

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TESIS**

**ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE SECADO DEL MAÍZ MOTE BLANCO GIGANTE DEL CUSCO  
(*Zea mays* L.) EN UN SECADOR DE BANDEJAS A ESCALA LABORATORIO**

**PRESENTADO POR:**

Br. FRANK CESAR DELGADO MONTALVO

Br. CESAR AUGUSTO SISA CONDORHUAMAN

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**ASESORA:**

Dra. MERY LUZ MASCO ARRIOLA

**CUSCO – PERÚ**

**2025**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

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

El que suscribe, el **Asesor** ..... MERY LUZ MASCO ARRIOLA .....  
..... quien aplica el software de detección de similitud al  
trabajo de investigación/tesis titulada: ..... ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE SECADO DEL MAÍZ MOTE BLANCO .....  
GIGANTE DEL CUSCO (*Zea mays* L.) EN UN SECADOR DE BANDEJAS A ESCALA LABORATORIO .....

Presentado por: ..... FRANK CESAR DELGADO MONTALVO ..... DNI N° ..... 70822620 ..... ;  
presentado por: ..... CESAR AUGUSTO SISA CONDORHUAMAN ..... DNI N°: ..... 76223337 .....  
Para optar el título Profesional/Grado Académico de ..... INGENIERO QUÍMICO .....

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

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

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

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

Cusco, ...08... de ..... ENERO ..... de 20.26.....

  
Firma

Post firma..... MERY LUZ MASCO ARRIOLA .....

Nro. de DNI..... 23847057 .....

ORCID del Asesor..... 0000-0002-5156-6464 .....

#### Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** ..... 27259:535536623 .....

**FRANK DELGADO**

**TESIS CINETICA DE SECADO DE MAIZ  
MOTE\_LEVANTAMIENTO PARA DICTAMINANTES (3).docx**

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

---

**Document Details**

Submission ID

trn:oid:::27259:535536623

169 Pages

Submission Date

Dec 2, 2025, 7:09 PM GMT-5

30,090 Words

Download Date

Dec 2, 2025, 7:18 PM GMT-5

153,654 Characters

File Name

TESIS CINETICA DE SECADO DE MAIZ MOTE\_LEVANTAMIENTO PARA DICTAMINANTES (3).docx

File Size

7.9 MB




## 2% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

### Filtered from the Report



- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 15 words)
- Submitted works
- Crossref posted content database

### Top Sources

- 2%  Internet sources
- 0%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

### Integrity Flags

#### 2 Integrity Flags for Review

-  **Replaced Characters**  
32 suspect characters on 17 pages  
Letters are swapped with similar characters from another alphabet.
-  **Hidden Text**  
28 suspect characters on 4 pages  
Text is altered to blend into the white background of the document.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

## TABLA DE CONTENDO

AGRADECIMIENTO .....	xv
DEDICATORIA .....	xvi
RESUMEN .....	xvii
ABSTRAC .....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	xix
CAPÍTULO I .....	20
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.1. Problemática.....	20
1.2. Formulación del problema .....	21
1.2.1. Problema general .....	21
1.2.2. Problemas específicos.....	21
1.3. Justificación de la investigación.....	21
1.3.1. Justificación técnica .....	21
1.3.2. Justificación económica .....	22
1.4. Objetivos de la investigación .....	22
1.4.1. Objetivo general.....	22
1.4.2. Objetivos específicos .....	22
1.5. Hipótesis de investigación: .....	23
1.5.1. Hipótesis general:.....	23
1.5.2. Hipótesis específica: .....	23
1.6. Parámetros y variables de operación.....	23
1.6.1. Parámetro de operación.....	23
1.6.2. Variables independientes .....	23
1.6.3. Variables dependientes .....	24
CAPÍTULO II.....	25
2. MARCO TEÓRICO.....	25
2.1. Antecedentes .....	25
2.2. Bases teóricas .....	29
2.2.1. Maíz .....	29

2.2.2.	Maíz blanco gigante de Cusco .....	32
2.2.3.	Maíz mote de Cusco.....	35
2.2.4.	Clasificación taxonómica:.....	36
2.2.5.	Nixtamalización. ....	36
2.2.6.	Almidón de maíz.....	37
2.2.7.	Propiedades organolépticas.....	38
2.3.	Secado .....	38
2.3.1.	Factores determinantes en la elección del método de secado (lotes vs. continuo) .....	38
2.3.2.	Criterios a considerar para la elección del método de secado .....	39
2.3.3.	Temperatura de secado. ....	39
2.3.4.	Entalpia .....	40
2.3.5.	Humedad residual .....	40
2.3.6.	Actividad del agua .....	41
2.4.	Operación general de secado:.....	41
2.4.1.	Variables que influyen en la velocidad de secado .....	41
2.4.2.	Fases de secado .....	43
2.4.3.	Clasificación de métodos de secado del maíz.....	46
2.5.	Ecuaciones de los modelos cinéticos de la curva de secado .....	52
2.6.	Psicrometría en el secado .....	54
2.6.1.	Software para cálculo de propiedades Psicrométricas .....	56
2.6.2.	Balance de materia y energía .....	56
2.6.3.	Balance de masa y energía en un secador discontinuo o batch.....	57
2.7.	Indicadores de calidad en alimentos para el consumo humano .....	62
2.7.1.	Criterios microbiológicos.....	62
2.7.2.	Rehidratación de maíz mote blanco gigante del Cusco. ....	64
CAPÍTULO III.....		65
3.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	65
3.1.	Materiales y equipos .....	65
3.1.1.	Materiales:.....	65
3.1.2.	Instrumentos:.....	65

3.1.3.	Equipo (secador de bandejas a escala laboratorio): .....	66
3.1.4.	Reactivos:.....	67
3.1.5.	Software: .....	67
3.2.	Métodos.....	68
3.2.1.	Procedimiento del pelado del maíz .....	68
3.2.2.	Evaluar el efecto de la velocidad de aire en el secado .....	71
3.2.3.	Evaluar el efecto de la temperatura del aire.....	73
3.2.4.	Procedimiento de cálculos para la velocidad de secado (R) .....	73
3.2.5.	Evaluación de la cinética de secado (modelos matemáticos) .....	75
3.2.6.	Tipo y diseño de la investigación.....	76
3.2.7.	Factores de estudio para la evaluación de la capacidad de rehidratación del Maíz Mote Gigante del Cusco secado a tres diferentes temperaturas.....	80
CAPÍTULO IV.....		81
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	81
4.1.	Proceso de secado. ....	81
4.2.	Evaluación del efecto de la temperatura en la cinética de secado de maíz mote blanco gigante de Cusco ( <i>Zea mays</i> L.). ....	85
4.3.	Evaluación del efecto de la velocidad del aire en la cinética de secado de maíz mote blanco gigante de Cusco ( <i>Zea mays</i> L.). ....	89
4.4.	Ajuste a modelos matemáticos de la cinética del secado de Maíz mote blanco gigante del Cusco ( <i>Zea mays</i> L.).....	95
4.4.1.	Evaluación estadística del ajuste a los diez modelos cinéticos de secado	99
4.4.2.	Parámetros experimentales a los diez modelos cinéticos planteados ....	103
4.4.3.	Parámetro cinético ajustado al modelo de Page modificado IV .....	105
4.5.	Evaluación de la calidad físico, química y organoléptica del maíz mote Blanco Gigante del Cusco ( <i>Zea mays</i> L.). ....	118
4.5.1.	Determinación experimental de la humedad de equilibrio .....	118
4.5.2.	Análisis fisicoquímico .....	119
4.5.3.	Capacidad de rehidratación.....	119
4.6.	Balance de masa y energía .....	121
4.6.1.	Balance de masa y energía para el secado de maíz mote.....	121
CONCLUSIONES .....		132

RECOMENDACIONES.....	133
BIBLIOGRAFÍA .....	134
ANEXOS .....	142
APÉNDICE.....	152



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Variedades de maíz.</i> .....	30
<b>Figura 2</b> <i>Estructura del grano de maíz</i> .....	30
<b>Figura 3</b> <i>Regiones donde se obtiene la materia prima para la elaboración del maíz mote</i> .....	32
<b>Figura 4</b> <i>Maíz mote</i> .....	35
<b>Figura 5</b> <i>Diagrama de humedad vs tiempo</i> .....	43
<b>Figura 6</b> <i>Secador de contenedor tipo aire natural/secado a baja temperatura</i> .....	47
<b>Figura 7</b> <i>Secador de capas</i> .....	48
<b>Figura 8</b> <i>Columna de secado tipo batch de tipo cruzado.</i> .....	49
<b>Figura 9</b> <i>Secador de horno o estufa</i> .....	50
<b>Figura 10</b> <i>Secador de bandejas</i> .....	51
<b>Figura 11</b> <i>Secador de túnel</i> .....	52
<b>Figura 12</b> <i>Diagrama psicrométrico</i> .....	55
<b>Figura 13</b> <i>Software de versión gratuita PsyCalc</i> .....	56
<b>Figura 14</b> <i>Diagrama de flujo de bloques para el balance global del secador</i> .....	57
<b>Figura 15</b> <i>Secador de bandejas a escala laboratorio de Escuela profesional de Ingeniería Química</i> .....	67
<b>Figura 16</b> <i>Secador de bandejas a escala laboratorio de Escuela profesional de Ingeniería Química</i> .....	68
<b>Figura 17</b> <i>Diagrama de flujo de bloques del proceso de secado por lotes (batch) del maíz mote</i> .....	69
<b>Figura 18</b> <i>Curva de secado del maíz mote blanco gigante del Cusco</i> .....	81
<b>Figura 19</b> <i>Curva de la velocidad de secado vs la humedad en base seca del maíz mote blanco gigante del Cusco</i> .....	83
<b>Figura 20</b> <i>Efecto de la temperatura en la curva de secado a una velocidad de aire de 1.78 m/s</i> 85	
<b>Figura 21</b> <i>Efecto de la temperatura en la curva de velocidad de secado a una velocidad de aire de 1.78 m/s</i> .....	86
<b>Figura 22</b> <i>Efecto de la temperatura en la curva de secado a una velocidad de flujo de aire de 3.56 m/s</i> .....	87
<b>Figura 23</b> <i>Efecto de la temperatura en la curva de velocidad de secado a una velocidad de flujo de aire de 3.56 m/s</i> .....	88

<b>Figura 24</b> <i>Efecto de la velocidad del aire en la curva de secado a una temperatura de aire 40°C</i>	89
<b>Figura 25</b> <i>Efecto de la velocidad del aire en la curva de velocidad de secado a una temperatura de 50°C</i>	90
<b>Figura 26</b> <i>Efecto de la velocidad del aire en la curva de secado a una temperatura de aire 50°C</i>	91
<b>Figura 27</b> <i>Efecto de la velocidad del aire en la curva de velocidad de secado a una temperatura de 50 °C</i>	92
<b>Figura 28</b> <i>Efecto de la velocidad del aire en la curva de secado a una temperatura de aire 60°C</i>	93
<b>Figura 29</b> <i>Efecto de la velocidad del aire en la curva de velocidad de secado a temperatura de 60 °C</i>	94
<b>Figura 30</b> <i>Curva de secado experimental ajustada con el modelo matemático de Lewis a condiciones de 40 °C y 1.78 m/s</i>	98
<b>Figura 31</b> <i>Ajustes de los modelos matemáticos a condiciones de 40 °C, 50 °C y 60°C a velocidad de aire de 1.78 m/s y 3.56 m/s</i>	102
<b>Figura 32</b> <i>Curva de secado (XR) vs t(tiempo) de 40 °C, 50 °C y 60°C a velocidad de aire de 1.78 m/s</i>	105
<b>Figura 33</b> <i>Gráfica de línea ajustada en función de <math>\ln(k)</math> vs <math>1/T</math> con velocidad de aire 1,78 m/s</i>	108
<b>Figura 34</b> <i>Gráfica de línea ajustada en función de <math>\ln(k)</math> vs <math>1/T</math> con velocidad de aire 3.56 m/s</i>	110
<b>Figura 35</b> <i>Relación entre la constante de secado (k) y la temperatura con ajuste mediante la ecuación de Arrhenius (flujo de aire: 1.78 m/s)</i>	111
<b>Figura 36</b> <i>Relación entre la constante de secado (k) y la temperatura con ajuste mediante la ecuación de Arrhenius (flujo de aire: 3.56 m/s)</i>	112
<b>Figura 37</b> <i>Gráfica de tiempo vs XR con modelo de page modificado IV con flujo de aire 1.78 m/s</i>	113
<b>Figura 38</b> <i>Gráfica de tiempo vs XR con modelo de page modificado IV con flujo de aire 3.56 m/s</i>	114

<b>Figura 39</b> <i>Gráfica de comparación de XR experimental y calculado con la Ecuación General (28)</i> <i>a 1.78m/s</i> .....	116
<b>Figura 40</b> <i>Gráfica de comparación de XR experimental y calculado con la Ecuación General (28)</i> <i>a 3.56m/s</i> .....	117
<b>Figura 41</b> <i>Evaluación de la calidad fisicoquímica.</i> .....	119
<b>Figura 42</b> <i>Curvas del proceso de rehidratación</i> .....	121
<b>Figura 43</b> <i>Balance global de materia</i> .....	122

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Clasificación por tipo de endosperma del maíz</i> .....	31
<b>Tabla 2</b> <i>Características del maíz blanco gigante Cusco</i> .....	33
<b>Tabla 3</b> <i>Comparativa del crecimiento de exportación del MBGC y maíz mote del Cusco (2020 – 2023)</i> .....	34
<b>Tabla 4</b> <i>Valor nutricional de maíz blanco gigante del Cusco</i> .....	34
<b>Tabla 5</b> <i>Taxonomía del maíz</i> .....	36
<b>Tabla 6</b> <i>Contenido de amilosa y amilopectina en almidones</i> .....	37
<b>Tabla 7</b> <i>Contenido de humedad de granos y temperatura máxima tolerable</i> .....	40
<b>Tabla 8</b> <i>Modelos cinéticos para el secado de alimentos y productos agrícolas</i> .....	53
<b>Tabla 9</b> <i>constantes y parámetros en modelos matemáticos de secado</i> .....	54
<b>Tabla 10</b> <i>Aptitud microbiológica para el consumo humano</i> .....	63
<b>Tabla 11</b> <i>Características del secador a escala laboratorio</i> .....	66
<b>Tabla 12</b> <i>Características del secador a escala laboratorio</i> .....	76
<b>Tabla 13</b> <i>Factores de estudio de la investigación</i> .....	78
<b>Tabla 14</b> <i>Combinación de factores para pruebas experimentales</i> .....	78
<b>Tabla 15</b> <i>Toma de datos para evaluar la capacidad de rehidratación de las muestras secada (40°C, 50°C y 60°C)</i> .....	80
<b>Tabla 16</b> <i>Humedad residual y constante de secado a 40 °C y 1.78 m/s “Modelo de Lewis”</i> .....	95
<b>Tabla 17</b> <i>Coeficientes estadísticos aplicados a 10 modelos matemáticos</i> .....	100
<b>Tabla 18</b> <i>Parámetros experimentales (<math>\alpha</math>, <math>k</math>, <math>n</math> y <math>b</math>) de los modelos planteados</i> .....	104
<b>Tabla 19</b> <i>Parámetros experimentales (<math>\alpha</math>, <math>k</math> y <math>n</math>) de los modelos planteados con flujo de aire 1.78 m/s</i> .....	105
<b>Tabla 20</b> <i>Datos linealizados de <math>T^\circ</math> y <math>\ln(k)</math> para el cálculo de correlación con flujo de 1.78 m/s</i> .....	107
<b>Tabla 21</b> <i>Datos de parámetros y <math>k</math> aplicada a una regresión con Arrhenius con flujo de aire 1.78 m/s</i> .....	109
<b>Tabla 22</b> <i>Datos no linealizados de <math>T^\circ</math> y <math>\ln(k)</math> para el cálculo de correlación con flujo de 3.56 m/s</i> .....	110
<b>Tabla 23</b> <i>Datos de parámetros y <math>k</math> aplicada a una regresión con Arrhenius con flujo de aire 3.56 m/s</i> .....	111

<b>Tabla 24</b> <i>Valores experimentales de humedad en equilibrio (<math>X_{eq}</math>) según las condiciones de secado</i>	119
<b>Tabla 25</b> <i>Datos de la rehidratación de muestras de maíz deshidratado</i>	120
<b>Tabla 26</b> <i>Resumen en las condiciones del maíz mote en base seca</i>	123
<b>Tabla 27</b> <i>Datos iniciales para el balance de masa</i>	123
<b>Tabla 28</b> <i>Datos para calcular caudal de ingreso de aire.</i>	124
<b>Tabla 29</b> <i>Datos para calcular el volumen húmedo específico del aire.</i>	124
<b>Tabla 30</b> <i>Datos finales del balance de masa.</i>	126
<b>Tabla 31</b> <i>Datos iniciales para el balance de energía.</i>	127
<b>Tabla 32</b> <i>Cálculo de la entalpía del aire para la entrada y salida.</i>	127
<b>Tabla 33</b> <i>Cálculo de la entalpía del sólido a secar para la entrada y salida.</i>	129
<b>Tabla 34</b> <i>Datos finales del balance de energía.</i>	130

## ANEXOS

<b>Anexo 1</b>	<i>Especificaciones técnicas del mote del ministerio de desarrollo e inclusión social ..</i>	142
<b>Anexo 2</b>	<i>Constantes de Antoine.....</i>	146
<b>Anexo 3</b>	<i>Propiedades del vapor saturado. ....</i>	147
<b>Anexo 4</b>	<i>Propiedades de transferencia de calor del agua líquida. ....</i>	148
<b>Anexo 5</b>	<i>Resultado microbiológico de muestra de maíz secado al aire libre .....</i>	149
<b>Anexo 6</b>	<i>Resultado de análisis físico químico de granos de maíz.....</i>	150
<b>Anexo 7</b>	<i>Resultado microbiológico de granos de maíz secado .....</i>	151

## APÉNDICES

<b>Apéndice 1</b> <i>Datos de contenido en base húmeda y tiempo.</i> .....	152
<b>Apéndice 2</b> <i>Cálculo del contenido de humedad en base seca a condiciones de (40°C y 1.78m/s)</i> .....	154
<b>Apéndice 3</b> <i>Datos de contenido de humedad en base seca y tiempo.</i> .....	155
<b>Apéndice 4</b> <i>Cálculo de velocidad de secado</i> .....	157
<b>Apéndice 5</b> <i>Datos para la gráfica de velocidad de secado</i> .....	159
<b>Apéndice 6</b> <i>Cálculo del contenido de humedad absoluta (Y)</i> .....	162
<b>Apéndice 7</b> <i>Cálculo de constante de secado para el ajuste a modelos matemáticos (Lewis) ...</i>	163
<b>Apéndice 8</b> <i>Determinación de la humedad del aire en base seca antes de ingresar al secador</i> .....	165
<b>Apéndice 9</b> <i>Obtención de humedad del aire en base seca</i> .....	167
<b>Apéndice 10</b> <i>Obtención de entalpías del aire (ingreso y salida)</i> .....	168
<b>Apéndice 11</b> <i>Datos experimentales y datos reemplazados en la formula general</i> .....	169

## LISTA DE SÍMBOLOS

t: Tiempo (horas)

$T_G$ : Temperatura de aire ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_S$ : Temperatura de sólido ( $^{\circ}\text{C}$ )

$H_G$ : Contenido de humedad del aire en base seca (kg de agua / kg de sólido seco).

$X_I$ : Contenido de humedad inicial en base seca (kg de agua / kg de sólido seco).

$X_c$ : Contenido crítico de humedad (kg de agua /kg de sólido seco).

$X_{eq}$ : Contenido de humedad de equilibrio (kg de agua /kg de sólido seco).

$k_M$ : Constante se secado empírico o coeficiente de secado.

RH: Humedad relativa (%)

R: velocidad de secado en (kg  $\text{H}_2\text{O}$ /h.m<sup>2</sup>)

W: peso de solido húmedo (kg)

X: Contenido de humedad del sólido en base seca (kg de agua /kg de sólido seco).

$X_{bs}$ : Humedad en base seca (kg de agua /kg de sólido seco).

Y: Humedad absoluta (kg de vapor de agua / kg de aire seco)

$X_R$ : Humedad residual o relación de humedad (%)

$x_{bh}$ : Contenido de humedad en base húmeda (%)

k: Constante para el modelo Page y otros modelos cinéticos.

n: Parámetro de modelo de Page y otros modelos.

a y b: Son constantes adimensionales.

$\dot{m}$ : Flujo másico (Kg/s)

$V_H$ : Volumen húmedo (m<sup>3</sup>)

PM: Peso molecular (g/mol)

$\lambda$ : Calor latente del agua (kJ/kg de agua)

CH: Calor Húmedo (kJ/kg de aire seco)

$C_P$ : Capacidad calorífica (J/ $^{\circ}\text{C}$ )

$L_S$ : Cantidad de sólido seco (kg sólido seco)



$L_I$  y  $L_F$ : cantidad de producto inicial y final (kg)

$G$ : Cantidad de aire necesario para secar (kg aire seco)

$Q$ : Caudal ( $m^3/s$ )

$H'_G$ : Entalpía de aire (J/kg de aire seco)

$H'_S$ : Entalpía de sólido (J/kg de sólido)

$q_{(secador)}$ : Pérdida de calor del equipo secador (cal)

$P$ : Presión (atm)

$V$ : Velocidad de aire (m/s)

$A$ : área ( $m^2$ )

$A_t$ : área total de secado ( $m^2$ )

$C_S$ : calor húmedo del aire ( $kJ/kg_{\text{aire seco}} \cdot ^\circ C$ )

$CR$ : Capacidad de rehidratación

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por acompañarnos en el camino de la vida

A nuestras familias, por la sabiduría, el soporte y apoyo incondicional que nos brindaron.

A nuestra asesora la Dr. Ing. Mery Luz Masco Arriola, por su paciencia, experiencia, conocimiento, consejos y observaciones que contribuyeron en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Química por la dirección, conocimientos y experiencias proporcionadas en nuestros años de estudio.

A los encargados del Laboratorio de tecnologías de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por las facilidades, paciencia y tolerancias proporcionadas para la ejecución del proyecto de investigación.

A todos los amigos y personas que ayudaron en la realización de este trabajo de investigación.

Br. SISA CONDORHUAMAN, Cesar Augusto.

Br. DELGADO MOLTALVO, Frank Cesar.

## DEDICATORIA

A mi madre Florentina Condorhuaman Huallpa, por el amor y el cariño que me dio en todas las fases de mi vida, por la fe que sembró en mí, por la confianza en mis decisiones, por enseñarme de resiliencia en mis acciones y por enseñarme a nunca perder la esperanza.

A mi padre Santos Sisa Carlos, por enseñarme de disciplina y a concluir lo que comienzo.

A mi hermano Jhon Robert Sisa Condorhuaman, por su apoyo, ejemplo y sabios consejos para hacerme entender que el estudio es un pilar importante en la familia.

A mi hermano Carlos Sisa y Karina Sisa quienes siempre me dieron el apoyo y consejos motivadores.

A mis sobrinos que me impulsaron a no dar el ejemplo que en la familia debemos dejar en alto a la familia.

Br. SISA CONDORHUAMAN, Cesar Augusto

A mis padres Marina Montalvo Arriaga y David Delgado Chile y hermanos por el amor y el cariño que me dio en todas las fases de mi vida, por la fe que sembró en mí, por la confianza en mis decisiones, por enseñarme de resiliencia en mis acciones y por enseñarme a nunca perder la esperanza.

Gracias por creer en mí y por ser mi mayor motivación para alcanzar esta meta.

Br. DELGADO MOLTALVO, Frank Cesar.

## RESUMEN

La evaluación de la cinética de secado del maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays* L.) permitió analizar el comportamiento de la humedad en función del tiempo, obteniendo curvas de secado y de velocidad de secado ( $R$ ) con un excelente ajuste a modelos matemáticos. Se comprobó que el aumento tanto de la temperatura del aire (40, 50 y 60 °C) como de la velocidad del flujo (1.78 y 3.56 m/s) influye directamente en la reducción del tiempo total de secado. El incremento de la velocidad de aire de 1.78 m/s a 3.56 m/s redujo el tiempo de secado en 1.0, 0.8 y 0.4 horas para 40, 50 y 60 °C respectivamente, mientras que el aumento de temperatura de 40 °C a 50 °C y 60 °C disminuyó el tiempo en 1.8 y 2.0 horas, manteniendo la misma tendencia a ambas velocidades. De los diez modelos cinéticos evaluados, los de Midilli, Dos términos, Henderson & Pabis y Page modificado IV mostraron los mejores ajustes, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) superiores a 0.997, validando su capacidad predictiva. Finalmente, el producto seco alcanzó una humedad final de 6 %, conservando un buen aspecto físico, así como propiedades fisicoquímicas y microbiológicas dentro de los límites normativos, lo que demuestra que el maíz mote Blanco Gigante del Cusco puede ser secado de forma eficiente hasta 60 °C sin afectar su calidad ni inocuidad.

