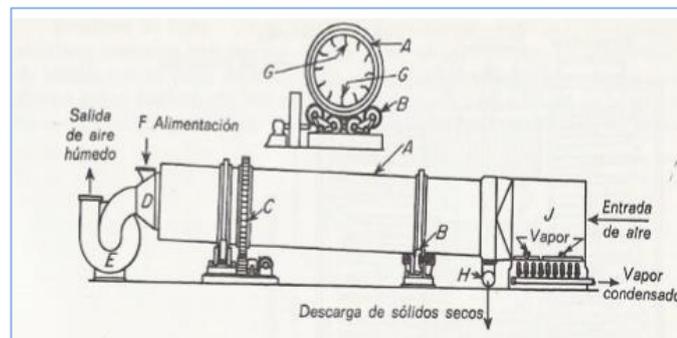
También puede ponerse un ventilador de empuje en la entrada del gas; de esta forma se mantiene una presión cercana a la atmosférica en el secador; éste previene la fuga de aire frío en los extremos de almacenamiento del secador; si la presión está bien balanceada, la fuga hacia el exterior también puede reducirse al mínimo. Los secadores

rotatorios se fabrican para diversas operaciones. La clasificación siguiente incluye los tipos principales.

a) **Secador directo, flujo a contracorriente.**- Para materiales que pueden calentarse a temperaturas elevadas, como minerales, arena, piedra caliza, arcillas, etc., se puede utilizar un gas de combustible como gas de secado. Para sustancias que no pueden calentarse excesivamente, como ciertos productos químicos cristalinos como sulfato de amonio y azúcar de caña, se puede utilizar aire caliente. El arreglo general es el que se muestra en la **Figura N° 2.8**; si se utiliza gas de combustible, las espirales de calentamiento se reemplazan por una caldera que está quemando gas, aceite o carbón.

**FIGURA N° 2.8**

**SECADOR ROTATORIO CALENTADO CON AIRE EN CONTRACORRIENTE**



**Fuente :** Geankoplis J.

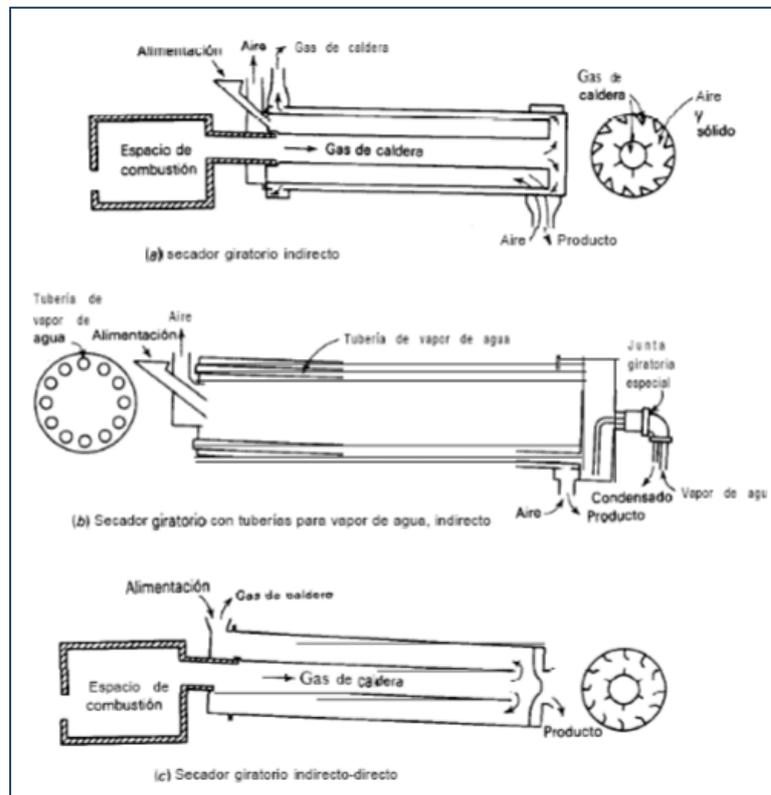
b) **Secador directo, flujo a corriente paralela.**- Los sólidos que pueden secarse con un gas de combustible sin miedo de contaminarlos, pero que no deben calentarse a temperaturas muy elevadas por temor a dañarlos (como yeso, piritas de hierro, y materiales orgánicos como la turba y la alfalfa), deben secarse en un secador con flujo a corriente paralela. Para sólidos como pigmentos blancos y similares, que pueden calentarse a temperaturas elevadas pero que nunca deben

entrar en contacto con el gas, puede utilizarse el secador indirecto que se muestra en forma esquemática en la **Figura N° 2.9 a**

Como una construcción alternativa, el secado puede encerrarse en una estructura de ladrillo y rodearse completamente con los gases calientes de combustible. El flujo de aire en un secador de este tipo debe ser mínimo, puesto que el calor se proporciona por conducción a través de la estructura o tubería central; además, de esta manera pueden manejarse los sólidos muy finamente divididos que tienden a formar polvo.

**FIGURA N° 2.9**

**ALGUNOS SECADORES ROTATORIOS**



**Fuente :** Geankoplis J.

**c) Secador indirecto, flujo a contracorriente.-** Para los sólidos que no se deben calentar a temperaturas elevadas y para los cuales es

deseable el calor indirecto, como el alimento para ganado, granos para cerveza, plumas y similares, se puede utilizar el secador de tubería con vapor que se muestra en la **Figura N° 2.9.b (Ver pag. N° 34)**

El secador puede tener o no elevadores y puede construirse con una, dos o más hileras concéntricas de tubos calentados con vapor. Como los tubos giran con el secador, es necesaria una junta giratoria especial en donde se introduce el vapor y se separa el condensado. Con frecuencia se utiliza este tipo de secador cuando se necesita la recuperación del líquido evaporado.

- d) Directo-indirecto.-** Estos secadores, más económicos de manejar que los secadores directos, pueden utilizarse para sólidos que pueden secarse a altas temperaturas mediante un gas de combustible, en especial cuando los costos de combustible son altos y cuando se deben eliminar elevados porcentajes de humedad del sólido. En la **Figura N° 2.9.c (Ver pag. N° 34)** se muestra un arreglo típico. En un secador de este tipo, el gas caliente puede entrar al tubo central a 650°C a 980°C (1 200°F a 1 800°F), ser enfriado hasta 200°C a 480°C (400°F a 900°F), cuando pase por vez primera por el secador y ser regresado a través del espacio de secado anular para que se enfríe más aún hasta 60°C a 70°C (140°F a 170°F) durante la descarga. La lignita, carbón y coque pueden secarse en atmósfera inerte en este secador a temperaturas relativamente altas sin peligro de que se quemem o de provocar una explosión de polvos.

#### **2.2.5. Generalidades de las curvas de secado**

Un proceso de secado es usualmente descrito por diagramas contruidos con las siguientes coordenadas.

- a)** Contenido de humedad del material contra tiempo de secado (Curva de secado).
- b)** Velocidad de secado contra contenido de humedad del material (Curva de velocidad del secado)

- c) Temperatura del material contra contenido de humedad (Curva de temperatura)

Estas curvas son obtenidas bajo condiciones de laboratorio donde se mide el cambio de masa y temperatura con el tiempo a base de muestreo. El proceso de secado es obtenido con estado estable. Usando aire caliente como el agente de secado. La letra Y es el contenido de humedad absoluta de masa en el aire. Esto quiere decir que el peso de masa de vapor de agua por el peso de masa de aire seco.

#### 2.2.6. Curva de Secado

- a) **Curva de tiempo y contenido de humedad.**- Este tipo de curva nos muestra el contenido de humedad a través del tiempo en el proceso de secado. En el periodo inicial de secado, el cambio de humedad en el material está ilustrado en la curva A–B. Al terminar este primer periodo el secado toma una forma lineal en este periodo la velocidad de secado es constante (recta B – C)

El secado se mantiene igual por un periodo de tiempo hasta que llega a un punto crítico (Punto C) donde la línea recta tiene a curvarse y a formar una asíntota con el contenido de humedad  $X_{eq}$  donde es el valor mínimo de humedad en el proceso de secado esto quiere decir que el punto E jamás es tocado. La recta (B – C) es llamado el periodo de velocidad de secado constante, y al siguiente periodo de secado se conoce como el periodo de caída de velocidad del secado.

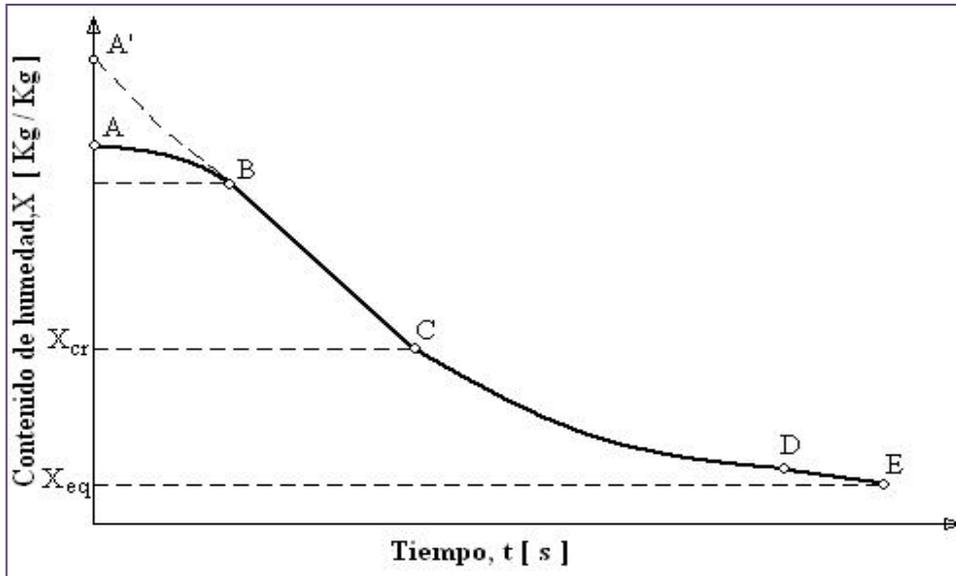
- b) **Curva de Velocidad de secado y contenido de humedad.**- En esta grafica también pueden verse los periodos de velocidad constante y caída en la velocidad de secado. La explicación de la forma de la curva de secado está conectada con el fenómeno de transferencia de masa y calor.

La humedad  $Y_s$  corresponde a las condiciones de saturación en la temperatura de la capa de líquido ( $T_s$ ). La velocidad de evaporación

entre los puntos B y C será constante e igual a  $w_{Dcr}$ . Este valor es igual a la velocidad de evaporación en una superficie libre.

**FIGURA N° 2.10**

**CURVA DE TIEMPO Y CONTENIDO DE HUMEDAD**



**Fuente :** <http://catarina.udlap.mx> – Cap 4 : Proceso de Secado

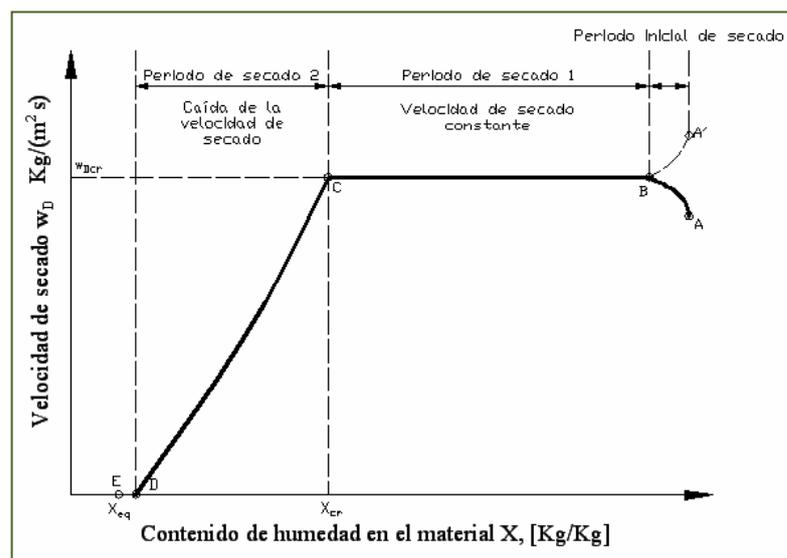
Como es bien sabido en el periodo inicial de secado, el cuerpo a secar y su superficie están cubiertas con una capa de líquido, teniendo una temperatura menor a la temperatura de equilibrio  $T_s$  y como resultado, la velocidad de secado en el rango entre los puntos A y B se incrementa hasta que la temperatura de la superficie alcanza el valor correspondiente a la línea B – C. Es más raro cuando el secador es alimentado con material húmedo a una temperatura  $T > T_s$ . Entonces el periodo inicial de secado está representado por la línea punteada  $A' - B$

Cuando  $X < X_{cr}$  la cantidad de humedad que alcanza la superficie del cuerpo a secar empieza a caer gradualmente. Entonces nosotros nos encontramos el periodo de caída de la

velocidad de secado (Curva C – D) en este periodo la velocidad de secado es controlado por el transporte de la humedad del material (condiciones internas) la cuales dependen del gradiente de la concentración de humedad.

**FIGURA N° 2.11**

**CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO Y CONTENIDO DE HUMEDAD**



**Fuente :** <http://catarina.udlap.mx> – Cap 4 : Proceso de Secado

La velocidad de secado (N) se define como la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo y por unidad de rea de la superficie del sólido expuesta al secado, operando en condiciones constantes :

$$N = - \left( \frac{Ls}{A} \right) x \left( \frac{dX}{d\theta} \right)$$

Dónde :

- Ls : Peso del sólido seco
- A : Superficie del sólido expuesta al secado

$\left(\frac{dX}{d\theta}\right)$  : Variación del contenido de humedad con respecto al tiempo

**c) Tiempo de secado.-** Si se desea determinar el tiempo de secado de un sólido bajo las mismas condiciones para las que se determinó experimentalmente una curva de secado, solo se necesita leer en la curva la diferencia en los tiempos que corresponden a los contenidos inicial y final de humedad. Dentro de ciertos límites, es posible a veces estimar el aspecto de una curva de velocidad de secado para condiciones diferentes de aquellas fijadas o existentes en los experimentos.

En estos casos, para determinar el tiempo de secado se puede partir de la expresión que define la velocidad de secado :

$$N = -\frac{Ls}{A} \cdot \frac{dx}{d\theta} \quad (1)$$

Ordenando la ecuación y separando variables :

$$d\theta = -\frac{Ls}{A} \cdot \frac{dx}{N} \quad (2)$$

Tomando en cuenta que  $Ls$  y  $A$  son constantes e integrando en el lapso en que cambia el contenido de humedad desde su valor inicial  $X_1$  hasta su valor final  $X_2$  :

$$\theta = \int_0^\theta d\theta = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dx}{N} \quad (3)$$

**1) El periodo de rapidez constante.-** Si el secado tiene lugar completamente dentro del periodo de rapidez constante, de forma que  $X_1$  y  $X_2 > X_c$  y  $N = N_c$  la ecuación se vuelve

$$\theta = \frac{Ls}{A} \frac{(X_1 - X_2)}{N_c} \quad (4)$$

2) **El periodo decreciente de la rapidez.** Si tanto  $X_1$  como  $X_2$  son menores que  $X_c$  de forma que el secado ocurre bajo condiciones cambiantes de  $N$ , se puede hacer lo siguiente :

- **Caso general.** Para cualquier forma de la curva decreciente de la rapidez, la ecuación (4) puede integrarse gráficamente mediante la determinación del área bajo una curva de  $1/N$  como ordenada,  $X$  como abscisa, cuyos datos se pueden obtener de la curva de rapidez de secado.
- **Caso especial.-**  $N$  es lineal en  $X$ , como en la región BC de la **Figura N° 2.11**. En este caso

$$N = mX + b \quad (5)$$

En donde  $m$  es la pendiente de la porción lineal de la curva y  $b$  es una constante. Sustituyendo en la ecuación (4) se tiene:

$$\theta = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dx}{mX+b} = \frac{Ls}{mA} \ln \frac{mX_1+b}{mX_2+b} \quad (6)$$

Sin embargo, como  $N_1 = mX_1 + b$ ,  $N_2 = mX_2 + b$  y  $m =$

$\frac{(N_1 - N_2)}{(X_1 - X_2)}$ , la ecuación (4) se vuelve :

$$\theta = \frac{Ls}{A} \frac{(X_1 - X_2)}{(N_1 - N_2)} \ln \frac{N_1}{N_2} = \frac{Ls}{A} \frac{(X_1 - X_2)}{N_m} \quad (7)$$

En donde  $N_m$  es el promedio logarítmico de la rapidez  $N_1$  al contenido de humedad  $X_1$  y  $N_2$  en  $X_2$ . Con frecuencia, la curva decreciente de la rapidez total se puede tomar como una línea

recta entre los puntos C y E (**Ver Figura N° 2.11 pag. N° 38**)

Con frecuencia, esto se supone debido a la falta de datos. En este caso,

$$N = m(X - X^*) = \frac{Nc(X - X^*)}{X_c - X^*} \quad (8)$$

y la ecuación (4) se vuelve :

$$\theta = \frac{Ls(X_c - X^*)}{NcA} \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \quad (9)$$

En cualquier problema particular de secado, pueden intervenir tanto el periodo de rapidez constante como el decreciente según sean los valores relativos de  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_c$ . Deben escogerse las ecuaciones y los límites adecuados.

### **2.2.7. Efecto de las variables del proceso sobre la velocidad de secado**

- a) Aire como agente secante.**- Los productos alimenticios pueden ser secados con aire, vapor sobrecalentado, en vacío, con gas inerte y con la aplicación directa de calor. Generalmente se utiliza aire como medio deshidratador debido a su abundancia, su conveniencia y a que puede ser regulado sobre el calentamiento del alimento (Fellows y col, 1994) El aire caliente causa la transferencia de calor que hace posible la deshidratación del alimento, además, conduce el aire húmedo a la salida del secador y la velocidad de secado aumenta a medida que incrementa la velocidad de aire que fluye sobre el alimento. (Foust, 1990)
- b) Temperatura en el proceso de secado.**- La temperatura de secado está estrechamente relacionada con la humedad relativa del aire, ya que influye en la calidad organoléptica del producto final, por ejemplo, si la temperatura del aire de secado es alta y su humedad relativa es

baja, existe peligro de que la humedad que será eliminada de la superficie de los alimentos se elimine más rápido de lo que el agua puede difundirse del interior húmedo del alimento al exterior y se forme un endurecimiento o costra en la superficie del material. (Raya, G, 2016)

- c) **El agua en los alimentos.**- El agua es un contribuyente importante a las propiedades organolépticas de los alimentos. La pérdida de agua en los alimentos ricos en ella, o ganancia de agua en alimentos en que es escasa, reduce su calidad organoléptica y por tanto, su aceptabilidad. Por lo tanto, retirando agua de los alimentos o haciéndola menor disponible se puede extender la vida útil de los mismos (Raya, G, 2016)
- d) **Contenido de humedad.**- Se refiere a toda el agua en forma global presente en el alimento. Puede expresarse en base seca o húmeda. El contenido de humedad en base húmeda es el contenido de agua en relación con la masa total húmeda del sólido. El contenido de humedad en base seca, es el contenido de agua con relación a la masa totalmente seca del sólido (Raya, G, 2016)
- e) **Actividad acuosa en los alimentos.**- Del agua contenida en un alimento dependen las propiedades reológicas y de textura de este, pero también es responsable en gran medida de las reacciones químicas, enzimáticas y microbiológicas, las cuales son las tres principales causas del deterioro de un producto. Para medir el agua que es capaz de propiciar las reacciones anteriores se acuñó el término de actividad acuosa, el cual representa el grado de interacción del agua con los demás constituyentes (Raya, G, 2016)
- f) **Contenido de humedad del aire seco.**- El contenido de humedad en el aire seco o humedad relativa es un variable importante en el secado de materiales con determinada humedad. Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua revisten gran interés en la etapa de post – cosecha de productos agrícola, por

el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos (Raya, G, 2016)

### **2.2.8. Determinación matemática del modelo cinético de secado**

Los datos derivados de cada condición de trabajo, fueron remplazados en la **Ecuación 2** y se determinó la razón de humedad de la yuca (MR) en función del tiempo de secado.

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \text{Exp} \left( \frac{-D_f \pi^2 t}{4l^2} \right) \quad (7)$$

Dónde :

L : Espesor de la muestra (m)

Con los valores de MR y t, se evaluaron los modelos matemáticos para el secado de alimentos y se estableció cuál de estos presentó mayor ajuste estadístico en el secado de la Arracacha. Los modelos propuestos fueron : modelo de Newton, Page, Mildilli, Logaritmico, Wang y Sing, Difusión aproximada, y el de Henderson y Pabis Modificado (Tabla 2.6).

Donde MR es la razón de humedad, t es el tiempo de secado en horas, K, K<sub>0</sub>, K<sub>1</sub> son las constantes de secado (h - 1), a, b, c, n los coeficientes de ajuste.

Para la selección del modelo cinético se empleó como parámetro el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), el error porcentual absoluto medio (MAE), y cuadrado medio del error (RMSE)

### **2.3. Glosario**

**a) Contenido de humedad en base húmeda.-** El contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje en peso de humedad; a menos que se indique otra cosa, es decir, (Treybal, Pag. 723 – 730)

**TABLA N° 2.6**

**MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DEL SECADO**

<b>Autor</b>	<b>Ecuación</b>
Newton	MR = Exp (-kt)
Page	MR = Exp (-kt <sup>n</sup> )
Wang – Sing	MR = 1 + at + bt <sup>2</sup>
Mildilli	MR = a. Exp (-kt <sup>n</sup> ) + bt
Logarítmico	MR = a. (Exp (-kt)) + c
Verma	MR = a. (Exp (-kt)) + (1 - a) (Exp(-gt))
De dos términos	MR = Exp (-kt) + b Exp (-g*t)
De dos términos exponencial	MR = a. (Exp(-kt)) + (1 - a) (Exp (-kat))
Henderson – Pabis	MR = a. Exp (-kt)
Henderson – Pabis modificado	MR = a. Exp (-kt) + b. Exp (-kt) + c. Exp (-kt)

**Fuente** : Elaboración propia

$$\frac{Kg\ humedad}{Kg\ solido\ humedo} * 100 = \frac{Kg\ humedad}{Kg\ solido\ seco + Kg\ humedad} * 100 = \frac{100 X}{1 + X}$$

**b) Contenido de humedad en base seca.** Se expresa como:

$$\frac{Kg\ humedad}{Kg\ solido\ seco} = X$$

Porcentaje de humedad, base seca = 100X

**c) Humedad en el equilibrio X\*.**- Es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del vapor.

**d) Humedad ligada.**- Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

- e) **Humedad no ligada.**- Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.
- f) **Humedad libre.**- La humedad libre es la humedad contenida por una sustancia exceso de la humedad en el equilibrio :

$$X - X^*$$

Solo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas.

- g) **Actividad del agua (Aw).**- Es la humedad relativa de equilibrio dividido entre 100 como se muestra :

$$A_w = \frac{H_R}{100}$$

- h) **Gas saturado.**- Es el gas en el que el vapor esta en equilibrio con el líquido a la temperatura del gas. La presión parcial del vapor en un gas saturado es igual a la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas.
- i) **Punto de rocío.**- Temperatura a la que una mezcla dada de vapor de agua y aire se satura.

### III. VARIABLES E HIPOTESIS

#### 3.1. Variables de la investigación

##### 3.1.1. Variable Dependiente

Y : Proceso de secado de Arracacha en un secador rotatorio discontinuo.

##### 3.1.2. Variables Independientes

X<sub>1</sub> : Propiedades fisicoquímicas de Arracacha

X<sub>2</sub> : Parámetros óptimos para el proceso de secado

#### 3.2. Operacionalización de variables

TABLA N° 3.1

#### OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y = Proceso de secado de arracacha en un secador rotatorio discontinuo	Humedad final del producto secado	%	Experimental
VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODO
X <sub>1</sub> = Propiedades fisicoquímicas de la arracacha	– Composición – Humedad inicial	% %	Bibliográfico Experimental
X <sub>2</sub> = Parámetros óptimos para el proceso de secado	– Temperatura – Espesor – Flujo de aire – Tiempo	°C mm L/min min	Experimental Experimental Experimental Experimental

Fuente : Elaboración propia

#### 3.3. Hipótesis

##### 3.3.1. Hipótesis general

El proceso de secado de arracacha en un secador rotatorio discontinuo depende de parámetros óptimos.

##### 3.3.2. Hipótesis Específicas

- 1) Las propiedades fisicoquímicas de la arracacha son apropiadas para ser secadas en un secador rotatorio discontinuo.

- 2) El proceso de secado de arracacha depende de factores como temperatura, espesor de partícula, flujo de aire y tiempo.
- 3) El secador rotatorio discontinuo optimiza el tiempo de secado de la arracacha.

## **IV. METODOLOGIA**

### **4.1. Tipo de investigación**

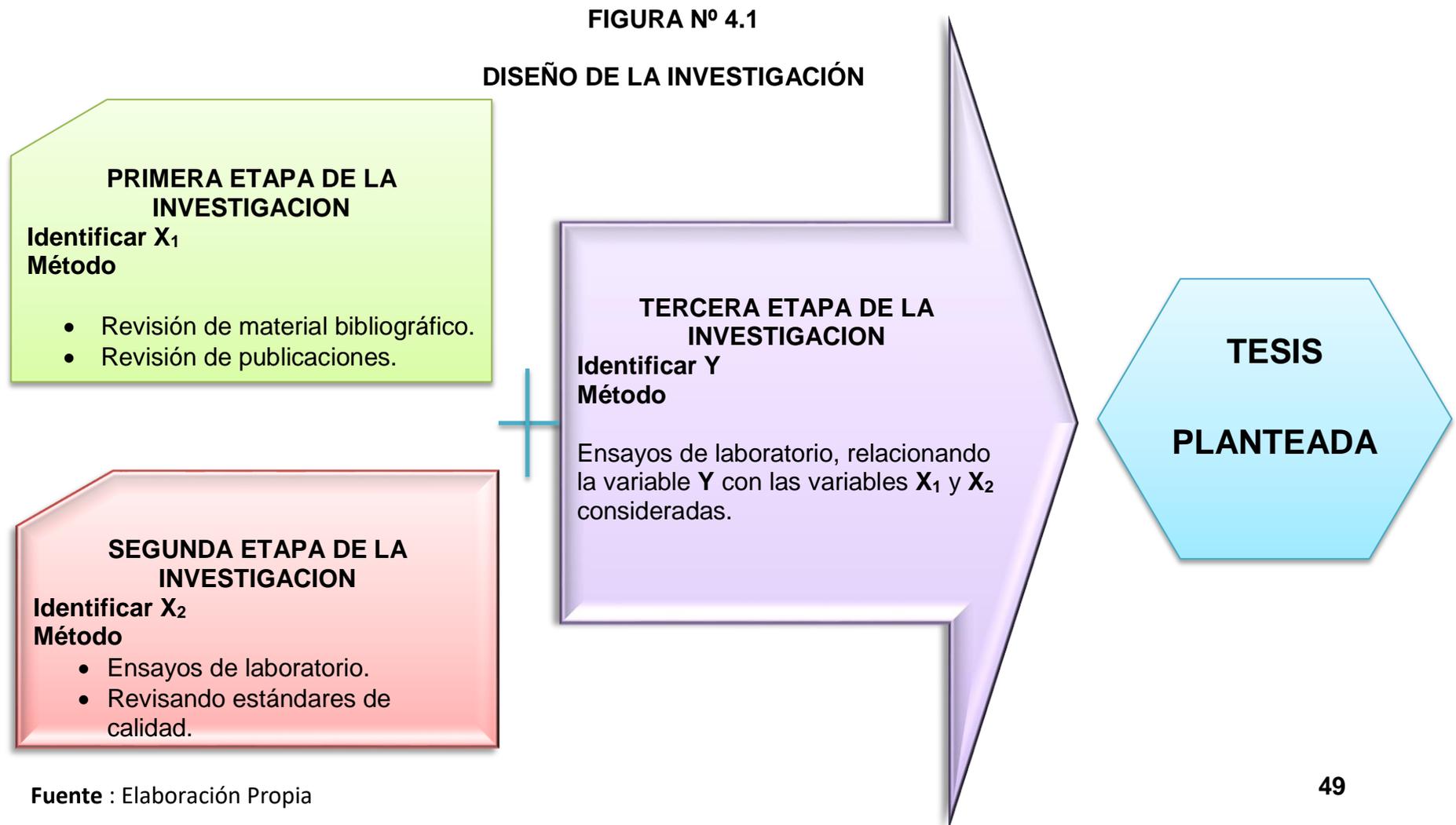
Para el cumplimiento de los objetivos planteados, se llevó a cabo una investigación cuantitativa – experimental, la cual evaluó el comportamiento dinámico del sistema para diferentes valores de condiciones de operación, Las pruebas se realizaron a nivel de laboratorio, donde se manipularon las variables independientes para obtener el efecto deseado.

Los tipos de investigación que se realizaron en el presente trabajo de tesis son :

- a)** Por su finalidad la investigación es de tipo aplicada, porque los resultados obtenidos lo podemos llevar a la práctica.
- b)** Por su diseño interpretativo es experimental, porque requiere de observación, registro y análisis de las variables que intervienen.
- c)** Por el énfasis de la naturaleza de los datos manejados es del tipo cuali – cuantitativa porque las variables de la investigación son cualitativas y cuantitativas.
- d)** Por el ámbito de desarrollo es de laboratorio, ya que la investigación se realizó a nivel laboratorio.

## 4.2. Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación se ha considerado en 3 etapas, los cuales se muestran en la **Figura N° 4.1**



### **4.3. Etapas de la Investigación**

Se ha considerado que la investigación propuesta tendrá tres etapas :

- a) Primera etapa de la investigación.-** En la primera etapa de la investigación se realizó una revisión de la teoría, junto a los diferentes tipos de tecnologías vinculadas a la variable de investigación. Que en este será la variable X1, con el propósito de identificar algunos argumentos científicos, antecedentes de estudio y bases científicas.
- b) Segunda etapa de la investigación.-** En la segunda etapa de la investigación, se realizaron los ensayos en el laboratorio usando el secador rotatorio discontinuo para el análisis de secado de la arracacha, para ello se midió el %humedad y % solidos secos al inicio y el peso de la muestra en intervalos de tiempo hasta que se obtuvo un peso constante.
- c) Tercera etapa de la investigación.-** En la tercera etapa de la investigación con la información y datos recabados se procedió a un exhaustivo análisis de los diversos valores tanto cuantitativos como cualitativos obtenidos en las etapas anteriores. En esta etapa se identifica a la variable Y

### **4.4. Población y muestra**

#### **4.4.1. Población**

La población está representada por el tubérculo de Arracacha que se cultiva a unos 1 200 a 2 500 m.s.n.m principalmente en la provincia de Cajamarca.

#### **4.4.2. Muestra**

Se tomaron 2 000 g de la arracacha representada en rodajas para las diferentes evaluaciones de secado.

### **4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

#### **4.5.1. Materiales**

#### **a) Equipos :**

- 1) Secador rotatorio discontinuo

- 2) Balanza marca OHAUS, de triple brazo, de 2 610 g de capacidad y sensibilidad de 0,1 g

**FIGURA N° 4.2**

**EQUIPO SECADOR ROTATORIO**



**Fuente** : Elaboración propia

- 3) Balanza analítica, de sensibilidad de 1 g

**FIGURA N° 4.3**

**BALANZA ANALÍTICA**



**Fuente** : Elaboración propia

- 4) Balanza de humedad  
5) DATA Q  
6) Monitor y PC

**b) Instrumentos :**

- 1) Cuchillos y otros implementos para pelar y cortar la arracacha.
- 2) Utensilios
- 3) Colador
- 4) Cronometro
- 5) Luna reloj
- 6) Calibrador vernier

**FIGURA N° 4.4**

**UTENSILIOS**



**Fuente :** Elaboración propia

**c) Insumos :**

- 1) Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) (Ver Figura N° 4.5 pag. N° 53)

**4.5.2. Método**

- a) **Pre tratamiento.**- La materia prima se obtuvo de los cultivos de Cajamarca las cuales fueron transportados en camiones hacia los mercados locales de Lima del distrito de la Victoria – Aviación, donde fueron seleccionados lotes homogéneos de acuerdo a su estado de madurez, tamaño y color.
- b) **Limpieza.**- Se eliminó todo material extraño que pueda afectar el proceso de secado de la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*)

## FIGURA N° 4.5

### INSUMO – ARRACACHA



Fuente : Elaboración propia

- c) **Selección y tamaño.**- Después del pre tratamiento se llevó a cabo el cortado de la Arracacha, para tener una medida estándar y así facilitar las mediciones de la humedad. Los cortes fueron de 1,5 cm, 3 cm y 5 cm de espesor aproximadamente. Luego la masa se registró con una balanza analítica de precisión 0,01 g a intervalos de tiempo definidos y se procedió a calcular la humedad en base seca.
- d) **Equipo de secado y proceso.**- En esta sección se detallaron algunos de los materiales empleados en la construcción del secador rotatorio :
- 1) Se diseñó un tubo de vidrio para la rotación del secador, el cual fue adaptado con una brida para su ajuste **(Ver Figura N° 4.6 pag. N° 54)**
  - 2) Este tubo se ensamblo a un soporte de acero, junto a tuberías para la entrada y salida del aire caliente al igual que las cañerías (como se muestra en la imagen) **(Ver Figura N° 4.7 pag. N° 54)**

**FIGURA Nº 4.6**

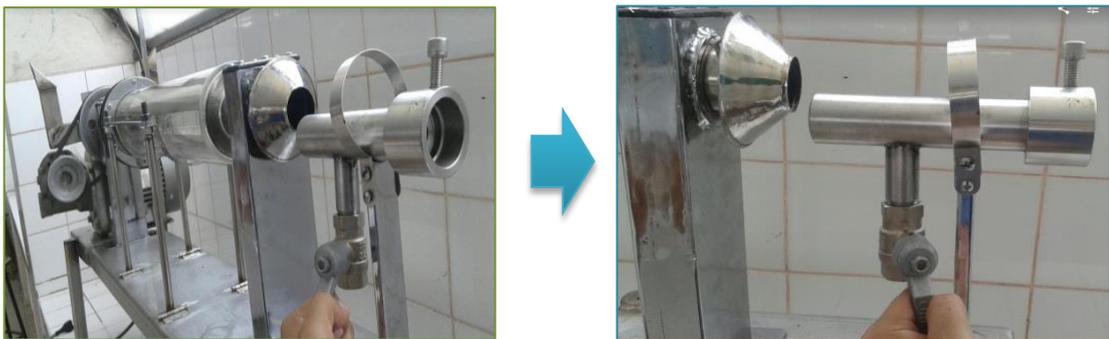
**ADAPTACIÓN DEL TUBO ROTATORIO**



**Fuente :** Elaboración propia

**FIGURA Nº 4.7**

**ENSAMBLAJE DEL EQUIPO**



**Fuente :** Elaboración propia

- 3) De igual forma se ensamblaron los motores, el controlador de velocidad y una compresora para la regularización del flujo del aire.

**FIGURA N° 4.8**

**EQUIPO SECADOR ROTATORIO**



**Fuente :** Elaboración propia

- 4) Para el control de las temperaturas se usaron sensores de temperaturas – termocuplas, adaptándolo al sistema del equipo del secador rotatorio discontinuo con el programa DATA Q. Este programa se instaló a la PC del laboratorio de investigación **(Ver Figura N° 4.9 pag. N° 56)**
- 5) Una vez instalado el sistema del secador rotatorio discontinuo se procedió con las corridas de las muestras Arracacha a diferentes espesores, temperaturas y flujo; en intervalos de 10 minutos de operación y se pesó la muestra en cada intervalo hasta llegar a un peso constante **(Ver Figura N° 4.10 pag. N° 56)**
- e) **Obtención de resultados.-** Con los datos obtenidos se realizaron graficas de las curvas de secado, donde se visualizaron las condiciones óptimas del secado, dependiendo de las variables utilizadas en el equipo. Estas variables son el espesor de la muestra –

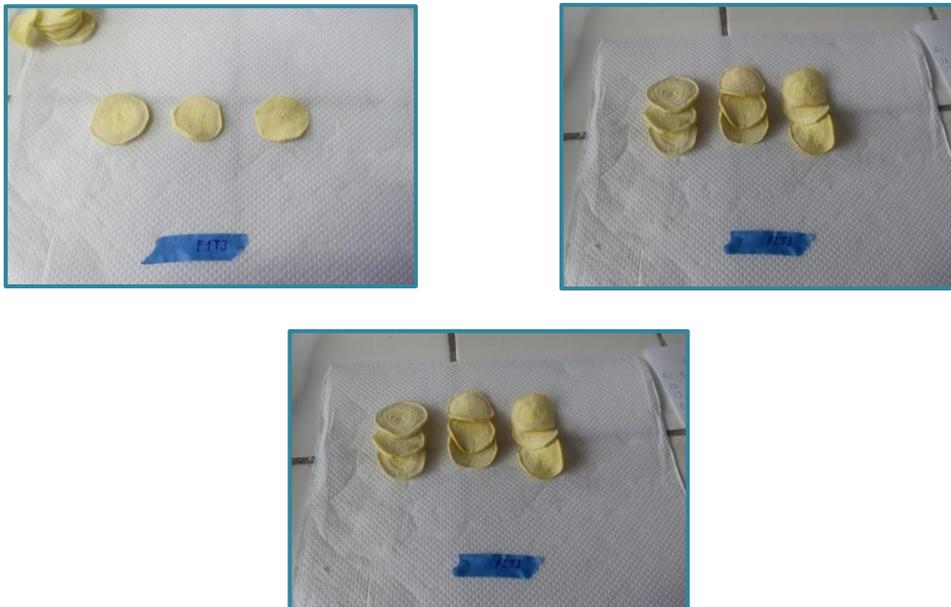
Arracacha, flujo del aire, el tiempo de secado y las condiciones de temperatura.

**FIGURA N° 4.9**  
**CONEXIÓN DATAQ CON EL EQUIPO**



**Fuente :** Elaboración propia

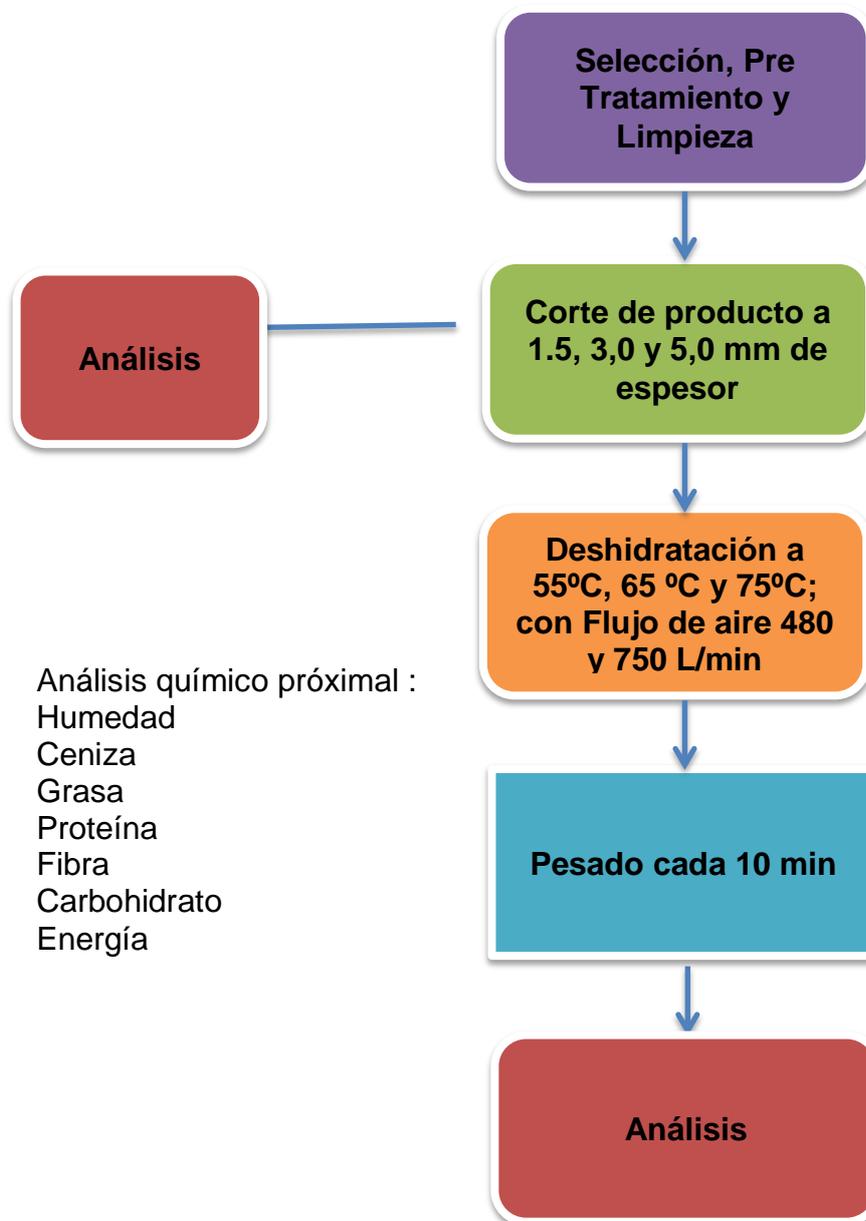
**FIGURA N° 4.10**  
**CORRIDAS DEL SECADO DE LA ARRACACHA**



**Fuente :** Elaboración propia

FIGURA Nº 4.11

DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL PROCESO DE SECADO DE LA ARRACACHA (*Arracacia xanthorrhiza*) EN UN SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO



Fuente : Elaboración propia

## V. RESULTADOS

La humedad inicial de la muestra fresca se determinó haciendo uso de la balanza de humedad del laboratorio de alimentos de la Facultad de Ingeniería Química, donde se determinó el peso inicial y bajo las condiciones de una temperatura de 123°C y un tiempo de 15 min. se obtuvo el valor de la humedad inicial igual a 66,78% b.h.

Con el objetivo de comparar y validar el secado rotatorio discontinuo respecto a la metodología tradicional, se procedió a realizar pruebas de secado de la Arracacha (*Arracacia xanthorriza*) con 1,5 mm, 3 mm y 5 mm de espesor, considerando tres temperaturas de trabajo de 55°C, 65°C y 75°C, dos flujos de aire de 480 y 750 L/min, bajo una velocidad de rotación constante 13,20 rpm

Para poder realizar las corridas experimentales, se procedió a evaluar las consideraciones de las variables mediante un análisis de diseño factorial con múltiples niveles, obteniendo como resultado el número de experimentos igual a 18

Los experimentos de secado se llevaron a cabo por triplicado haciendo uso del secador rotatorio discontinuo que se encuentra implementado en el Laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

### 5.1. Especificaciones del Secador Rotatorio

En el Laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao se tiene implementado un secador rotatorio discontinuo con las siguientes especificaciones :

Longitud L : 47 cm

Diámetro D : 3,7 cm

Potencia motor o drum : 0,75 HP

Potencia motor del ventilador 1 (inyector de aire) = 1800W

### 5.2. Curvas de Secado

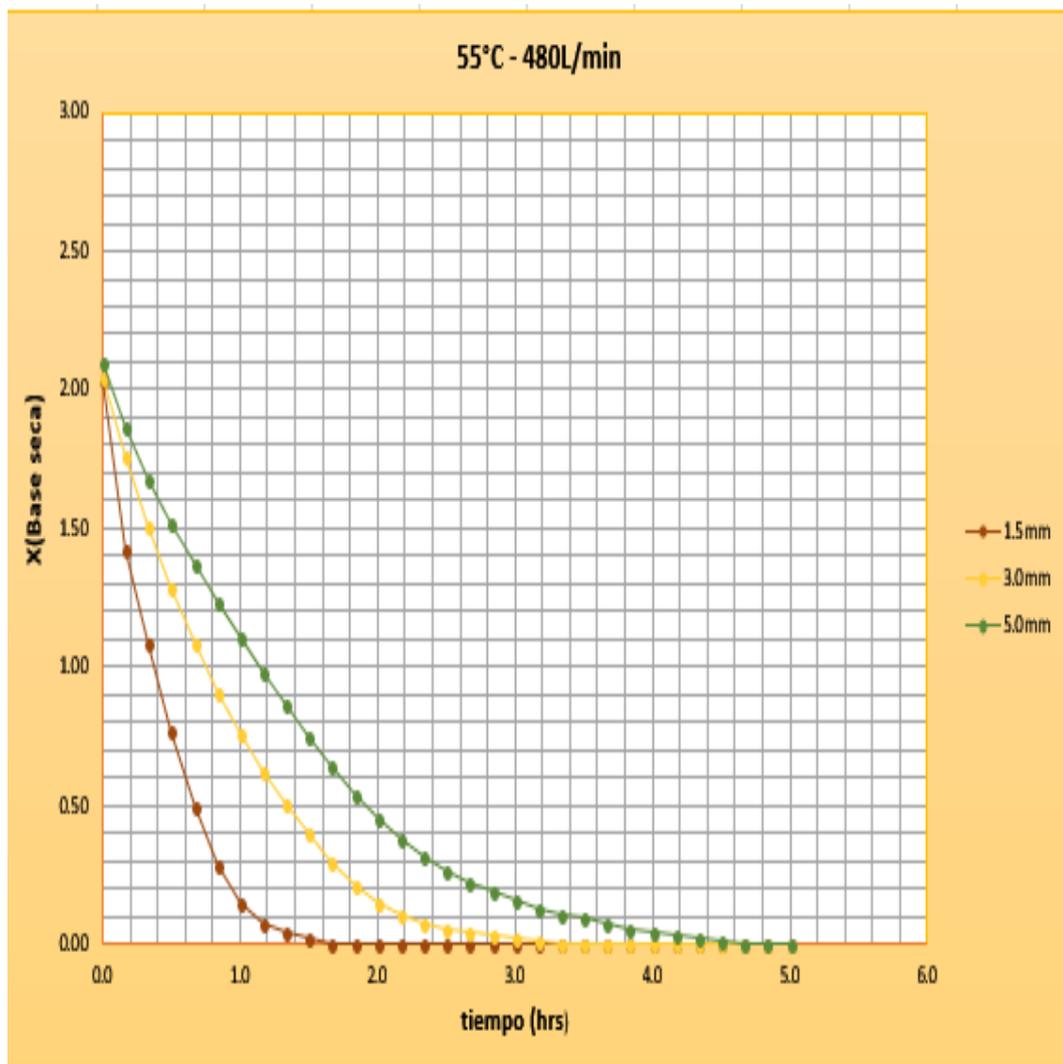
Los resultados que se muestran a continuación, describen el comportamiento experimental de la pérdida de masa de la Arracacha

**(*Arracacia xanthorriza*)** con la extracción de agua líquida por medio de la inyección de aire caliente en función de las variables controladas.

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas con los diferentes parámetros empleados.