Palabras clave: Cinética de secado, Velocidad de secado, Entalpia, Humedad residual.

## ABSTRAC

The evaluation of the drying kinetics of the Cusco Giant White Mote corn (*Zea mays* L.) allowed the analysis of moisture content as a function of time, obtaining drying and drying rate (R) curves with an excellent fit to mathematical models. It was found that increasing both air temperature (40, 50, and 60 °C) and air flow velocity (1.78 and 3.56 m/s) directly influenced the reduction of the total drying time. Increasing the air velocity from 1.78 m/s to 3.56 m/s reduced the drying time by 1.0, 0.8, and 0.4 hours for 40, 50, and 60 °C, respectively, while increasing the temperature from 40 °C to 50 °C and 60 °C decreased the time by 1.8 and 2.0 hours, maintaining the same trend at both speeds. Of the ten kinetic models evaluated, the Midilli, Dos term, Henderson & Pabis, and Page modified IV models showed the best fits, with coefficients of determination ( $R^2$ ) greater than 0.997, validating their predictive capacity. Finally, the dried product reached a final moisture content of 6%, maintaining a good physical appearance, as well as physicochemical and microbiological properties within regulatory limits, demonstrating that Cusco's Blanco Gigante mote corn can be efficiently dried at up to 60°C without affecting its quality or safety.

Keywords: Drying kinetics, Drying rate, Enthalpy, Residual moisture.

## INTRODUCCIÓN

La materia prima para la elaboración del maíz tipo mote es el maíz blanco gigante del Cusco (*Zea mays* L.). Dicho grano es originario del departamento de Cusco, del Valle Sagrado de los Incas (Urubamba y Calca), pertenece a la variedad blanco Urubamba y de raza Cusco gigante (sierra y selva exportadora, 2022).

El proceso de elaboración del maíz tipo mote en la actualidad requiere un tiempo de 3 a 5 días dependiendo de los factores climáticos, porque se realiza en el medio ambiente con energía solar, este proceso es lento y con poca garantía de calidad e inocuidad del producto.

El secado es una operación unitaria bastante conocida para la eliminación de la humedad y conservación del alimento. Los factores que afectan al desarrollo del secado del maíz mote son el tipo de grano, tamaño de grano, flujo de aire, temperatura del aire, velocidad del aire, la humedad del aire y grano.

La importancia de esta investigación es evaluar el efecto de la velocidad del aire y temperatura en la rapidez de secado del maíz mote en un secador de bandejas a escala laboratorio para la eliminación de la humedad. Los datos obtenidos permitirán tomar decisiones para hacer el proceso de secado a nivel industrial.

La cinética es necesaria para el estudio del secado, diseño del secador y optimización, los datos obtenidos se emplean para la simulación de proceso y toma de decisiones en las operaciones industriales. La cinética de secado permite ajustar las ecuaciones de los modelos cinéticos de la curva de secado utilizando modelos matemáticos ya establecidos para predecir los cambios de humedad del grano a diferentes tiempos, los cuales son útiles para programar el secado a nivel industrial. Además, permite realizar procesos de optimización y diseños de secadores.

## CAPÍTULO I

### 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Problemática

El secado del maíz mote en el Valle Sagrado de los Incas sigue siendo un secado al ambiente abierto con el calor transferido por la energía solar, donde se llega a reducir la humedad del producto para su preservación por un largo periodo de tiempo, llegando a ser entre 5 a 6 días generando demora de secado y pérdida de la calidad e inocuidad del producto por el daño de insectos, aves y deterioro por la lluvia.

El secado realizado al ambiente abierto tiene el riesgo a ser contaminado por parte de las excretas de las aves, en las excretas se encuentra la *Escherichia coli* y a la aparición de hongos (mohos) por el exceso de la humedad en el grano. Los granos al secar expuestos al aire libre en presencia de alta humedad relativa se llegan a formar las aflatoxinas y fumonisinas. Se realizó un examen microbiológico de una muestra de maíz mote blanco gigante del Cusco que fue secado al aire libre, el cual dio evidencia de colonización de *Escherichia coli* (Anexo 5). Una alternativa para controlar y evitar la contaminación con microorganismos es el secado en un equipo secador de bandejas.

Muchos empresarios que se dedican al pelado de maíz mote, desconocen otros tipos de secado para aumentar su producción y reducir el tiempo de secado, es por ese motivo que se plantea mejorar el secado con un secador tipo bandejas, para reducir el tiempo de secado y mejorar la calidad del producto.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

- ¿Cómo varía la cinética de secado del maíz mote blanco gigante del Cusco (*Zea mays* L.) en función de la temperatura y la velocidad de aire en un secador de bandejas a escala laboratorio?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cuál es el efecto de la velocidad de aire en la cinética de secado del maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays* L.) en un secador de bandejas a escala laboratorio?
- ¿Cuál es el efecto de la temperatura de aire en la cinética de secado del maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays* L.) en un secador de bandejas a escala laboratorio?
- ¿Cuál es el modelo cinético que mejor ajusta a la cinética de secado del maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays* L.)?
- ¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays* L.)?

## **1.3. Justificación de la investigación**

### **1.3.1. Justificación técnica**

El secador de bandejas presenta un control preciso de las condiciones, como la temperatura y velocidad de aire, también se tiene una mejor uniformidad durante el secado, por la distribución uniforme de los granos. Por otra parte, la eficiencia energética es mayor, con un diseño que favorece la transferencia de calor con un sistema de calentamiento eficiente, mejora el monitoreo, control automático, control de contaminación microbiológico y el manejo cuidadoso del grano.



### **1.3.2. Justificación económica**

El uso del secador tipo bandejas con una adecuada temperatura y velocidad del aire pueden reducir el tiempo de secado, llegando a realizar varios secados por lotes durante el día, aumentando la cantidad y reduciendo el costo de producción y uso eficiente de los recursos humanos y energéticos este método de secado conserva la calidad del grano, al evitar la sobreexposición de calor y humedad.

## **1.4. Objetivos de la investigación**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Determinar la cinética de secado del maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays L.*) en un secador de bandejas a escala laboratorio.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Evaluar el efecto de la velocidad de aire en la cinética de secado del maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays L.*) en un secador de bandejas a escala laboratorio
- Evaluar el efecto de la temperatura de aire en la cinética de secado del maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays L.*) en un secador de bandejas a escala laboratorio
- Determinar el modelo cinético que mejor se ajusta a la cinética de secado de maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays L.*).
- Evaluar la calidad fisicoquímica y microbiológica del maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays L.*).

## **1.5. Hipótesis de investigación:**

### **1.5.1. Hipótesis general:**

- Es posible determinar un modelo cinético de secado del maíz blanco Gigante del Cusco (*Zea mays L.*) a diferentes temperaturas y velocidad de flujo de trabajo en un secador de bandejas a escala laboratorio.

### **1.5.2. Hipótesis específica:**

- El incremento del flujo de aire influye en la cinética de secado del maíz Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays L.*) en un secador de bandejas a escala laboratorio.
- El incremento de la temperatura del aire influye en la cinética de secado del maíz Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays L.*) en un secador de bandejas a escala laboratorio.
- Los datos experimentales se ajustan a los modelos matemáticos de la cinética de secado en un secador de bandejas.
- La calidad fisicoquímica y microbiológica es afectada por el secado del maíz Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays L.*) en un secador de bandejas

## **1.6. Parámetros y variables de operación**

### **1.6.1. Parámetro de operación**

Valores que son utilizados para describir el proceso

- Temperatura del aire (ingreso y salida)
- Humedad del aire (ingreso y salida)
- Área de superficie de secado ( $m^2$ )

### **1.6.2. Variables independientes**

Variables controladas durante el proceso

- Temperatura del aire (40 °C, 50 °C y 60 °C)
- Flujo del aire (1.78 m/s y 3.56 m/s)

### **1.6.3. Variables dependientes**

Variables que son medidos como resultado del proceso

- Razón de humedad
- Contenido de humedad del alimento (base seca)
- Velocidad de secado (kg de agua/h.m<sup>2</sup>).
- Capacidad de rehidratación
- Humedad residual experimental
- Constantes de secado
- Parámetros de cinética
- Balance de masa y energía

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

Lara (2017) en su trabajo titulado “Desarrollo de un producto precocido deshidratado a base de maíz blanco nixtamalizado (pelado)”, tuvo como objetivo general desarrollar un producto a base de mote de maíz deshidratado para reconstitución. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo del tipo aplicada y diseño experimental. En esta investigación los parámetros más importantes que influyeron en la reconstitución final del producto fueron los procesos de remojo y cocción del grano nixtamalizado, el proceso de remojo fue realizado a 12 °C con dos tiempos de 10 y 12 horas, la temperatura de cocción fue a 93 °C con tres tiempos de 5 horas y 30 minutos; 6 horas; 6 horas y 30 minutos. Las variables paramétricas fueron el índice de absorción de agua, índice de solubilidad de agua y poder de hinchamiento. Las condiciones que recomendaron para el secado en relación de, la humedad del aire en base seca (Xbs) vs tiempo (7 horas) fue con temperatura de 80 °C a una velocidad de aire de 4 m/s. En las conclusiones determinaron que el almidón del maíz presenta una absorción de agua (2.37) (peso del residuo de centrifugación/peso de la muestra), índice de solubilidad en agua (4.39%) (peso de residuos de evaporación/peso seco de la muestra) y poder de hinchamiento (2.48) (peso de residuo de centrifugación/ (peso seco de muestra-peso del residuo de evaporación).

Cerrón y Junchaya (2019), en su trabajo titulado “Influencia de la temperatura del aire en la velocidad de secado de quinua germinada en un secador de bandejas”, tuvo como objetivo general evaluar el efecto de la temperatura del aire en la velocidad de secado de quinua germinada en un secador de bandejas. La investigación fue desarrollada con una metodología con enfoque cuantitativo, del tipo aplicada y diseño experimental. En los resultados desarrollados al equipo secador de bandejas, donde utilizó 5 gramos de muestra para la experimentación, con una humedad

en base seca de 0.81 g de agua/g de sólido seco, Alcanzar la humedad de equilibrio con valores de 0.08202, 0.08131 y 0.08121 g de agua/g de sólido seco, según las condiciones evaluadas. respectivamente a las temperaturas de 30°C, 35°C y 40°C, el secado tuvo una duración de 4 horas y 30 minutos a 30, 35 y 40 °C. Concluyen que el efecto de la temperatura de la corriente de aire es significativo en la velocidad de secado de la quinua, las curvas de secado se ajustaron a la ecuación empírica de Page. Las diferentes velocidades de secado a diferentes temperaturas son muy significativas al inicio del secado, pero luego de aproximadamente 1 hora las velocidades llegan a adquirir la misma magnitud. La mejor velocidad de secado su realizada a 40 °C a diferencia de 30 y 35 °C.

Figueroa y Sherly (2019) en su trabajo titulado “Evaluación del efecto de la temperatura y velocidad del aire en la rapidez de secado de la yuca en un secador de bandejas”, tuvo como objetivo general evaluar la significancia del efecto de la temperatura y la velocidad del aire en la rapidez de secado de yuca en un secador de bandejas. Esta investigación emplea una metodología de enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y con un diseño de carácter experimental. El trabajo realizado a temperaturas de 30 °C, 40 °C y 50 °C, con velocidad de 0.5 m/s y 1.0 m/s de velocidad de aire, para cada combinación tuvo 3 réplicas. La ecuación empírica que mejor ajuste tiene es con el modelo de page. Independientemente de la velocidad del aire, la rapidez del secado a temperatura de 50 °C es mayor que la rapidez a 40 °C y aún mucho mayor a 30 °C. Concluyeron que el contenido de humedad disminuye desde 2.7 g de agua/ g de sólido seco hasta 0.35 g de agua/ g de sólido seco con una velocidad de 0.5 m/s y desde 2.7 g de agua/ g de sólido seco hasta 0.26 g de agua/g de sólido seco con velocidad de 1.0 m/s.

Miranda (2011) evaluó el proceso de secado de granos de cacao (*Theobroma cacao* L) fermentado en un secador de bandejas con convección forzada de aire, presentando como

problemática que el secado del grano de cacao es importante para la actividad enzimática, es cuando hay reacciones químicas que reducen el amargor y la astringencia, desde un 45-60% de humedad hasta un 7-8%. La investigación fue desarrollada bajo una metodología con enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y experimental. Para el análisis, se consideró un rango de humedad del cacao comprendido entre 45 % y 60 %, como referencia para evaluar el comportamiento del proceso de secado. El trabajo de secado fue realizado con una muestra de 10 g de cacao fermentado previamente molido, se coloca a una estufa precalentada a temperatura de 103 °C luego sometida a calentamiento durante 16 horas. En el proceso de deshidratación trabajó a temperaturas de 50, 60 y 70 °C, durante los primeros 100 min de proceso se tuvo una disminución significativamente de la humedad, la pérdida de humedad fue mayor con una deshidratación a 70 °C con una humedad en equilibrio final de 0.0138g agua/g sólido con un tiempo aproximado de 300 min (5 horas). Con una conclusión que el grano de cacao tiene un comportamiento como un material poroso en el proceso de secado, presentando valores óptimos para el grano de cacao a temperatura de 70 °C puede ser deshidratado sin alterar la composición química del producto

Fernández *et al.*, (2013) desarrollaron un modelo matemático que ayude a modelar la cinética de deshidratación de maíz nixtamalizado a diferentes tiempos, haciendo mención a la importancia del secado de la harina de maíz para evitar el crecimiento de Salmonella mientras este almacenado. La investigación fue desarrollada con una metodología con enfoque cuantitativo, del tipo aplicado y experimental. Las muestras fueron granos de maíz con cocción de 0.8%  $\text{Ca(OH)}_2$  a 92 °C, con y sin reposo de su agua de cocción, se trabajaron con muestras de 45 g de maíz blanco con una humedad de 14.54% las muestras fueron realizadas por quintuplicada vez. fueron cocidas a temperatura de 92 °C durante 42 min y una concentración de  $\text{Ca(OH)}_2$  0.8% con la relación al peso, a diferentes tiempos de cocción 0, 2, 4, 6 y 8 horas, luego las muestras fueron drenadas y

deshidratadas a temperatura de 50 °C por 2 horas en un analizador de humedad Mettler-Toledo.

El modelo se expresa con la siguiente ecuación:

$$M(t) = M_e + (M_0 - M_e)e^{-t/\alpha} \quad (1)$$

Donde:

M(t) es el porcentaje de humedad en el tiempo t, M<sub>0</sub> es el porcentaje inicial de humedad (%), M<sub>e</sub> es el porcentaje de humedad de equilibrio o de saturación y el exponencial -t/α representa la razón de la humedad con respecto al tiempo. Las conclusiones del trabajo determinaron que la velocidad de hidratación decrece rápidamente en relación al aumento del tiempo de deshidratación, siendo un tiempo máximo de 8 horas, obteniendo la deshidratación con una ecuación asíntota de primer orden, para luego realizar ajuste en base a los datos experimentales, comprobando también por un análisis estadístico de los datos para determinar las diferencias significativas de los tratamientos térmico con un valor R<sup>2</sup> de 0.99771 a 0.99968 con un P menor igual a 0.05.

Choque y Molina (2018a) en su trabajo titulado “influencia de los métodos de secado en bandejas y el vacío sobre el germinado de quinua (*Chenopodium quinoa*) variedad “Pasankalla”, presentando como problema la importancia del secado del germinado de quinua para estabilizar el producto sin afectar sus propiedades químicas, removiendo el agua para evitar la proliferación de microorganismos que generen el deterioro de la quinua, como la aparición de reacciones químicas. La investigación fue desarrollada con una metodología con enfoque cuantitativo. Con los resultados que la quinua se germinó a temperatura de 20 °C y 30 °C a tiempo de 24 y 48 horas, posteriormente se realizó el secado por bandejas a temperaturas de 40 y 55 °C, la temperatura adecuada de secado fue a 55 °C disminuyendo el secado en un 80% sin afectar la disminución de vitamina C no tuvo ningún impacto en el contenido de proteínas y de hierro. Las conclusiones del

trabajo muestran que 48 horas y 30 °C fueron los valores óptimos para preservar sus propiedades, donde no hubo reducción de vitamina C desde el germinado.

Salazar (2020) en su trabajo titulado “Modelado de la cinética de secado por convección forzada de la semilla de pajuro (*Erythrina edulis* T.)”, tuvo como objetivo modelar y evaluar el ajuste a diferentes cinéticas de secado por convección y determinar el coeficiente de difusión. La investigación se desarrolló con una metodología con enfoque cuantitativo y presentó como problemática secar la semilla pajuro (*Erythrina edulis* T.) para su conservación, evitando el crecimiento de microorganismos y su descomposición. Se realizaron 12 experimentos por triplicado a las temperaturas de 40, 50, 60 y 70 °C y velocidades de aire de 1.8; 2.2 y 2.7 m/s, luego los datos se evaluaron con ocho modelos matemáticos para ver cual se ajusta mejor. En las conclusiones del trabajo se muestra que el modelo matemático de Midilli fue el que mejor ajusto con un  $R^2$  de 0.999 a 1 y los resultados para la difusividad de  $3,08015 \times 10^{-11}$  a  $7,57879 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  y la energía de activación de 14,59023 a 23,72150 kJ/mol para el secado, presentando datos aceptables para los porcentajes de proteínas con 6.5%, grasas con 1.01%, ceniza con 0.06% y carbohidratos con 13.26%.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Maíz**

El maíz (*Zea mays* L.) pertenece a la familia de las gramíneas esta planta se originó en América Latina, comenzando a ser cultivada por los nativos y posteriormente difundido a otros países.

Ripusudan *et al.* (2001) mencionan que existen varios tipos de maíz y se clasifican según; la constitución del endospermo y del grano, color de grano, ambiente en el que se cultiva, la



madurez y el uso, hace una clasificación según la apariencia del grano y del endosperma, los tipos de maíz más importantes son duro, dentado, reventón, dulce, harinoso, tunicado (Figura 1).

### Figura 1

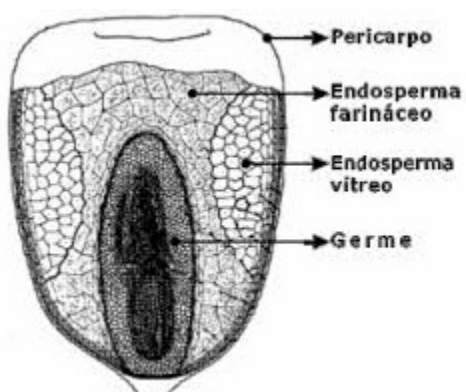
*Variedades de maíz.*



*Fuente: Ripusudan et al. (2001)*

### Figura 2

*Estructura del grano de maíz*



*Fuente: Lunven (1993)*

Según Lunven (1993) la estructura del grano de maíz (Figura 2) empieza desde la cáscara, seguida por el pericarpio como una capara exterior, dura y fibrosa que llega a ser entre el 5 al 6% de peso del grano. Luego se tiene el endospermo, zona con gran reserva energética, que llega a ser




entre el 80-84% del peso del grano, donde se encuentran los componentes más importantes del grano, que se dividen en 3 grupos:

- **Endospermo periférico:** Contenido de proteínas, almidón en pequeñas unidades y angulares.
- **Endospermo vítreo:** Contenido de gránulos de almidón recubierto por una matriz de proteínas, que le da una forma poligonal.
- **Endospermo harinoso:** Ubicada en la parte céntrica del grano, encapsulado por el endospermo vítreo, donde los gránulos de almidón son más grandes y menos angulares.

Cuitiño de Vega y Cardozo (2018) clasifica por tipo de endosperma siendo los siguientes tipos Tabla 1, maíz dentado, maíz harinoso y maíz duro.

**Tabla 1**

*Clasificación por tipo de endosperma del maíz*

Tipo	Dentado	Harinoso	Duro
<b>Endosperma</b>			
	Almidón blando (predomina en el centro)	Almidón muy blando (casi 100%)	Duro con una pequeña porción de almidón blando
<b>Color del grano predominante</b>	Amarillo (uso animal) Blanco (uso humano)	Blanco, pero existe otros colores	Naranja, amarillo o blanco cremoso
<b>Aspecto del grano</b>	Depresión en la corona (hendidura)	Espatulado	Redondo, suave al tacto

Fuente: Cuitiño de Vega y Cardozo (2018)

Ripusudan *et al.* (2001) menciona que la variedad del maíz blanco gigante del Cusco es de tipo Harinoso porque tiene un almidón muy blando que se raya fácilmente con la uña este maíz es usado únicamente para alimento humano.

### 2.2.2. Maíz blanco gigante de Cusco

El Maíz Blanco Gigante de Cusco (MBGC) es una variedad representativa del maíz amiláceo, cuyo nicho ecológico es el Valle Sagrado de los Incas donde anualmente se siembra alrededor de 3000 hectáreas y se obtienen rendimientos superiores a 4 t/ha (Quevado, 2013).

En la Figura 3 se muestra el territorio perteneciente a los principales lugares donde se produce los granos del Maíz Blanco Gigante de Cusco (MBGC) (*Zea mays* L.) del Valle Sagrado de los Incas, siendo en esta ocasión los granos seleccionados para la experimentación de la zona de Calca lugar característico por el gran tamaño y buenas características del grano, que llegan a producir los agricultores y el buen clima que favorece para su crecimiento

**Figura 3**

*Regiones donde se obtiene la materia prima para la elaboración del maíz mote*



Fuente: Almada *et al.* (2005)

Las características excepcionales que presenta este tipo de maíz son por su gran tamaño, textura suave, color blanco, con un aspecto espatulado y de pequeño espesor. Los granos de la parte central de la mazorca son uniformes de tamaño y en apariencia. Por el tamaño grande y buena calidad, el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI) ha reconocido su denominación de origen con el nombre del maíz blanco gigante Cusco (Navarro & Rivera, 2011).

**Tabla 2**

*Características del maíz blanco gigante Cusco*

<b>Mazorca:</b>	<b>Cilíndrica de media a grande</b>
Grano:	Blanco, grande, plano circular
Peso de 100 granos:	120 a 135 gramos
Marlo o tusa:	Blanco, grosor intermedio
Altura de planta:	200 a 290 cm
Días de floración:	115 a 130
Días de madurez:	230 a 240
Nº de hileras:	8 (ocho)
Textura de grano:	Suave harinoso (amiláceo)
Ciclo vegetativo:	tardío

*Fuente:* Quevedo (2013)

Quevado (2013) menciona en la Tabla 2 las principales características del Maíz Blanco Gigante de Cusco (MBGC) que será estudiado en la presente investigación, como principales características es el gran tamaño y textura suave harinoso.

El principal uso es el consumo en choclo y la exportación en grano, las características requeridas por el mercado internacional son la pureza, sanidad y apariencia, color blanco, chato y uniforme en peso, longitud, ancho y espesor.

**Tabla 3**

*Comparativa del crecimiento de exportación del MBGC y maíz mote del Cusco (2020 – 2023)*

	<b>año 2020</b>	<b>año 2023</b>	<b>porcentaje de crecimiento</b>
<b>MAIZ MOTE (TM.)</b>	750.66	879.86	17%
<b>MBGC (TM.)</b>	5,440.20	5,048.97	-7%
<b>TOTAL (TM.)</b>	6,190.86	5,928.83	-4%

*Fuente:* SUNAT (2024)

En la Tabla 3 SUNAT (2024) menciona que la exportación del maíz blanco gigante del Cusco (MBGC) tuvo un decrecimiento entre los años 2020 a 2023 con un porcentaje -7% en Toneladas métricas, mientras que la exportación del maíz mote gigante del Cusco tuvo un crecimiento del 17% en Toneladas métricas entre los años 2020 al 2023.

**Tabla 4**

*Valor nutricional de maíz blanco gigante del Cusco*

<b>COMPONENTES</b>	<b>Por 100 g</b>
Calorías	353 cal
Agua	14.1 g
Proteínas	5,6%
Grasas	4.6%
Fibra	1.9%
Ceniza	1.4%
Carbohidratos	74.6%
Calcio	5 mg
Fósforo	249 mg
Hierro	3 mg
Vitamina B1	0.2 mcg
Vitamina B2	0.16 mcg
Vitamina B5	3 mcg
Ácido ascórbico reducido	2.6 mcg

*Fuente:* Sierra y Selva Exportadora (2022)

Sierra y selva exportadora (sierra y selva exportadora, 2022) muestra los componentes nutricionales de 100 g de granos secos de Maíz Blanco Gigante de Cusco (MBGC) indicadas en la Tabla 4, la humedad que tiene el grano seco es de 14.1%.

### 2.2.3. Maíz mote de Cusco

La materia prima del maíz mote de Cusco es el maíz blanco gigante del Cusco que se cultiva principalmente en el Valle Sagrado de los Incas en el departamento y región Cusco, en las provincias de Calca y Urubamba, el maíz mote de Cusco se caracteriza por presentar granos grandes con endospermo blanco suave amiláceo de color blanco como muestra la Figura 3, pericarpio de color blanco, el mote tiene un sabor harinoso, tiene varias posibilidades culinarias, el maíz mote es una variedad del maíz (*Zea Mays* L.), también se le denomina maíz blanco gigante por su color blanquecino y su gran tamaño, los granos se descascaran en una cocción con cal, este último se llama nixtamalización, posteriormente se deja secar al sol, el maíz mote es común en los platos de América latina, es necesario remojar un día antes para luego ser cocido durante 3 horas, así menciona García (2013).