**FIGURA N° 5.1**

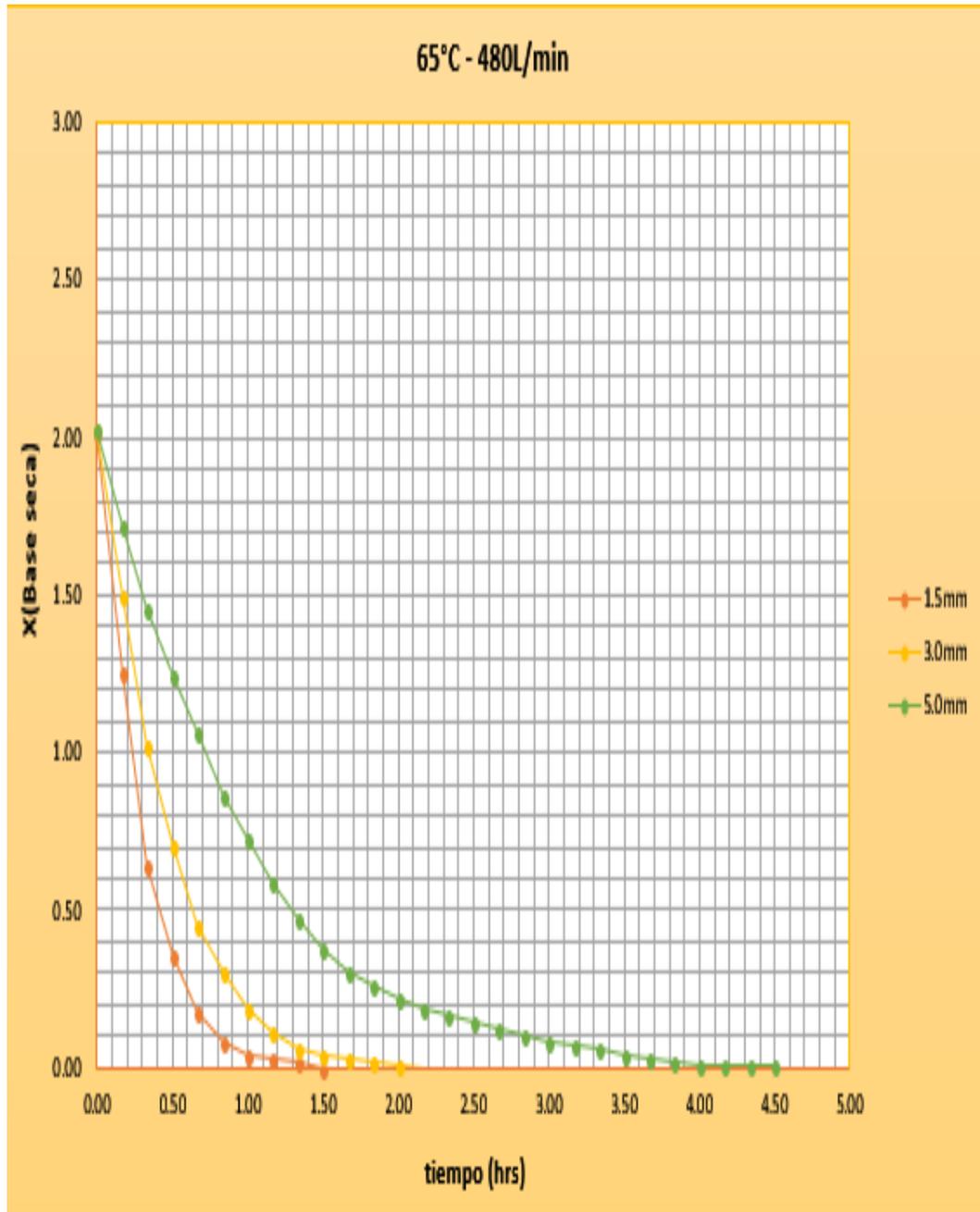
**CURVA DE SECADO DE LA HUMEDAD EN BASE SECA DE LA ARRACACHA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA LOS PARAMETROS DE 55°C, 480 L/MIN Y ESPESORES DE 1,5; 3,0 Y 5,0 mm (TABLA DE DATOS EN ANEXO N° 4)**



**Fuente :** Elaboración propia

FIGURA N° 5.2

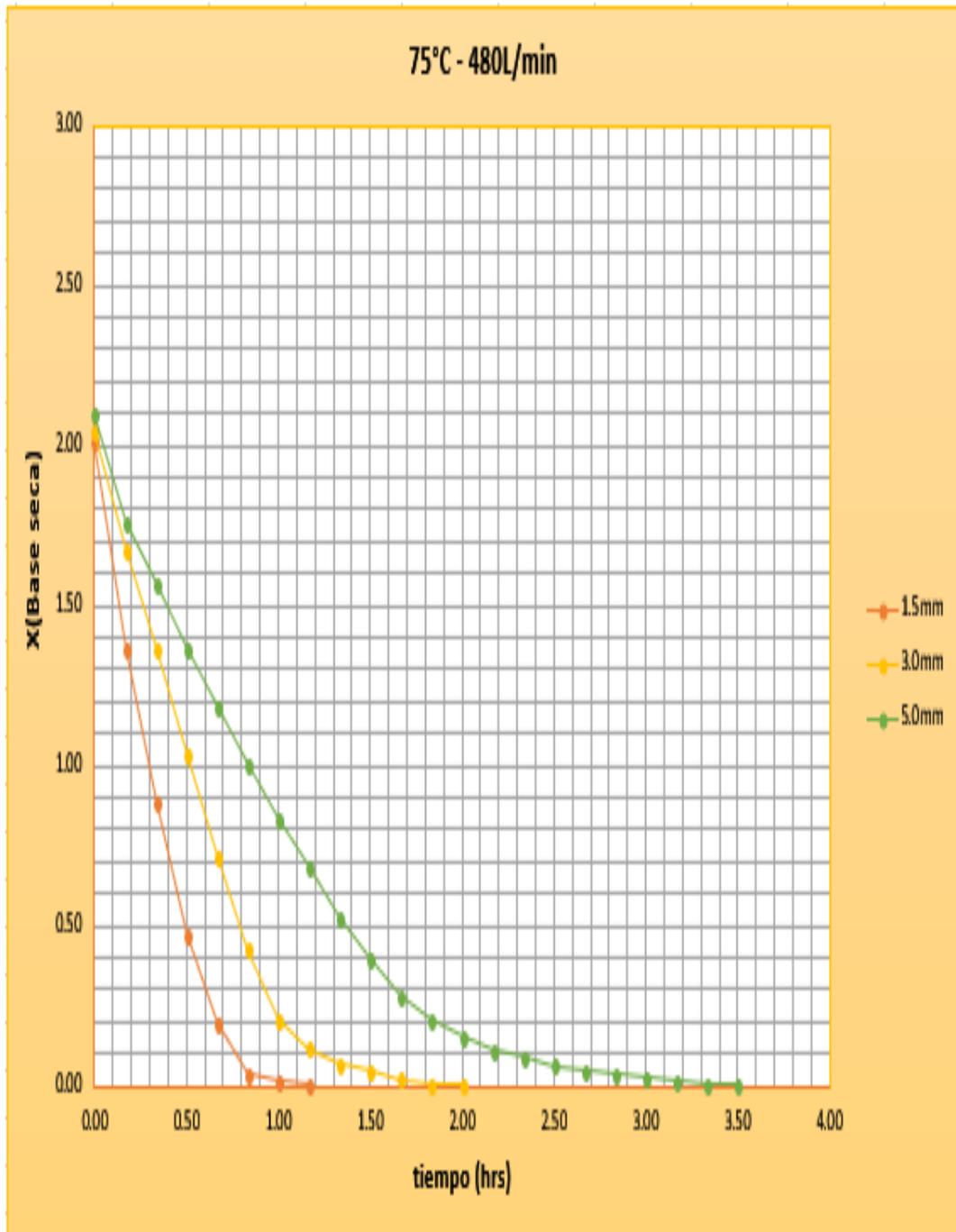
CURVA DE SECADO DE LA HUMEDAD EN BASE SECA DE LA  
ARRACACHA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA LOS PARAMETROS  
DE 65°C, 480 L/MIN Y ESPESORES DE 1,5; 3,0 Y 5,0 mm  
(TABLA DE DATOS EN ANEXO N° 4)



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 5.3

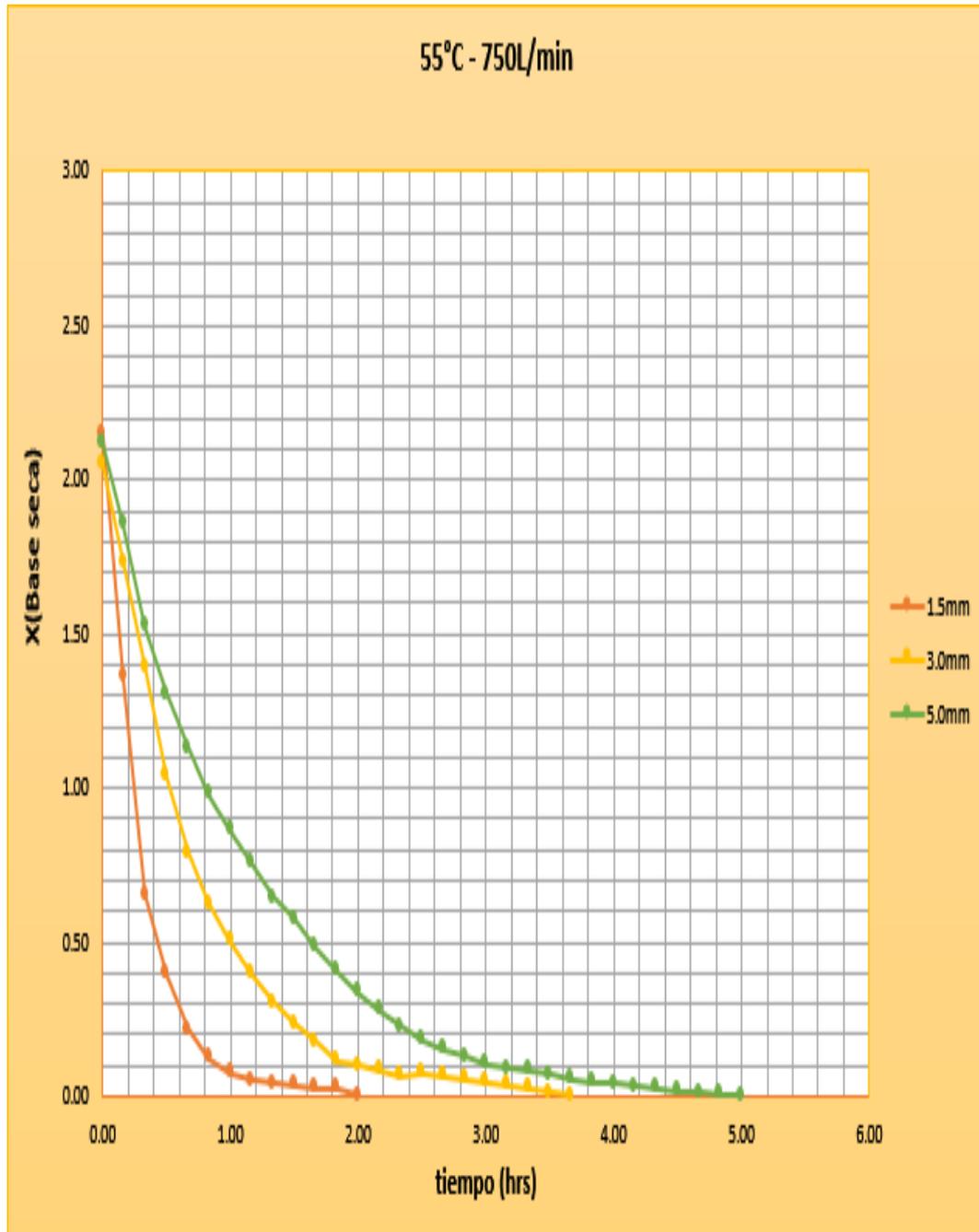
**CURVA DE SECADO DE LA HUMEDAD EN BASE SECA DE LA  
ARRACACHA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA LOS PARAMETROS  
DE 75°C, 480 L/MIN Y ESESORES DE 1,5; 3,0 Y 5,0 mm  
(TABLA DE DATOS EN ANEXO N° 4)**



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 5.4

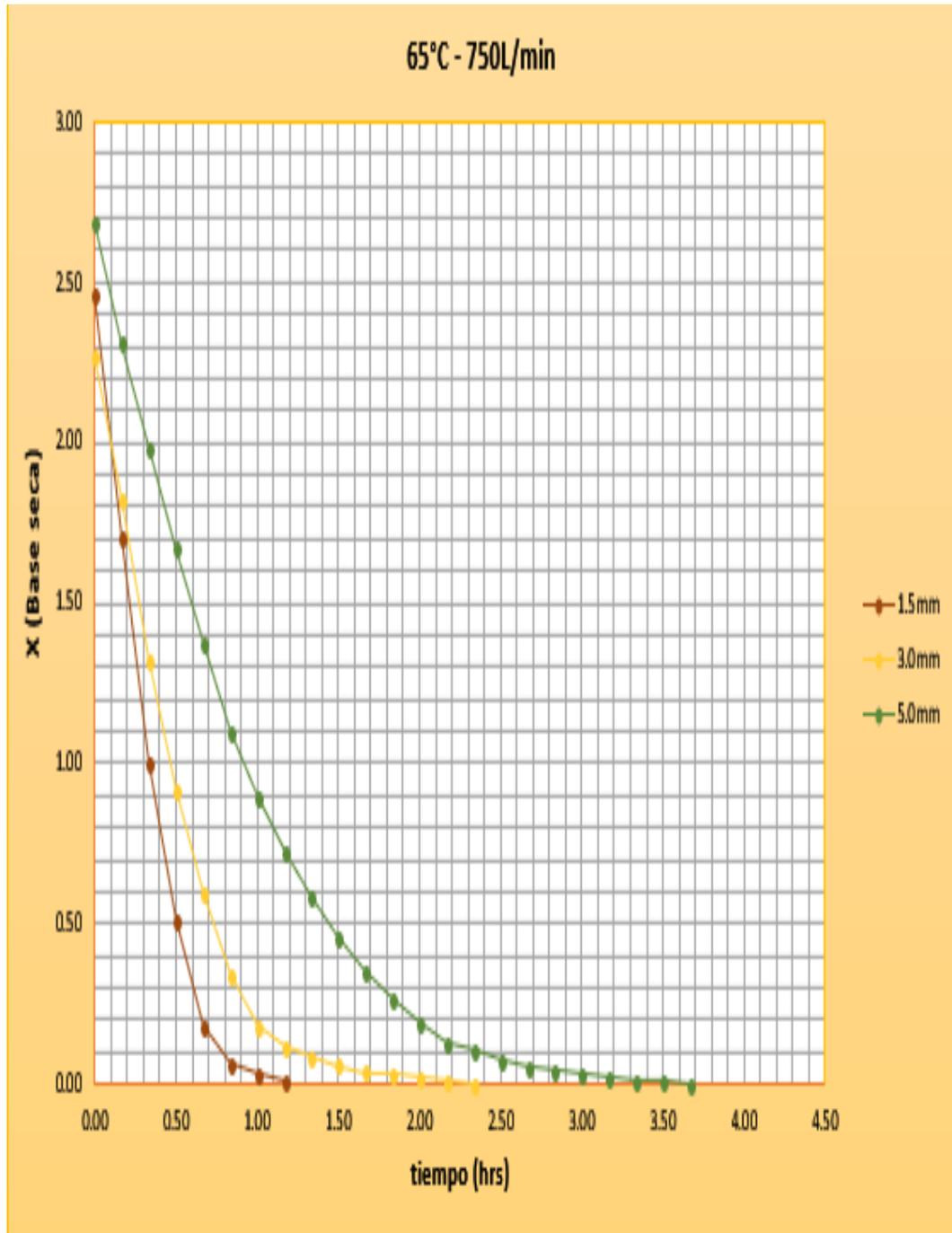
CURVA DE SECADO DE LA HUMEDAD EN BASE SECA DE LA  
ARRACACHA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA LOS PARAMETROS  
DE 55°C, 750 L/MIN Y ESPESORES DE 1,5; 3,0 Y 5,0 mm  
(TABLA DE DATOS EN ANEXO N° 4)



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 5.5

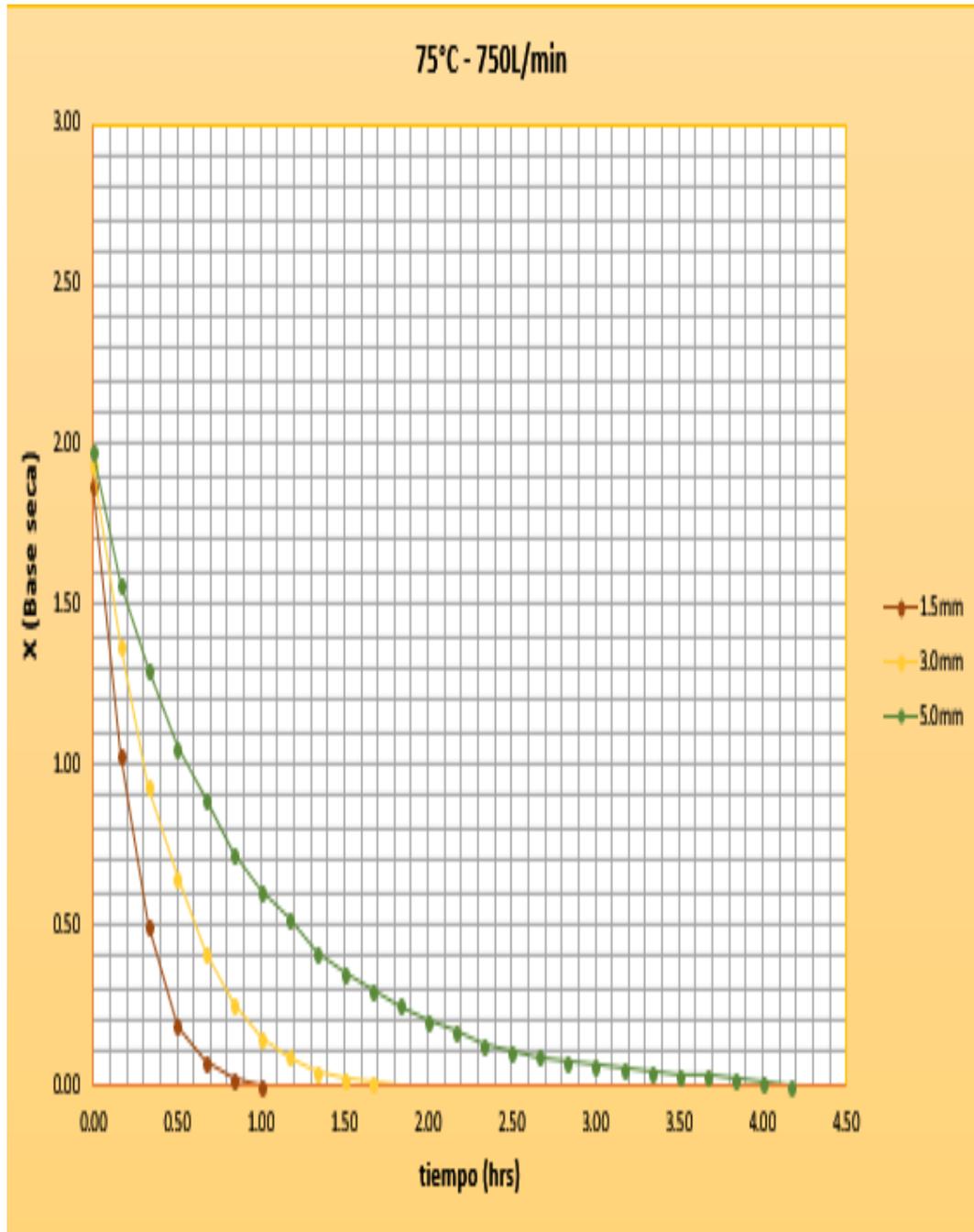
**CURVA DE SECADO DE LA HUMEDAD EN BASE SECA DE LA  
ARRACACHA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA LOS PARAMETROS  
DE 65°C, 750 L/MIN Y ESPESORES DE 1,5; 3,0 Y 5,0 mm  
(TABLA DE DATOS EN ANEXO N° 4)**



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 5.6

**CURVA DE SECADO DE LA HUMEDAD EN BASE SECA DE LA  
ARRACACHA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA LOS PARAMETROS  
DE 75°C, 750 L/MIN Y ESESORES DE 1,5; 3,0 Y 5,0 mm  
(TABLA DE DATOS EN ANEXO N° 4)**



Fuente : Elaboración propia

### 5.3. Ajuste de curvas a modelos matemáticos

Para determinar la ecuación de la curva de secado, se han realizado regresiones no lineales considerando 10 de los modelos más empleados para el proceso de secado en la industria alimentaria.

**TABLA Nº 5.1**  
**MODELOS MATEMÁTICOS EMPLEADOS**

MODELOS MATEMATICOS		
1	NEWTON	$X = \text{EXP}(-Kt)$
2	PAGE	$X = \text{EXP}(-Kt^n)$
3	HENDERSON	$X = a \cdot \text{EXP}(-Kt)$
4	LOGARITMICA	$X = a \cdot \text{EXP}(-Kt) + c$
5	DOS TERMINOS	$X = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t) + b \cdot \text{EXP}(-g \cdot t)$
6	DOS TERMINOS EXPONENCIAL	$X = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t) + (1-a) \cdot \text{EXP}(-K \cdot a \cdot t)$
7	WANG AND SINGH	$X = 1 + at - bt^2$
8	HENDERSON Y PABIS MODIFICADO	$X = a \cdot \text{EXP}(-Kt) + b \cdot \text{EXP}(-gt) + c \cdot \text{EXP}(-ht)$
9	VERMA	$X = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t) + (1-a) \cdot \text{EXP}(-g \cdot t)$
10	MIDILLI	$X = a \cdot \text{EXP}(-Kt^n) + b \cdot t$

**Fuente :** Elaboración propia

Con ayuda del programa Polymath se realizaron las iteraciones para poder ajustar las curvas a un modelo que presente menor error posible, obteniendo los valores de las constantes en cada modelo.

Para realizar la selección del modelo, interpretamos el análisis estadístico con el Software Minitab 17. Mediante el uso de la herramienta ANOVA, donde se realizó el análisis del índice de correlación  $R^2$  y de la varianza presentada en los modelos al ajustar la curva con cada experimento.

Según el análisis gráfico realizado, podemos indicar que el método con un índice de correlación  $R^2$  más cercano a 1 y un valor de la varianza cercano a 0, es el Modelo de Midilli, por ello nos basaremos en este modelo para determinar las curvas de secado estimadas para cada experimento.

Ecuación del modelo de Midilli

$$X = a * e^{-kt^n} + b * t$$

**TABLA N° 5.2**

**CONSTANTES OBTENIDAS PARA EL MODELO DE MIDILLI**

N° experimento	PARAMETROS			a	K	n	b	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR						
1	F1	T1	E1	2.013	2.172	1.123	-0.042	0.997	0.002
2	F1	T1	E2	2.023	0.987	1.174	-0.017	0.999	0.001
3	F1	T1	E3	2.043	0.630	1.198	-0.009	0.999	0.001
4	F1	T2	E1	2.024	4.114	1.190	0.008	0.999	0.000
5	F1	T2	E2	2.022	2.395	1.159	-0.002	1.000	0.000
6	F1	T2	E3	2.023	1.044	1.074	0.001	0.999	0.000
7	F1	T3	E1	2.011	3.549	1.300	-0.044	0.998	0.001
8	F1	T3	E2	2.008	1.999	1.516	-0.008	0.997	0.002
9	F1	T3	E3	2.030	0.929	1.281	-0.010	0.997	0.001
10	F2	T1	E1	2.158	3.957	1.169	0.016	0.998	0.001
11	F2	T1	E2	2.069	1.446	1.119	0.007	0.999	0.000
12	F2	T1	E3	2.123	0.910	0.977	-0.007	0.999	0.000
13	F2	T2	E1	2.455	4.265	1.409	-0.013	1.000	0.001
14	F2	T2	E2	2.264	2.376	1.360	0.006	1.000	0.000
15	F2	T2	E3	2.670	1.087	1.195	-0.007	1.000	0.000
16	F2	T3	E1	1.869	5.272	1.237	-0.011	1.000	0.000
17	F2	T3	E2	1.939	2.387	1.091	-0.016	1.000	0.000
18	F2	T3	E3	1.979	1.177	0.924	-0.005	1.000	0.000

Fuente : Elaboración propia

**5.4. Condición óptima de secado**

Para obtener la condición óptima del secado, interpretamos el análisis estadístico mediante el Software Minitab 17

Mediante el uso de la herramienta DOE, se realizó el análisis de diseño factorial completo general con 3 factores de múltiples niveles.

Con los análisis estadísticos realizados podemos decir lo siguiente :

- a) Variable Espesor; los espesores de 1,5 y 3 mm me generan menor tiempo, pero existe menor tiempo diferenciado con el espesor de 1,5 mm
- b) Variable Temperatura; existen menores tiempos con la temperatura de 65°C y 75°C, pero no hay diferencia significativa entre ambas temperaturas respecto al espesor, por lo que se elige la temperatura de 65°C, porque ahorra en el costo energético y ayuda a conservar mejor las propiedades del producto en comparación a la temperatura de 75°C
- c) Variable Flujo; no hay una diferencia significativa entre ambos flujos por lo que se considera al Flujo = 480 L/min, porque este genera menor costo energético.