#### Figura 4

*Maíz mote*



*Fuente:* Agro Sur Perú (2021)

#### 2.2.4. Clasificación taxonómica:

La clasificación taxonómica del maíz más aproximada ha sido reportada por Takhtajan (1980) con la siguiente descripción (Tabla 5):

**Tabla 5**

*Taxonomía del maíz*

<b>Jerarquía</b>	<b>Descripción</b>
<b>Reino</b>	Plantae
<b>División</b>	Magnoliophyta
<b>Clase</b>	Liliopsida
<b>Subclase</b>	Commelinidae
<b>Orden</b>	Poales
<b>Familia</b>	Poaceae
<b>Subfamilia</b>	Panicoideae
<b>Tribu</b>	An droponeae
<b>Genero</b>	<i>Zea</i>
<b>Especie</b>	<i>Zea mays</i>
<b>Nombre común</b>	Maíz Blanco Gigante del Cusco

*Fuente:* Takhtajan (1980)

#### 2.2.5. Nixtamalización.

Se llama nixtamalización a la transformación que se da al maíz por la extracción del pericarpio (pelado) mediante un proceso físico-químico, el maíz se llega a cocer en una solución alcalina para luego retirar el pericarpio (pelado) manualmente, finalizando con el secado al sol. Este proceso llega a alterar su contenido de nutrientes, dando un producto de grano blando que se denomina maíz pelado o nixtamalizado.

Méndez (2015) mencionan que la nixtamalización es un proceso muy antiguo heredado por las culturas precolombina como los Mayas Aztecas e Inca, ellos desarrollaron la técnica a base de prueba y error.

### 2.2.6. Almidón de maíz.

Badui (2006) indica que el almidón o glúcido es la principal fuente de calorías por el alto contenido de carbohidratos complejos, el cual es una mezcla de polisacáridos, como la amilosa y amilopectina, la amilosa sucede por la condensación de la glucosa por enlaces glucosídicos que establecen largas cadenas lineales con 200-500 unidades y peso molecular hasta un millón, la amilosa es una  $\alpha$ -D-(1,4)-glucano, tiene la facilidad de adquirir una conformación tridimensional. Todos los carbohidratos presentes en el almidón forman la fuente de energía de un alimento

- **Contenido de amilasa y amilopectina en distintas series:**

Charro (2015) menciona que los almidones son mezclas de amilosa y amilopectina. Generalmente los almidones están en el rango de 20% a 30% de amilosa. En el maíz céreo, llamado así por aspecto del interior del grano, casi no existe amilosa, mientras que en las variedades amiláceas representa entre 50% a 70% (variedad del maíz blanco gigante del Cusco), las propiedades del almidón dependen mucho del origen y de la relación amilosa/ amilopectina, en la Tabla 6 muestra el contenido de amilosa y amilopectina en almidones de cereales y tubérculos.

**Tabla 6**

*Contenido de amilosa y amilopectina en almidones*

<b>Tipo de almidón</b>	<b>Amilosa (%)</b>	<b>Amilopectina (%)</b>
Maíz	25	75
Mandioca	17	83
Papa	20	80
Trigo	25	75
Arroz	19	81
Maíz de alta amilosa	55	45-10
Céreo	<1	>99

*Fuente: (Mendoza et al.,2017)*



### **2.2.7. Propiedades organolépticas.**

Según la ficha técnica de alimentos que forman parte de la prestación del servicio del Programa Nacional de Alimentación Escolar Qali Warma (2022), ver Anexo 1, para el maíz deshidratado se espera que mantenga propiedades principales como el sabor y olor (exento de olores y sabores extraños, sin indicios de rancidez o enmohecimientos) el color (de acuerdo a la naturaleza del producto) y aspecto (granos sueltos, exento de piedras, insectos vivos y muertos en cualquiera de sus estados fisiológicos u otras materias extrañas).

Lara Espinoza (2017) comenta que en algunos casos la disminución parcial de algunas propiedades como el aroma y sabor se ve influenciado directamente por el proceso de secado que se realiza, como la temperatura, tiempo de secado y velocidad de flujo de aire.

## **2.3. Secado**

Treybal (1997) define al secado como la eliminación de la humedad en una sustancia. Por otro lado, Colina (2010) dice que el secado de alimentos sirve para evitar su deterioro durante el almacenamiento de largos periodos de tiempo siendo la forma más antigua manera de conservación de alimentos y actualmente es uno de los métodos más utilizados en la industria de alimentos.

Fellows (2006) dice que la deshidratación es un método usado para la conservación de alimentos y materiales biológicos, porque permite reducir significativamente el contenido de humedad y la actividad del agua de los productos, aumentando consecuentemente su estabilidad química y microbiológica, facilitando de esta forma los procesos de transporte, almacenamiento, distribución y consumo.

### **2.3.1. Factores determinantes en la elección del método de secado (lotes vs. continuo)**

La elección entre secado por lotes o continuo depende de factores como el volumen de producción, flexibilidad operativa, calidad requerida, costos de inversión y operación, y

disponibilidad de espacio. El secado por lotes es ideal para volúmenes pequeños o medianos, ofrece mayor control de calidad y facilita cambios frecuentes de producto, mientras que el secado continuo es más eficiente para grandes producciones, aunque requiere mayor inversión inicial y mayor infraestructura (Toledo, 2007).

### **2.3.2. Criterios a considerar para la elección del método de secado**

Fito *et al.* (2016) menciona los métodos más usados en la industria alimentaria son el secado solar, secado por aire caliente, secado por contacto, secado por infrarrojo, el secado por congelación, el secado por liofilización y secado dieléctrico. El secado solar requiere mucho espacio y tiempo, no garantiza buen control de proceso.

Se escoge el método de secado por convección con aire caliente por ser un método sencillo, eficaz y económico a comparación de los ya mencionados a excepción del secado solar, el secado por bandejas es un método eficiente que permite conservar los nutrientes.

Almada *et al.* (2005) indica que los factores claves para un buen secado son: (1) el aire caliente a una temperatura de 40 a 70°C, (2) el aire con un bajo contenido de humedad y (3) un movimiento constante del aire.

### **2.3.3. Temperatura de secado.**

Valdés (2008) refiere que, si la temperatura es muy baja al comienzo, pueden desarrollarse microorganismos antes que el producto sea adecuadamente deshidratado. Si la temperatura es muy elevada y la humedad muy baja, la superficie del producto puede endurecerse manteniendo la humedad interna. Él mismo alude que la temperatura para deshidratar alimentos es de 50 °C a 60 °C. A mayor calor, se cocina el alimento, y si es aún mayor, cocina su exterior impidiendo que la humedad interna escape. Valdés (2008) enumera como temperaturas recomendadas para los productos en general, como para vegetales, una temperatura mayor que 52° C; para frutas, mayor

que 57° C y para cuero de fruta (láminas de frutas deshidratadas), mayor que 60° C. Según la NTP 205.084.2020 se recomienda una humedad máxima de 12.5% para el grano de maíz mote.

El Instituto Nacional de Calidad (INACAL) por medio de la plataforma digital del Estado Peruano (2020) y la norma “NTP 205.084.2020 Maíz amiláceo (Maíz mote) Requisitos” INACAL (2020), indican que es aplicable al maíz mote destinado para el consumo humano y uso industrial, con el propósito de mejorar los estándares de calidad de este producto y garantizar su buena conservación para la distribución a los mercados.

Almada *et al.* (2005) muestra en la Tabla 7 el contenido de humedad de algunos productos y temperaturas máximas tolerables, para el grano de maíz (no pelado) es recomendable llegar a 15% de humedad.

**Tabla 7**

*Contenido de humedad de granos y temperatura máxima tolerable*

<b>Producto</b>	<b>Fresco (%)</b>	<b>Seco (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
Arroz	24	14	50
Maíz	35	15	60
Poroto	70	5	n/d
Maní	40	9	n/d
Café	50	11	n/d

*Fuente: Almada et al. (2005)*

#### **2.3.4. Entalpia**

La entalpia en el proceso de secado es un parámetro relacionado con la energía necesaria para eliminar el agua presente en un alimento, el movimiento de calor y masa involucrada a partir de la energía interna del sistemas, presión y volumen (Mujumdar, 2015).

#### **2.3.5. Humedad residual**

La humedad residual es el residuo de agua en un material sometido al secado y no ha sido eliminado por las condiciones operativas (Baker,1997).

### **2.3.6. Actividad del agua**

La actividad del agua es la medida de disponibilidad de agua libre en un alimento que permite el crecimiento microbiano y la estabilidad química, logrando la conservación de calidad durante el almacenamiento (Mujumdar, 2015).

## **2.4. Operación general de secado:**

El secado es una operación que implica la eliminación de humedad de un material, mediante la transferencia simultánea de calor y masa. Según (Green & Perry, 2008), las operaciones generales incluyen el suministro de calor para evaporar el líquido, la remoción del vapor formado y la circulación adecuada de aire o gas para transportar dicha humedad.

### **2.4.1. Variables que influyen en la velocidad de secado**

#### **a) Naturaleza de la materia:**

Antonininho *et al.* (2006) menciona que el contenido de humedad inicial influye en el secado, cuando mayor sea la cantidad de humedad del producto mayor será la cantidad de vapor de agua a retirar, cuando un material tiene elevado contenido de humedad las fuerzas de adsorción son menores que cuando el contenido del producto es bajo, por ese motivo se usa mayor porcentaje de energía para evaporar la humedad contenida en granos más secos.

#### **b) Temperatura del aire:**

Barreiros (2016) enfatiza que la temperatura del aire es importante en el proceso de secado y es el parámetro más flexible en un sistema de secado e influye significativamente en la tasa de secado del producto final, una temperatura elevada puede llegar a causar daños térmicos a los granos. La mayoría de secadores utilizan la resistencia eléctrica como fuente de calentamiento del aire que entra al secador.

Existen varios niveles de temperatura que sucede durante el proceso de secado:

- **Temperatura de bulbo seco:** Temperatura real del aire seco considerado como parámetro de control para el proceso de transferencia de calor
- **Temperatura superficial:** Temperatura de la capa externa del material a secar.
- **Temperatura de bulbo húmedo:** Temperatura mínima que puede alcanzar el aire por evaporación del agua a condiciones adiabáticas, sin intercambio de calor con el entorno.

Durante el proceso de secado, se origina un gradiente de temperatura con respecto al espesor del material.

#### c) **Velocidad de aire**

Cengel y Ghajar, (2015) comentan que el calor se transmite por mecanismos de conducción, convección y radiación, Choque y Molina (2018), en su estudio titulado "Influencia de los métodos de secado en bandejas y en vacío sobre la germinación de la quinua", se emplea como mecanismo de transferencia de calor la convección forzada. La velocidad de aire se usa como un método de transferencia de calor por convección.

#### d) **Humedad absoluta del aire (U)**

“Es la cantidad de masa de vapor de agua contenida en una unidad de volumen de aire, se mide en  $\text{g/m}^3$ . Por tanto, la humedad absoluta constituye la densidad del vapor de agua existente en el aire” (Barreiro, 2016).

#### e) **Tamaño de la partícula del material**

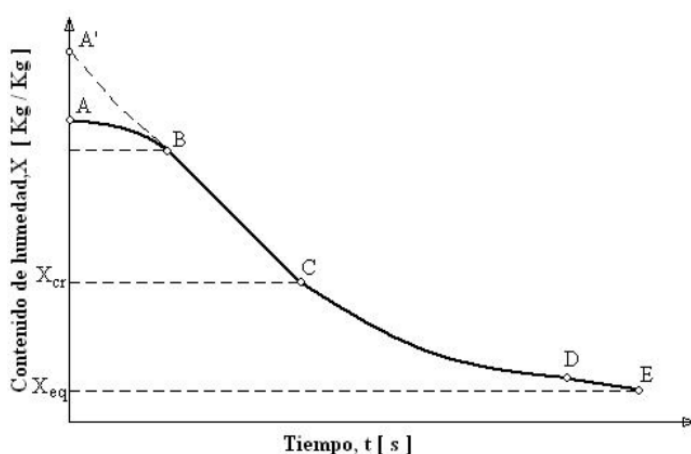
Rudy *et al.* (2015) menciona que, al incrementar el diámetro de una partícula, se incrementa la velocidad de secado. De modo que, si aumenta el tamaño de la partícula al doble en su diámetro, el tiempo de la eliminación de humedad es proporcional al tamaño de la partícula.

### 2.4.2. Fases de secado

El proceso de secado puede dividirse en varias fases (calentamiento, secado a velocidad constante y secado a velocidad descendente), que destacan los cambios específicos en el producto durante el ciclo de secado para optimizar su operación y diseño. El aumento de la temperatura del grano y la disminución del contenido de humedad se pueden medir mediante tomas de muestra. Asimismo, los cambios en la densidad del producto, causados por su expansión o contracción, pueden evaluarse directamente y relacionarse con la evolución de la temperatura del grano durante el secado. Finalmente, los cambios en las tasas de calentamiento y evaporación influyen en la resistencia interna del producto a la migración de agua. (Perdon *et al.*, 2020)

**Figura 5**

*Diagrama de humedad vs tiempo*



*Fuente:* Galvez Condori, 2016

La Figura 5 muestra en la ordenada el contenido de humedad ( $\text{kg de agua/ kg de s. s}$ ), en la abscisa muestra el tiempo expresado en segundos. La humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ ) es una función de la humedad relativa y la temperatura para una determinada sustancia.

**a) Fase de calentamiento.**

La fase de calentamiento es la etapa inicial del secado, en la cual el grano absorbe calor del medio circundante hasta alcanzar la temperatura necesaria para que comience la evaporación del agua superficial. Durante esta fase, no hay una pérdida significativa de humedad, ya que la energía se utiliza principalmente para elevar la temperatura del grano. Este proceso depende de factores como la temperatura y velocidad del aire, así como del tipo y contenido de humedad del grano Çengel y Ghajar (2015)

**b) Fase de velocidad de secado constante.**

Esta fase tiene lugar cuando hay agua libre en la superficie. El agua superficial es removida continuamente por el flujo de aire convectivo y reemplazada por moléculas de agua internas que vienen del interior del sólido a la superficie por el mecanismo de difusión. Considerando que se alcanzan las condiciones de equilibrio, la temperatura de la superficie permanece constante a un valor que corresponde a la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado. La velocidad de secado permanecerá constante siempre que la velocidad de difusión del agua desde el interior del sólido (grano) a su superficie sea suficiente para mantener esta superficie saturada. En otras palabras, durante esta etapa, la velocidad con la que el agua se difunde desde el interior del grano hacia su superficie es mayor que la velocidad con la que se transfiere esa humedad desde la superficie al aire. Esto significa que la superficie del grano permanece constantemente húmeda, ya que el agua llega más rápido desde el interior que lo que se evapora hacia el aire. La fuerza impulsora en este período se puede considerar la presión de vapor de agua diferente de la superficie en comparación con la corriente de aire seco (Santiago & Moreira, 2020)

La teoría predice que la tasa de evaporación convectiva de una superficie saturada de agua es constante si las condiciones externas (temperatura, humedad y velocidad del aire) son

constantes. El calor se transfiere por convección desde el aire caliente a la superficie húmeda más fría a través de la capa límite en la interfaz e induce cierta evaporación. El vapor de agua formado se transporta por convección desde la superficie saturada de humedad al aire más seco (Berk, 2018) En la segunda fase, la fase de secado de velocidad constante, la temperatura de la superficie de la partícula permanece relativamente constante.

#### **d) Fase de velocidad de secado descendente.**

En la fase de secado de velocidad descendente, el equilibrio en la superficie se rompe y el agua de la superficie se evapora más rápido de lo que se puede mover hacia la superficie. Físicamente, esto da como resultado un aumento en la temperatura de la superficie del producto y puede definirse por la fuerza con la que se mantienen en su lugar las moléculas de agua. En esta fase, la difusividad de la humedad disminuye a medida que aumenta la resistencia al movimiento de las moléculas de agua hacia la superficie del producto. Cuanto menor sea el contenido de humedad, mayor será la resistencia. El resultado neto es que se requiere más energía para mover las moléculas de agua en la fase de velocidad descendente. En la fase de secado de velocidad descendente, las condiciones de funcionamiento tienen una mayor influencia en la calidad del producto (Perdon et al., 2020) La velocidad de transferencia de agua desde el interior de la partícula a su superficie disminuye continuamente a medida que el producto se vuelve más seco. Cuando el suministro de agua a la superficie cae por debajo de la velocidad de evaporación, el contenido de humedad de la superficie comienza a disminuir rápidamente y se acerca rápidamente al contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la humedad relativa del aire en la isoterma de sorción del material. A partir de ese momento, el transporte interno y no la evaporación se convierte en el factor limitante de la tasa y comienza el período de tasa descendente. El contenido medio de humedad de los alimentos cuando esto ocurre se denomina “contenido crítico de



humedad  $X_c$ ". Obviamente, una transición brusca de una velocidad constante a una descendente solo se puede observar si existe un período de velocidad constante real, es decir, cuando se secan materiales inertes que no encogen, pero no en los alimentos. En el caso de los alimentos, la pendiente negativa de la curva de secado se vuelve gradualmente más pronunciada, pero no hay un punto de transición bien definido. No obstante, el concepto de humedad crítica se mantiene a los efectos del modelado. Dado que la superficie de los alimentos ya no está saturada de agua, la temperatura del alimento aumenta durante el período de velocidad descendente y se acerca asintóticamente a la temperatura de bulbo seco del aire. Teóricamente, el secado se detiene cuando el contenido de humedad en todas partes del alimento se ha reducido al contenido de humedad de equilibrio  $X_{eq}$  (Berk, 2018).

#### **2.4.3. Clasificación de métodos de secado del maíz**

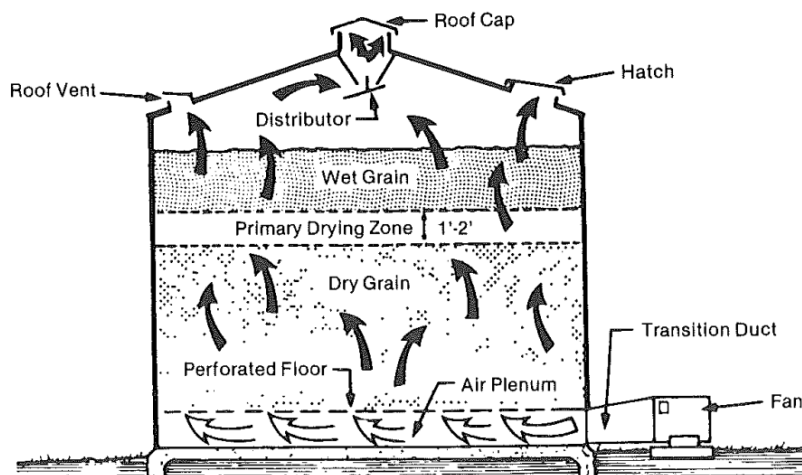
Hellevang (1994) hace la siguiente clasificación del secado de granos de maíz por método de transferencia de calor, estas son:

##### **a) Aire natural/ secado a baja temperatura.**

Las ventajas son que no tiene cuello de botella al no ser secado con aire caliente, porque en el secado no existe una fase puntual de frenen de forma crítica, siendo es un secado económico, la desventaja es que el secado está en equilibrio con la humedad del aire, este tipo de secado puede demorar varios días e incluso semanas dependiendo a las condiciones climáticas y la cantidad de agua a eliminar (Hellevang, 1994).

**Figura 6**

*Secador de contenedor tipo aire natural/secado a baja temperatura*

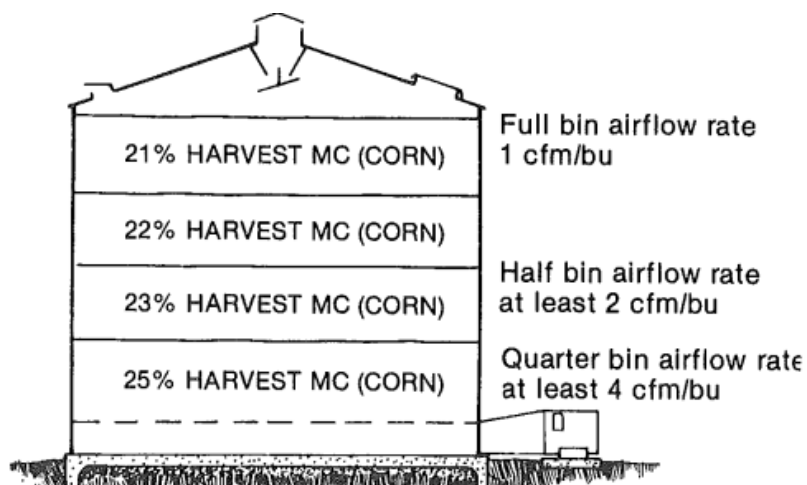


*Fuente: Hellevang (1994)*

En la Figura 6 se muestra un secador de contenedor tipo aire natural/secado a baja temperatura, en donde el aire ingresa por el conducto de transmisión en la parte inferior del equipo, haciendo que el aire se distribuya por la zona de secado primario a través de pisos perforados que arrastran la humedad del grano mojado.

#### **b) Secado por capas.**

La ventaja del secado por capas es la capacidad de trabajar con porcentajes altos de humedad en los granos de maíz y la desventaja es que el horario de retiro del producto está restringido, el secado por capas es muy similar al secado natural del aire/ baja temperatura excepto que los granos se colocan por capas. Se coloca un lote inicial o una capa de grano en el contenedor y se inicia el secado, las capas de granos se agregan periódicamente para que exista una profundidad de grano húmedo en adelante.

**Figura 7***Secador de capas**Fuente:* Hellevang (1994)

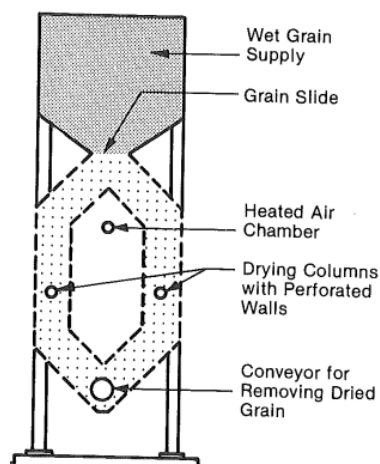
La Figura 7 muestra un secado por capas mientras la tasa de flujo de aire es más alta permite la eliminación de una carga con mayor contenido de humedad.

**c) secadores de columnas.**

Este tipo de secado puede ser batch y de flujo continuo, no ocupa espacio de almacenamiento y son portátiles, las desventajas es que el calor en el secador no se usa de manera tan eficiente como en un secador de lecho profundo, este tipo de secador se puede usar a temperaturas altas, este tipo de secador consta de columnas o venas rectas donde circula por gravedad los granos, las columnas está en forma de chapas perforadas por donde ingresa el aire caliente de forma cruzada.

**Figura 8**

*Columna de secado tipo batch de tipo cruzado.*



*Fuente:* Hellevang (1994)

En la Figura 8 se muestra una columna de secado tipo batch (tipo cruzado) en donde el suministro de grano húmedo ingresa por la parte superior del equipo, pasando por el tobogán e ingresando a las columnas de secado que tienen las paredes perforadas para el ingreso de aire caliente que ingresara desde la cámara central del equipo, llegando a acumularse los granos secos en la parta inferior y con ayuda de un transportador para retirar los granos secos.

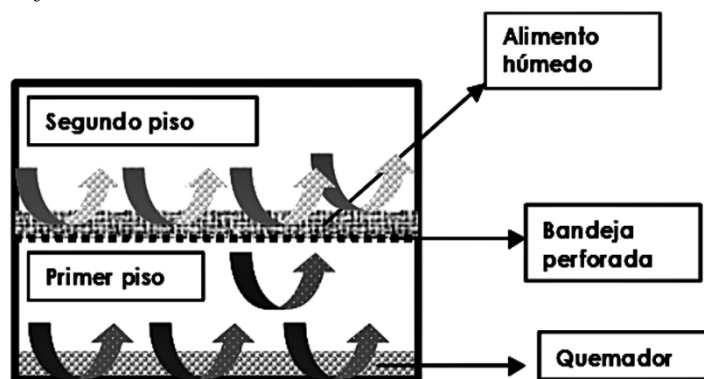
#### **d) Secadores de Horno o estufa.**

Fito *et al.* (2016) comentan que este tipo de secado es el menos complejo y tiene forma de un paralelepípedo de dos pisos. En la Figura 9 se muestra como el aire de secado se calienta en un quemador en el primer piso y por convección ingresa al segundo piso donde se encuentra el maíz a secar. Esta máquina utiliza electricidad como energía térmica, tiene un radiador para generar calor y un ventilador cuya función es de intercambio de calor por convección, la característica más

importante es que la mayor parte del aire caliente circula en la caja mejorando así la transferencia de calor.

## Figura 9

*Secador de horno o estufa*

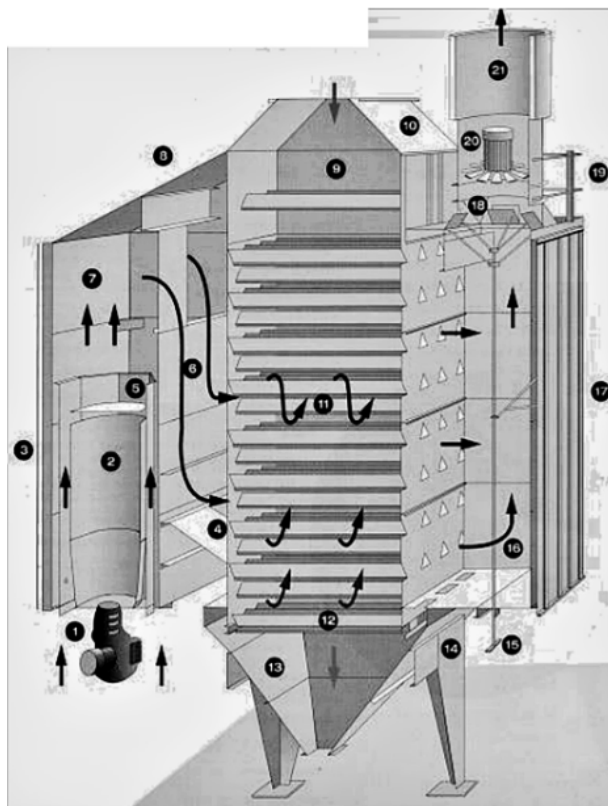


*Fuente:* (Fito Maupoey et al., 2016)

### e) Secadores de bandejas o armario

Fito *et al.* (2016) mencionan que el tipo de secado funciona de manera intermitente, cada bastidor lleva un cierto número de bandejas montadas una sobre otras con una separación conveniente donde se carga el material a secar. En la Figura 10 se observa que se hace circular aire caliente entre las bandejas por medio del ventilador acoplado al motor haciendo pasar por medio del calentador constituido por un haz de tubos cuyo interior circula vapor de agua, por medio de un conducto de salida se evacua continuamente aire húmedo y a través de una abertura de entrada penetra aire fresco, cuando las características de material y su manejo lo permiten se utilizan bandejas perforadas en las que el aire circula a través de la capa sólida.

García (2013) realizó un diseño de secador de bandeja para los productos de maíz, quinua y amaranto. En su diseño los granos tienen una humedad inicial de 32% secado hasta una húmeda final de 14.2% este trabajo se realizó en las condiciones de 60 °C, volumen de 38,75 m<sup>3</sup>/h y cantidad a secar de 126 kg con un tiempo de desecado de 36 horas.

**Figura 10***Secador de bandejas**Fuente: Fito et al. (2016)***f) Secadores de túnel**

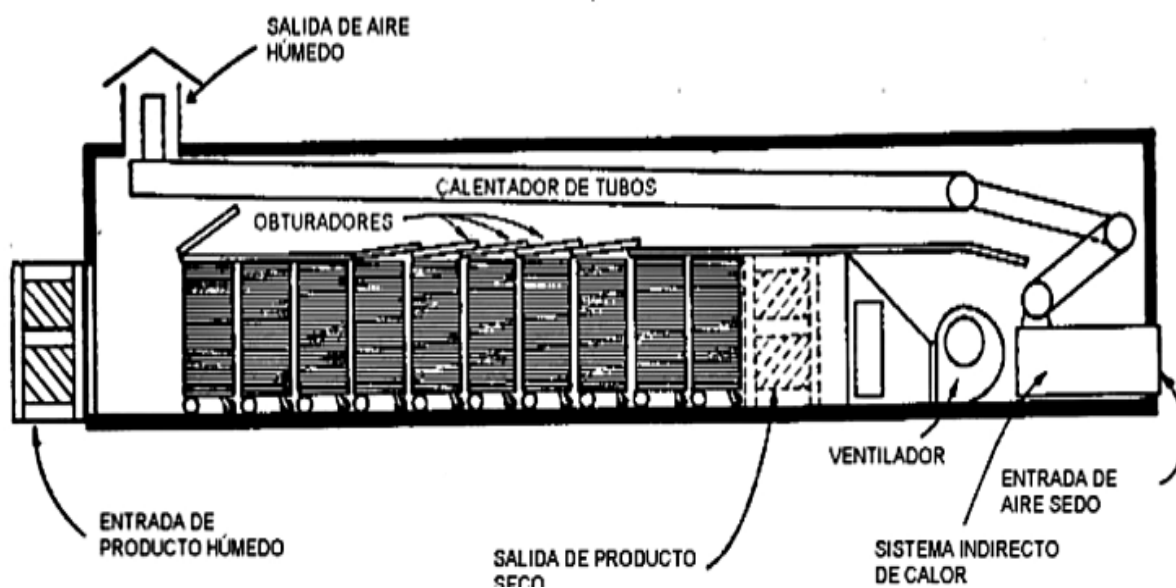
Fito *et al.* (2016) indica que este tipo de secadores son similares a los secadores de bandejas, en la Figura 11 se puede ver el funcionamiento semicontinuo las bandejas contenidas de productos a secar se cargan sobre carretillas que se trasladan a lo largo del túnel de secado. Cuando se introduce una nueva carretilla, la primera es evacuada conteniendo el producto seco mientras que las restantes adelantan una posición a su trayectoria.

Aucancela y Chávez (2009) diseñaron un secador de túnel para satisfacer las necesidades de secado de granos, el dimensionamiento se realizó a través de la ingeniería de datos, este equipo está formado por un perfil de estructura rectangular y diversos componentes tales como: tolvas, dos ventiladores, un sensor digital para control de temperatura, la cámara de secado y aireación

fueron hechas de acero inoxidable la banda transportadora compuesta por poliestireno, 4 rodillos adaptados para el movimiento con reductor de velocidad, con una capacidad de carga de 25 kg con una velocidad de 0.11 m/s. El secado de granos de maíz se ejecuta en media hora a 60 °C con una humedad inicial de 30,5 % y llegando a una humedad final de 13.7% en la costa y 14,4 en la sierra, con una eficiencia de 84,33%.

**Figura 11**

*Secador de túnel*



*Fuente: Fito et al. (2016)*

## 2.5. Ecuaciones de los modelos cinéticos de la curva de secado

Cáceres (2022) presenta en su libro, los modelos cinéticos según observaciones y usos para el secado de alimentos y productos agrícolas, los cuales se presentan algunos relacionados al maíz en la Tabla 8. Cada fila presenta una ecuación que describe el comportamiento de la humedad durante el proceso de secado y al final, se presenta una fórmula general (Babu *et al.*, 2018) para calcular la razón de humedad ( $X_R$ ) en función de la humedad en un tiempo dado.

**Tabla 8***Modelos cinéticos para el secado de alimentos y productos agrícolas*

<b>Modelo</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Observaciones – Usos</b>	<b>Referencias</b>
<b>Wang &amp; Singh</b>	$X_R = 1 + at + bt^2$	Arroz con cáscara, plátano, hojas de perejil, rodajas de brotes de bambú.	Wang & Singh (1978)
<b>Thompson</b>	$X_R = \exp\left(-a - (a^2 + 4bt)^{\frac{1}{2}}\right) / 2b$	Maíz sin cáscara, arvejas, arándanos	Thompson <i>et al.</i> (1968)
<b>Midilli</b>	$X_R = a - b \exp[-(Kt^n)]$	Saladas, verdolaga y berenjena	Midilli <i>et al.</i> (2002)
<b>Verma</b>	$X_R = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Arroz, perejil, higos y café	Verma <i>et al.</i> (1985)
<b>dos términos</b>	$X_R = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Solución con los dos primeros términos. Los parámetros representan propiedades físicas del secado.	Henderson (1974)
<b>Henderson y Pabis</b>	$X_R = a \exp(-kt)$	Mango, plátano, mandioca y cebolla	Westerman (1973)
<b>Logarítmico</b>	$X_R = a \exp(-kt) + c$	Pimiento, piña, durazno, frijol y morera blanca	Togrul y Pehlivan (2003)
<b>Lewis</b>	$X_R = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt)$	Fresas, semillas de uvas, té negro	Lewis (1921)
<b>Page</b>	$X_R = \exp(-kt^n)$	Corrige las deficiencias de Lewis	Page (1949)
<b>Page modificado IV</b>	$X_R = a \exp[-(kt^n)]$	Higos	(Arslan y Musa, 2010)

*Fuente:* Cáceres (2022)

Babu *et al.* (2018) define a la razón de humedad ( $X_R$ ) con la siguiente fórmula:

$$X_R = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (2)$$

Dónde:

X: Humedad en cada instante de tiempo (g agua/g s.s.)

$X_{eq}$ : Humedad de equilibrio (g agua/g s.s.)

$X_0$ : Humedad inicial (g agua/g s.s.)



Para las ecuaciones que se encuentran en la Tabla 9 aparte del tiempo  $t$  (horas), se puede ver diferentes parámetros o constantes en particular, así como;  $k$ ,  $n$ ,  $a$  y  $b$  (adimensionales) que se muestran en la siguiente Tabla 9.

**Tabla 9**

*constantes y parámetros en modelos matemáticos de secado*

Constante	Significado	Modelos donde aparece
<b>a</b>	Factor de ajuste inicial; relacionado con la humedad inicial o peso relativo	Wang & Singh, Midilli, Verma, Dos términos, Henderson y Pabis, Page modificado IV
<b>b</b>	Factor de corrección o ajuste adicional; en algunos modelos representa otra fase	Wang & Singh, Midilli, Dos términos
<b>c</b>	Constante de corrección (humedad residual no eliminada)	Henderson y Pabis Logarítmico
<b>k</b>	Constante de secado (velocidad del proceso de secado)	Midilli, Verma, Henderson y Pabis, Lewis, Page, Page modificado IV
<b>n</b>	Exponente que ajusta la curvatura de la pérdida de humedad en el tiempo	Midilli, Page, Page modificado IV
<b>g</b>	Segunda constante de secado (otro mecanismo de pérdida de humedad)	Verma
<b>K<sub>0</sub></b>	Primera constante de secado (primer mecanismo)	Dos términos
<b>K<sub>1</sub></b>	Segunda constante de secado (segundo mecanismo)	Dos términos

*Fuente: Cáceres (2022)*

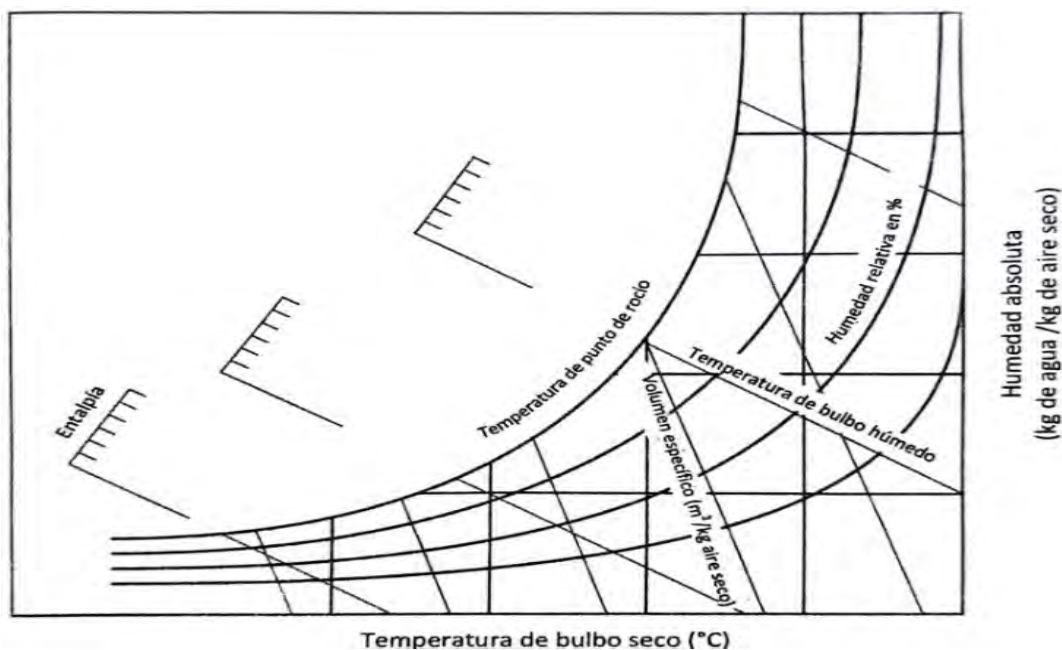
## 2.6. Psicrometría en el secado

Cáceres (2022) menciona que “Para el proceso de deshidratación de un producto alimenticio, se considera importante la humedad, temperatura y presión del aire para su proceso.

Siendo la psicrometría importante para detallar las principales características del aire, propiedades de vapor de agua y mezclas de aire – vapor” (p.63).

## Figura 12

*Diagrama psicrométrico*



*Fuente:* Paul y Heldman (2009)

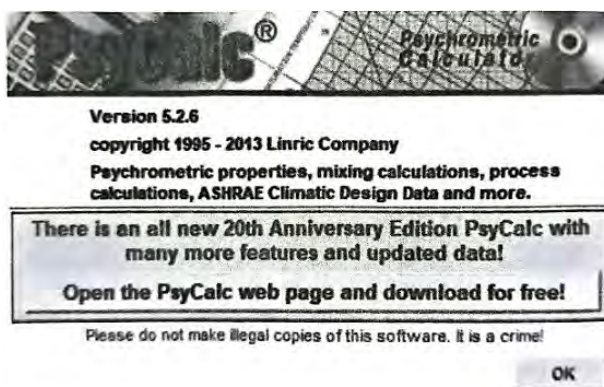
En la Figura 12 muestra el diagrama psicrométrico de Grosvenor, en donde las líneas representan humedades relativas constantes, línea de entalpía constante, líneas de saturación adiabática y líneas de temperatura de bulbo seco y húmedo. A parte de considerar que el diagrama psicrométrico de la Figura 12 es considerada para lugares que presentan una presión atmosférica de 1, o también ubicadas a 0 m.s.n.m., también en la actualidad se cuentan con softwares que proporcionan datos en función de la presión atmosférica o altitud que tengan desde el nivel del mar, llegando a obtener datos más precisos, entre los accesibles se encuentra el software PsyCalc, el cual detalla las propiedades del aire a diferentes condiciones termodinámicas (Cáceres, 2022).

### 2.6.1. Software para cálculo de propiedades Psicrométricas

Existe una gran cantidad de softwares para el cálculo de propiedades Psicrométricas cada una de ellas con diferentes características, un software bien diseñado debe considerar además de dos parámetros que con frecuencia esta la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa, la altitud y presión total. En el programa PsyCalc (Figura 13) se puede trabajar considerando dos parámetros para luego realizar el cálculo del resto de variables psicrométricos (Cáceres, 2022).

**Figura 13**

*Software de versión gratuita PsyCalc*



*Fuente:* Cáceres (2022).

### 2.6.2. Balance de materia y energía

Cáceres (2022a) menciona la importancia del balance de masa y energía como herramienta para tecnólogos en alimentos, ayudando a determinar capacidad de producción, dimensionamientos de equipos, control de la economía del proceso y entre otros. Para estos cálculos se tuvo como principio la conservación de masa y conservación de energía, además que en este trabajo de investigación se aplicó para un sistema abierto donde existe transferencia de materia entre el sistema y los alrededores. Cáceres (2022) también hace mención que, para los problemas de balance de masa y energía en el sistema, sea en un estado estable o estacionario en

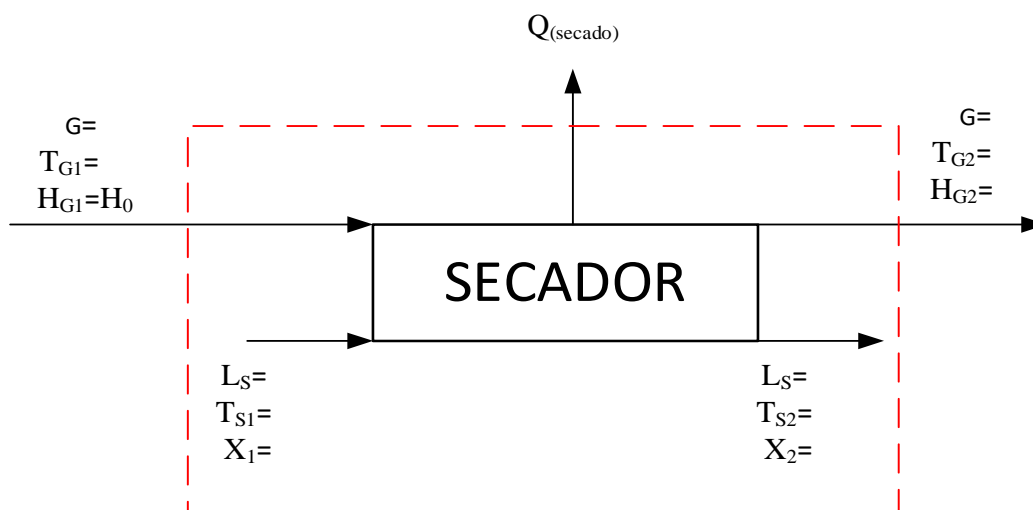
un enfoque más simple de la conservación de masa y energía, se puede afirmar que la masa que entra es igual a la masa que sale y que la energía que entra es igual a la energía que sale.

### 2.6.3. Balance de masa y energía en un secador discontinuo o batch.

El proceso de secado se realizó en un secador a escala laboratorio y el tiempo esperado hasta llegar al punto de equilibrio es de 7 horas, se considera como base de cálculo un lote, el balance de masa que realizo en base seca para facilitar las operaciones matemáticas (Figura 14).

**Figura 14**

*Diagrama de flujo de bloques para el balance global del secador*



En la Figura 13 el secador opera de forma discontinua o batch, es decir, el material húmedo se carga completamente al inicio, se somete a un secado controlado, y posteriormente se descarga el material seco. Sin embargo, para simplificar los cálculos y aplicar principios de ingeniería, el balance de materia y energía se plantea como si fuera un proceso continuo y en estado estacionario, donde las condiciones de operación (flujo de aire, temperatura, contenido de humedad) se consideran constantes durante todo el tiempo de secado.

❖ **Balance global de masa húmeda:**

$$(G)(H_{G1}) + (Ls)(X_1) = (G)(H_{G2}) + (Ls)(X_2) \quad (3)$$

Donde:

$L_s$ : Cantidad de sólido en base seca (kg s.s)

$G$ : Cantidad de aire necesario para el secado en base seca (kg a.s)

$H_{G1}, H_{G2}$ : Contenido de humedad del aire en base seca (kg  $H_2O$ /kg a.s)

$X_1, X_2$ : Contenido de humedad de sólido en base seca (kg  $H_2O$ /kg s.s)

El balance de masa fue realizado en base de sólido seco “s.s” y aire seco “a.s” para el mejor manejo de datos.

Para determinar la cantidad de aire necesario en base seca ( $G$ ) se dividió el caudal ( $Q$ ) entre el volumen húmedo en base seca ( $V_H$ ) como indica la ecuación 4.

**Cantidad de aire necesario para el secado del grano de maíz “G” (kg a.s):**

$$G = \frac{Q}{V_H} \quad (4)$$

Donde:

$Q$  = Cantidad de ingreso de aire en un tiempo de 7 horas ( $m^3$ )

$V_H$  = Volumen húmedo en base seca ( $m^3/kg$  a.s)

El secado se realizó con base de cálculo de un lote de 40 g de maíz mote en 7 horas de secado.

**Volumen específico del aire húmedo “ $V_H$ ” ( $m^3/kg$  a.s):**

$$V_H = \left[ \frac{1}{PM_{aire}} + \frac{H_1}{PM_{agua}} \right] \frac{RT}{P} \quad (5)$$

Donde:

$V_H$ : volumen específico del aire húmedo ( $m^3/kg$  a.s)

$R$ : constante de gases ideales ( $atm.m^3/kg.mol. ^\circ K$ )

T: temperatura con que ingresa el aire ( $^{\circ}\text{K}$ )

P: presión (atm)

$H_1$ : contenido de humedad del aire en base seca ( $\text{kg H}_2\text{O/kg a.s.}$ )

$\text{PM}_{\text{aire}}$ : peso molecular del aire ( $\text{kg a.s./mol}$ )

$\text{PM}_{\text{agua}}$ : peso molecular del agua ( $\text{kgH}_2\text{O/mol}$ )

Petrucci *et al.*, (2011) afirma que el valor teórico de la masa molecular aparente del aire seco es  $28.97\text{g/mol}$

**Para determinar la presión de vapor a temperatura ambiente se usó la ecuación de Antoine:**

$$\text{Log } P^{\circ} = A - \frac{B}{T + C} \quad (6)$$

Donde:

A, B y C: Constantes propias de cada sustancia (adimensional)

T: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$P^{\circ}$ : Presión de Vapor (mmHg)

**Para determinar la presión parcial del agua se usó la ecuación de la humedad relativa por la diferencia de presiones:**

$$\text{RH} = \left( \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) * 100\% \quad (7)$$

Donde:

$\rho_w$ : presión parcial del agua (mmHg)

$\rho_s$ : presión de vapor de agua (mmHg)

**Para determinar la humedad de ingreso “ $H_{G1}$ ” del aire a condiciones ambientales se usó la siguiente ecuación:**

$$H_{G1} = \left( \frac{\rho_w}{\rho_0 - \rho_w} \right) \left( \frac{PM_{\text{agua}}}{PM_{\text{aire}}} \right) \quad (8)$$

Donde:

$H_{G1}$ : humedad de ingreso del aire en base seca (kg  $H_2O$ /kg a.s)

$\rho_w$ : presión parcial del agua (mmHg)

$\rho_0$ : presión a condición inicial (mmHg)

$PM_{\text{agua}}$ : peso molecular del agua (kg  $H_2O$ /kg mol)

$PM_{\text{aire}}$ : peso molecular del aire (kg a.s /kg mol)

❖ **Balance de energía:**

$$(G)(H'_{G1}) + (Ls)(H'_{S1}) = (G)(H'_{G2}) + (Ls)(H'_{S2}) + Q_{\text{secador}} \quad (9)$$

Donde:

G: Cantidad de aire necesario para el secado en base seca (kg a.s)

Ls: Cantidad de sólido en base seca (kg s.s.)

$H'_{G1}, H'_{G2}$ : Entalpía del aire de ingreso y salida (kJ/kg a.s)

$H'_{S1}, H'_{S2}$ : Entalpía del sólido de ingreso y salida (kJ/kg s.s)

$Q_{\text{secador}}$ : Cantidad de calor perdido en el secador (kJ/h)

El calor necesario para el secado del maíz mote fue la suma del secador más el precalentador, este equipo contenía una cámara de precalentamiento, el objetivo fue de calentar el aire del ambiente previo al ingreso al secador.

### Entalpía de ingreso y salida del aire:

$$H'_G = C_s (T_G - T_0) + (H_G)(\lambda_0) \quad (10)$$

Donde:

$H'_{G1}, H'_{G2}$ : Entalpía del aire de ingreso y salida (kJ/kg a.s)

$C_{S1}, C_{S2}$ : Calor húmedo del aire de ingreso y salida (kJ/kg a.s. °K)

$T_{G1}, T_{G2}$ : Temperatura de ingreso y salida del aire (°K)

$T_0$ : Temperatura base, se recomienda trabajar con 0 °C ó 273.15 °K

$H_{G1}, H_{G2}$ : Contenido de humedad del aire en base seca de ingreso y salida (kg H<sub>2</sub>O/kg a.s)

$\lambda_{0G1}, \lambda_{0G2}$ : Calor latente del agua de ingreso y salida (kJ/kg H<sub>2</sub>O °K)

**Para determinar el calor húmedo de ingreso y salida “ $C_{s1}$  y  $C_{s2}$ ” se realizó con la ecuación 11; para determinar el calor latente de ingreso y salida del aire ( $\lambda_{0G1}, \lambda_{0G2}$ ), se obtuvo del Anexo 3 del libro de introducción a la ingeniería de alimentos (2009) de los autores Sinh y Heldman.**

$$C_s = C_{p_{aire}} + C_{p_{vapor}}(H_G) \quad (11)$$

Donde:

$C_{S1}, C_{S2}$ : Calor húmedo del aire de ingreso y salida (kJ/kg a.s. °K)

$C_{p_{aire}}$ : capacidad calorífica de aire (1.005 kJ a.s/kg °K)

$C_{p_{vapor}}$ : capacidad calorífica de vapor (1.88 kJ/kgH<sub>2</sub>O °K)

$H_{G1}, H_{G2}$ : humedad de ingreso y salida del aire en base seca (kg H<sub>2</sub>O/kg a.s)

### Entalpía de ingreso y salida del sólido:

$$H'_s = (C_{p_{sólido}})(T_s - T_0) + (X)(C_{p_{agua}})(T_s - T_0) \quad (12)$$



Donde:

$H'_{s1}, H'_{s2}$ : Entalpía del sólido de ingreso y salida (kJ/kg s.s)

$C_{P \text{ sólido}}$ : Capacidad calorífica del maíz (kJ/kg s.s.°K)

$C_{P \text{ agua}}$ : Capacidad calorífica de agua (kJ/kg H<sub>2</sub>O°K)

$T_{s1}, T_{s2}$ : Temperatura de ingreso y salida del sólido (°K)

$X_1, X_2$ : Contenido de humedad de sólido en base seca (kg H<sub>2</sub>O/kg s.s)

$T_0$ : Temperatura base, se recomienda trabajar con 0 °C ó 273.15 °K

La capacidad calorífica ( $C_p$ ) del maíz nixtamalizado tuvo el valor de 2.27 kJ/kg s.s°K que fue obtenido del artículo de nombre “Nixtamalización de cinco variedades de maíz con diferente dureza de grano: impacto de consumo de combustible y cambios fisicoquímicos” publicado por Roque *et.al.*, (2016)

## **2.7. Indicadores de calidad en alimentos para el consumo humano**

### **2.7.1. Criterios microbiológicos**

La Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), el año 2008 reportó que en el Perú existen normas de criterios microbiológicos como NTS N° 071 - MINSA/DIGESA-V.01 (Norma Sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano).