### 5.5. Tiempo de secado a las condiciones optimas

Se realizó el ajuste de la curva de la velocidad de secado obtenida con la relación de las variables de velocidad de secado y la humedad en base seca.

Ecuación de la curva de velocidad de secado

$$N = -0,0259X^2 + 0127X - 0,0007$$

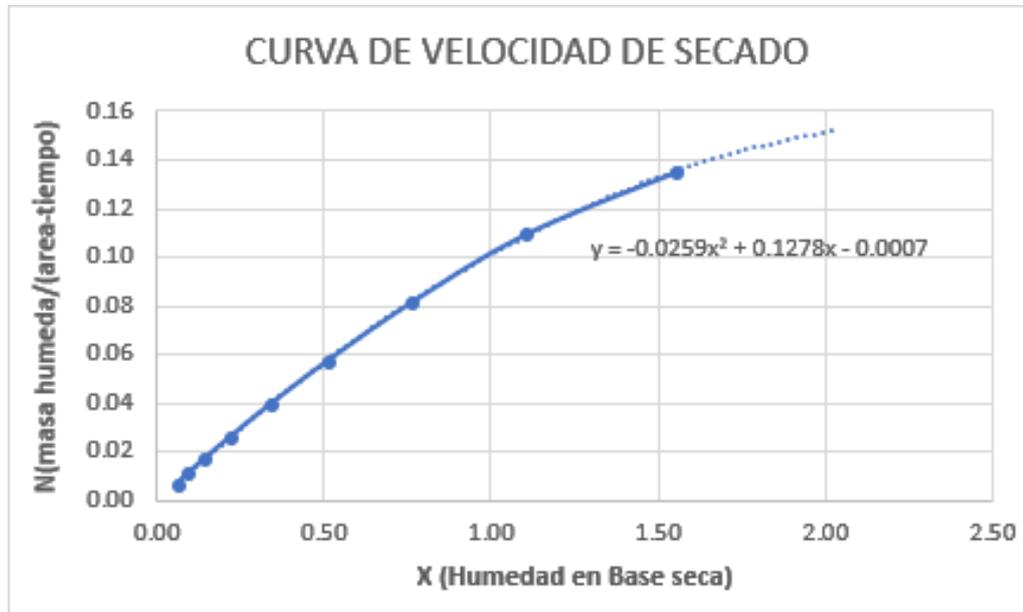
Tiempo de secado calculado

$$t = \frac{Ls}{A} \int_{0.111}^{2.024} \frac{dX}{-0.0259X^2 + 01278X - 0.0007} = 0.758h$$

$$t = 45.5min$$

FIGURA N° 5.7

**CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO DE LA ARRACACHA EN  
FUNCION DE LA HUMEDAD EN BASE SECA PARA LOS  
PARAMETROS OPTIMOS DE 65°C, 480L/MIN Y ESPESOR DE 3.0mm**



Fuente : Elaboración propia

## **VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **5.6. Contrastación de hipótesis con los resultados**

#### **6.1.1 Hipótesis general**

El proceso de secado de la Arracacha (*Arracacia Xanthorriza*) presenta resultados óptimos en un secador rotatorio discontinuo disminuyéndose el tiempo de secado a 45,5 min con una temperatura de 65°C, espesor de 1,5 mm, flujo de 480 L/min y una velocidad de rotación de 13,20 rpm para obtener una humedad de 10% bh.

Por lo que la hipótesis general del presente estudio es aceptada.

#### **6.1.2 Hipótesis específicas**

- 1) Las propiedades físico químicas de la Arracacha (*Arracacia Xanthorriza*) son apropiadas para ser secadas en un equipo secador rotatorio discontinuo ya que no se ha observado variaciones significativas con las condiciones empleadas. Por lo que la hipótesis específica N° 1 del presente estudio es aceptada.
- 2) Se comprobó que tanto la temperatura, espesor de partícula, flujo de aire y tiempo son factores que influyen en el proceso de secado de Arracacha. Por lo que la hipótesis específica N° 2 del presente estudio es aceptada.
- 3) El secado de las muestras de Arracacha (*Arracacia Xanthorriza*) en un secador rotatorio discontinuo permite disminuir el tiempo de secado respecto a otros equipos de secado hasta 45,5 min para obtener una humedad de 10% que es comercialmente aceptable en la industria alimentaria. Por lo que la hipótesis específica N°3 del presente estudio es aceptada.

### **5.7. Contrastación de resultados con otros estudios similares**

En 2011, Idarraga, Alcocer, Salazar y Bernal, realizaron una evaluación de la calidad de la harina de arracacha a partir del método de secado por conducción. Optimizándose el proceso de secado, alcanzándose así mayores rendimientos con un alto grado de calidad y

valor nutritivo; la misma que se obtuvo en el proceso de secado de la Arracacha con un alto rendimiento de su valor nutritivo.

Así mismo se encontraron estudios e investigaciones similares con otros tipos de materias primas y otro Sistema de secado, donde se detallan en la **Tabla N° 6.1**

**TABLA N° 6.1**  
**CONDICIONES DE OPERACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS DE ESTUDIOS SIMILARES**

Referencia	Materia	Sistema de Secado	Espesor (cm)	Humedad Final	Tiempo	Flujo máximo de aire (Kg/s)	Temperatura (°C)
Carranza, Sánchez (2002)	Plátano, yuca	Secador de bandeja por convección	0,2	6,80 % 6,84 %	2,64 h		50
Montes, Torres, Andrade, Perez, Marimon y Meza (2008)	ñame	Secador de laboratorio tipo bandeja	0,5 cm	28,15%	0,38 h		70
Salcedo, Mercado, Vanega, Fernandez y Vernel (2014)	Yuca	Secador de bandeja a escala de laboratorio	0,2 cm	4,87%	4,5 h		55
Vega y Lemus (2006)	Papaya Chilena	secador convectivo de bandejas		5%	5 h		80
Torres y Sper	Pulpa de	Secador rotatorio		8%	45 min	3,61	60

(2009)	plátano	de malla					
Vega y Martinez (2015)	Cacao	secador de flujo continuo	0,5	12%	10 h	0,5	50

**Fuente** : Elaboración propia

## VII. CONCLUSIONES

- 1) Se desarrolló el proceso de secado de la Arracacha (*Arracacia Xanthorriza*) en un Secador Rotatorio Discontinuo, permitiéndose realizar pruebas de secado a diferentes temperaturas llevando un control automático en la Temperatura de secado. Esto facilitó el manejo y registro de los datos en el Data Q instalado en el Laboratorio de Investigación de la Universidad Nacional del Callao, obteniendo así un proceso más flexible y con menor error.
- 2) El proceso de secado de la Arracacha presenta dependencia con la temperatura el cual tuvo una gran influencia en el tiempo de secado, evidenciándose menores tiempos con cada incremento de esta; de la misma manera, la geometría de las muestras permitió obtener menor tiempo de secado.
- 3) Los modelos cinéticos de Henderson, Logarítmica, Dos Términos, Henderson y Pabis modificado se ajustan bien a los datos de secado bajo las condiciones estudiadas; no obstante, el modelo de Midilli es el que mejor describe el proceso, una vez que presenta el valor más alto en promedio del índice de correlación ( $R^2=0.999$ ) y el menor valor de varianza en promedio ( $MSE = 0,0001$ ) para todas las temperaturas ( $55^{\circ}\text{C}$ ,  $65^{\circ}\text{C}$  y  $75^{\circ}\text{C}$ ), espesores (1,5; 3 y 5 mm) y flujos (480, 750 L/min) empleadas en este estudio.
- 4) Se determinó la condición óptima de secado con un Espesor = 1,5 mm, Temperatura =  $65^{\circ}\text{C}$  y un Flujo = 480 L/min para obtener un tiempo de secado = 45,5 min. Determinando así que el Secador Rotatorio Discontinuo es uno de los más adecuados para el secado de la Arracacha (*Arracacia Xanthorriza*), pues se logró reducir la humedad del tubérculo, tiempo de secado y trabajar bajo diferentes condiciones.

## **VIII. RECOMENDACIONES**

- 1)** Verificar el buen funcionamiento de cada una de las partes del equipo de secado, así como dar buen uso a las partes sensibles del equipo, sea el regulador de velocidad, termocuplas, cañerías, Data Q, etc., para iniciar con las experiencias.
- 2)** Desarrollar estudios de secado para otras variedades de Arracacha para poder aprovechar sus propiedades en la alimentación humana, en especial de los niños y ancianos.
- 3)** Realizar un estudio termo-económico para evaluar las posibilidades de ahorro de energía.

## **IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1) AGUILAR, P. 1991, Plagas de plantas tuberosas tropicales. Oficina Regional de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Santiago
- 2) ARBIZU, C. y ROBLES, E La Colección de los cultivos de raíces y tubérculos andinos de la universidad de Huamanga. En anales del V congreso Internacional de Sistemas Agropecuarios Andinos. Puno – Perú, 1986
- 3) BUKASOV, S. 1981, Las plantas cultivadas en México, Guatemala y Colombia. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Costa Rica
- 4) CARRANZA J. (2011) Cinética de secado del plátano (*Musa paradisiaca*) y de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) Trabajo de Fin de Carrera, Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP) Iquitos, Perú
- 5) CORPOICA, 2013, Concepción de un modelo de agroindustria rural para la elaboración de harina de almidón a partir de raíces y tubérculos promisorios, con énfasis en los casos de achira (*Canna edulis*), arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) y ñame (*Dioscorea* sp.) Informe técnico final. Corpoica; Pronata. Mosquera, Colombia
- 6) COULSON, J.M. – RICHARDSON, J.F. “Ingeniería Química – Operaciones Básicas” Tomo II; Editorial REVERTE, S.A., BARCELONA 1981 (Pag 915)
- 7) FENNEMA, O. Química de los alimentos 2<sup>da</sup> Edición. Editorial Acribia, Madrid, España, 2000
- 8) FELLOWS (1994) Tecnología del Procesamiento de Alimentos : Principios y Prácticas. Acribia, Zaragoza
- 9) FOUST A. 1990, Principios de Operaciones Unitaria Ed. Cecsá México 468 – 484
- 10) FRANCO, S. & RODRÍGUEZ, J. 1988, Evaluación del germoplasma de arracacha en el valle de Cajamarca. VI Congreso internacional sobre cultivos andinos. Quito

- 11) GEANKOPLIS C.J 1998, Proceso de Transporte y Operaciones Unitaria. Editiva CECSA 578 – 601
- 12) G. NOHEBEL, A.A.H. MOS. El Secado de sólidos en la Industria Química. Editorial Reverte S.A BARCELONA 1979
- 13) HIGUITIA, M. 1968, El cultivo de la arracacha en la Sabana de Bogotá. Instituto colombiano agropecuario. Bogotá
- 14) HIGUITIA, M. 1977, La horticultura en Colombia. Instituto colombiano agropecuario. Bogotá
- 15) IBARZ, A. y BARBOSA, G “Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos” Ediciones Mundi – Prensa. 1ª Edición. España, 2005 855pp
- 16) IDARRAGA, ALCO CER, SALAZAR Y BERNAL (2011) Calidad de la harina de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) a partir del método de secado por conducción
- 17) JIMENEZ, F. 2005, Características nutricionales de la arracacha (*arracacia xanthorrhiza*) y sus perspectivas en la alimentación
- 18) KITONOJA, L. & A. KADER. 1996, Manual de prácticas de manejo poscosecha de los productos hortofrutícolas a pequeña escala. Serie de Horticultura Poscosecha N 85
- 19) LEON, J. 1964, Plantas alimenticias andinas. Instituto interamericano de ciencias agrícolas zona andina. Lima
- 20) MARÍ, M.J. Cinética de transferencia de materia durante el proceso de rehidratación de cubos de pimiento seco (*Capsicum Annuum* L.). Trabajo Fin de Carrera. Valencia, España : Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos, 2002
- 21) MONTES J, TORRES R, ANDRADE R, PEREZ O, MARIMON J e MEZA I. Modelo de la Cinética de Secado de Ñame (*Dioscorea Rotundata*) en capa delgada. Revista Ingeniería e Investigación Vol. 28 N°2. agosto de 2008 (45 – 52)
- 22) MUJICA, A. 1990. La arracacha en el Perú. Programa de investigación de cultivos andinos

- 23)** PERRY, ROBERT H. Manual del Ingeniero Químico. Quinta Edición. Editorial. Mc GRAW – Hill. México 1973
- 24)** REA, J. 1984. Arracacia xanthorrhiza en los países andinos de Sudamérica. IV Congreso internacional de cultivos andinos. Nariño
- 25)** RAYA, G. “Propuesta de una formulación de sopa deshidratada a partir de las mermas generadas en el procesamiento de esparrago en conserva – gandules inc SAC. Tesis de pregrado. Lambayeque. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo 2016
- 26)** RODAS, R. 1992. Obtención y caracterización de la harina de arracacha amarilla obtenida por secado en túnel de aire caliente. Tesis Universidad Nacional Agraria. Lima
- 27)** SALCEDO, MERCADO, VANEGA, FERNANDEZ Y VERNEL (2014) Cinética de secado de la yuca (*Manihot esulenta Crantz*) variedad Copoica M – tai en función de la temperatura y de la velocidad de aire
- 28)** SPER, J., y TORRES, I. Diseño de una planta Deshidratadora de Banano usando Secador Rotatorio. Tesis de pregrado. Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2009
- 29)** TORRES Y SPER (2009) Planta deshidratadora de banano usando un secador rotatorio
- 30)** TREYBAL ROBERT. Operaciones de Transferencia de Masa. 2 Edición Editorial Mc GRAW – HILL. (Paginas 723 – 730)
- 31)** VEGA A., LEMUS R., Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena (*Vasconcellea Pubescens*). Influencia Tecnológica – Vol.17 N° 3 – 2016, (23 – 31)
- 32)** VEGA, R., y MARTINEZ, W. Diseño e Implementación de un sistema rotatorio de flujo constante para el secado de cacao utilizando transferencia de calor por convección y control predictivo basado en modelo. Tesis de pregrado. Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana 2015
- 33)** <http://www.google.com/> imagen arracacha

# **ANEXOS**

**ANEXO N°01**  
**TITULO: PROCESO DE SECADO DE ARRACACHA (*Arracacia xanthorrhiza*) PARA LA OBTENCION DE**  
**PARAMETROS OPTIMOS EN UN SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO**

<b>PROBLEMA GENERAL</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPOTESIS GENERAL</b>	<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>METODO</b>
¿Cómo debe ser el proceso de secado de arracacha para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo?	Realizar el proceso de secado de arracacha para la obtención de parámetros en un secador rotatorio discontinuo.	El proceso de secado de arracacha depende de parámetros óptimos.	<b>Y</b> = Proceso de secado de arracacha en un secador rotatorio discontinuo.	Humedad final del producto secado	%	Experimental
<b>PROBLEMAS ESPECIFICOS</b>	<b>OBJETIVOS ESPECIFICO</b>	<b>HIPOTESIS ESPECIFICAS</b>	<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>METODO</b>
¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas de la arracacha?	Evaluar las propiedades fisicoquímicas de la arracacha.	Las propiedades fisicoquímicas de la arracacha son apropiadas para ser secadas un secador rotatorio discontinuo.	<b>X1</b> = Propiedades fisicoquímicas de la arracacha.	– Composición – Humedad inicial	% %	Bibliográfico Experimental
¿Cuáles son los parámetros óptimos para el proceso de secado de arracacha en un secador rotatorio discontinuo?	Obtener los parámetros óptimos para el proceso de secado de arracacha.	El proceso de secado de arracacha depende de factores como temperatura, espesor de partícula, flujo de aire y tiempo.  El secador rotatorio discontinuo optimiza el tiempo de secado de la arracacha.	<b>X2</b> = Parámetros óptimos para el proceso de secado.	– Temperatura – Espesor – Flujo de aire – Tiempo	°C mm L/min min	Experimental Experimental Experimental Experimental

## ANEXO N° 02

### PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE LA ARRACACHA ANTES Y DESPUES DEL SECADO



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA  
LABORATORIO DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO (LASAQ)



#### INFORME DE ENSAYOS LASAQ N°015B-1-2017-DQ

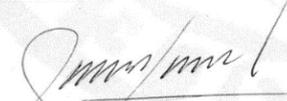
SOLICITANTE : Carin Osorio Rosario  
PRODUCTO DECLARADO : Arracacha Fresca  
NÚMERO DE MUESTRAS : 01  
CANTIDAD RECIBIDA : 500 g  
MARCA : S/M  
FORMA DE PRESENTACIÓN : En bolsa  
MUESTREO POR : Muestra proporcionada por el solicitante  
FECHA DE RECEPCIÓN : 25 Mayo del 2017  
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO: 05 Julio del 2017  
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO / QUÍMICO

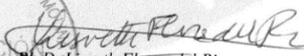
ENSAYO	RESULTADO
1.-Humedad (g/100g de muestra original)	68.50
2.-Cenizas Totales (g/100g de muestra original)	1.04
3.-Grasa Cruda (g/100g de muestra original)	0.75
4.- Proteína Cruda (g/100g de muestra original)	0.72
5.- Fibra Cruda (g/100g de muestra original)	5.65
6 - Carbohidratos (g/100g de muestra original)	28.99
7.- Energía Total (kcal 100g de muestra original)	118.34

#### MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:

- 1.- AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.925.10
- 2.- AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.923.03
- 3.- AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.922.06
- 4.- AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.920.87
- 5.- AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.920.86
- 6.- Por Dif. MS-INN Collazos 1993
- 7.- Por Calc. MS-INN Collazos 1993

Atentamente:

  
Mg. Sc. Juan Carlos Palma  
JEFE DEL LABORATORIO DE  
ANÁLISIS QUÍMICO

  
Ph.D. Lisbeth Flores del Pino  
DIRECTORA DEL DEPARTAMENTO  
ACADÉMICO DE QUÍMICA

UNIVERSIDAD AGRARIA LA MOLINA  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO  
DPTO. ACADÉMICO DE QUÍMICA



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA  
LABORATORIO DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO (LASAQ)



**INFORME DE ENSAYOS**  
**LASAQ N°015A-2017-DQ**

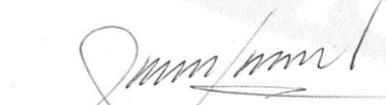
SOLICITANTE : Carin Osorio Rosario  
PRODUCTO DECLARADO : Secado de Arracacha  
NÚMERO DE MUESTRAS : 12  
CANTIDAD RECIBIDA : 100 g  
MARCA : S/M  
FORMA DE PRESENTACIÓN : En bolsa  
MUESTREO POR : Muestra proporcionada por el solicitante  
FECHA DE RECEPCIÓN : 25 Mayo del 2017  
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO: 05 Julio del 2017  
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO / QUÍMICO

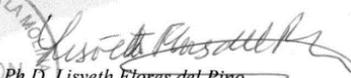
ENSAYO	RESULTADO											
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1.-Humedad (g/100g de muestra original)	13.50	14.20	13.20	15.30	13.10	13.00	12.80	13.70	12.10	14.30	14.20	13.50
2.-Cenizas Totales (g/100g de muestra original)	2.58	2.47	2.58	1.90	2.00	2.52	2.44	2.77	2.64	2.55	6.02	2.25
3.-Grasa Cruda (g/100g de muestra original)	6.11	5.90	6.50	5.80	6.11	6.50	5.60	5.98	6.13	5.89	2.60	5.96
4.- Proteína Cruda (g/100g de muestra original)	5.40	3.24	3.56	4.19	4.45	4.33	3.99	3.73	3.91	3.84	3.82	4.29
5.- Fibra Cruda (g/100g de muestra original)	1.83	2.20	2.10	1.90	2.40	2.50	1.75	2.10	1.80	2.30	1.80	1.60
6 - Carbohidratos (g/100g de muestra original)	72.41	74.19	74.16	72.81	74.34	73.65	75.17	73.82	75.22	73.42	73.36	74.00
7.- Energía Total (kcal 100g de muestra original)	348.15	344.27	352.94	362.1	372.55	354.51	350.00	347.67	354.69	345.995	315.58	349.90

**MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:**

- 1.- AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.925.10
- 2.- AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.923.03
- 3.- AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.922.06
- 4.- AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.920.87
- 5.- AOAC International official Methods of Analysis 19th Edition 2012.920.86
- 6.- Por Dif. MS-INN Collazos 1993
- 7.- Por Calc. MS-INN Collazos 1993

Atentamente:

  
Mg. Sc. Juan Carlos Palma  
JEFE DEL LABORATORIO DE  
ANÁLISIS QUÍMICO

  
Ph.D. Lisveth Flores del Pino  
DIRECTORA DEL DEPARTAMENTO  
ACADÉMICO DE QUÍMICA

UNIVERSIDAD AGRARIA LA MOLINA  
DIRECCIÓN  
DPTO. ACADÉMICO DE QUÍMICA

### ANEXO N° 03

#### CALCULO DEL NUMERO DE EXPERIMENTOS MEDIANTE EL METODO FACTORIAL

$$N^{\circ} \text{ Experimentos} = \text{Factor1} * \text{Factor2} * \text{Factor3} = 3 * 3 * 2$$

#### Número de experimento 18

**Factor 1** : El Factor Espesor presenta 3 niveles (E1 = 1,5; E2 = 3, E3 = 5 mm)

**Factor 2** : El Factor Temperatura presenta 3 niveles (T1 = 55, T2 = 65, T3 = 75°C)

**Factor 3** : El factor Flujo de aire presenta 2 niveles (F1 = 480, F2 = 750 L/min)

#### Detalle de experimentos

N° experimento	PARAMETROS		
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR
1	F1	T1	E1
2	F1	T1	E2
3	F1	T1	E3
4	F1	T2	E1
5	F1	T2	E2
6	F1	T2	E3
7	F1	T3	E1
8	F1	T3	E2
9	F1	T3	E3
10	F2	T1	E1
11	F2	T1	E2
12	F2	T1	E3
13	F2	T2	E1
14	F2	T2	E2
15	F2	T2	E3
16	F2	T3	E1
17	F2	T3	E2
18	F2	T3	E3

Fuente : Elaboración propia

## ANEXOS N° 04

### TABLAS DE DATOS PARA LAS CURVAS DE SECADO

Consideraciones para el cálculo :

$$X = \frac{W_{SH} - W_{SS}}{W_{SS}}$$

**W<sub>SH</sub>** : Peso del sólido húmedo

**W<sub>SS</sub>** : Peso del sólido seco

**X** : Humedad en base seca

#### TABLA DE DATOS DE LA CURVA DE LA FIGURA N° 5.1

tiempo (horas)	Xbase seca (E=1.5mm)	Xbase seca (E=3.0mm)	Xbase seca (E=5.0mm)
0.00	2.03	2.05	2.10
0.17	1.43	1.76	1.86
0.33	1.09	1.51	1.67
0.50	0.77	1.29	1.52
0.67	0.50	1.09	1.38
0.83	0.28	0.91	1.23
1.00	0.15	0.76	1.10
1.17	0.07	0.63	0.98
1.33	0.04	0.51	0.87
1.50	0.02	0.40	0.75
1.67	0.00	0.29	0.64
1.83	0.00	0.21	0.54
2.00	0.00	0.15	0.45
2.17	0.00	0.11	0.38
2.33	0.00	0.08	0.31
2.50	0.00	0.06	0.26
2.67	0.00	0.04	0.22
2.83	0.00	0.03	0.19
3.00	0.00	0.02	0.16
3.17	0.00	0.01	0.13
3.33	0.00	0.00	0.11
3.50	0.00	0.00	0.09
3.67	0.00	0.00	0.07
3.83	0.00	0.00	0.06
4.00	0.00	0.00	0.04
4.17	0.00	0.00	0.03
4.33	0.00	0.00	0.02
4.50	0.00	0.00	0.01
4.67	0.00	0.00	0.01
4.83	0.00	0.00	0.00

**Fuente** : Elaboración propia

**TABLA DE DATOS DE LA CURVA DE LA FIGURA N° 5.2**

<b>tiempo (horas)</b>	<b>Xbase seca (E=1.5mm)</b>	<b>Xbase seca (E=3.0mm)</b>	<b>Xbase seca (E=5.0mm)</b>
0.00	2.02	2.05	2.10
0.17	1.37	1.68	1.77
0.33	0.89	1.37	1.57
0.50	0.47	1.04	1.36
0.67	0.20	0.72	1.18
0.83	0.04	0.43	1.01
1.00	0.02	0.21	0.84
1.17	0.00	0.12	0.69
1.33	0.00	0.07	0.53
1.50	0.00	0.05	0.40
1.67	0.00	0.02	0.28
1.83	0.00	0.01	0.21
2.00	0.00	0.00	0.16
2.17	0.00	0.00	0.12
2.33	0.00	0.00	0.09
2.50	0.00	0.00	0.06
2.67	0.00	0.00	0.05
2.83	0.00	0.00	0.04
3.00	0.00	0.00	0.03
3.17	0.00	0.00	0.02
3.33	0.00	0.00	0.01
3.50	0.00	0.00	0.00

**Fuente :** Elaboración propia

**TABLA DE DATOS DE LA CURVA DE LA FIGURA N° 5.3**

<b>tiempo (horas)</b>	<b>Xbase seca (E=1.5mm)</b>	<b>Xbase seca (E= 3.0mm)</b>	<b>Xbase seca (E=5.0mm)</b>
0.00	2.02	2.02	2.03
0.17	1.25	1.50	1.72
0.33	0.64	1.02	1.45
0.50	0.35	0.70	1.24
0.67	0.18	0.45	1.07
0.83	0.08	0.30	0.86
1.00	0.04	0.18	0.73
1.17	0.03	0.11	0.59
1.33	0.02	0.06	0.47
1.50	0.00	0.04	0.37
1.67	0.00	0.03	0.31
1.83	0.00	0.02	0.26
2.00	0.00	0.00	0.22
2.17	0.00	0.00	0.19
2.33	0.00	0.00	0.17
2.50	0.00	0.00	0.14
2.67	0.00	0.00	0.12
2.83	0.00	0.00	0.10
3.00	0.00	0.00	0.08
3.17	0.00	0.00	0.07
3.33	0.00	0.00	0.06
3.50	0.00	0.00	0.04
3.67	0.00	0.00	0.03
3.83	0.00	0.00	0.02
4.00	0.00	0.00	0.01
4.17	0.00	0.00	0.01
4.33	0.00	0.00	0.00

**Fuente :** Elaboración propia

TABLA DE DATOS DE LA CURVA DE LA FIGURA N° 5.4

<b>tiempo (horas)</b>	<b>Xbase seca (E=1.5mm)</b>	<b>Xbase seca (E=3.0mm)</b>	<b>Xbase seca (E=5.0mm)</b>
0.00	2.15	2.05	2.12
0.17	1.36	1.73	1.85
0.33	0.66	1.39	1.52
0.50	0.40	1.04	1.30
0.67	0.21	0.79	1.13
0.83	0.12	0.63	0.98
1.00	0.07	0.50	0.86
1.17	0.05	0.40	0.75
1.33	0.04	0.30	0.64
1.50	0.03	0.24	0.58
1.67	0.03	0.18	0.49
1.83	0.03	0.11	0.41
2.00	0.00	0.10	0.34
2.17	0.00	0.08	0.28
2.33	0.00	0.07	0.23
2.50	0.00	0.06	0.18
2.67	0.00	0.06	0.15
2.83	0.00	0.06	0.13
3.00	0.00	0.05	0.11
3.17	0.00	0.04	0.09
3.33	0.00	0.02	0.08
3.50	0.00	0.01	0.07
3.67	0.00	0.00	0.06
3.83	0.00	0.00	0.05
4.00	0.00	0.00	0.04
4.17	0.00	0.00	0.03
4.33	0.00	0.00	0.02
4.50	0.00	0.00	0.02
4.67	0.00	0.00	0.01
4.83	0.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00	0.00

Fuente : Elaboración propia

**TABLA DE DATOS DE LA CURVA DE LA FIGURA N° 5.5**

<b>tiempo (horas)</b>	<b>Xbase seca (E=1.5mm)</b>	<b>Xbase seca (E=3.0mm)</b>	<b>Xbase seca (E=5.0mm)</b>
0.00	2.46	2.27	2.69
0.17	1.71	1.82	2.31
0.33	1.01	1.33	1.99
0.50	0.51	0.92	1.67
0.67	0.18	0.60	1.37
0.83	0.06	0.34	1.10
1.00	0.03	0.19	0.89
1.17	0.01	0.12	0.73
1.33	0.00	0.08	0.58
1.50	0.00	0.06	0.46
1.67	0.00	0.04	0.35
1.83	0.00	0.03	0.27
2.00	0.00	0.02	0.20
2.17	0.00	0.01	0.13
2.33	0.00	0.00	0.10
2.50	0.00	0.00	0.07
2.67	0.00	0.00	0.05
2.83	0.00	0.00	0.04
3.00	0.00	0.00	0.03
3.17	0.00	0.00	0.02
3.33	0.00	0.00	0.02
3.50	0.00	0.00	0.01
3.67	0.00	0.00	0.00

**Fuente :** Elaboración propia

**TABLA DE DATOS DE LA CURVA DE LA FIGURA N° 5.6**

<b>tiempo (horas)</b>	<b>Xbase seca (E=1.5mm)</b>	<b>Xbase seca (E=3.0mm)</b>	<b>Xbase seca (E=5.0mm)</b>
0.00	1.87	1.94	1.98
0.17	1.03	1.37	1.57
0.33	0.50	0.93	1.30
0.50	0.18	0.64	1.05
0.67	0.07	0.42	0.89
0.83	0.02	0.26	0.72
1.00	0.00	0.15	0.60
1.17	0.00	0.09	0.52
1.33	0.00	0.04	0.41
1.50	0.00	0.02	0.35
1.67	0.00	0.01	0.30
1.83	0.00	0.00	0.25
2.00	0.00	0.00	0.20
2.17	0.00	0.00	0.17
2.33	0.00	0.00	0.13
2.50	0.00	0.00	0.11
2.67	0.00	0.00	0.09
2.83	0.00	0.00	0.07
3.00	0.00	0.00	0.06
3.17	0.00	0.00	0.05
3.33	0.00	0.00	0.04
3.50	0.00	0.00	0.03
3.67	0.00	0.00	0.03
3.83	0.00	0.00	0.02
4.00	0.00	0.00	0.01
4.17	0.00	0.00	0.00

**Fuente :** Elaboración propia

## ANEXOS N° 05

### AJUSTE DE LAS CURVAS DE SECADO EXPERIMENTALES A LOS MODELOS MATEMATICOS

Se realizan los ajustes con la ayuda del Software Polymath considerando el siguiente análisis para el modelo de Midilli.

$$Y = ae^{-kX^n} + bX$$

$$S = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum (Y_i - ae^{-kX^n} - bX)^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial k} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial n} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}$$

$$VAR = \frac{1}{V} \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Dónde :  $V = n - m$

**n** : Número de datos

**m** : Número de parámetros

## REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

### EXPERIMENTO N° 1

**POLYMAT** Regresión no lineal - Aracacha  
**H Report**  
 Nonlinear Regression (L-M)

**Model:**  $X1 = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t^n) + b \cdot t^1$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.0129	0.0959708
K	0.5	2.171893	0.3430065
n	0.5	1.123194	0.1701432
b	0.5	-0.041533	0.0569501

#### Nonlinear regression settings

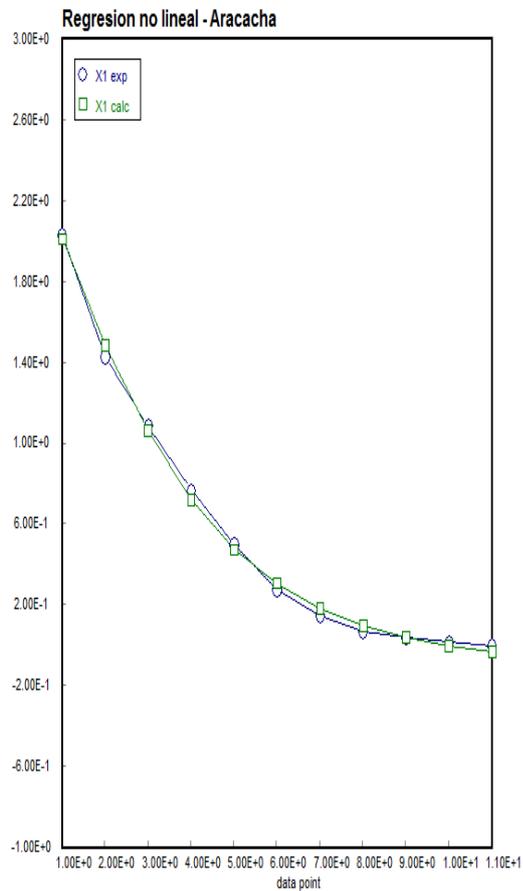
Max # iterations = 64

#### Precision

R <sup>2</sup>	0.9974254
R <sup>2</sup> adj	0.9963221
Rmsd	0.0098977
Variance	0.0016934

#### General

Sample size	11
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	8



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

# REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO DE MIDILLI

## EXPERIMENTO N° 2

**POLYMAT** Regression no  
**H Report** lineal -  
 Aracacha  
 Nonlinear  
 Regression (L-  
 M)

**Model:**  $X2 = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t^2)^n + b \cdot t^2$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.022546	8.27E-05
K	0.5	0.9873896	6.96E-05
n	0.5	1.174134	0.0001255
b	0.5	-0.016746	1.78E-05

### Nonlinear regression settings

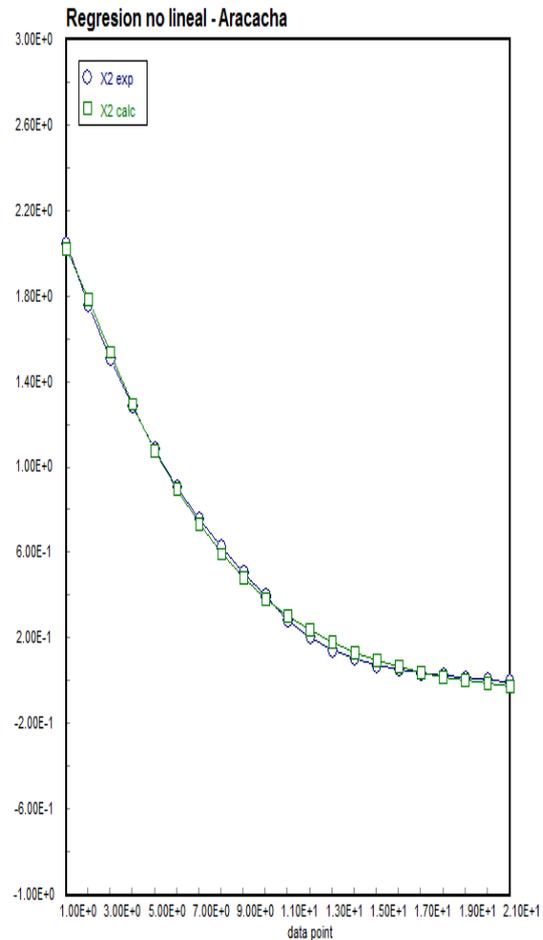
Max # iterations = 64

### Precision

R <sup>2</sup>	0.9988069
R <sup>2</sup> adj	0.9985964
Rmsd	0.0046743
Variance	0.0005668

### General

Sample size	21
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	11



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

## REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

### EXPERIMENTO N° 3

**POLYMAT** Regresión no lineal - Aracacha  
**H Report**  
 Nonlinear Regression (LM)  
 4-Mar-18

**Model:** X3 = a\*EXP(-K\*t<sup>3</sup>n)+b\*t<sup>3</sup>

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.042597	0.0420971
K	0.5	0.6295756	0.0294187
n	0.5	1.198376	0.0644775
b	0.5	-0.008859	0.0062437

#### Nonlinear regression settings

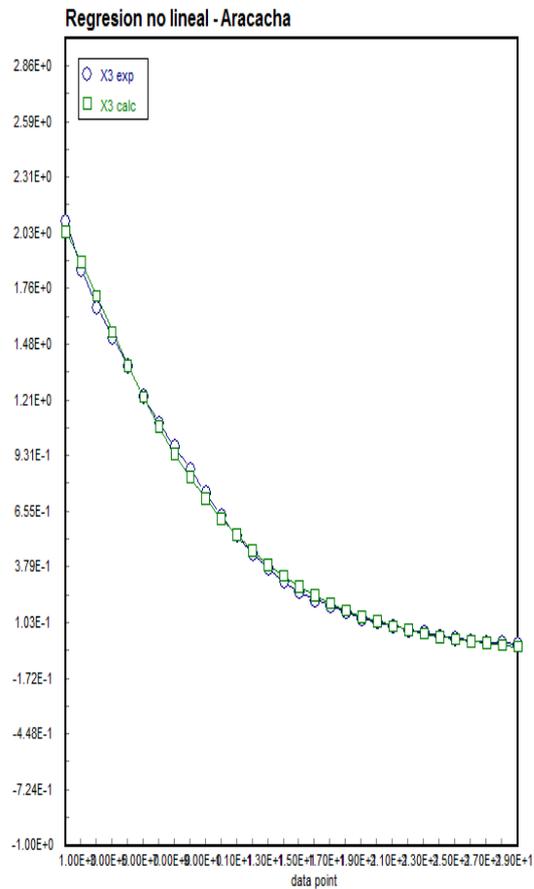
Max # iterations = 64

#### Precision

R <sup>2</sup>	0.9986021
R <sup>2</sup> adj	0.9984408
Rmsd	0.0042094
Variance	0.0006134

#### General

Sample size	30
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	10



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

## REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

### EXPERIMENTO N° 4

**POLYMAT H Report**  
 Regresión no lineal - Aracacha  
 Nonlinear Regression (LM)  
 4-Mar-18

**Model:**  $X4 = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t^4) + b \cdot t^4$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.023557	0.0496242
K	0.5	4.11433	0.4566998
n	0.5	1.190454	0.0940053
b	0.5	0.0075629	0.0216005

#### Nonlinear regression settings

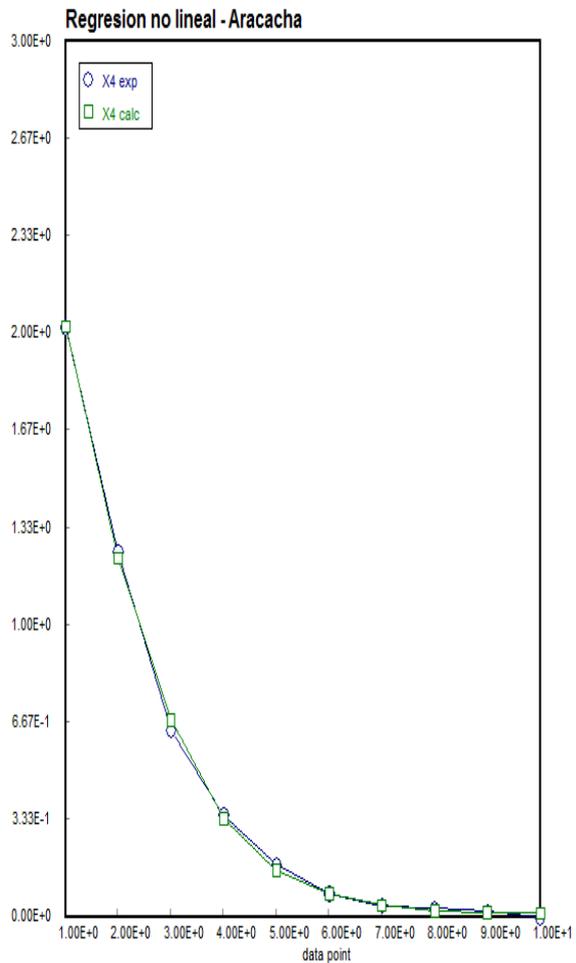
Max # iterations = 64

#### Precision

R <sup>2</sup>	0.9993923
R <sup>2</sup> adj	0.9990885
Rmsd	0.0049862
Variance	0.0004144

#### General

Sample size	10
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	7



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

## REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

### EXPERIMENTO N° 5

**POLYMAT** Regresión no lineal - Aracacha  
**H Report**  
 Nonlinear Regression (LM)  
 4-Mar-18

**Model:**  $X5 = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t5^n) + b \cdot t5$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.022242	5.42E-06
K	0.5	2.394519	1.18E-05
n	0.5	1.15896	6.06E-06
b	0.5	-0.001845	1.81E-06

**Nonlinear regression settings**

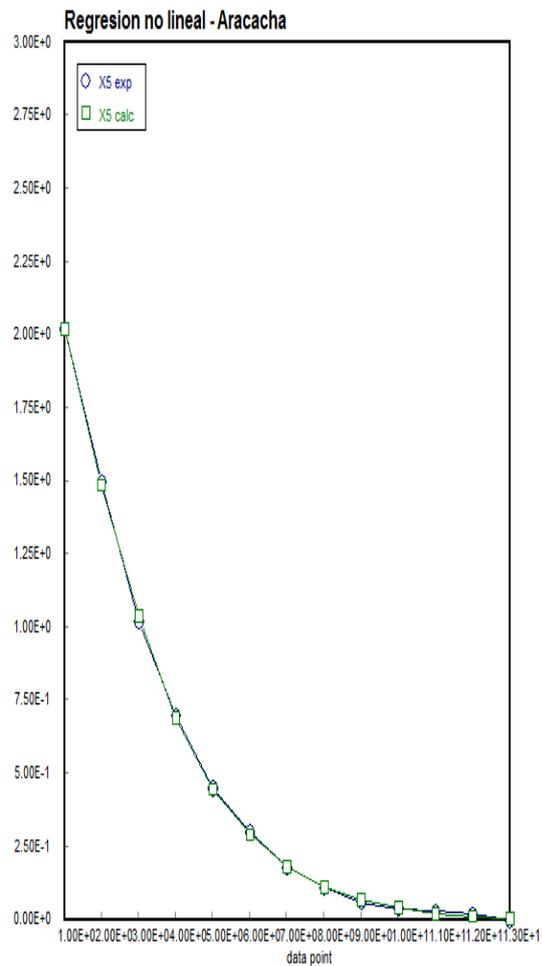
Max # iterations = 64

**Precision**

R <sup>2</sup>	0.9997933
R <sup>2</sup> adj	0.9997244
Rmsd	0.0024789
Variance	0.0001154

**General**

Sample size	13
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	7



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

# REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

## EXPERIMENTO N° 6

**POLYMAT H Report** Regresion no lineal - Aracacha  
 Nonlinear Regression (LM) 4-Mar-18

**Model:**  $X_6 = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t_6^n) + b \cdot t_6$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.022834	0.0339325
K	0.5	1.043742	0.0277517
n	0.5	1.073969	0.0423145
b	0.5	0.0005607	0.0041885

### Nonlinear regression settings

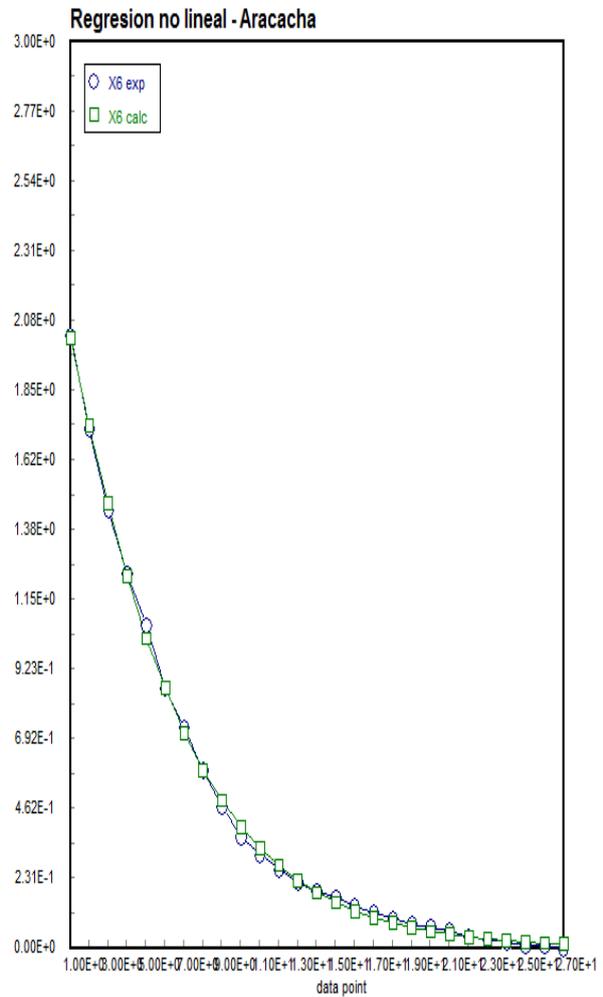
Max # iterations = 64

### Precision

R <sup>2</sup>	0.9991418
R <sup>2</sup> adj	0.9990299
Rmsd	0.0031676
Variance	0.000318

### General

Sample size	27
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	12



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

# REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

## EXPERIMENTO N° 7

**POLYMAT** Regresión no lineal - Aracacha  
**H Report**  
 Nonlinear Regression (LM)  
 4-Mar-18

**Model:**  $X7 = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t^n) + b \cdot t^7$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.011304	2.55E-05
K	0.5	3.548795	9.21E-05
n	0.5	1.300231	2.58E-05
b	0.5	-0.043806	1.71E-05

### Nonlinear regression settings

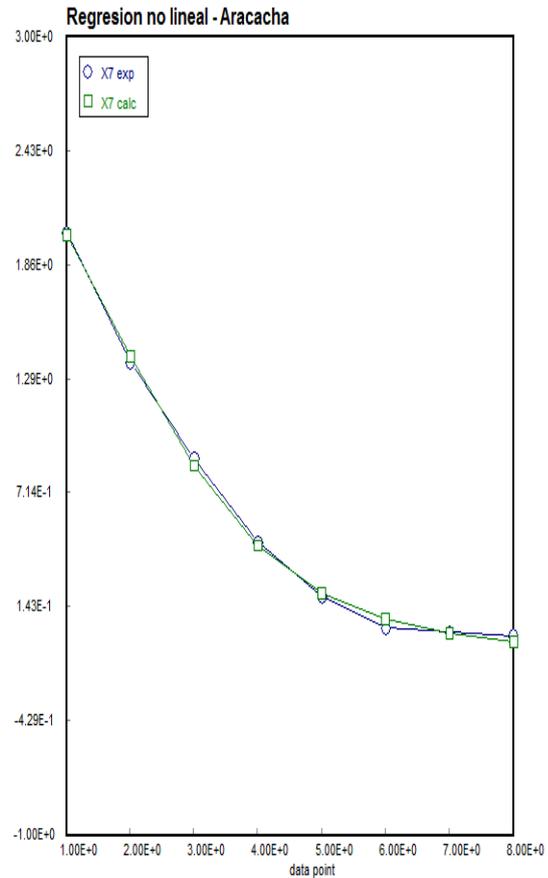
Max # iterations = 64

### Precision

R <sup>2</sup>	0.9984717
R <sup>2</sup> adj	0.9973255
Rmsd	0.0096192
Variance	0.0014805

### General

Sample size	8
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	8



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

## REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

### EXPERIMENTO N° 8

**POLYMAT**    Regresión no  
**H Report**    lineal -  
                          Aracacha

Nonlinear  
 Regression (L-  
 M)                    4-Mar-18

**Model:**  $X8 = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t8^n) + b \cdot t8$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.008158	0.0880874
K	0.5	1.999316	0.2275328
n	0.5	1.516184	0.1939984
b	0.5	-0.008026	0.0313184