#### **a) Conformación de los criterios microbiológicos**

De acuerdo a la NTS N°071, (2008)-V.01, los criterios microbiológicos están conformados por:

- El grupo de alimento al que se aplica el criterio.
- Los agentes microbiológicos a controlar en los distintos grupos de alimentos.
- El plan de muestreo que ha de aplicarse al lote o lotes de alimentos.

- Los límites microbiológicos establecidos para los grupos de alimentos.

#### **b) Aptitud microbiológica para el consumo humano**

Los alimentos y bebidas serán considerados microbiológicamente aptos para el consumo humano cuando cumplan en toda su extensión con los criterios microbiológicos establecidos en la NTS N° 071 - MINSA/DIGESA-V.01 para el grupo y subgrupo de alimentos al que pertenece

El maíz mote pelado se considera dentro de los alimentos de granos de cereales, leguminosos, quenopodiáceos y derivados (harina y otros). En la actualidad el estado peruano con el programa QALI WARMA tiene una ficha técnica (ver Anexo 1)

**Tabla 10**

*Aptitud microbiológica para el consumo humano*

<b>Agente microbiano</b>	<b>Categoría</b>	<b>Clase</b>	<b>n</b>	<b>C</b>	<b>Límite por g</b>	
					<b>m</b>	<b>M</b>
<b>Mohos</b>	2	3	5	2	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>

*Fuente: BID-ADEX (2008)*

La Tabla 10 muestra los límites máximos de Mohos donde, "n" (minúscula) es la cantidad de unidades de muestras para llevar a cabo el análisis que se eligen por separado e independientemente, según la regulación nacional e internacional referidas a alimentos y bebidas apropiadas para fines microbiológicos.

"C": Número máximo permitido de unidades de muestras rechazables, en un plan de muestreo de 2 clases de microorganismos comprendidos entre "m" y "M". El lote es rechazado cuando el número de unidades de muestra es mayor a "C". Unidades de muestra provisionalmente aceptables dentro de un plan de muestreo de 3 clases.

"m" (minúscula): Límite microbiológico que separa la calidad aceptable de la rechazable. En general, un valor igual o menor a "m", representa un producto aceptable y los valores superiores a "m" indican lotes rechazables en un plan de muestreo de 2 clases.

"M" (mayúscula): Los valores de recuentos microbianos superiores a "M" son inaceptables, el alimento representa un riesgo para la salud.

### **2.7.2. Rehidratación de maíz mote blanco gigante del Cusco.**

El proceso de rehidratación dio a conocer el nivel del daño que ha sufrido el maíz mote blanco gigante del Cusco por motivos del secado, el nivel de daño está relacionado con la temperatura con la que fue secado, a mayor temperatura el almidón llega a ser desnaturalizado.

Los parámetros de temperatura y velocidad de aire, que pudieron cambiar las características y composición del producto deshidratado. Entre las principales características que se pretende mantener está la integridad del tejido celular luego de la deshidratación, y sus propiedades fisicoquímicas. Un producto en buenas condiciones de secado presentará una rápida rehidratación, mismas estructuras, propiedades químicas y sobre todo las propiedades nutricionales y sensoriales del alimento. Entre los procesos más comunes de rehidratación se tiene a la inmersión en agua, para lograr un producto igual al estado fresco, antes del secado. (Marín B. *et al.*, 2006)

Los productos obtenidos mediante liofilización presentan una rehidratación más rápida en comparación con aquellos sometidos a secado por aire caliente. Esta diferencia se debe a las características en el tamaño, la distribución y el volumen de los poros, donde queda atrapado el gas durante el proceso (Marín B. *et al.*, 2006).

## **CAPÍTULO III**

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Materiales y equipos**

Las pruebas experimentales se realizaron en el Laboratorio de Control de Procesos de la Escuela Profesional de Ingeniería Química – UNSAAC, utilizando equipos e instrumentos pertenecientes a dicha institución, lo que garantizó condiciones técnicas adecuadas para el desarrollo de los ensayos.

En los ítems siguientes se presentan de manera detallada los materiales, instrumentos, equipos y reactivos empleados durante la investigación.

##### **3.1.1. Materiales:**

- Muestra de maíz blanco gigante del Cusco (*Zea mays* L.)
- Agua destilada
- Tela rugosa
- Recipiente de acero inox
- Olla de acero inox
- Cernidor
- Vasos de precipitados

##### **3.1.2. Instrumentos:**

- Anemómetro digital marca laserliner
- Termómetro digital con espiga marca precisso
- Cronometro digital
- Balanza digital marca adventurer
- Equipado con sensores de temperatura, humedad y peso integrados

### 3.1.3. Equipo (secador de bandejas a escala laboratorio):

El proceso de secado se realizó en un secador de bandejas a escala laboratorio por convección forzada, propiedad de la Escuela Profesional de Ingeniería Química – UNSAAC (Figura 15). Este equipo fue acondicionado a partir de la estructura de un horno microondas doméstico por un trabajo anterior de seminario de la carrera, la cual es un equipo automatizado y controlado mediante el software LabVIEW, que permite la adquisición y control en tiempo real de las variables del proceso: temperatura del aire (entrada, interior y salida), humedad relativa y peso de la muestra. La fuente de energía térmica proviene de una hornilla de una cocina de base cerámica y una resistencia eléctrica, también el sistema cuenta con dos ventiladores que generan un flujo de aire constante de 1.78 m/s, verificado con un anemómetro digital. La temperatura se controla entre 20 °C y 120 °C mediante un sistema de regulación digital. Pero para esta actividad se consideró un rango de 40°C a 60°C. La bandeja o área de secado está compuesta por una bandeja de acero inoxidable de 11 cm × 11 cm, cuya base tipo malla permite el secado simultaneo de ambas caras del producto, con una capacidad máxima de muestra de 50 gramos. Todo este sistema secador permite registrar en tiempo real los datos durante todo el proceso de secado y pérdida de peso de la muestra como los cambios del aire al ingreso y salida, es así que los datos fueron registrados automáticamente en hojas de cálculo de Microsoft Excel para su posterior análisis.

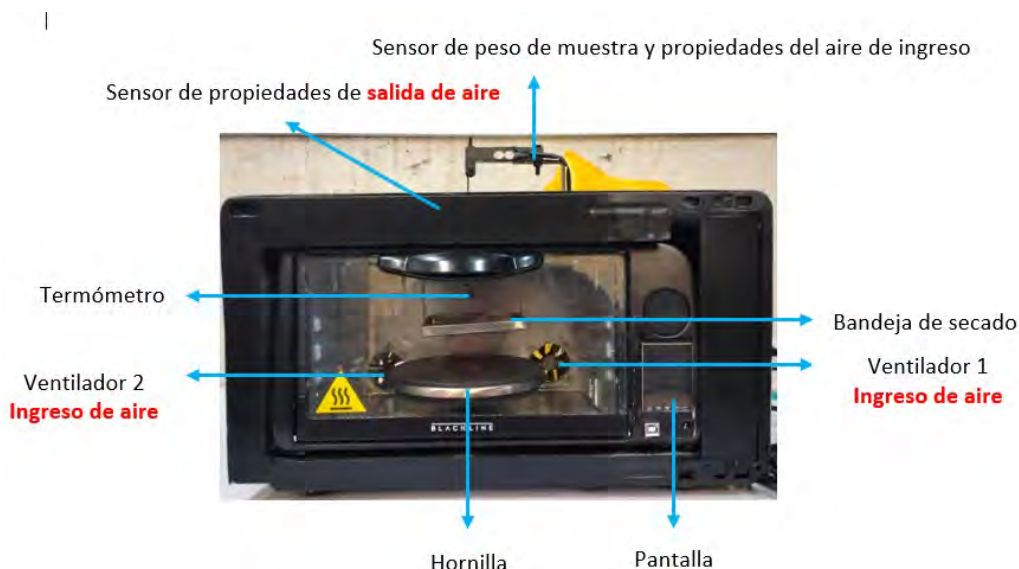
**Tabla 11**

*Características del secador a escala laboratorio*

<b>Tipo de secador</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Rango de temperatura</b>	<b>Control y función</b>	<b>Material de fabricación</b>	<b>Tipo de energía</b>	<b>Dimensión (Largo x Ancho x Alto)</b>
Secador de bandejas	50 g	20 °C a 120 °C	control digital ajustable de Temperatura, tiempo y ventilación	Bandeja de acero inoxidable	Eléctrico	30 cm x 34 cm x 47 cm

**Figura 15**

*Secador de bandejas a escala laboratorio de Escuela profesional de Ingeniería Química*



**Nota:** El secador corresponde a una estufa modificada, la cual fue adaptada con dos ventiladores y aberturas para la salida del aire, permitiendo un mejor control del flujo y distribución del calor durante el proceso de secado.

### 3.1.4. Reactivos:

- Hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) – grado alimenticio, utilizado para facilitar la remoción del pericarpio.
- Metabisulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) – preservante para evitar oxidación y crecimiento microbiano.

### 3.1.5. Software:

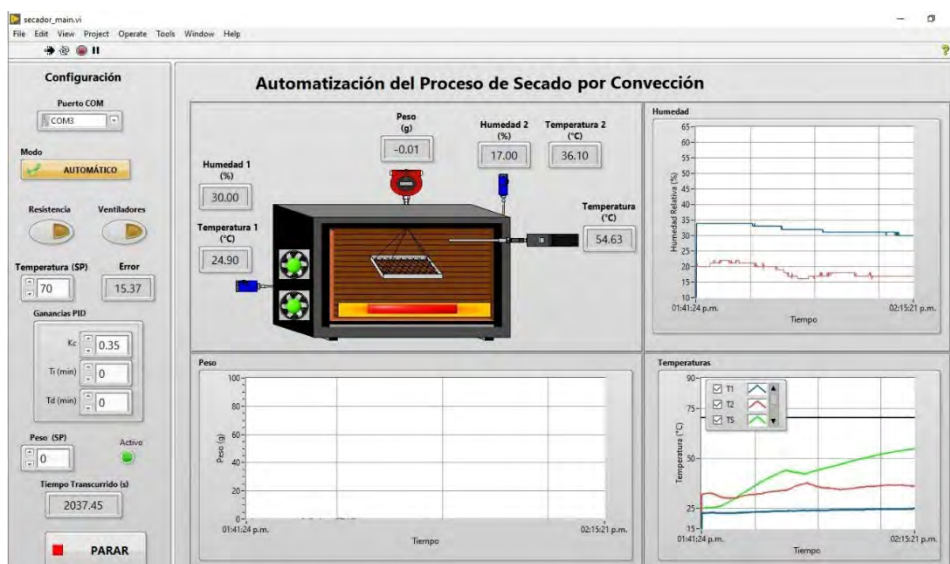
- **LabVIEW:** Para la automatización, adquisición y control de variables del proceso de secado.
- **Microsoft Excel:** Para el registro y procesamiento de datos experimentales.
- **PsyCal:** Para el cálculo de propiedades psicrométricas y condiciones del aire.

El sistema de secado fue automatizado mediante el software LabVIEW, que permitió el monitoreo y control en tiempo real de las variables del proceso (temperatura, humedad y peso).

Los datos registrados por los sensores integrados fueron almacenados automáticamente en Microsoft Excel para su análisis posterior (ver Figura 16).

**Figura 16**

*Secador de bandejas a escala laboratorio de Escuela profesional de Ingeniería Química*



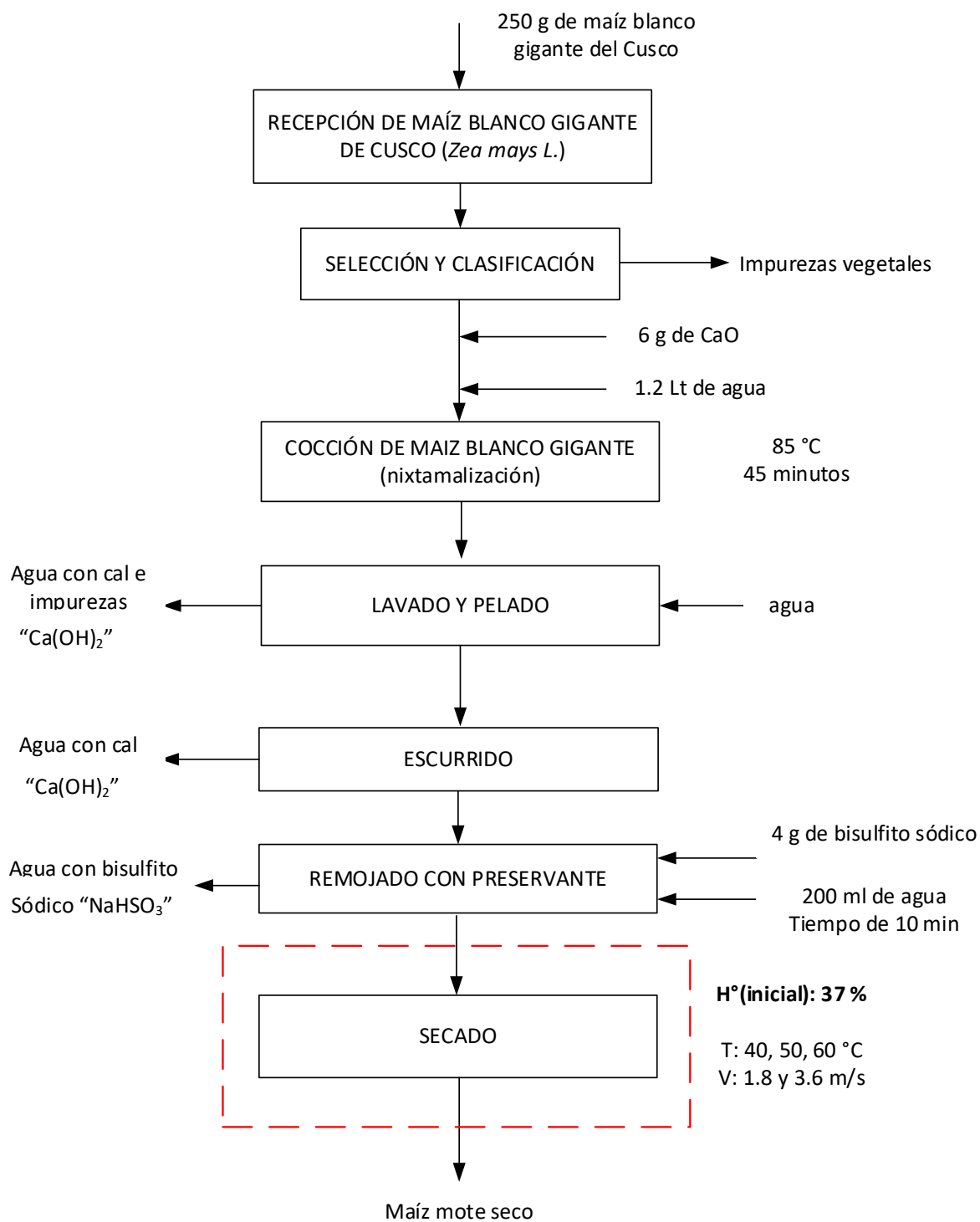
## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Procedimiento del pelado del maíz

Para el secado de maíz mote Cusco (*Zea mays* L.) se realizó el siguiente diagrama de flujo de bloques que se describe en la Figura 17.

**Figura 17**

*Diagrama de flujo de bloques del proceso de secado por lotes (batch) del maíz mote*





**a) Recepción de maíz blanco gigante**

Se trabajó con la materia prima que es el MGBC, de la zona del Valle Sagrado de los Incas, este producto fue de la cosecha del año 2024. Los granos fueron secados al aire libre y posteriormente clasificados, seleccionándose únicamente aquellos de primera calidad. La materia prima empleada presentó un tamaño superior a 16 mm y un peso aproximado de 22 g/oz, parámetros sustentados en estudios técnicos de la FAO y el IICA revisado por Rivera & Riveros, (2007)

**b) Pelado**

El procedimiento del pelado inicio al hacer hervir 1.2 litros de agua mineral en una olla y luego ser tapada, una vez que el agua llegó al punto de ebullición se le agregó 250 gramos de maíz seco y 6 gramos de (CaO) (óxido de calcio) con la finalidad de facilitar la remoción del pericarpio del grano del maíz, se realizó una pre cocción durante 45 minutos para luego ser retirado los granos de maíz con la ayuda de un cernidor y continuar con el retiro de la cáscara (pericarpio).

**c) Lavado y retiro de cáscara**

La finalidad del lavado de los granos precocidos fue retirar la cáscara (pericarpio), el exceso de  $\text{Ca(OH)}_2$  (hidróxido de calcio) y las impurezas que pudieran estar presentes. Este proceso se realizó bajo un flujo constante de agua, con el apoyo de una tela rugosa que permitió una fricción uniforme y eficaz, facilitando así la limpieza completa del grano. El lavado se efectuó en cuatro repeticiones para garantizar un resultado óptimo.

**d) Añadido de preservante**

Teniendo los granos pelados y limpios de impurezas, se preparó una solución de 250 ml de agua destilada con 4 g de metabisulfito sódico ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ), al homogenizar el agua destilada con el

metabisulfito sódico ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ), formó una solución de bisulfito sódico ( $\text{NaHSO}_3$ ), esta sal ácida fue usada como preservante y antioxidante, la muestra de maíz fue sumergida en la solución de bisulfito durante 20 min para luego ser retirados.

#### **e) Secado**

Para el secado del maíz mote se utilizó un secador de bandejas a escala laboratorio, donde se procesó una muestra de aproximadamente 40 gramos de granos. El secado se realizó en una bandeja tipo rejilla de  $11\text{ cm} \times 11\text{ cm}$ , con ambas caras expuestas al flujo de aire. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en el secador, que operó bajo un sistema de convección forzada a temperaturas de 40, 50 y  $60\text{ }^\circ\text{C}$  y velocidades de aire de 1.7 y  $3.4\text{ m/s}$ , medidas con un anemómetro multifuncional, de acuerdo con los valores recomendados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España según el MAPA, (2012).

#### **f) Determinación de la humedad**

Para determinar la humedad del maíz mote al final del proceso de secado, se utilizó un Analizador de Humedad Adam Equipment PMB 53, (2025). Equipo ubicado en el laboratorio de hidrocarburos de la Escuela Profesional de Ingeniería Química. Se colocaron 5 g de muestra previamente triturada en la bandeja del equipo, el cual fue configurado para operar a una temperatura constante de  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , utilizando una lámpara halógena como fuente de calor.

El analizador proporcionó un valor exacto que permitió verificar que el proceso de secado alcanzó un nivel adecuado para su conservación.

### **3.2.2. Evaluar el efecto de la velocidad de aire en el secado**

Para evaluar la influencia de la velocidad del aire sobre la cinética de secado, se emplearon dos velocidades de flujo:  $1.78\text{ m/s}$  y  $3.56\text{ m/s}$ , configuradas mediante el sistema de control del

secador de bandejas a escala de laboratorio. Dado que el equipo dispone de una sola bandeja, el maíz mote blanco gigante del Cusco se distribuyó uniformemente sobre su superficie para asegurar una adecuada exposición al aire caliente. La velocidad del flujo fue verificada con un anemómetro digital perteneciente a la Escuela Profesional de Ingeniería Química, el cual contaba con menos de un año de adquisición, lo que garantiza su correcto funcionamiento. Durante todos los ensayos, las demás condiciones operativas, especialmente la temperatura de secado, se mantuvieron constantes.

Durante el proceso de secado, la pérdida de masa de las muestras se registró de manera automática en intervalos regulares mediante un sensor de peso incorporado al equipo. La información recolectada fue gestionada con el software LabVIEW y almacenada en hojas de cálculo de Microsoft Excel, lo que facilitó su ordenamiento y análisis posterior.

A partir de los datos obtenidos durante cada ensayo —registrados a intervalos establecidos en el plan de recolección de datos— se construyeron las curvas de secado (humedad vs. tiempo) y las curvas de velocidad de secado ( $R$  vs. tiempo), lo que permitió analizar y comparar el comportamiento del proceso bajo las distintas velocidades de flujo evaluadas. Se observó que, independientemente de la velocidad aplicada, ambas condiciones permitieron alcanzar un porcentaje final de humedad similar en las muestras; sin embargo, se evidenciaron diferencias en el tiempo requerido para completar el secado. Este resultado confirma la relevancia del diseño experimental aplicado, ya que los registros sistemáticos realizados facilitaron la interpretación del proceso y la determinación de condiciones de operación más eficientes para el secado del maíz mote blanco gigante del Cusco.

### 3.2.3. Evaluar el efecto de la temperatura del aire

Se evaluó el efecto de tres niveles de temperatura: 40 °C, 50 °C y 60 °C, controladas electrónicamente mediante el sistema del secador de bandejas. La temperatura fue monitoreada en tres puntos estratégicos: entrada, zona interna de secado y salida del aire, utilizando sensores conectados al software LabVIEW, lo cual permitió un registro preciso y continuo durante todo el proceso.

Durante cada tratamiento, la velocidad del aire se mantuvo constante, y las muestras fueron pesadas automáticamente en intervalos regulares para registrar la pérdida de humedad. Los datos obtenidos se utilizaron para construir las curvas de secado (humedad vs. tiempo) y las curvas de velocidad de secado ( $W$  “sólido húmedo” vs. tiempo), como base para el análisis cinético posterior.

### 3.2.4. Procedimiento de cálculos para la velocidad de secado ( $R$ )

El cálculo de la velocidad de secado se desarrolló por medio de la relación de diferencias de pesos que presentan minuto a minuto entre el tiempo y área de secado. Una vez obtenido los cálculos, se procedió a graficar la velocidad de secado en relación del tiempo, por medio de la siguiente ecuación obtenida de Geankopolis (1998), Los datos obtenidos se expresaron como peso total “ $W$ ” del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos “ $t$ ” horas en el periodo de secado.

$$X_t = \frac{W - W_s \text{ (kg total de agua)}}{W_s \text{ (kg sólido seco)}} \quad (13)$$

Donde:

$X_t$ : contenido de humedad en tiempo  $t$  (kg de  $H_2O$ / kg de sólido seco)

$W$ : peso del sólido húmedo (kg)

$W_s$  : peso del sólido seco (kg)

Después de obtener las condiciones de secado, se determina el contenido de humedad de equilibrio, “X\*” mediante la siguiente formula.

$$X = X_t - X^* \quad (14)$$

Siendo:

X: humedad libre (kg de H<sub>2</sub>O libre/ kg de sólido seco)

X<sub>t</sub>: humedad libre en un tiempo t (kg de H<sub>2</sub>O libre/ kg de sólido seco)

X\*: humedad de equilibrio de sólido seco (kg de H<sub>2</sub>O libre/ kg de sólido seco)

Para obtener una curva de velocidad de secado como se muestra en la Figura 5 se midieron las pendientes de las tangentes de la curva, lo que proporcionó valores de  $\left(\frac{dX}{dt}\right)$  para ciertos valores de t. Para calcular la velocidad de secado “R” se usó la siguiente expresión:

$$R = -\frac{L_s}{A_t} \frac{dX}{dt} \quad (15)$$

Donde:

R = velocidad de secado en (kg H<sub>2</sub>O/h.m<sup>2</sup>)

L<sub>s</sub> = kg de sólido seco usado

A<sub>t</sub> = área de la superficie (m<sup>2</sup>)

$\left(\frac{dX}{dt}\right)$  = diferencia de peso en un tiempo t (kg H<sub>2</sub>O/h)

Para poder determinar el cálculo del área total se realizó la siguiente ecuación:

$$A_t = L * A * n \quad (16)$$

Donde:

$L$ : Longitud (metros)

$A$ : Ancho (metros)

$n$ : número de bandejas

### 3.2.5. Evaluación de la cinética de secado (modelos matemáticos)

Para evaluar la cinética de secado del maíz mote Blanco Gigante del Cusco, se registró la pérdida de humedad de las muestras a lo largo del tiempo durante los ensayos experimentales bajo diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire.