**Nonlinear regression settings**

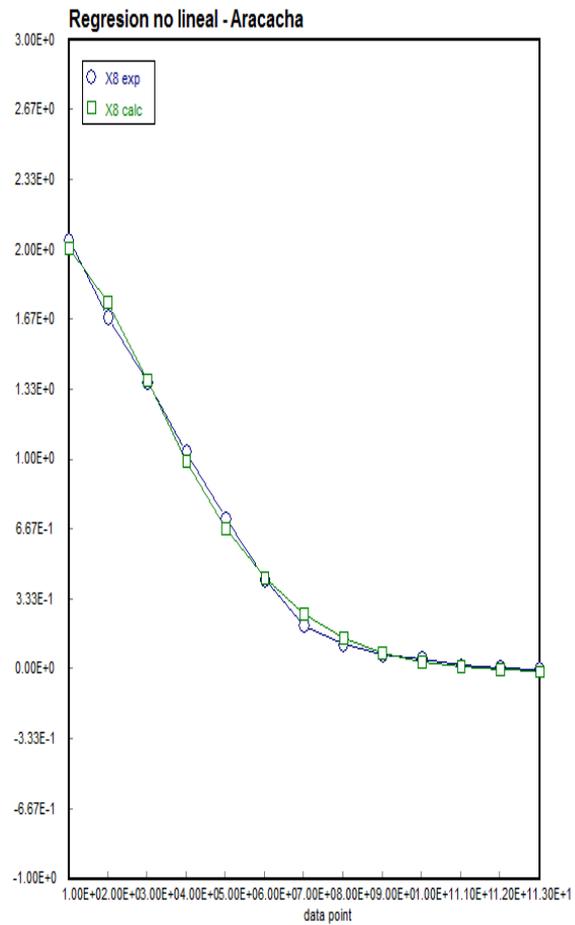
Max # iterations = 64

**Precision**

R <sup>2</sup>	0.9973954
R <sup>2</sup> adj	0.9965271
Rmsd	0.0097032
Variance	0.001768

**General**

Sample size	13
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	10



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

# REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

## EXPERIMENTO N° 9

**POLYMAT H Report** Regresion no lineal - Aracacha  
 Nonlinear Regression (LM) 4-Mar-18

**Model:**  $X9 = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t9^n) + b \cdot t9$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.030185	0.0313016
K	0.5	0.9285555	0.0267571
n	0.5	1.281126	0.0527409
b	0.5	-0.010047	0.0066341

### Nonlinear regression settings

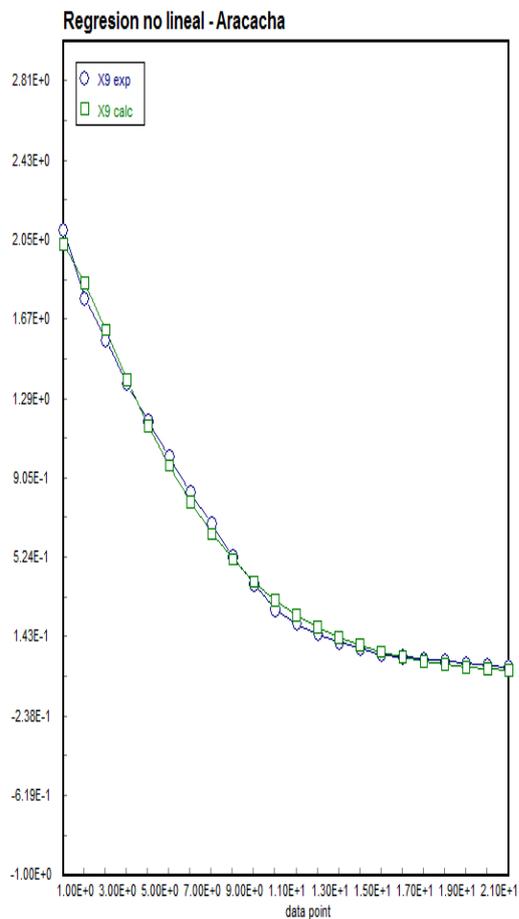
Max # iterations = 64

### Precision

R <sup>2</sup>	0.996985
R <sup>2</sup> adj	0.9964825
Rmsd	0.0074656
Variance	0.0014987

### General

Sample size	22
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	12



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

## REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

### EXPERIMENTO N° 10

**POLYMAT H Report** Regresion no lineal - Aracacha  
 Nonlinear Regression (LM) 4-Mar-18

**Model:**  $X_{10} = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t_{10}^n) + b \cdot t_{10}$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.158433	0.0771297
K	0.5	3.957004	0.5576009
n	0.5	1.168888	0.1259238
b	0.5	0.0161139	0.0200347

#### Nonlinear regression settings

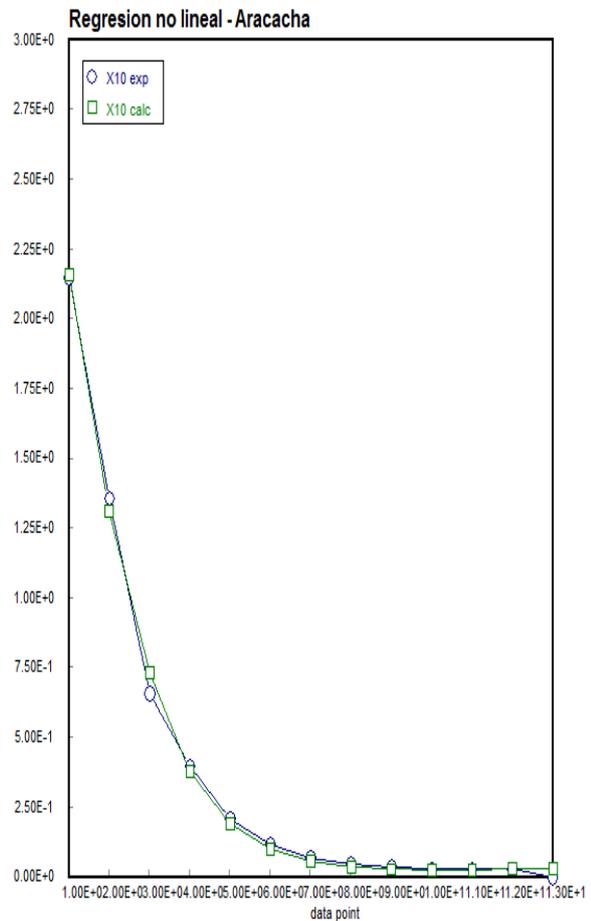
Max # iterations = 64

#### Precision

R <sup>2</sup>	0.9979288
R <sup>2</sup> adj	0.9972384
Rmsd	0.0079041
Variance	0.0011731

#### General

Sample size	13
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	9



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

# REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

## EXPERIMENTO N° 11

**POLYMAT** Regresión no  
**H Report** lineal -  
 Aracacha  
 Nonlinear  
 Regression (L-  
 M) 4-Mar-18

**Model:**  $X_{11} = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t^{1/n}) + b \cdot t^{11}$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.069067	0.0429038
K	0.5	1.446029	0.0462929
n	0.5	1.119247	0.054795
b	0.5	0.0071019	0.0056293

### Nonlinear regression settings

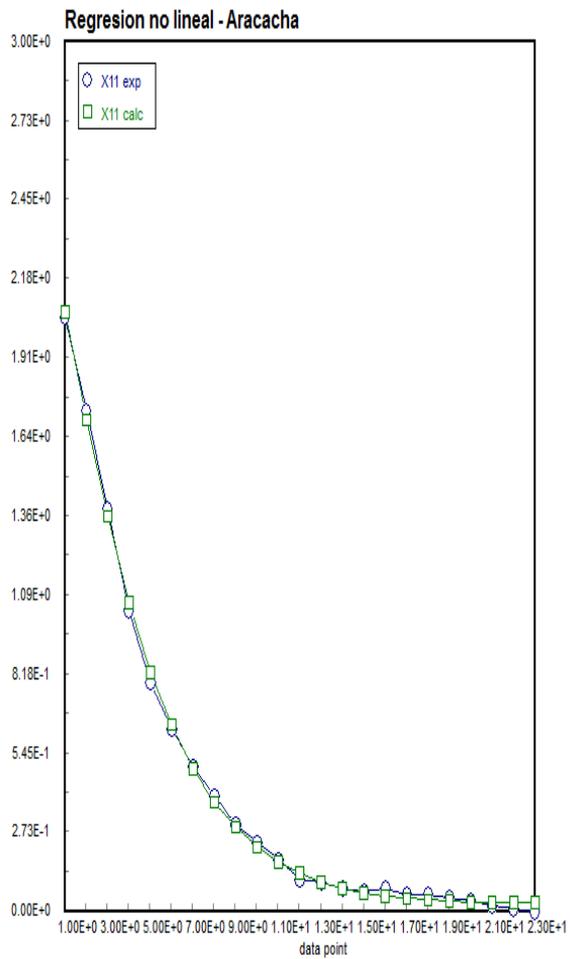
Max # iterations = 64

### Precision

R <sup>2</sup>	0.9988245
R <sup>2</sup> adj	0.9986389
Rmsd	0.0041053
Variance	0.0004692

### General

Sample size	23
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	8



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

# REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

## EXPERIMENTO N° 12

**POLYMAT H Report**  
 Regression no lineal - Aracacha  
 Nonlinear Regression (LM)  
 4-Mar-18

**Model:**  $X_{12} = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t_{12}^n) + b \cdot t_{12}$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.122619	0.0406077
K	0.5	0.9096786	0.0285988
n	0.5	0.9772406	0.0440374
b	0.5	-0.007355	0.004993

### Nonlinear regression settings

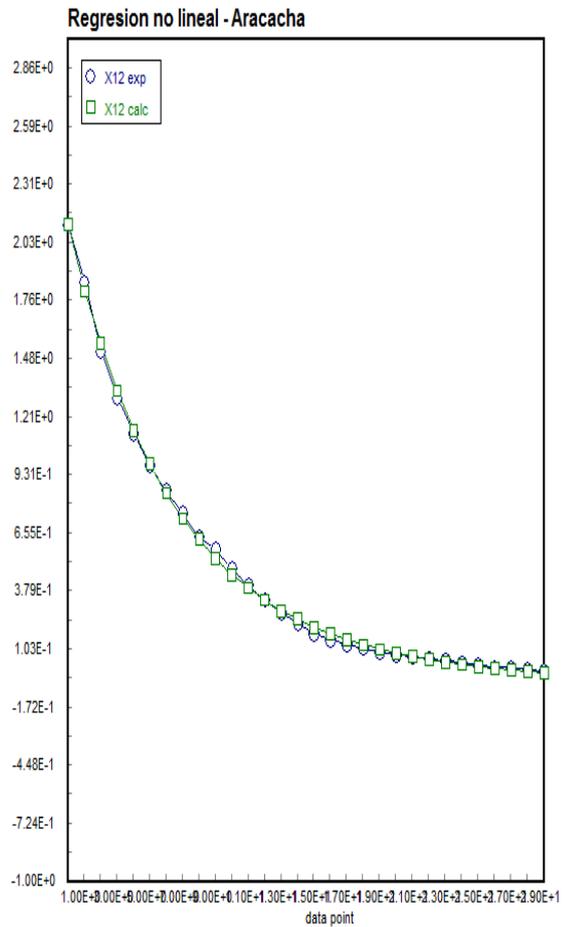
Max # iterations = 64

### Precision

R <sup>2</sup>	0.9988047
R <sup>2</sup> adj	0.9986668
Rmsd	0.0036339
Variance	0.0004571

### General

Sample size	30
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	10



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

## REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

### EXPERIMENTO N° 13

**POLYMAT** Regresión no lineal - Aracacha  
**H Report**  
 Nonlinear Regression (LM)  
 4-Mar-18

**Model:**  $X13 = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t^{13^n}) + b \cdot t^{13}$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.455245	0.0682811
K	0.5	4.265426	0.620015
n	0.5	1.408699	0.1288526
b	0.5	-0.012962	0.0495337

**Nonlinear regression settings**

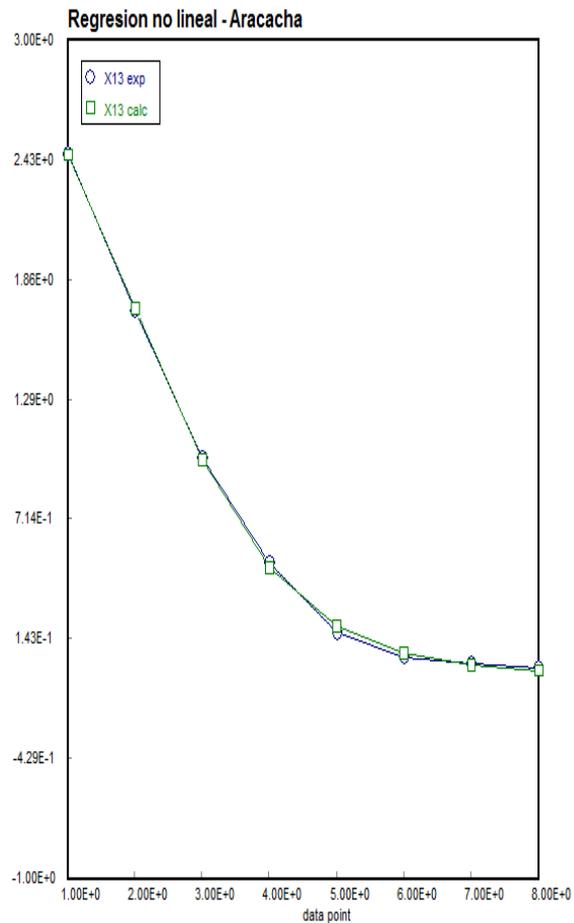
Max # iterations = 64

**Precision**

R <sup>2</sup>	0.9995782
R <sup>2</sup> adj	0.9992618
Rmsd	0.006203
Variance	0.0006156

**General**

Sample size	8
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	8



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

## REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

### EXPERIMENTO N° 14

**POLYMAT** Regresión no lineal - Aracacha  
**H Report**  
 Nonlinear Regression (LM)  
 4-Mar-18

**Model:**  $X_{14} = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t_{14}^n) + b \cdot t_{14}$

Variable	Initial guess	Value	95% confidence
a	0.5	2.264214	0.0361481
K	0.5	2.375822	0.093628
n	0.5	1.360262	0.0580316
b	0.5	0.0055553	0.0083894

#### Nonlinear regression settings

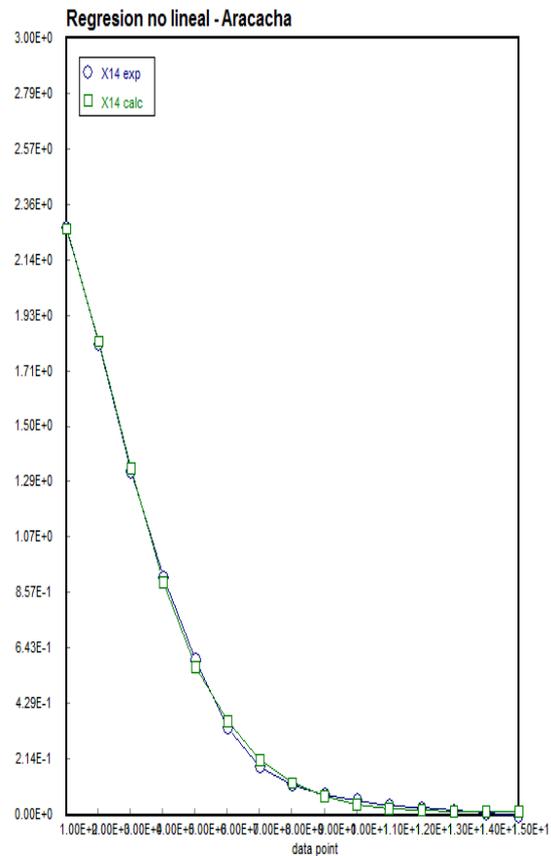
Max # iterations = 64

#### Precision

R <sup>2</sup>	0.9995726
R <sup>2</sup> adj	0.999456
Rmsd	0.0037827
Variance	0.0002927

#### General

Sample size	15
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	8



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

# REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

## EXPERIMENTO N° 15

**POLYMAT H Report**  
 Regresion no lineal - Aracacha  
 Nonlinear Regression (LM)  
 4-Mar-18

**Model:**  $X_{15} = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t_{15}^n) + b \cdot t_{15}$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	2.670062	0.0297177
K	0.5	1.087298	0.0199967
n	0.5	1.195157	0.0332408
b	0.5	-0.006665	0.0047662

### Nonlinear regression settings

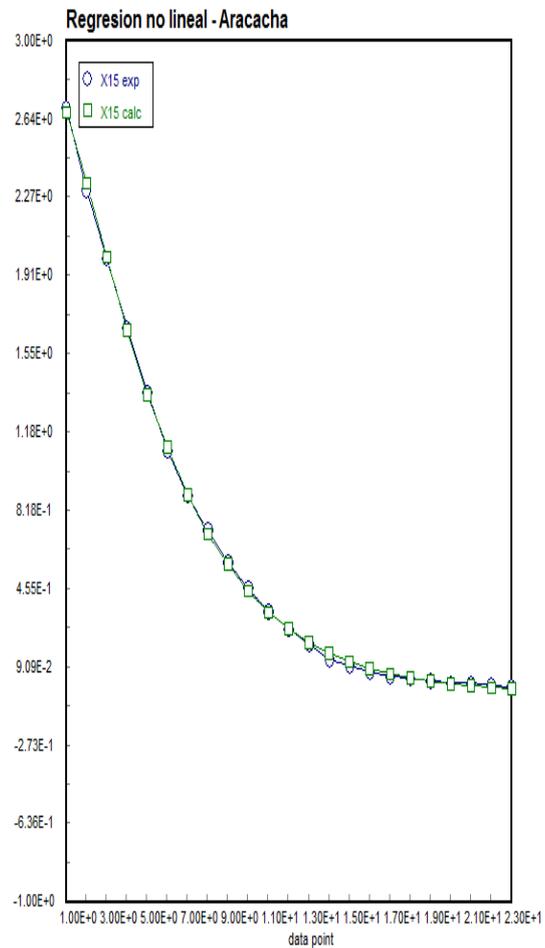
Max # iterations = 64

### Precision

R <sup>2</sup>	0.9996811
R <sup>2</sup> adj	0.9996308
Rmsd	0.0029733
Variance	0.0002461

### General

Sample size	23
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	9



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

# REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

## EXPERIMENTO N° 16

POLYMAT Regresion no lineal - Aracacha  
**H Report**  
 Nonlinear Regresion (LM)  
 4-Mar-18

**Model:**  $X_{16} = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t_{16}^n) + b \cdot t_{16}$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	1.869251	0.0009956
K	0.5	5.271785	0.0059582
n	0.5	1.23668	0.0008732
b	0.5	-0.011037	0.0007385

**Nonlinear regression settings**

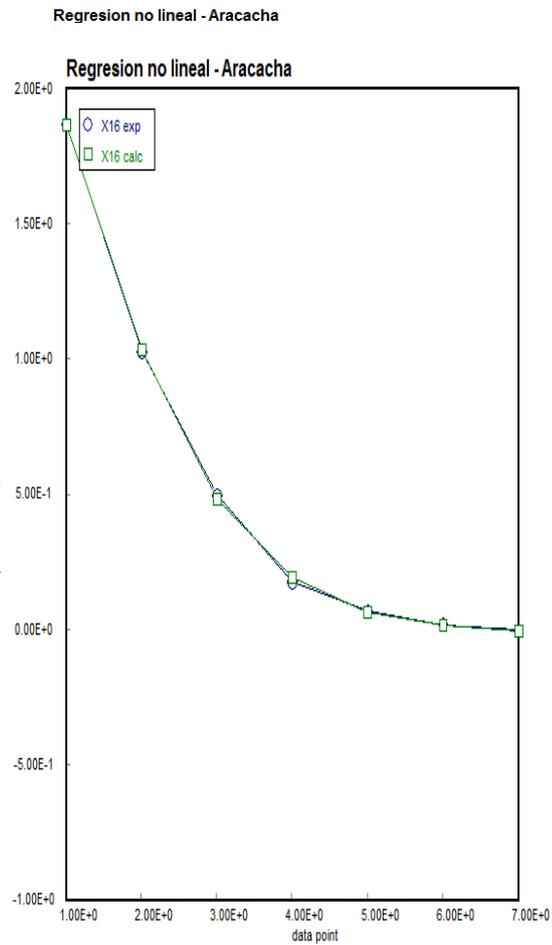
Max # iterations = 64

**Precision**

R <sup>2</sup>	0.9998601
R <sup>2</sup> adj	0.9997203
Rmsd	0.0028876
Variance	0.0001362

**General**

Sample size	7
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	7



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

## REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

### EXPERIMENTO N° 17

**POLYMAT** Regresion no  
**H Report** lineal -  
 Aracacha  
 Nonlinear  
 Regression (L-  
 M) 4-Mar-18

**Model:**  $X_{17} = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t_{17}^n) + b \cdot t_{17}$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	1.938506	0.0006639
K	0.5	2.387274	0.0014571
n	0.5	1.09137	0.0007279
b	0.5	-0.015974	0.000246

#### Nonlinear regression settings

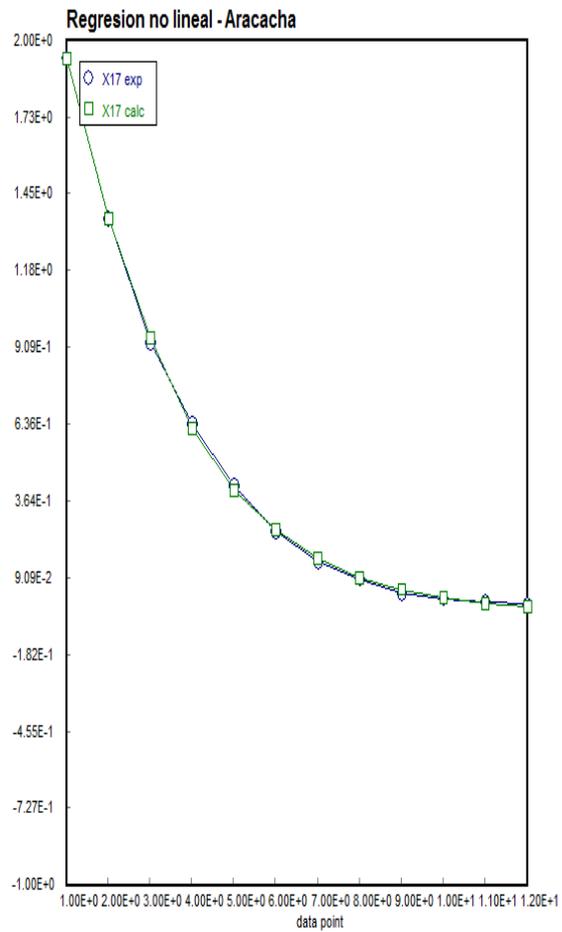
Max # iterations = 64

#### Precision

R <sup>2</sup>	0.9997037
R <sup>2</sup> adj	0.9995925
Rmsd	0.0029817
Variance	0.00016

#### General

Sample size	12
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	7



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

## REGRESIÓN NO LINEAL CON MODELO MIDILLI

### EXPERIMENTO N° 18

**POLYMAT** Regresión no lineal - Arcacacha  
**H Report**  
 Nonlinear Regression (LM) 4-Mar-18

**Model:**  $X_{18} = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t_{18}^n) + b \cdot t_{18}$

Variable	Initial guess	Value	95% confidenc
a	0.5	1.978824	0.0161577
K	0.5	1.17685	0.0141512
n	0.5	0.9238529	0.0178065
b	0.5	-0.004335	0.0022444

#### Nonlinear regression settings

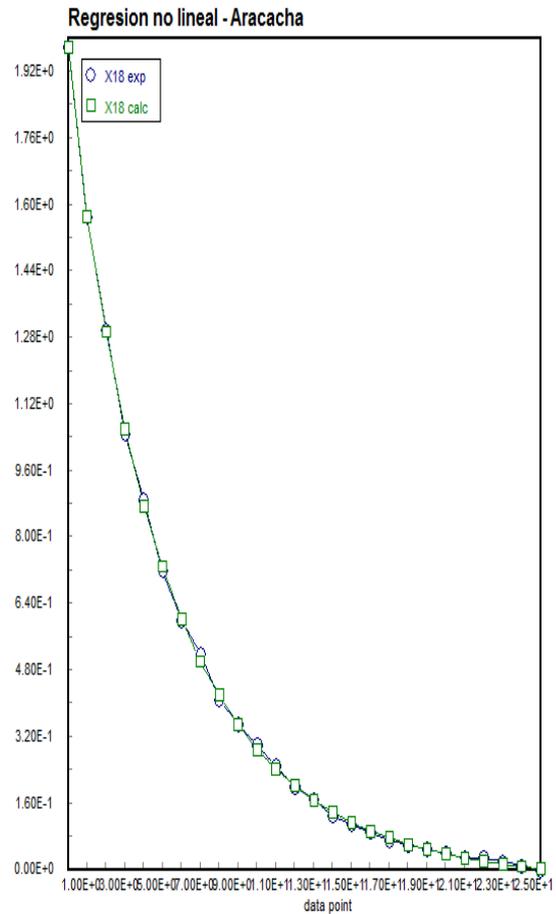
Max # iterations = 64

#### Precision

R <sup>2</sup>	0.9997948
R <sup>2</sup> adj	0.9997668
Rmsd	0.0014652
Variance	6.60E-05