Los pesos utilizados para calcular el contenido de humedad en base húmeda y luego convertidos a humedad en base seca utilizando la Ecuación 16.

$$\text{En base seca (X)} = \frac{\text{peso de agua (g)}}{\text{peso de sólido seco (g)}} \quad (17)$$

Con los datos de humedad en base seca y el valor estimado de la humedad en equilibrio ( $X_{eq}$ ), se procedió al cálculo de la humedad residual ( $X_R$ )

Teniendo los datos en base seca usamos la Ecuación 2

$$X_R = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$$

Dónde:

$X$ : Humedad en cada instante de tiempo (g agua/g s.s.)

$X_{eq}$ : Humedad de equilibrio (g agua/g s.s.)

$X_0$ : Humedad inicial (g agua/g s.s.)

Los valores de  $X_R$  obtenidos fueron ajustados a modelos matemáticos mencionados en la Tabla 8.

Los parámetros de cada modelo fueron determinados usando el módulo Solver de Microsoft Excel empleando el método de mínimos cuadrados.

Para evaluar la calidad del ajuste de cada modelo, se utilizó el siguiente indicador estadístico:

Coefficiente de determinación  $R^2$

El modelo que presentó el mayor valor de  $R^2$  fue seleccionado como el que mejor describe el comportamiento de la cinética de secado del maíz mote bajo las condiciones evaluadas

### 3.2.6. Tipo y diseño de la investigación

Las investigaciones y en particular los diseños experimentales intentan establecer básicamente relaciones causa-efecto. Más específicamente, cuando se desea estudiar como una variable independiente (causa) que modifica una variable dependiente (efecto), (Granda, 2023).

Se utilizó un diseño factorial  $3 \times 2$ , considerando tres niveles de temperatura (40 °C, 50 °C y 60 °C) y dos niveles de velocidad de aire (1.78 m/s y 3.56 m/s), con tres repeticiones por tratamiento, lo que resultó en un total de 18 ensayos, ver Tabla 12. Este diseño permitió analizar el efecto individual y combinado de los factores sobre la cinética de secado.

**Tabla 12**

*Características del secador a escala laboratorio*

Tratamiento	Temperatura (°C)	Velocidad aire (m/s)	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
T1	40	1.78	✓	✓	✓
T2	40	3.56	✓	✓	✓
T3	50	1.78	✓	✓	✓
T4	50	3.56	✓	✓	✓
T5	60	1.78	✓	✓	✓
T6	60	3.56	✓	✓	✓

**Total, de tratamientos:** 6 combinaciones  $\times$  3 repeticiones = **18 ensayos**

La investigación fue de tipo experimental aplicado y explicativo, desarrollada en condiciones controladas de laboratorio para determinar y analizar la cinética de secado, donde se manipularon variables independientes de temperatura del aire y velocidad del flujo de aire para

evaluar su efecto sobre la razón de humedad del maíz mote Blanco Gigante del Cusco, este estudio describe el proceso y explica los fenómenos de transferencia de calor y masa que intervienen por medio de ajustes de datos a modelos matemáticos. Según Arias (1997), la investigación aplicada utiliza el conocimiento teórico para abordar situaciones específicas, como en este caso, mediante la recopilación y análisis de datos experimentales obtenidos en laboratorio.

El alcance temporal de la investigación fue de carácter transversal, por ser desarrollada en un periodo de tiempo y limitado a pruebas experimentales durante la ejecución del proyecto. El alcance del trabajo de investigación fue espacial, al ser realizado en un laboratorio de la escuela profesional de ingeniería química con ayuda de un secador de bandeja para fines experimentales. En relación al alcance de los resultados obtenidos fue de orientado a un enfoque aplicado, ya que aporta conocimientos útiles para el sector agroindustrial en el proceso de optimización del secado y conservación de alimentos. De acuerdo con Hernández Sampieri *et al.* (2014), la investigación descriptiva permite recolectar datos en un tiempo determinado y así describir las variables en un momento dado, y espacial por que la investigación se delimita en el lugar donde se desarrolló el estudio.

especificar las propiedades, características y perfiles de fenómenos estudiados, lo cual se evidenció en la evaluación de parámetros como temperatura, velocidad del aire, humedad y calidad final del producto.

Finalmente, el enfoque fue cuantitativo, dado que se fundamentó en la medición numérica precisa de las variables involucradas y en el análisis estadístico de los datos para probar hipótesis y evaluar modelos matemáticos. Este enfoque, como lo señala Hernández Sampieri (2014), permite establecer relaciones causales y verificar patrones de comportamiento a través del uso de instrumentos y métodos estandarizados.



### a) Variables independientes para el tratamiento del maíz mote

Dentro de los parámetros que se utilizaron para esta investigación, se tomó en cuenta como los más importantes; las variables de temperatura y velocidad del aire, que influyen en la determinación la cinética. Para esta investigación se realizó un diseño experimental factorial de dos variables (AxB) donde A representa las temperaturas de secado con 3 niveles y B representa la velocidad del aire con 2 niveles como se muestra en la tabla 13 como factores de estudio.

Factor A: temperaturas de secado del maíz mote (pelado)

Factor B: velocidades de secado

**Tabla 13**

*Factores de estudio de la investigación*

Factores		Simbología	
<b>F-A</b>	Temperaturas de secado (T°)	A1	40 °C
		A2	50 °C
		A3	60 °C
<b>F-B</b>	Velocidad de secado (v)	B1	1.78 m/s
		B2	3.56 m/s

Se obtuvieron 6 tratamientos resultantes de la combinación de los factores los cuales se detalla a continuación en la siguiente Tabla 14.

**Tabla 14**

*Combinación de factores para pruebas experimentales*

Número	Tratamiento	Descripción
<b>T1</b>	A1B1	40 °C, 1.78 m/s
<b>T2</b>	A1B2	40 °C, 3.56 m/s
<b>T3</b>	A2B1	50 °C, 1.78 m/s
<b>T4</b>	A2B2	50 °C, 3.56 m/s
<b>T5</b>	A3B1	60 °C, 1.78 m/s
<b>T6</b>	A3B2	60 °C, 3.56 m/s

### Características del experimento

- Tratamientos: 6
- Repeticiones: 3
- Unidades experimentales 18

Características de la unidad experimental; Se manejó 40 g. de maíz mote blanco gigante del Cusco

### b) Variables

#### Variables independientes

- Temperatura de aire de secado ( $^{\circ}\text{C}$ ) ( $40^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$ )
- Velocidad de flujo de aire (m/s) ( $1.78\text{ m/s}$  y  $3.56\text{ m/s}$ )

#### Variables de entrada

- Temperatura inicial de la muestra ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Masa inicial de la muestra (kg)
- Humedad inicial del grano (%)

#### Variables dependientes

- Razón de humedad ( $X_R$ )
- Velocidad de secado ( $\text{kg/h.m}^2$ )
- Calidad fisicoquímica y microbiológica del producto final.

### 3.2.7. Factores de estudio para la evaluación de la capacidad de rehidratación del Maíz Mote Gigante del Cusco secado a tres diferentes temperaturas.

El proceso de rehidratación se realizó sumergiendo muestras de maíz, previamente secadas a 40 °C, 50 °C y 60 °C, en agua destilada a 89,3 °C. Se registraron los pesos cada minuto hasta el minuto 10 y luego cada 5 minutos hasta el minuto 30. Según Verma y Prasad (1999), a temperaturas cercanas a 90 °C, la absorción de agua en los granos de maíz es rápida, alcanzando niveles significativos en un rango de 30 a 60 minutos.

Marín *et al.*, (2006) aplica la siguiente fórmula para calcular la capacidad de rehidratación (CR) en productos alimenticios deshidratados:

$$CR = \frac{\text{contenido de agua absorbida (g)}}{\text{masa de la muestra deshidratada (g)}}$$

**Tabla 15**

*Toma de datos para evaluar la capacidad de rehidratación de las muestras secada (40°C, 50°C y 60°C)*

Tiempo (min)	Muestras a evaluar		
	Peso de rehidratado (g) a 40°C	Peso de rehidratado (g) a 50°C	Peso de rehidratado (g) a 60°C
<b>1</b>	Valor	Valor	Valor
<b>2</b>	Valor	Valor	valor
<b>:</b>	<b>:</b>	<b>:</b>	<b>:</b>
<b>25</b>	Valor	Valor	Valor
<b>30</b>	Valor	Valor	valor

Se realizaron tres repeticiones por muestra, y al finalizar el proceso de rehidratación a los 30 minutos (según Tabla 15), se espera que las muestras presenten mejoras en sus propiedades fisicoquímicas. Estos cambios estarán relacionados con el aumento progresivo de peso registrado, evidenciando una adecuada absorción de agua durante el proceso.



En la Figura 18, se muestran las curvas de contenido de humedad en base seca en función del tiempo. Se realizaron seis ensayos con tres repeticiones cada uno. El trabajo se realizó en base seca para facilitar los cálculos como se expresa en la siguiente Ecuación 17.

$$\text{En base seca (X bs)} = \frac{\text{peso de agua (g)}}{\text{peso de sólido seco (g)}}$$

Los datos de peso en base húmeda obtenidos en intervalos regulares de 0.13 horas se presentan en el Apéndice 1. A partir de estos datos, se procedió al cálculo del contenido de humedad en base seca, tal como se detalla en el Apéndice 2. Los resultados del contenido de humedad en base seca correspondientes a las seis pruebas experimentales se resumen en el Apéndice 3.

Según la Figura 18, los tratamientos realizados a 60 °C con velocidades de 1.78 m/s y 3.56 m/s alcanzaron la humedad constante en un tiempo aproximado de 5 horas, siendo los más eficientes del estudio. En comparación, los tratamientos a 50 °C tardaron entre 7 y 7.5 horas, y los realizados a 40 °C extendieron el tiempo de secado hasta 8 a 9 horas.

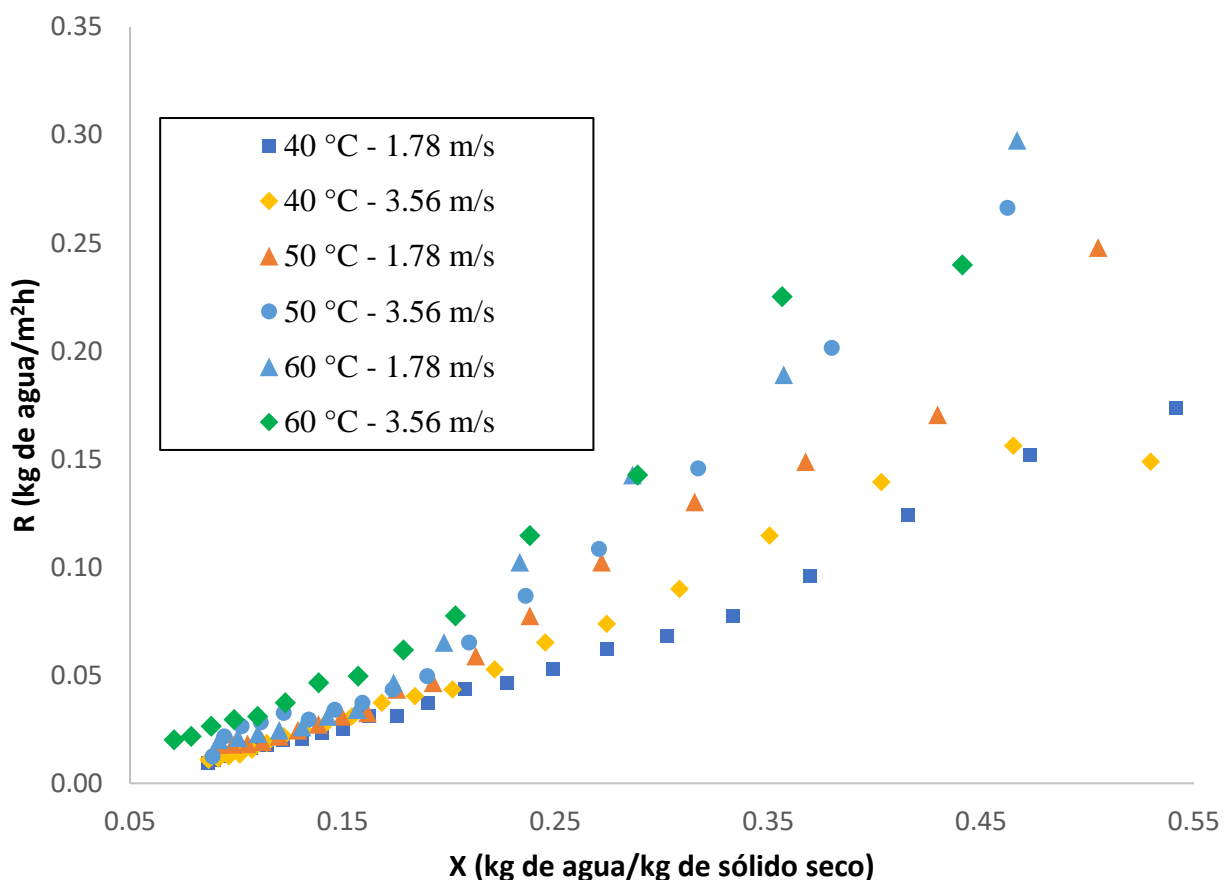
Estas diferencias se deben a que una mayor temperatura incrementa la velocidad de transferencia de calor y la energía cinética molecular, lo que acelera la evaporación del agua contenida en el grano. Además, al elevarse la temperatura, se incrementa el gradiente de concentración de vapor entre el interior del grano y el ambiente, facilitando su difusión hacia el exterior, así también lo demostraron Choque & Molina (2018) con un secado a 55°C.

En comparación al trabajo de Lara (2017) se pudo evidenciar que, a mayor temperatura y velocidad de flujo de aire, la deshidratación es más rápida a condiciones de secado de 80°C y 4 m/s de flujo de aire, en un tiempo de 6 horas. Del mismo modo en comparación con Choque y

Molina (2018) que a una mayor temperatura optimizar el secado sin afectar sus propiedades fisicoquímicas.

**Figura 19**

*Curva de la velocidad de secado vs la humedad en base seca del maíz mote blanco gigante del Cusco*



La Figura 19 muestra la relación entre la velocidad de secado ( $R$ ) y el contenido de humedad en base seca ( $X$ ) del maíz mote Blanco Gigante del Cusco, los datos experimentales se encuentran en el Apéndice 5. Se evidencia que el proceso no presenta las etapas iniciales ni de velocidad constante, desarrollándose únicamente en la etapa de velocidad decreciente, lo cual es común en muchos productos agrícolas donde las fases iniciales resultan difíciles de identificar según Cáceres (2022).

Los resultados demostraron que la velocidad de secado aumenta proporcionalmente con la temperatura, siendo más alta en los tratamientos a 60 °C con flujos de 1.78 y 3.56 m/s, y más baja a 40 °C, lo que refleja un secado más lento. La velocidad de secado (R) se calculó a partir de los valores de humedad en base seca registrados en diferentes intervalos de tiempo, considerando el peso de sólido seco y el área de secado efectiva (0.0121 m<sup>2</sup> por bandeja, duplicada por secado en ambas caras). Esta información permitió determinar la pérdida de humedad por unidad de área y tiempo usando la resolución detallada de la velocidad de secado se encuentra en el Apéndice 4 resuelta con la Ecuación 15 y los datos de las curvas de secado en el Apéndice 5.

$$R = -\frac{L_s}{A_t} \frac{dX}{dt}$$

Singh y Heldman (2009) indican que el movimiento del fluido del aire influye considerablemente en la transferencia de calor por convección, del mismo modo Geankoplis (1998) comenta que si existe mayor velocidad de corriente de aire la transferencia de calor será mayor. Ambos autores concuerdan que, si existe mayor velocidad de aire, el secado será en menor tiempo como se puede ver en la Figura 19.

También se puede observar que todas las curvas de velocidad de secado muestran una etapa de velocidad decreciente, caracterizada por no tener agua en la superficie y la velocidad de secado disminuye, el factor limitante es el agua que migra de la parte interna del maíz mote. Finalmente, la fase de secado final, donde es más difícil la reducción de humedad, ya que el agua restante se encuentra adentrada en la matriz del alimento.

La tesis realizada por Lara (2017) titulada desarrollo de un producto pre-cocido deshidratado a base de maíz blanco nixtamalizado (pelado) tiene una curva y velocidad de secado (80°C y 4m/s) similar a las Figuras 18 y 19, verificando que no existe una etapa de secado inicial

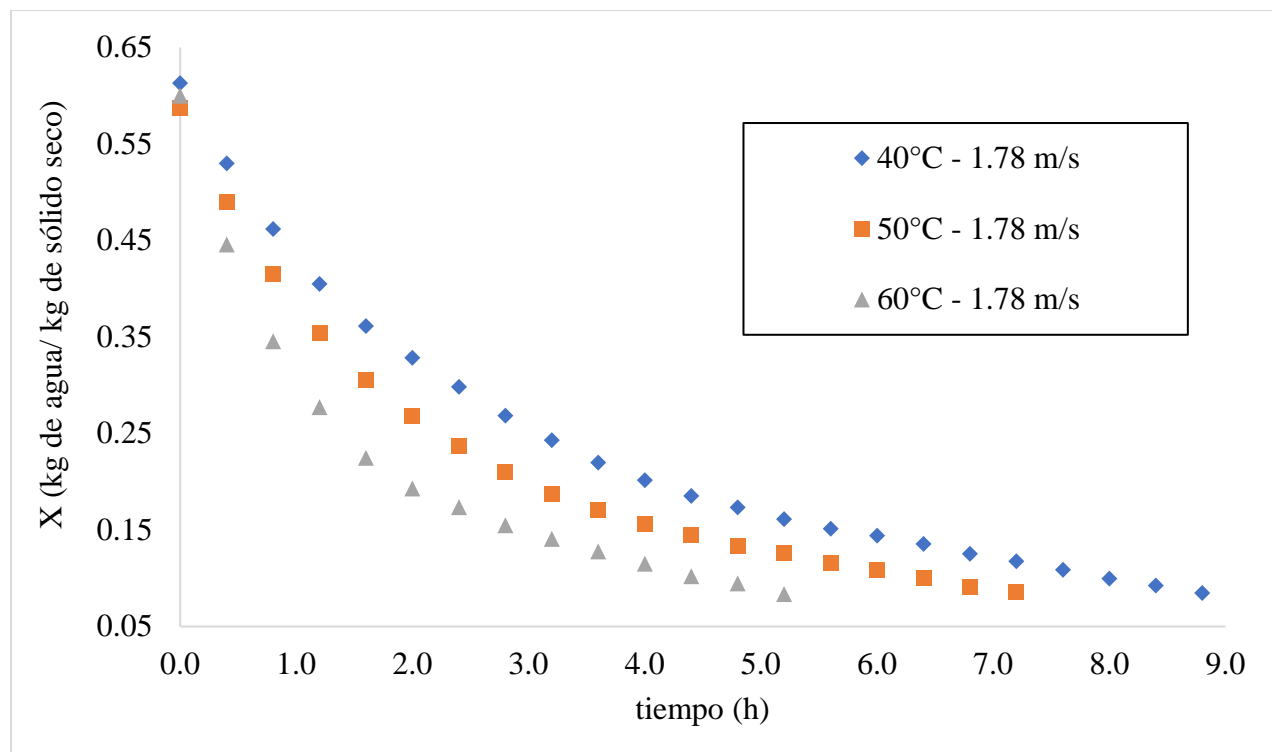
y constante, además llegando a ver que no todos los productos agrícolas tienen todas las etapas de secado se reafirma que la única etapa presente en la curva de secado es la etapa decreciente, también que la pendiente de la curva es mayor a condiciones más altas de temperatura y flujo de aire. Cáceres (2022a) menciona que la humedad crítica aparece entre la etapa de velocidad constante y al inicio de la etapa de velocidad decreciente. La etapa de velocidad constante en la Figura 20 no se puede apreciar. En comparación el trabajo de Choque y Molina (2018) la velocidad de secado presenta una mayor pendiente para un secado con mayor temperatura (55°C).

#### 4.2. Evaluación del efecto de la temperatura en la cinética de secado de maíz mote blanco gigante de Cusco (*Zea mays* L.).

A continuación, se muestra el efecto de la temperatura en las curvas, para las pruebas experimentales:

**Figura 20**

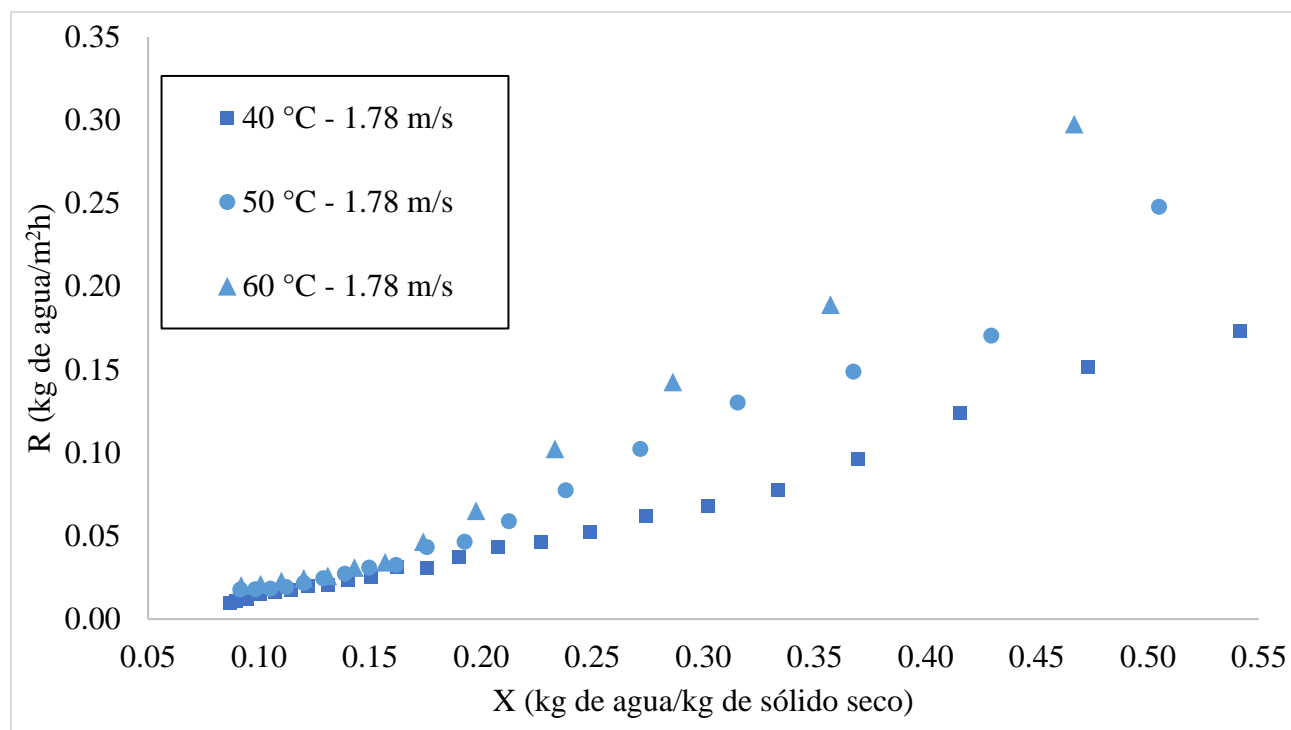
*Efecto de la temperatura en la curva de secado a una velocidad de aire de 1.78 m/s*





**Figura 21**

*Efecto de la temperatura en la curva de velocidad de secado a una velocidad de aire de 1.78 m/s*

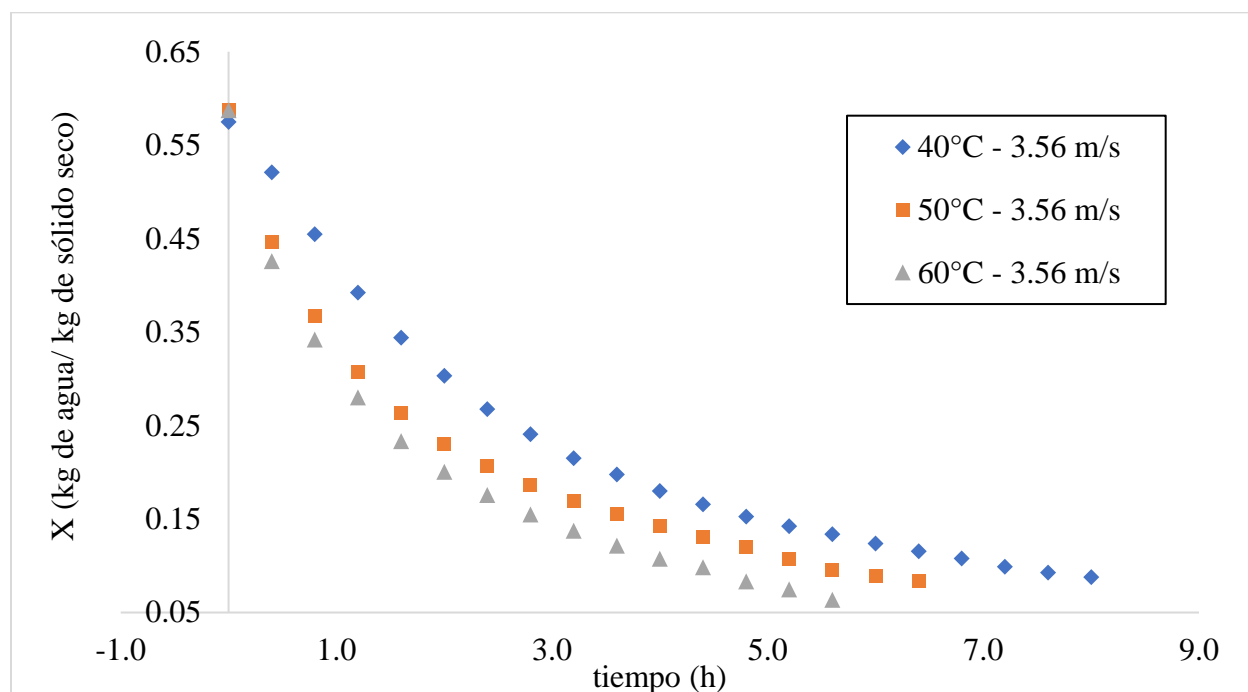


La Figura 20 muestra la influencia de la temperatura del aire en el proceso de secado del maíz mote blanco gigante del Cusco, manteniendo constante la velocidad del aire en 1.78 m/s. Los ensayos se realizaron a temperaturas de 40, 50 y 60 °C, obteniéndose humedades finales cercanas al 7–8 %, determinadas mediante un medidor de humedad. Se observa que, al incrementar la temperatura, la pendiente de la curva de secado se hace más pronunciada, lo que evidencia una mayor velocidad de eliminación de humedad. Asimismo, se aprecia que el tiempo necesario para alcanzar la humedad final se reduce de manera significativa: aproximadamente 1.5 horas entre 40 °C y 50 °C, y alrededor de 2 horas entre 50 °C y 60 °C. Esto confirma que la temperatura es un factor determinante en la eficiencia del secado, ya que incrementa la transferencia de calor hacia el grano y acelera la evaporación del agua contenida.

La Figura 21 muestra las curvas de velocidad de secado ( $R$ ) en función del contenido de humedad en base seca ( $X$ ), a una velocidad constante del aire de 1.78 m/s y a tres temperaturas diferentes (40 °C, 50 °C y 60 °C). Se observa que, en todos los casos, el proceso presenta una etapa de velocidad decreciente, lo que indica que a medida que el contenido de humedad disminuye, la velocidad de secado también se reduce. Este comportamiento se intensifica cuando la humedad superficial del grano ha sido eliminada y la evaporación depende de la difusión interna del agua. Además, se evidencia que, a mayor temperatura, la velocidad de secado es más alta en todo el intervalo de humedad, siendo más eficiente el secado a 60 °C. Esto se debe al mayor gradiente de presión de vapor y a la mayor energía térmica disponible, lo que favorece la transferencia de masa.

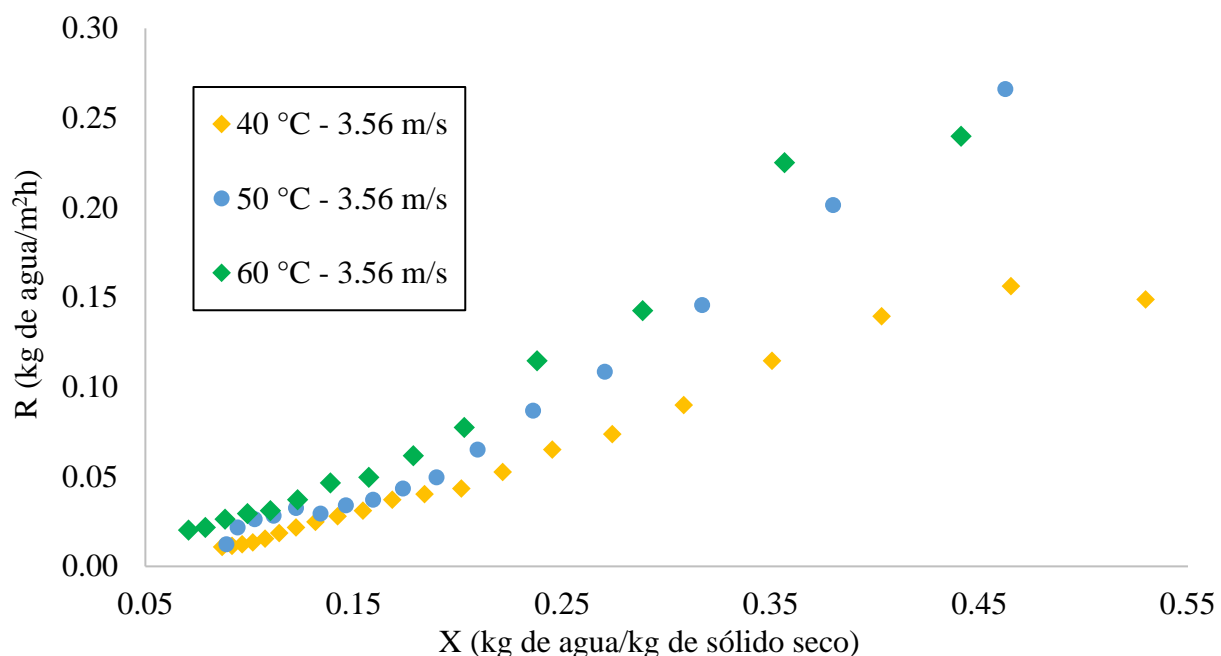
## Figura 22

*Efecto de la temperatura en la curva de secado a una velocidad de flujo de aire de 3.56 m/s*



**Figura 23**

*Efecto de la temperatura en la curva de velocidad de secado a una velocidad de flujo de aire de 3.56 m/s*



La Figura 22 muestra como la temperatura influye en el secado, manteniendo la velocidad del aire (3.56m/s), el ensayo se realizó con tres temperaturas de 40, 50, 60 °C, en la gráfica se puede ver que al incrementar la temperatura la pendiente de la curva de humedad se incrementa. Se observa la diferencia en el tiempo de secado entre las curvas de 40 °C y 50 °C fue de 1.5 horas mientras que la evaluación del efecto de la velocidad del aire en la cinética de secado del maíz mote blanco gigante de Cusco.

La Figura 23 muestra que, a una velocidad constante del aire de 3.56 m/s, la velocidad de secado (R) aumenta a medida que se incrementa la temperatura del aire, siendo más alta a 60 °C en todo el rango de humedad evaluado. A medida que el contenido de humedad disminuye, las curvas presentan una pendiente menos pronunciada, lo que indica una etapa de velocidad decreciente, típica cuando la humedad superficial ha sido eliminada y la evaporación depende de la difusión del agua desde el interior del grano. Este comportamiento evidencia que temperaturas

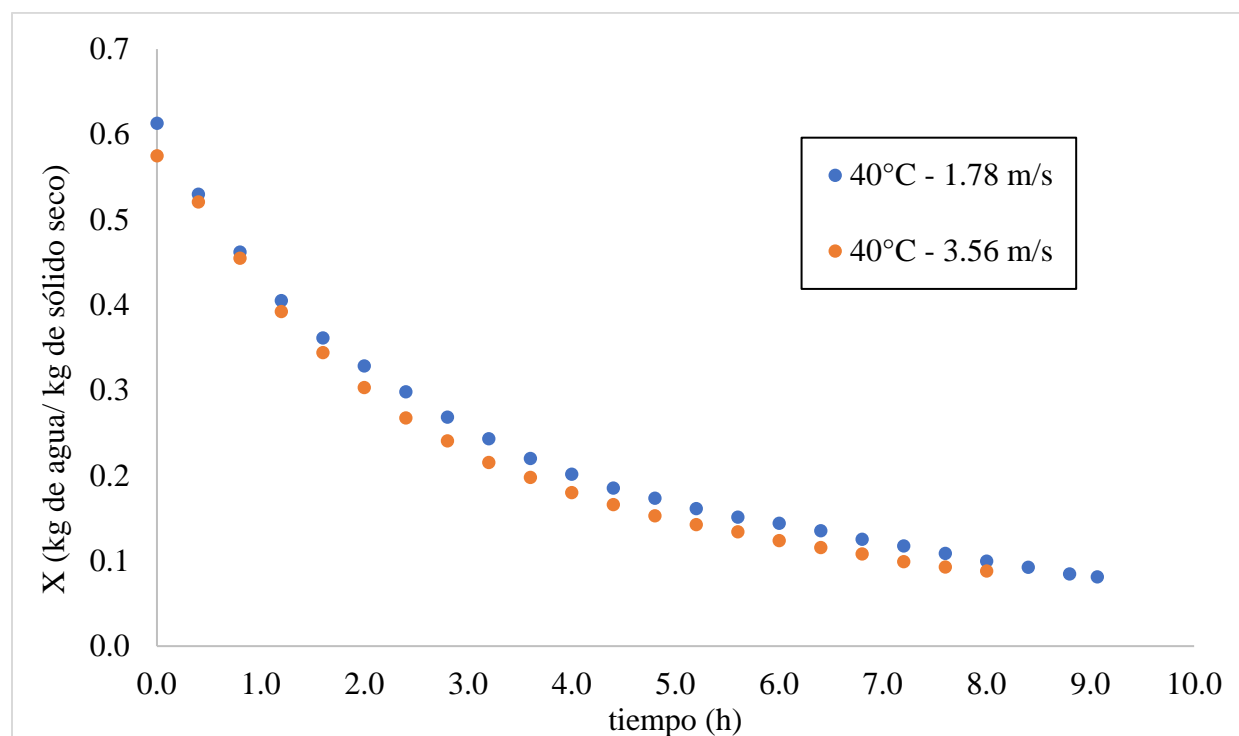
más altas permiten un secado más eficiente, ya que incrementan el gradiente de presión de vapor y la energía térmica disponible para acelerar la eliminación de la humedad.

#### 4.3. Evaluación del efecto de la velocidad del aire en la cinética de secado de maíz mote blanco gigante de Cusco (*Zea mays* L.).

A continuación, se muestra el efecto de la temperatura en las curvas, para las pruebas experimentales:

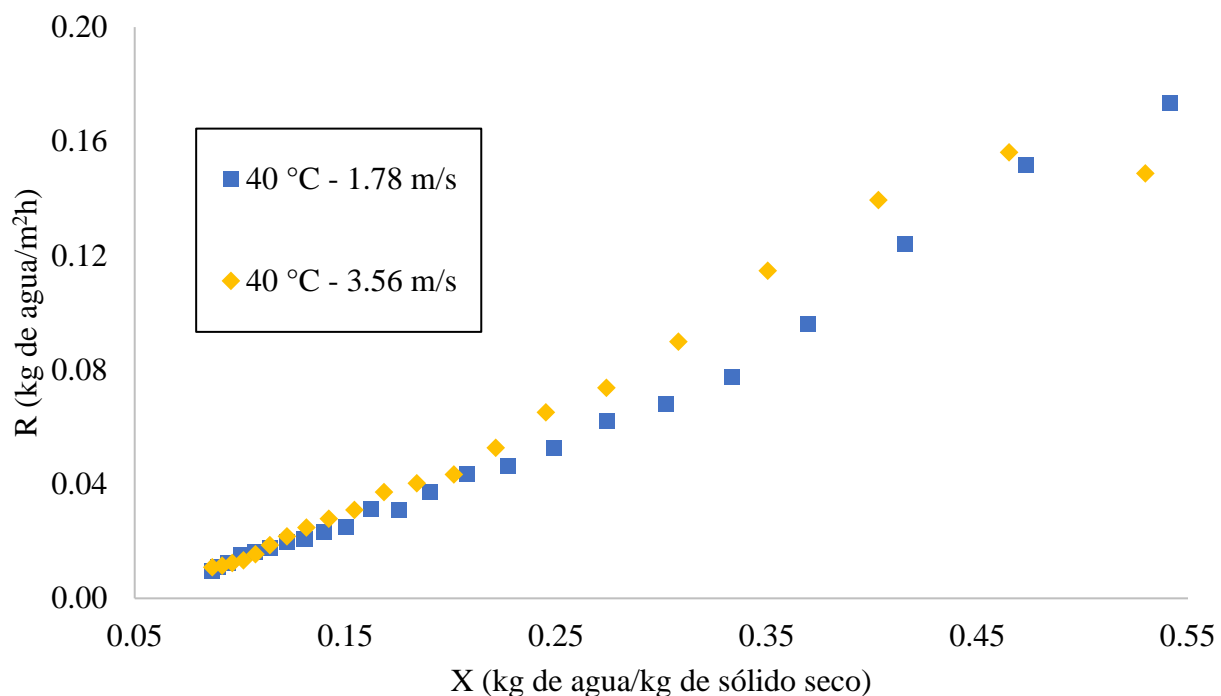
**Figura 24**

*Efecto de la velocidad del aire en la curva de secado a una temperatura de aire 40°C*



**Figura 25**

*Efecto de la velocidad del aire en la curva de velocidad de secado a una temperatura de 50°C*

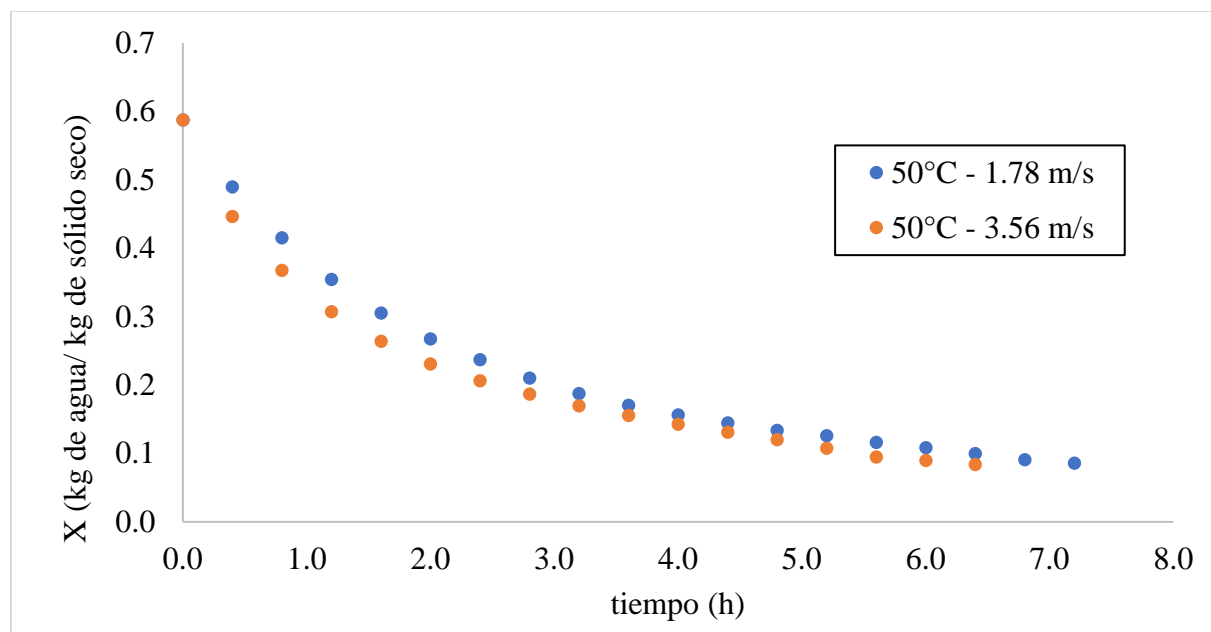


La Figura 24 muestra el efecto de la velocidad del flujo de aire sobre la cinética de secado del maíz mote a 40 °C, comparando las condiciones de 1.78 m/s y 3.56 m/s. Se observa que un mayor flujo de aire acelera el proceso de deshidratación, ya que la curva correspondiente a 3.56 m/s desciende más rápidamente, alcanzando niveles bajos de humedad en menos tiempo. En ambos casos, el contenido de humedad disminuye de manera progresiva durante las primeras siete horas, pero a partir de ese punto las curvas tienden a estabilizarse, lo que indica la proximidad a la humedad en equilibrio. El producto sometido a 3.56 m/s alcanza ese equilibrio alrededor de las 8 horas, mientras que a 1.78 m/s lo hace aproximadamente a las 9 horas. Este comportamiento confirma que un mayor flujo de aire mejora la eficiencia del secado, al facilitar la renovación de vapor y aumentar el gradiente de presión parcial de agua entre el grano y el aire.

La Figura 25 muestra el efecto de la velocidad del aire sobre la velocidad de secado del maíz mote blanco gigante del Cusco, a una temperatura constante de 40 °C. Se observa que, al incrementar la velocidad del flujo de aire de 1.78 m/s a 3.56 m/s, la velocidad de secado aumenta ligeramente, lo que evidencia una mejora en la transferencia de humedad desde el grano hacia el ambiente. Sin embargo, ambas curvas siguen un patrón similar: a medida que disminuye la humedad del producto, también disminuye progresivamente la velocidad de secado, lo que indica el inicio de una fase de secado más lenta. Este comportamiento es característico de la etapa de velocidad decreciente dentro de la cinética de secado, y sugiere que, aunque el incremento del flujo de aire tiene un efecto positivo inicial, su influencia se atenúa conforme el maíz mote se acerca a su humedad de equilibrio.

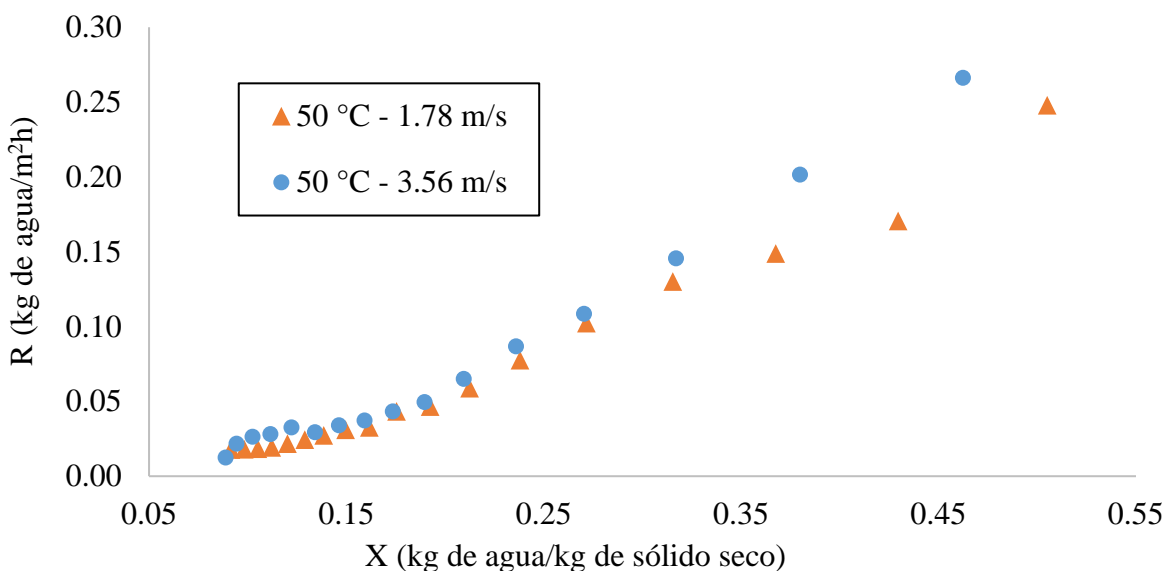
### Figura 26

*Efecto de la velocidad del aire en la curva de secado a una temperatura de aire 50°C*



**Figura 27**

*Efecto de la velocidad del aire en la curva de velocidad de secado a una temperatura de 50 °C*



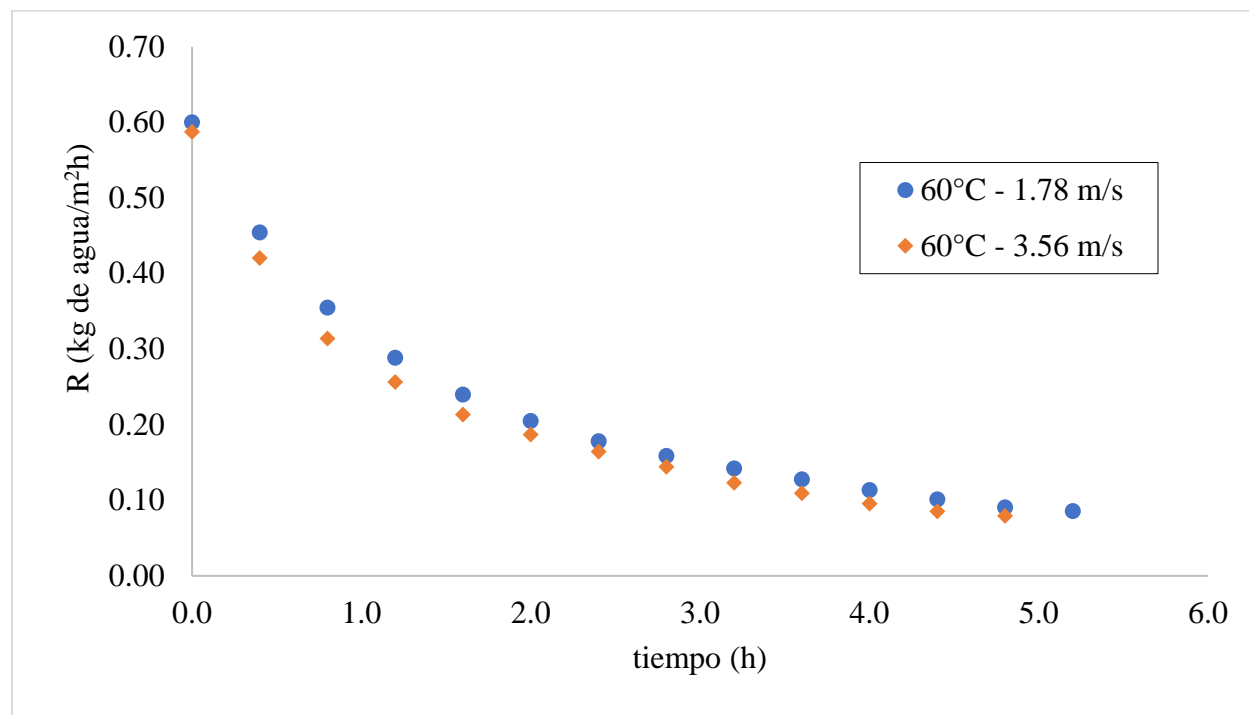
La Figura 26 muestra la evolución del contenido de humedad en base seca (X) del maíz mote blanco gigante del Cusco durante el secado a una temperatura constante de 50 °C, comparando dos velocidades de aire: 1.78 m/s y 3.56 m/s. Se observa que, a mayor velocidad del aire (3.56 m/s), la eliminación de humedad es más rápida, alcanzando la humedad de equilibrio en aproximadamente 6 horas, mientras que a 1.78 m/s este equilibrio se logra alrededor de las 7.5 horas. En ambas condiciones, la curva de secado presenta un comportamiento decreciente hasta estabilizarse, indicando que el aumento de la velocidad del aire mejora la eficiencia del secado al reducir el tiempo necesario para alcanzar la humedad de equilibrio.

La Figura 27 muestra la relación entre el contenido de humedad en base seca y la velocidad de secado del maíz mote blanco gigante del Cusco a una temperatura constante de 50 °C, comparando dos velocidades de aire: 1.78 m/s y 3.56 m/s. Se evidencia que la velocidad de secado

es superior cuando se emplea un flujo de aire de 3.56 m/s, especialmente durante las primeras etapas del proceso, donde el contenido de humedad es más elevado. A medida que el secado avanza y la humedad del grano disminuye, las diferencias entre ambas curvas se reducen, tendiendo a comportamientos similares. Esto sugiere que el efecto del incremento en la velocidad del aire es más significativo en las fases iniciales del secado, cuando hay mayor cantidad de agua disponible para ser eliminada.