#### General

Sample size	26
Model vars	4
Indep vars	1
Iterations	8



**Fuente :** Datos elaborados con el software Polymath

A continuación, se muestran tablas de resumen con los resultados obtenidos de las constantes para cada modelo

### MODELO MATEMÁTICO NEWTON

X = EXP(-Kt)						
N° experimento	PARAMETROS			K	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR			
1	F1	T1	E1	1.178	0.611	0.179
2	F1	T1	E2	0.569	0.607	0.159
3	F1	T1	E3	0.382	0.596	0.159
4	F1	T2	E1	1.907	0.663	0.153
5	F1	T2	E2	1.211	0.651	0.146
6	F1	T2	E3	0.566	0.679	0.105
7	F1	T3	E1	1.613	0.580	0.233
8	F1	T3	E2	0.948	0.566	0.221
9	F1	T3	E3	0.546	0.591	0.174
10	F2	T1	E1	1.741	0.655	0.147
11	F2	T1	E2	0.742	0.673	0.113
12	F2	T1	E3	0.473	0.657	0.117
13	F2	T2	E1	1.421	0.432	0.474
14	F2	T2	E2	1.024	0.568	0.232
15	F2	T2	E3	0.485	0.451	0.366
16	F2	T3	E1	2.473	0.676	0.158
17	F2	T3	E2	1.319	0.678	0.126
18	F2	T3	E3	0.639	0.726	0.078

Fuente : Elaboración propia

### MODELO MATEMÁTICO DE PAGE

$X = \text{EXP}(-Kt^n)$							
N° experimento	PARAMETROS			K	n	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR				
1	F1	T1	E1	2.345	3.419	0.722	0.142
2	F1	T1	E2	0.219	3.344	0.741	0.110
3	F1	T1	E3	0.063	3.342	0.737	0.107
4	F1	T2	E1	6.138	2.693	0.719	0.144
5	F1	T2	E2	2.007	2.835	0.734	0.121
6	F1	T2	E3	0.276	2.542	0.768	0.079
7	F1	T3	E1	8.594	3.774	0.692	0.199
8	F1	T3	E2	1.711	4.658	0.715	0.158
9	F1	T3	E3	0.168	3.828	0.736	0.118
10	F2	T1	E1	4.999	2.652	0.702	0.138
11	F2	T1	E2	0.545	2.578	0.751	0.090
12	F2	T1	E3	0.159	2.651	0.754	0.087
13	F2	T2	E1	13.929	4.710	0.544	0.443
14	F2	T2	E2	2.052	4.118	0.675	0.188
15	F2	T2	E3	0.122	4.042	0.575	0.297
16	F2	T3	E1	13.935	2.877	0.734	0.156
17	F2	T3	E2	2.231	2.660	0.757	0.105
18	F2	T3	E3	0.395	2.130	0.793	0.061

Fuente : Elaboración propia

## MODELO MATEMÁTICO DE HENDERSON

$X = a \cdot \text{EXP}(-Kt)$							
N° experimento	PARAMETROS			a	K	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR				
1	F1	T1	E1	2.079	2.215	0.990	0.005
2	F1	T1	E2	2.146	1.121	0.990	0.004
3	F1	T1	E3	2.192	0.773	0.991	0.004
4	F1	T2	E1	2.058	3.425	0.996	0.002
5	F1	T2	E2	2.080	2.250	0.996	0.002
6	F1	T2	E3	2.068	1.077	0.998	0.001
7	F1	T3	E1	2.095	2.980	0.983	0.011
8	F1	T3	E2	2.205	1.839	0.973	0.015
9	F1	T3	E3	2.203	1.087	0.986	0.006
10	F2	T1	E1	2.187	3.327	0.996	0.002
11	F2	T1	E2	2.122	1.432	0.997	0.001
12	F2	T1	E3	2.122	0.926	0.998	0.001
13	F2	T2	E1	2.566	3.099	0.982	0.018
14	F2	T2	E2	2.404	2.081	0.988	0.007
15	F2	T2	E3	2.826	1.184	0.994	0.004
16	F2	T3	E1	1.901	4.108	0.994	0.004
17	F2	T3	E2	1.978	2.355	0.997	0.001
18	F2	T3	E3	1.938	1.164	0.999	0.000

**Fuente :** Elaboración propia

## MODELO MATEMÁTICO DE LOGARÍTMICA

$X = a \cdot \text{EXP}(-Kt) + c$								
N° experimento	PARAMETROS			a	K	c	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR					
1	F1	T1	E1	2.185	1.841	-0.146	0.997	0.002
2	F1	T1	E2	2.238	0.925	-0.149	0.998	0.001
3	F1	T1	E3	2.273	0.644	-0.142	0.997	0.001
4	F1	T2	E1	2.081	3.274	-0.031	0.997	0.002
5	F1	T2	E2	2.116	2.084	-0.054	0.998	0.001
6	F1	T2	E3	2.076	1.046	-0.019	0.999	0.000
7	F1	T3	E1	2.279	2.312	-0.223	0.994	0.004
8	F1	T3	E2	2.373	1.427	-0.225	0.986	0.009
9	F1	T3	E3	2.303	0.891	-0.161	0.994	0.003
10	F2	T1	E1	2.184	3.346	0.004	0.996	0.002
11	F2	T1	E2	2.123	1.426	-0.003	0.997	0.001
12	F2	T1	E3	2.134	0.887	-0.027	0.999	0.000
13	F2	T2	E1	2.756	2.490	-0.230	0.991	0.010
14	F2	T2	E2	2.454	1.898	-0.076	0.991	0.006
15	F2	T2	E3	2.886	1.053	-0.110	0.997	0.002
16	F2	T3	E1	1.973	3.642	-0.085	0.997	0.002
17	F2	T3	E2	2.021	2.146	-0.063	0.999	0.000
18	F2	T3	E3	1.937	1.172	0.004	0.999	0.000

Fuente : Elaboración propia

## MODELO MATEMÁTICO DE DOS TÉRMINOS

$X = a \cdot \exp(-K \cdot t) + b \cdot \exp(-g \cdot t)$									
N° experimento	PARAMETROS			a	K	b	g	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR						
1	F1	T1	E1	1.040	2.215	1.040	2.215	0.990	0.006
2	F1	T1	E2	1.073	1.121	1.073	1.121	0.990	0.005
3	F1	T1	E3	1.096	0.773	1.096	0.773	0.991	0.004
4	F1	T2	E1	1.029	3.424	1.029	3.424	0.996	0.003
5	F1	T2	E2	1.040	2.250	1.040	2.250	0.996	0.002
6	F1	T2	E3	1.034	1.077	1.034	1.077	0.998	0.001
7	F1	T3	E1	1.047	2.980	1.047	2.980	0.983	0.016
8	F1	T3	E2	1.102	1.839	1.102	1.839	0.973	0.018
9	F1	T3	E3	1.101	1.087	1.101	1.087	0.986	0.007
10	F2	T1	E1	1.094	3.327	1.094	3.327	0.996	0.003
11	F2	T1	E2	1.061	1.432	1.061	1.432	0.997	0.001
12	F2	T1	E3	1.061	0.926	1.061	0.926	0.998	0.001
13	F2	T2	E1	1.283	3.099	1.283	3.099	0.982	0.027
14	F2	T2	E2	1.202	2.081	1.202	2.081	0.988	0.008
15	F2	T2	E3	1.413	1.184	1.413	1.184	0.994	0.005
16	F2	T3	E1	0.951	4.107	0.951	4.107	0.994	0.006
17	F2	T3	E2	0.989	2.355	0.989	2.355	0.997	0.002
18	F2	T3	E3	0.969	1.163	0.969	1.163	0.999	0.000

**Fuente :** Elaboración propia

## MODELO MATEMÁTICO DE DOS TÉRMINOS EXPONENCIAL

$X = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t) + (1-a) \cdot \text{EXP}(-K \cdot a \cdot t)$							
N° experimento	PARAMETROS			a	k	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR				
1	F1	T1	E1	3.092	2.821	0.768	0.119
2	F1	T1	E2	3.357	1.516	0.856	0.061
3	F1	T1	E3	3.455	1.059	0.882	0.048
4	F1	T2	E1	3.073	4.464	0.745	0.130
5	F1	T2	E2	3.150	2.954	0.791	0.095
6	F1	T2	E3	3.229	1.463	0.865	0.046
7	F1	T3	E1	3.229	3.965	0.728	0.176
8	F1	T3	E2	3.473	2.493	0.815	0.103
9	F1	T3	E3	3.434	1.463	0.859	0.063
10	F2	T1	E1	3.223	4.350	0.737	0.122
11	F2	T1	E2	3.304	1.961	0.846	0.056
12	F2	T1	E3	3.257	1.239	0.852	0.053
13	F2	T2	E1	3.888	4.181	0.633	0.357
14	F2	T2	E2	3.665	2.798	0.785	0.125
15	F2	T2	E3	4.159	1.570	0.800	0.140
16	F2	T3	E1	2.923	5.409	0.741	0.152
17	F2	T3	E2	2.957	3.014	0.794	0.089
18	F2	T3	E3	2.939	1.513	0.850	0.044

Fuente : Elaboración propia

## MODELO MATEMÁTICO DE WANG AND SINGH

$X = 1+at-bt^2$							
N° experimento	PARAMETROS			a	b	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR				
1	F1	T1	E1	-0.677	0.004	0.660	0.174
2	F1	T1	E2	-0.301	0.016	0.669	0.141
3	F1	T1	E3	-0.191	0.012	0.663	0.137
4	F1	T2	E1	-1.422	-0.495	0.684	0.162
5	F1	T2	E2	-0.865	-0.165	0.682	0.145
6	F1	T2	E3	-0.409	-0.038	0.713	0.098
7	F1	T3	E1	-0.850	0.113	0.630	0.239
8	F1	T3	E2	-0.487	0.055	0.625	0.208
9	F1	T3	E3	-0.289	0.015	0.653	0.155
10	F2	T1	E1	-1.281	-0.403	0.670	0.153
11	F2	T1	E2	-0.559	-0.077	0.700	0.108
12	F2	T1	E3	-0.326	-0.021	0.697	0.108
13	F2	T2	E1	-0.514	0.434	0.482	0.504
14	F2	T2	E2	-0.729	-0.111	0.600	0.232
15	F2	T2	E3	-0.205	0.037	0.506	0.345
16	F2	T3	E1	-1.763	-0.709	0.701	0.175
17	F2	T3	E2	-0.929	-0.187	0.712	0.125
18	F2	T3	E3	-0.472	-0.054	0.755	0.072

Fuente : Elaboración propia

## MKODELO MATEMÁTICO DE HENDERSON Y PABIS MODIFICADO

$X = a \cdot \text{EXP}(-Kt) + b \cdot \text{EXP}(-gt) + c \cdot \text{EXP}(-ht)$											
N° experimento	PARAMETROS			a	K	b	g	c	h	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR								
1	F1	T1	E1	0.696	2.215	0.696	2.215	0.688	2.215	0.990	0.009
2	F1	T1	E2	0.715	1.121	0.715	1.121	0.715	1.120	0.990	0.005
3	F1	T1	E3	0.730	0.773	0.730	0.773	0.732	0.773	0.991	0.004
4	F1	T2	E1	0.686	3.424	0.686	3.424	0.686	3.425	0.996	0.004
5	F1	T2	E2	0.693	2.250	0.693	2.250	0.694	2.250	0.996	0.003
6	F1	T2	E3	0.689	1.078	0.689	1.078	0.689	1.077	0.998	0.001
7	F1	T3	E1	0.698	2.980	0.698	2.980	0.698	2.980	0.983	0.033
8	F1	T3	E2	0.735	1.839	0.735	1.839	0.735	1.839	0.973	0.024
9	F1	T3	E3	0.738	1.087	0.738	1.087	0.726	1.088	0.986	0.008
10	F2	T1	E1	0.729	3.327	0.729	3.327	0.729	3.327	0.996	0.003
11	F2	T1	E2	0.709	1.424	0.709	1.424	0.705	1.448	0.997	0.001
12	F2	T1	E3	0.707	0.925	0.707	0.925	0.707	0.928	0.998	0.001
13	F2	T2	E1	0.855	3.099	0.855	3.099	0.855	3.099	0.982	0.054
14	F2	T2	E2	0.801	2.081	0.801	2.081	0.801	2.080	0.988	0.010
15	F2	T2	E3	0.938	1.184	0.938	1.184	0.950	1.184	0.994	0.005
16	F2	T3	E1	0.629	4.108	0.629	4.108	0.643	4.108	0.994	0.018
17	F2	T3	E2	0.659	2.356	0.659	2.356	0.660	2.355	0.997	0.002
18	F2	T3	E3	0.646	1.177	0.646	1.177	0.646	1.138	0.999	0.000

Fuente : Elaboración propia

## MODELO MATEMÁTICO DE VERMA

$X = a \cdot \text{EXP}(-K \cdot t) + (1-a) \cdot \text{EXP}(-g \cdot t)$								
N° experimento	PARAMETROS			a	K	g	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR					
1	F1	T1	E1	8.148	3.721	5.269	0.769	0.133
2	F1	T1	E2	2.534	1.279	9.275	0.859	0.063
3	F1	T1	E3	2.457	0.850	8.783	0.889	0.047
4	F1	T2	E1	1.000	1.816	1.816	0.662	0.198
5	F1	T2	E2	1.000	1.206	1.206	0.651	0.175
6	F1	T2	E3	2.168	1.123	15.960	0.875	0.045
7	F1	T3	E1	13.351	5.527	6.877	0.730	0.209
8	F1	T3	E2	11.737	3.520	4.742	0.818	0.111
9	F1	T3	E3	3.000	1.357	6.215	0.859	0.066
10	F2	T1	E1	15.668	0.860	0.818	0.663	0.172
11	F2	T1	E2	2.254	1.517	27.912	0.854	0.055
12	F2	T1	E3	2.085	0.912	181.657	0.872	0.047
13	F2	T2	E1	1.027	1.569	137.217	0.438	0.656
14	F2	T2	E2	3.731	2.824	9.991	0.785	0.135
15	F2	T2	E3	3.289	1.341	11.389	0.804	0.144
16	F2	T3	E1	1.000	2.358	2.357	0.676	0.237
17	F2	T3	E2	1.955	2.565	118.759	0.787	0.102
18	F2	T3	E3	1.870	1.124	127.586	0.864	0.042

**Fuente :** Elaboración propia

## MODELO MATEMÁTICO DE MIDILLI

$X = a \cdot \text{EXP}(-Kt^n) + b \cdot t$									
N° experimento	PARAMETROS			a	K	n	b	R2	Varianza
	FLUJO	TEMPERATURA	ESPESOR						
1	F1	T1	E1	2.013	2.172	1.123	-0.042	0.997	0.002
2	F1	T1	E2	2.023	0.987	1.174	-0.017	0.999	0.001
3	F1	T1	E3	2.043	0.630	1.198	-0.009	0.999	0.001
4	F1	T2	E1	2.024	4.114	1.190	0.008	0.999	0.000
5	F1	T2	E2	2.022	2.395	1.159	-0.002	1.000	0.000
6	F1	T2	E3	2.023	1.044	1.074	0.001	0.999	0.000
7	F1	T3	E1	2.011	3.549	1.300	-0.044	0.998	0.001
8	F1	T3	E2	2.008	1.999	1.516	-0.008	0.997	0.002
9	F1	T3	E3	2.030	0.929	1.281	-0.010	0.997	0.001
10	F2	T1	E1	2.158	3.957	1.169	0.016	0.998	0.001
11	F2	T1	E2	2.069	1.446	1.119	0.007	0.999	0.000
12	F2	T1	E3	2.123	0.910	0.977	-0.007	0.999	0.000
13	F2	T2	E1	2.455	4.265	1.409	-0.013	1.000	0.001
14	F2	T2	E2	2.264	2.376	1.360	0.006	1.000	0.000
15	F2	T2	E3	2.670	1.087	1.195	-0.007	1.000	0.000
16	F2	T3	E1	1.869	5.272	1.237	-0.011	1.000	0.000
17	F2	T3	E2	1.939	2.387	1.091	-0.016	1.000	0.000
18	F2	T3	E3	1.979	1.177	0.924	-0.005	1.000	0.000

Fuente : Elaboración propia

## ANEXOS N° 06

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA ELECCION DEL MODELO MATEMATICO CON EL SOFTWARE MINITAB 17

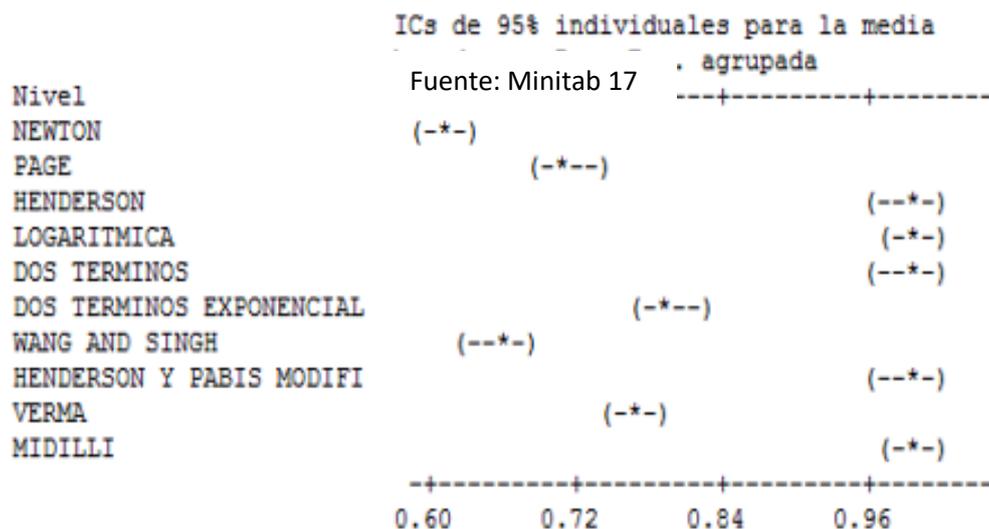
#### ANÁLISIS DE CORRECCIÓN DE ÍNDICE DE CORRELACIÓN

ANOVA unidireccional: NEWTON, PAGE, HENDERSON, LOGARITMICA, DOS TERMINOS, ...

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Factor	9	4.04266	0.44918	138.42	0.000
Error	170	0.55167	0.00325		
Total	179	4.59433			

S = 0.05697    R-cuad. = 87.99%    R-cuad. (ajustado) = 87.36%

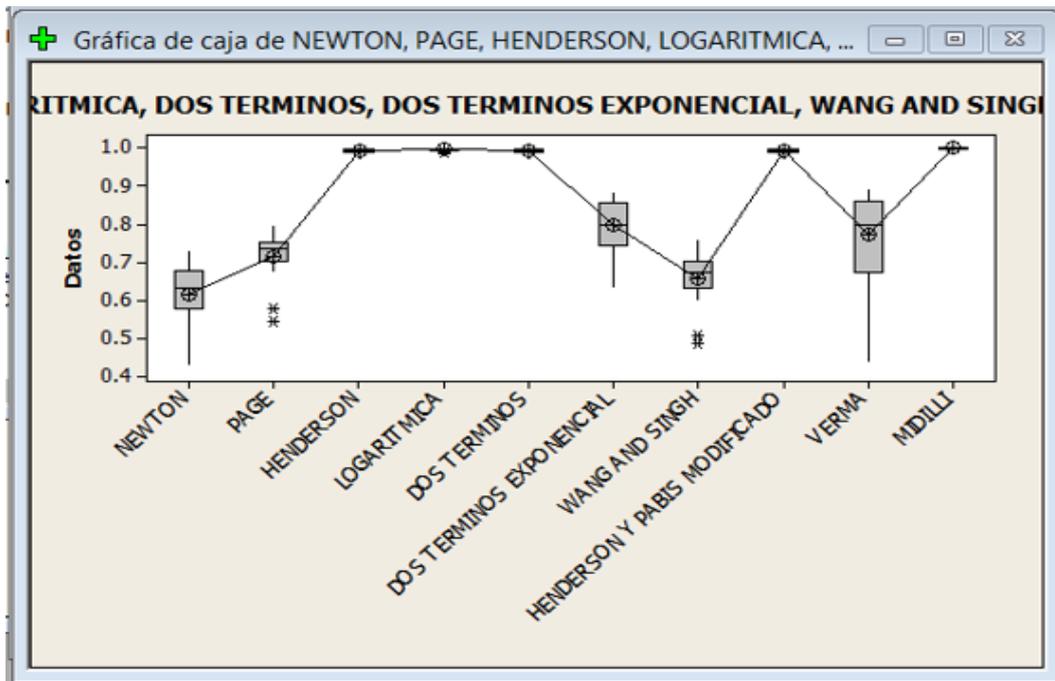
Nivel	N	Media	Desv.Est.
NEWTON	18	0.6145	0.0773
PAGE	18	0.7139	0.0628
HENDERSON	18	0.9915	0.0071
LOGARITMICA	18	0.9959	0.0035
DOS TERMINOS	18	0.9915	0.0071
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	18	0.7970	0.0642
WANG AND SINGH	18	0.6556	0.0691
HENDERSON Y PABIS MODIFI	18	0.9915	0.0071
VERMA	18	0.7696	0.1161
MIDILLI	18	0.9989	0.0009



Desv.Est. agrupada = 0.0570

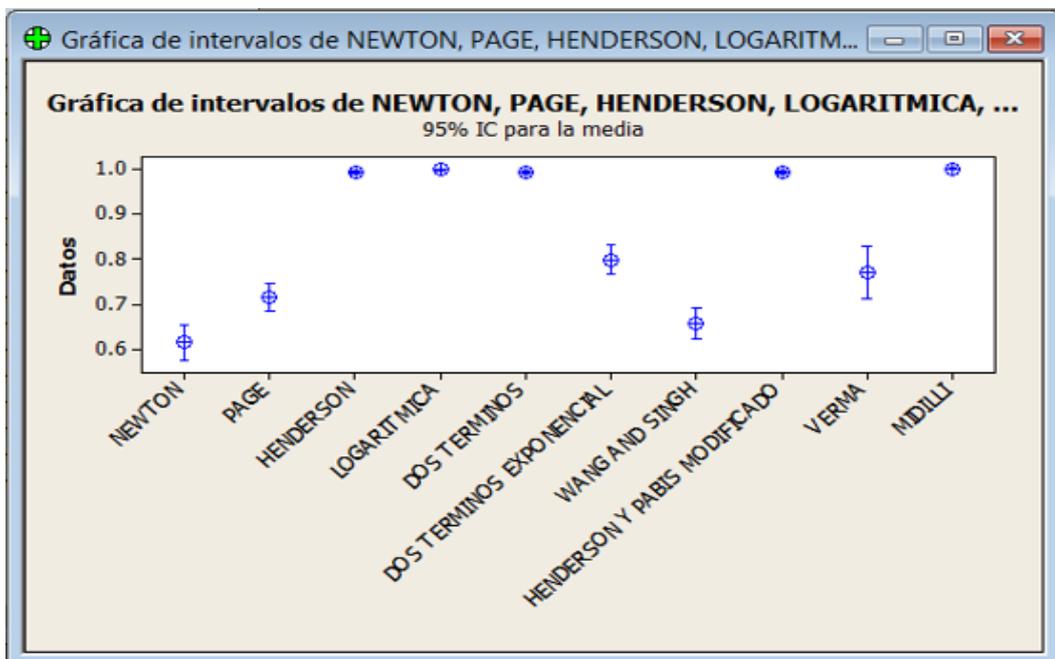
**Fuente** : Datos elaborados con el software Minitab 17

## GRÁFICO DE CAJA



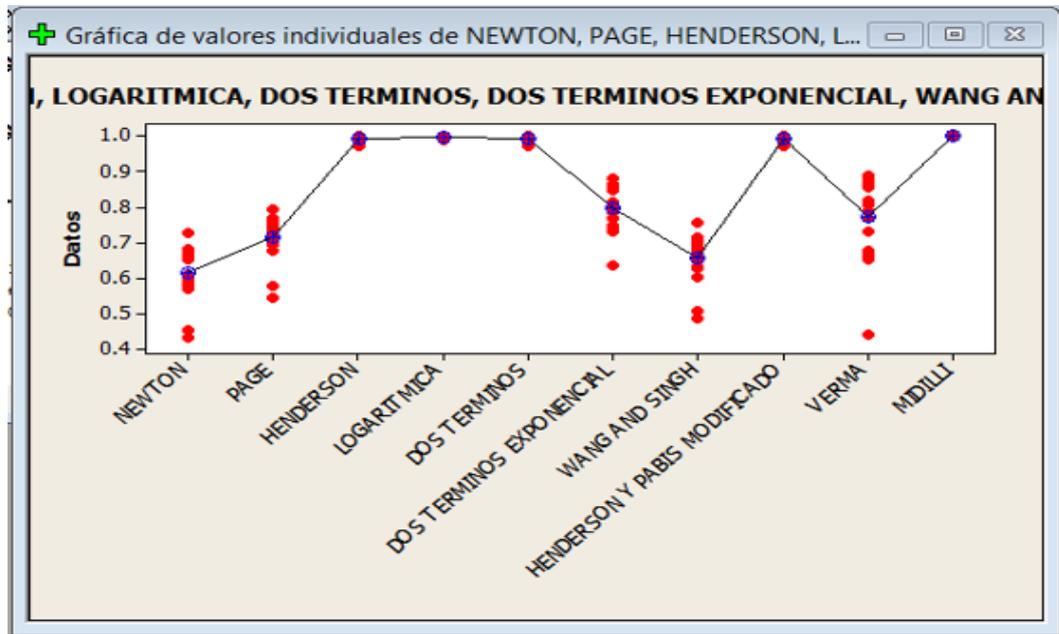
Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

## GRÁFICO DE INTERVALOS



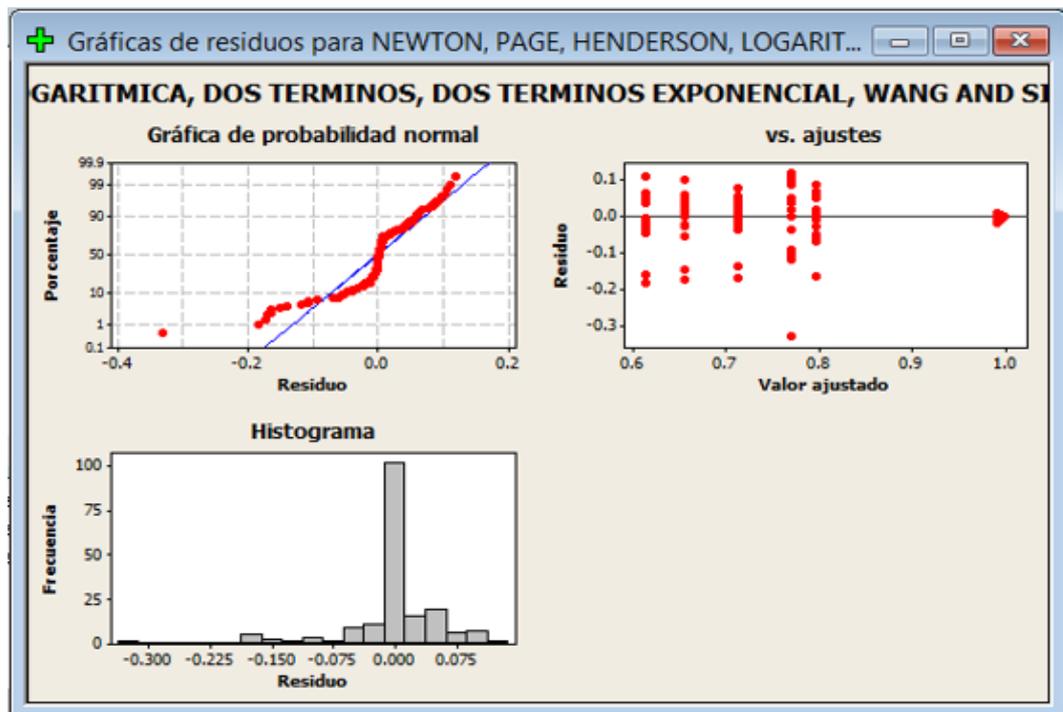
Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

## GRÁFICO DE VALORES INDIVIDUALES



Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

## GRÁFICOS DE RESIDUOS



Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

## ANÁLISIS DE LA VARIANZA

**ANOVA unidireccional: NEWTON°, PAGE°, HENDERSON°, LOGARITMICA°, ...**

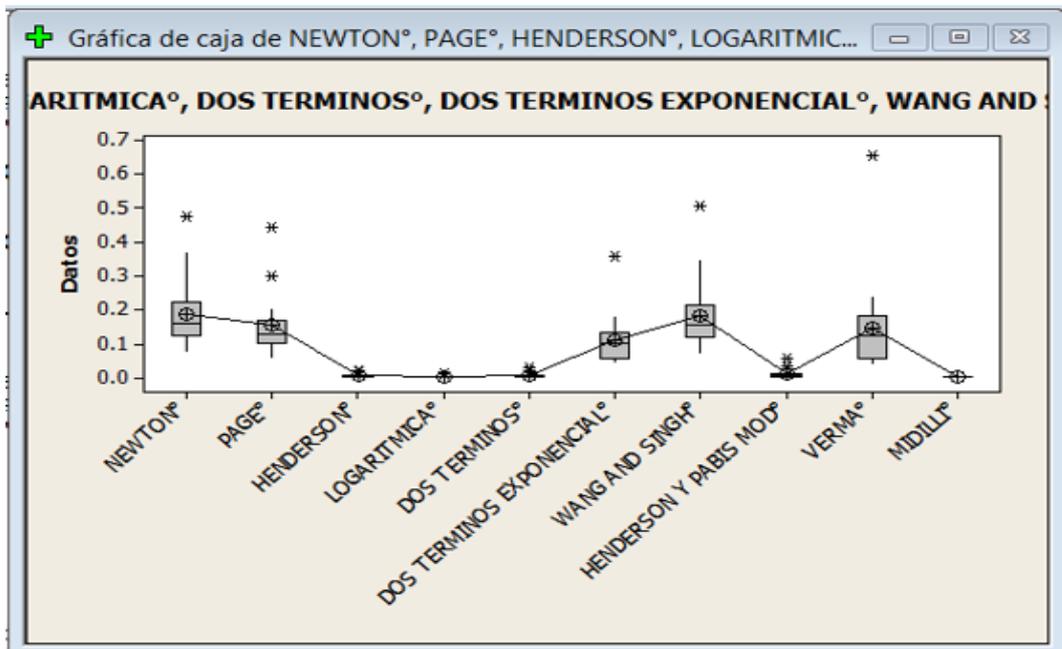
Fuente	GL	SC	CM	F	P
Factor	9	1.08664	0.12074	22.41	0.000
Error	170	0.91571	0.00539		
Total	179	2.00235			

S = 0.07339    R-cuad. = 54.27%    R-cuad. (ajustado) = 51.85%

Nivel	N	Media	Desv.Est.
NEWTON°	18	0.18554	0.09678
PAGE°	18	0.15247	0.09063
HENDERSON°	18	0.00488	0.00506
LOGARITMICA°	18	0.00263	0.00284
DOS TERMINOS°	18	0.00637	0.00721
DOS TERMINOS EXPONENCIAL	18	0.10986	0.07383
WANG AND SINGH°	18	0.18225	0.10205
HENDERSON Y PABIS MOD°	18	0.01030	0.01394
VERMA°	18	0.14657	0.14191
MIDILLI°	18	0.00067	0.00058

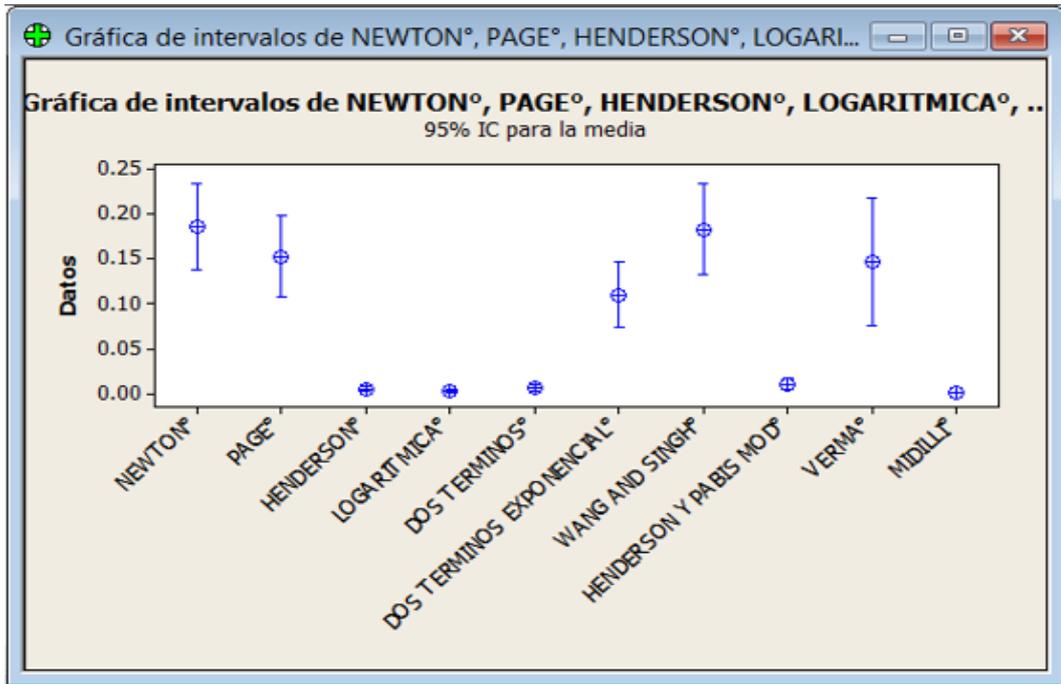
Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

## GRÁFICO DE CAJA



Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

## GRÁFICO DE INTERVALOS



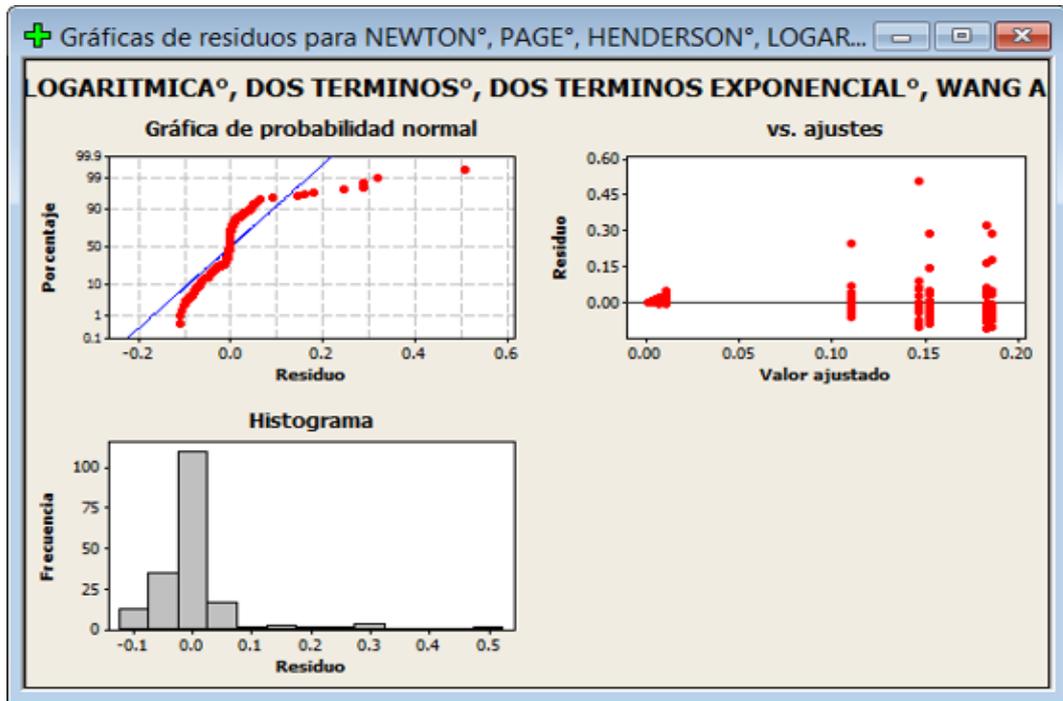
Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

## GRÁFICO DE VALORES INDIVIDUALES



Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

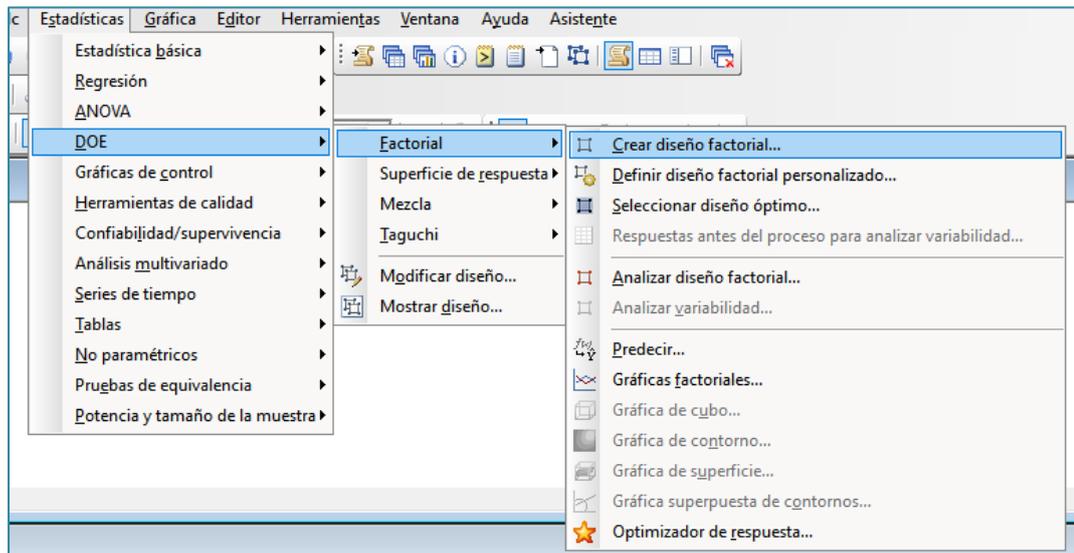
## GRÁFICO DE RESIDUOS



Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

## ANEXOS N° 07

### OBTENCIÓN DE LA CONDICIÓN ÓPTIMA DE SECADO



Sesión

Bienvenido a Minitab, presione F1 para obtener ayuda.

**Diseño factorial de múltiples niveles**

Factores: 3      Réplicas: 1  
 Corridas base: 18      Total de corridas: 18  
 Bloques base: 1      Total de bloques: 1

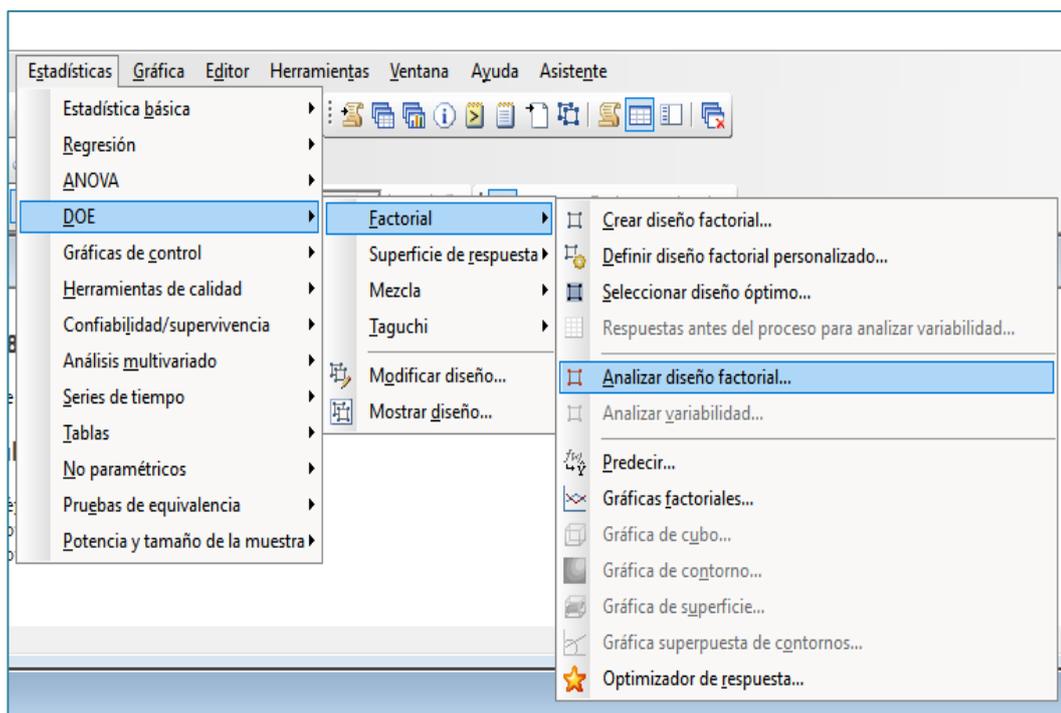
Número de niveles: 2; 3; 3

---

Hoja de trabajo 1 \*\*\*

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Flujo	Temperatura	Espesor
1	1	1	1	1	480	55	1.5
2	2	2	1	1	480	55	3.0
3	3	3	1	1	480	55	5.0
4	4	4	1	1	480	65	1.5
5	5	5	1	1	480	65	3.0
6	6	6	1	1	480	65	5.0
7	7	7	1	1	480	75	1.5
8	8	8	1	1	480	75	3.0

Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17



Sesión

### Regresión factorial general: Tiempo vs. Flujo; Temperatura; Espesor

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Flujo	2	480; 750
Temperatura	3	55; 65; 75
Espesor	3	1.5; 3.0; 5.0

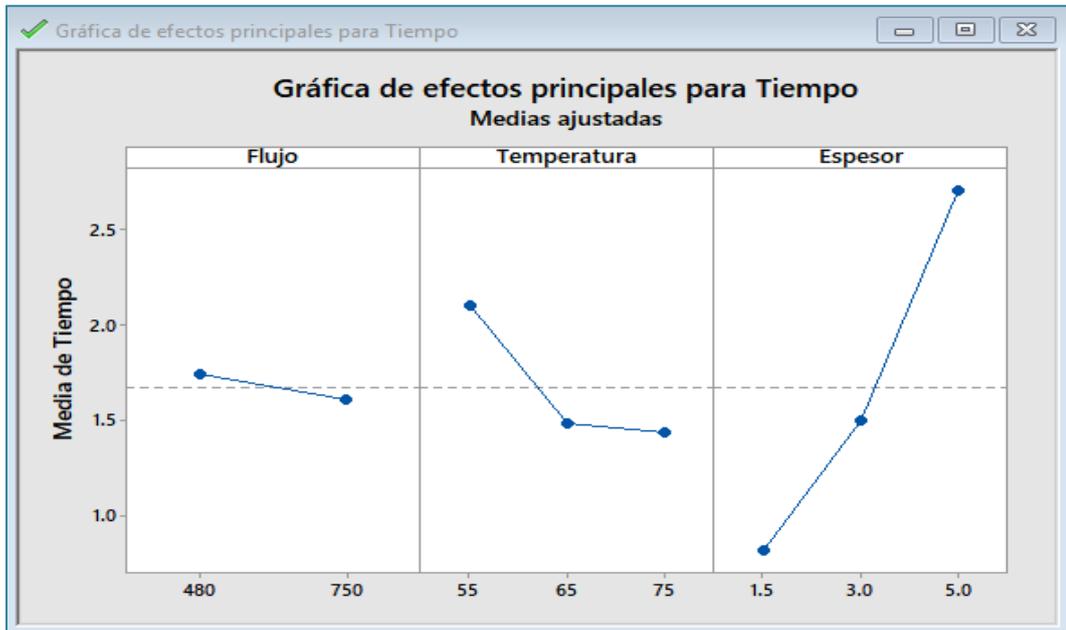
Análisis de Varianza

Hoja de trabajo 1 \*\*\*

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Flujo	Temperatura	Espesor	Tiempo
1	1	1	1	1	480	55	1.5	1.14903
2	2	2	1	1	480	55	3.0	2.28313
3	3	3	1	1	480	55	5.0	3.34265
4	4	4	1	1	480	65	1.5	0.75703
5	5	5	1	1	480	65	3.0	1.17215
6	6	6	1	1	480	65	5.0	2.60146
7	7	7	1	1	480	75	1.5	0.79198
8	8	8	1	1	480	75	3.0	1.25332

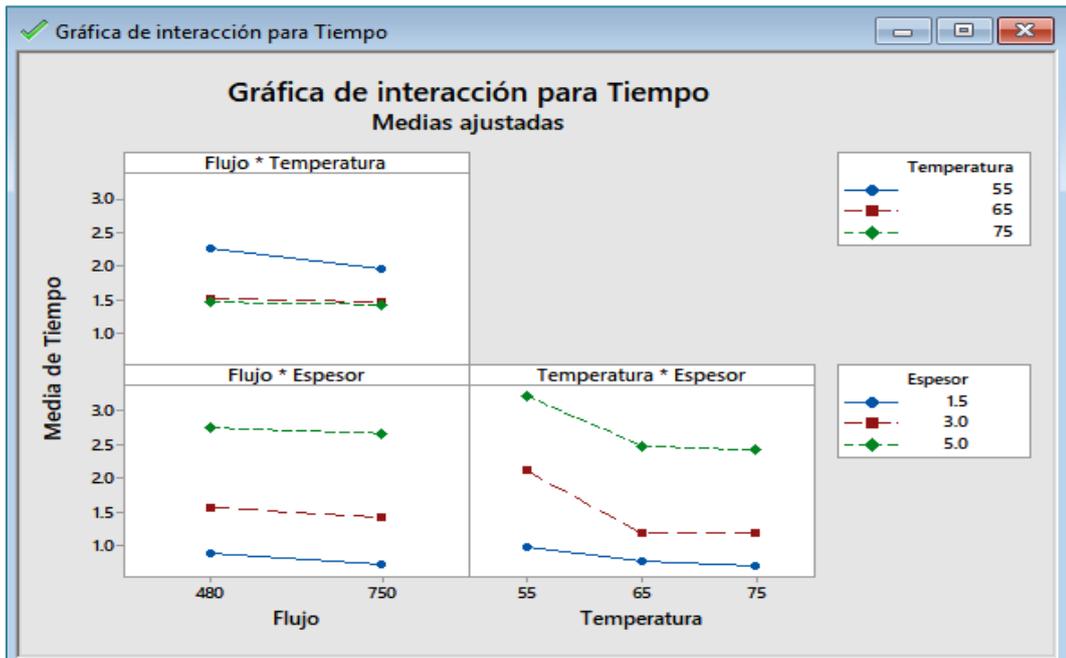
Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

## GRÁFICO DE EFECTOS PRINCIPALES PARA TIEMPO



Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

## GRAFICA DE INTERACCIÓN PARA TIEMPO



Fuente : Datos elaborados con el software Minitab 17

ANEXOS N° 08

TABLA DE DATOS PARA LA CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO A LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DEL PROCESO

<b><math>N = -(L_s/A) \cdot (dX/dt)</math></b>			
$L_s = 0.78$			
$A = 28.27$		$(cm^2)$	
$L_s/A = 0.028$			
<b>t(h)</b>	<b>X</b>	<b>dX/dt</b>	<b>N</b>
0	2.02	0.01	
0.1	1.55	-4.90	0.14
0.2	1.11	-3.97	0.11
0.3	0.76	-2.95	0.08
0.4	0.51	-2.08	0.06
0.5	0.34	-1.42	0.04
0.6	0.22	-0.95	0.03
0.7	0.14	-0.62	0.02
0.8	0.09	-0.40	0.01
0.9	0.06	-0.25	0.01

Fuente : Elaboración propia

Donde :

**N** : Velocidad de secado (masa humedad/área-tiempo)

**Ls = Wss** : Peso del solido seco

**A** : Superficie del solido expuesto al secado

**dX/dt** : Variación del contenido de humedad respecto al tiempo