**Figura 28**

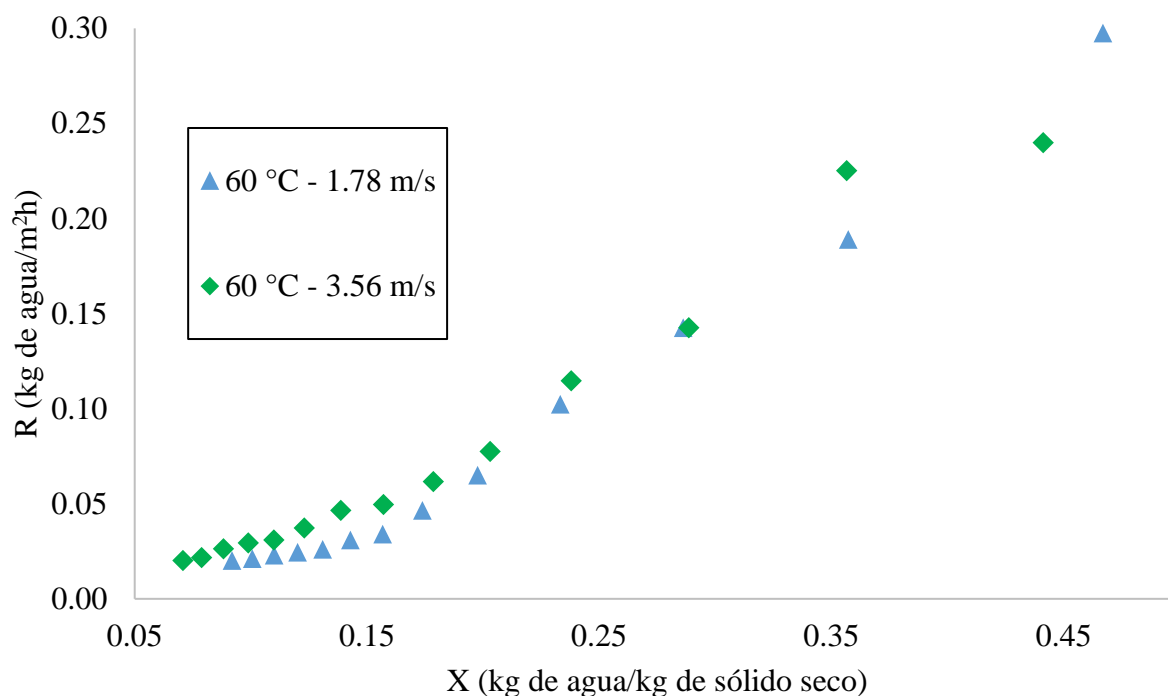
*Efecto de la velocidad del aire en la curva de secado a una temperatura de aire 60°C*





**Figura 29**

*Efecto de la velocidad del aire en la curva de velocidad de secado a temperatura de 60 °C*



La Figura 28 muestra el secado del maíz mote blanco gigante del Cusco a 60 °C con velocidades de aire de 1.78 y 3.56 m/s. Se observa que el secado es más rápido al inicio con 3.56 m/s, mostrando una mayor disminución del contenido de humedad. Ambas curvas mantienen una tendencia decreciente hasta las 4.5 horas, momento en que se aproximan al equilibrio. Esto indica que un mayor flujo de aire acelera el secado en las primeras etapas, pero su efecto se reduce conforme avanza el proceso.

La Figura 29 muestra el efecto de la velocidad del aire en la velocidad de secado del maíz mote blanco gigante del Cusco a 60 °C. Se observa que el flujo de 3.56 m/s genera una mayor velocidad de secado en las etapas iniciales, comparado con 1.78 m/s. Sin embargo, a medida que disminuye el contenido de humedad, ambas curvas tienden a converger, lo que indica que el efecto

del flujo de aire es más significativo al inicio del proceso y pierde influencia en las fases finales del secado.

#### 4.4. Ajuste a modelos matemáticos de la cinética del secado de Maíz mote blanco gigante del Cusco (*Zea mays* L.)

Para la evaluación de la cinética de secado se realizó el ajuste matemático de los datos experimentales utilizando el modelo de Lewis presentado en la Tabla 8, cuyos resultados se muestran en la Tabla 16. El ajuste fue ejecutado en Microsoft Excel mediante la herramienta Solver, con la finalidad de determinar la constante de secado ( $k$ ) y la humedad residual ( $X_R$ ) minimizando el error cuadrático entre los valores experimentales y calculados. La humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ ) estimada considerando el último valor de humedad en base seca registrado en cada ensayo. Los datos experimentales y los procedimientos de cálculo se detallan en el Apéndice 7. Asimismo, la humedad absoluta del aire ( $Y$ ), requerida para el análisis psicrométrico, fue determinada utilizando el software PsyCal, como se muestra en el Apéndice 6. El modelo de Lewis utilizado para la simulación se expresa mediante la ecuación indicada en la Tabla 8.

$$X_R = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-kt)$$

**Tabla 16**

*Humedad residual y constante de secado a 40 °C y 1.78 m/s “Modelo de Lewis”*

<b>T= 40°C</b>		<b>Y=0.00391</b>		<b>X<sub>eq</sub>=0.086</b>		<b>e<sup>2</sup></b>		<b>Constante de secado k: 0.3887</b>
<b>N°</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>X<sub>bs</sub></b>	<b>x<sub>bh</sub></b>	<b>X/X<sub>0</sub></b>	<b>X<sub>R, exp</sub></b>	<b>X<sub>R, cal</sub></b>	<b>(X<sub>R, exp</sub> - X<sub>R, cal</sub>)<sup>2</sup></b>	
1	0.00	0.613	0.38	1.00	1.00	1.0000	0.0000	
2	0.40	0.529	0.35	0.86	0.84	0.8560	0.0002	
3	0.80	0.462	0.32	0.75	0.71	0.7327	0.0003	
4	1.20	0.407	0.29	0.66	0.61	0.6272	0.0003	
5	1.60	0.363	0.27	0.59	0.53	0.5369	0.0001	
6	2.00	0.328	0.25	0.54	0.46	0.4596	0.0000	
7	2.40	0.297	0.23	0.49	0.40	0.3934	0.0001	
8	2.80	0.270	0.21	0.44	0.35	0.3367	0.0001	

9	3.20	0.245	0.20	0.40	0.30	0.2882	0.0002
10	3.60	0.224	0.18	0.37	0.26	0.2467	0.0002
11	4.00	0.205	0.17	0.33	0.22	0.2112	0.0002
12	4.40	0.187	0.16	0.31	0.19	0.1808	0.0001
13	4.80	0.173	0.15	0.28	0.17	0.1547	0.0001
14	5.20	0.160	0.14	0.26	0.14	0.1325	0.0001
15	5.60	0.148	0.13	0.24	0.12	0.1134	0.0000
16	6.00	0.138	0.12	0.23	0.10	0.0971	0.0000
17	6.40	0.129	0.11	0.21	0.08	0.0831	0.0000
18	6.80	0.121	0.11	0.20	0.07	0.0711	0.0000
19	7.20	0.113	0.10	0.18	0.05	0.0609	0.0001
20	7.60	0.106	0.10	0.17	0.04	0.0521	0.0002
21	8.00	0.099	0.09	0.16	0.03	0.0446	0.0004
22	8.40	0.094	0.09	0.15	0.01	0.0382	0.0006
23	8.80	0.089	0.08	0.14	0.01	0.0327	0.0008
24	9.07	<b>0.086</b>	0.08	0.14	0.00	0.0295	0.0009
						$\Sigma=$	<b>0.005</b>

Donde k es la constante de secado de modelo de Lewis, El cálculo de resultados de la Tabla 16 se muestra a continuación.

- **La tercera columna:** corresponde al contenido de humedad en base seca Xbs, el cual fue calculado a partir de los datos de masa húmeda y tiempo registrado en el Apéndice 1. Usando estos valores y la ecuación 17, se determinó el contenido de humedad en base seca para cada punto del proceso de secado.

$$\text{En base seca (X)} = \frac{\text{peso de agua (g)}}{\text{peso de sólido seco (g)}}$$

Usando la ecuación 17 obtenemos el primer y segundo datos de humedad en base seca

$$(X) = \frac{(36.85)(0.38)}{(36.85)(1 - 0.38)} = 0.6129$$

El cálculo del segundo dato hacia adelante se calcula de la siguiente forma:

$$(X) = \frac{(0.38)(36.85) - (36.85 - 36.08)}{(36.85)(1 - 0.38)} = 0.5297$$

- **La cuarta columna:** corresponde al contenido de humedad en base húmeda (xbh), se calcula de la siguiente forma:

$$xbh = \frac{Xbs}{Xbs - 1} \quad (18)$$

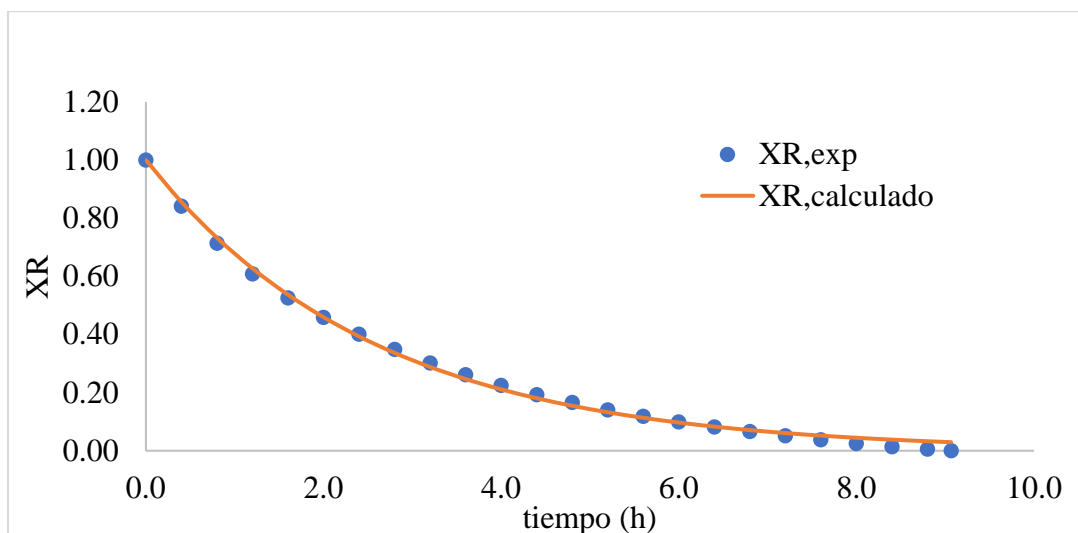
Usando la ecuación 18 obtenemos humedad en base húmeda.

$$x = \frac{0.6129}{0.6129 - 1} = 0.38$$

- **La quinta columna:** representa la relación de humedad en base seca (X) a diferente tiempo con la humedad en base seca inicial ( $X_0$ )
- **La sexta columna:** representa la humedad residual experimental ( $X_{R, \text{exp}}$ ), calculada utilizando el modelo matemático de Lewis según la ecuación correspondiente presentada en la Tabla 8.
- **La séptima columna** representa la humedad residual calculada ( $X_{R, \text{cal}}$ ) obtenida mediante el uso de la herramienta *Solver* en Microsoft Excel. Para ello, se crea una celda asignada al valor de la constante k, con un valor inicial fijado. Luego, se aplica la ecuación del modelo de Lewis, introduciendo los datos correspondientes para ajustar el modelo y minimizar el error respecto a los valores experimentales.
- **La octava columna** representa el cuadrado de la diferencia entre la humedad residual experimental y la calculada ( $e^2$ ). Esta fórmula se aplica a todas las celdas de la columna. La suma total de estos valores corresponde a la celda objetivo que debe minimizarse utilizando *Solver*, modificando el valor de la constante de secado k. Una vez encontrada la solución con un error mínimo, el valor ajustado de k se presenta en la novena columna

**Figura 30**

*Curva de secado experimental ajustada con el modelo matemático de Lewis a condiciones de 40 °C y 1.78 m/s*



La Figura 30 muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo de Lewis. Los resultados del ajuste, incluyendo la constante de secado ( $k$ ) y la suma de los errores al cuadrado (SSE), se detallan en la Tabla 16. En este caso, el valor de SSE fue 0.005, lo que indica que la diferencia entre los valores experimentales y los calculados por el modelo es muy baja, evidenciando un buen ajuste del modelo a los datos experimentales para este tratamiento.

Para el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se realiza con la siguiente ecuación.

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma e^2}{\Sigma (y - \bar{y})^2} \quad (19)$$

$$R^2 = 1 - \left( \frac{0.005}{1.830} \right) = 0.997$$

Al comparar los resultados de esta investigación con los de Choque y Molina (2018), quienes obtuvieron valores de  $k$  entre 0.020 y 0.065 y valores de  $n$  entre 0.87 y 1.02 para el secado de quinua, se observa que los valores de  $k$  obtenidos para el maíz mote blanco gigante del Cusco

son considerablemente mayores (por ejemplo,  $k = -1.114$  a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) mientras que los valores de  $n$  son similares (0.85). Esto indica que, aunque ambos productos siguen una cinética de secado comparable en la forma de la curva (reflejada en el parámetro  $n$ ), el maíz mote presenta una velocidad de secado más rápida, influenciada por las mayores velocidades de aire empleadas y por sus características físicas. En conjunto, la similitud del parámetro  $n$  demuestra que el modelo de Page describe adecuadamente el secado en ambos granos, mientras que las diferencias en  $k$  reflejan las particularidades estructurales y operativas de cada estudio. Sin embargo, los datos obtenidos por Miranda (2011) en el secado de granos de cacao, se observa una diferencia marcada en los valores de la constante de secado  $k$ . En cacao,  $k$  varía entre 0.0017 y 0.0079 en el rango de  $40\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que en el maíz mote blanco gigante del Cusco los valores fueron considerablemente mayores, alcanzando 0.6964 a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 0.8359 a  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 1.114 a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esta diferencia de dos órdenes de magnitud indica que el maíz mote presenta una cinética de secado mucho más rápida, influenciada por las mayores velocidades de aire empleadas.

#### **4.4.1. Evaluación estadística del ajuste a los diez modelos cinéticos de secado**

La Tabla 17 presenta los resultados del ajuste de la cinética de secado del maíz mote blanco gigante del Cusco a los diez modelos cinéticos descritos previamente en la Tabla 8. En esta tabla, la quinta columna muestra los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual indica el grado de ajuste entre el modelo y los datos experimentales; mientras más cercano a 1 sea este valor, mejor será el ajuste. En todos los modelos evaluados, los valores de  $R^2$  se encuentran próximos a la unidad, lo que sugiere un buen desempeño de los modelos planteados. Por otro lado, la sexta columna muestra los valores de la suma de los errores al cuadrado (SSE), que permite evaluar la diferencia entre los datos experimentales y los calculados por el modelo; en este caso, valores más cercanos a cero indican un mejor ajuste. Los SSE obtenidos para los diez modelos analizados son bajos, lo que también respalda la validez de los ajustes realizados.

**Tabla 17***Coeficientes estadísticos aplicados a 10 modelos matemáticos*

Número	Modelo matemático	T (°C)	V (m/s)	R <sup>2</sup>	SSE
1	Lewis $X_R = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt)$	40	1.78	0.9969	0.005
		40	3.56	0.9958	0.008
		50	1.78	0.9985	0.002
		50	3.56	0.9891	0.013
		60	1.78	0.9951	0.005
		60	3.56	0.9937	0.008
2	Henderson y Pabis $X_R = a \exp(-kt)$	40	1.78	0.9973	0.005
		40	3.56	0.9984	0.003
		50	1.78	0.9988	0.002
		50	3.56	0.9967	0.004
		60	1.78	0.9984	0.002
		60	3.56	0.9966	0.004
3	Page $X_R = \exp(-kt^n)$	40	1.78	0.9972	0.005
		40	3.56	0.9984	0.003
		50	1.78	0.9987	0.002
		50	3.56	0.9967	0.004
		60	1.78	0.9984	0.002
		60	3.56	0.9966	0.004
4	Page modificado IV $X_R = a \exp[-(kt^n)]$	40	1.78	0.9973	0.005
		40	3.56	0.9984	0.003
		50	1.78	0.9987	0.002
		50	3.56	0.9967	0.004
		60	1.78	0.9984	0.002
		60	3.56	0.9894	0.013
5	Midilli $X_R = a - b \exp[-(Kt^n)]$	40	1.78	0.9973	0.005
		40	3.56	0.9984	0.003
		50	1.78	0.9987	0.002
		50	3.56	0.9967	0.004
		60	1.78	0.9984	0.002
		60	3.56	0.9982	0.002
6	Logarítmico $X_R = a \exp(-kt) + c$	40	1.78	0.9978	0.004
		40	3.56	0.9990	0.002
		50	1.78	0.9988	0.002
		50	3.56	0.9926	0.009
		60	1.78	0.9966	0.004
		60	3.56	0.9943	0.007

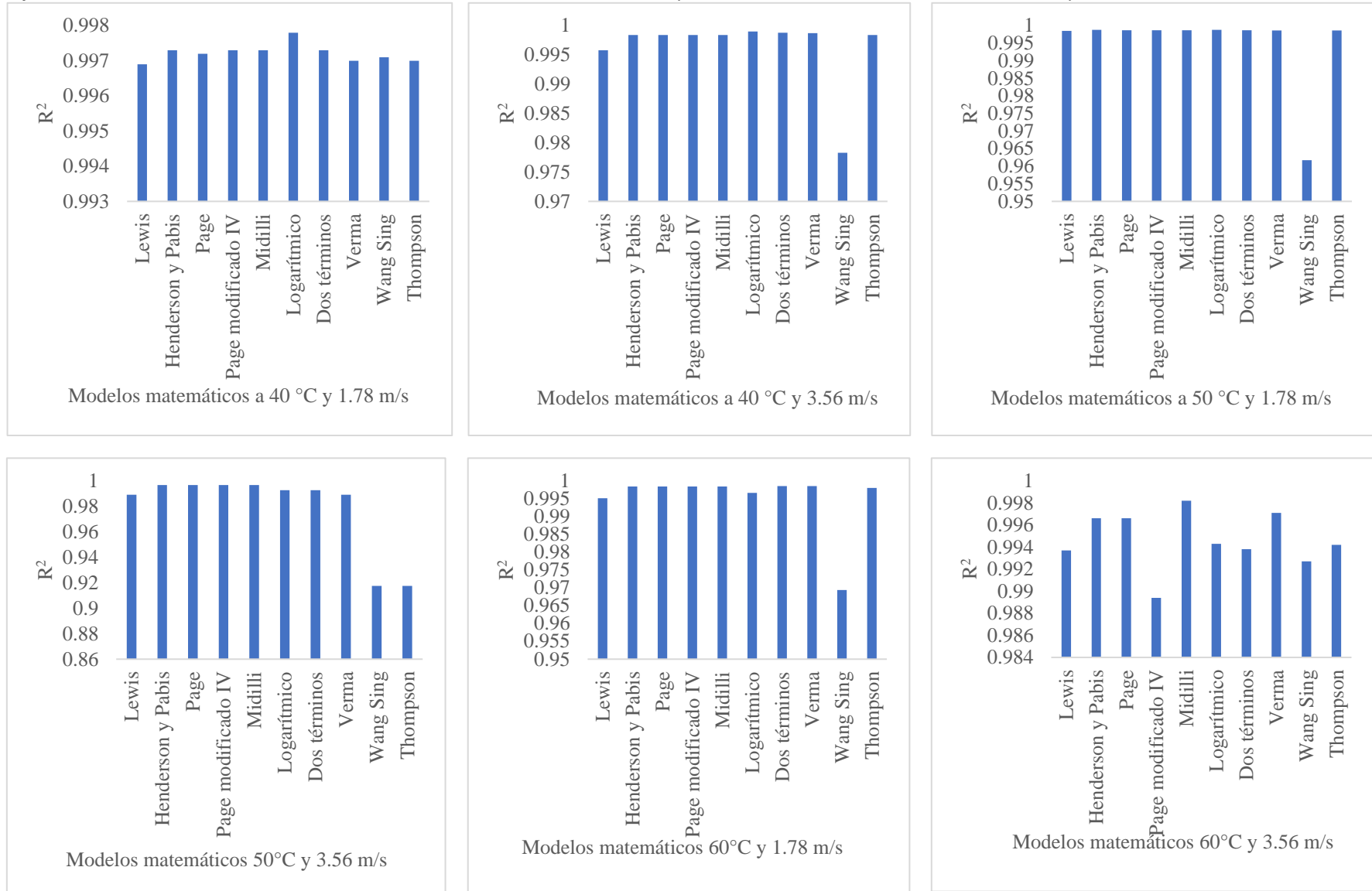
<b>7</b>	Dos términos $X_R = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	40	1.78	0.9973	0.005
		40	3.56	0.9988	0.002
		50	1.78	0.9987	0.002
		50	3.56	0.9926	0.009
		60	1.78	0.9985	0.002
		60	3.56	0.9938	0.008
<b>8</b>	Verma $X_R = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	40	1.78	0.9970	0.005
		40	3.56	0.9987	0.003
		50	1.78	0.9986	0.002
		50	3.56	0.9891	0.013
		60	1.78	0.9985	0.002
		60	3.56	0.9971	0.004
<b>9</b>	Wang Sing $X_R = 1 + at + bt^2$	40	1.78	0.9971	0.005
		40	3.56	0.9783	0.042
		50	1.78	0.9617	0.057
		50	3.56	0.9175	0.102
		60	1.78	0.9694	0.058
		60	3.56	0.9927	0.02
<b>10</b>	Thompson $X_R = \exp\left(-a - (a^2 + 4bt)^{\frac{1}{2}}\right)/2b$	40	1.78	0.9970	0.005
		40	3.56	0.9984	0.003
		50	1.78	0.9986	0.002
		50	3.56	0.9175	0.102
		60	1.78	0.9980	0.002
		60	3.56	0.9942	0.007

En relación al problema 6.1, Tabla 6.12 del libro de Cáceres (2022a), se puede relacionar el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) esta con valores cercanos a 1, el cual determina una buena correlación de valores reemplazados con las constantes en los 10 modelos propuestos. Esto se debe que los valores de k, n, etc llegan a ajustar las 10 formulas propuestas.



**Figura 31**

*Ajustes de los modelos matemáticos a condiciones de 40 °C, 50 °C y 60°C a velocidad de aire de 1.78 m/s y 3.56 m/s*



La Figura 31 presenta seis gráficos de barras que muestran los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) obtenidos al ajustar diez modelos matemáticos de secado (incluyendo Lewis, Henderson y Pabis, Page, Logarítmico, Midilli, entre otros) bajo distintas combinaciones de temperatura (40 °C, 50 °C y 60 °C) y velocidad de aire (1.78 m/s y 3.56 m/s). En general, todos los modelos presentan altos valores de  $R^2$ , lo que indica un buen ajuste a los datos experimentales en todas las condiciones evaluadas. A 40 °C, el modelo Logarítmico se destaca con el mejor desempeño en ambas velocidades, mientras que, a 50 °C, los modelos Henderson y Pabis, Logarítmico, Dos términos, y Midilli muestran los mejores resultados dependiendo del flujo de aire. A 60 °C, los modelos Dos términos, Verma y Midilli ofrecen los ajustes más precisos. En contraste, los modelos Wang & Singh y Thompson presentan un ajuste ligeramente inferior en algunas condiciones. En conjunto, los modelos Midilli, Logarítmico y Page modificado IV muestran un rendimiento consistente y robusto en todas las condiciones evaluadas, posicionándose como los más adecuados para describir la cinética de secado del maíz mote blanco gigante del Cusco. En comparación a los trabajos realizados con Cerrón y Junchaya (2019) uno de los modelos matemáticos que mejor ajuste presenta es el de page por medio de un análisis estadístico, así mismo también fue comprobado para Figueroa y Sherly (2019) que demostraron que la ecuación de Page define mejor la rapidez de secado para sus pruebas experimentales y para Salazar (2020) su modelo con mayor ajuste fue para el modelo matemático de Midilli con un estadístico próximo a 1.

#### **4.4.2. Parámetros experimentales a los diez modelos cinéticos planteados**

La Tabla 18 presenta los valores de los parámetros característicos de ajuste ( $a$ ,  $k$ ,  $n$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k_0$ ,  $k_1$  y  $g$ ) correspondientes a cada uno de los diez modelos cinéticos evaluados. Estos parámetros permiten describir con mayor precisión el comportamiento del secado del maíz mote blanco gigante del Cusco, facilitando la representación matemática de la pérdida de humedad en función del tiempo bajo diferentes condiciones experimentales.

**Tabla 18***Parámetros experimentales ( $a$ ,  $k$ ,  $n$  y  $b$ ) de los modelos planteados*

Modelo matemático	T (°C)	V (m/s)	Parámetro			
			a	k	n	b
Wang sing	40	1.78	1.009	-	-	0.372
	40	3.56	-0.284	-	-	0.020
	50	1.78	-0.348	-	-	0.030
	50	3.56	-0.405	-	-	0.041
	60	1.78	-0.508	-	-	0.064
	60	3.56	0.986	-	-	0.686
Thonmson	40	1.78	-2.602	-	-	0.012
	40	3.56	-2.676	-	-	0.169
	50	1.78	-1.953	-	-	0.012
	50	3.56	-0.405	-	-	0.041
	60	1.78	-1.114	-	-	0.111
	60	3.56	0.986	-	-	0.686

Modelo matemático	T (°C)	V (m/s)	Parámetro					
			a	K <sub>0</sub>	b	c	K <sub>1</sub>	g
Logarítmico	40	1.78	1.091	0.139	-	-0.045	-	-
	40	3.56	1.051	0.171	-	-0.044	-	-
	50	1.78	0.996	0.486	-	-0.011	-	-
	50	3.56	0.944	0.614	-	0.013	-	-
	60	1.78	0.965	0.810	-	0.017	-	-
	60	3.56	0.994	0.699	-	0.016	-	-
De dos términos	40	1.78	0.295	0.375	0.6881	-	0.375	-
	40	3.56	-1.453	0.251	2.467	-	0.307	-
	50	1.78	2.723	0.449	-1.73	-	0.423	-
	50	3.56	0.944	0.614	0.013	-	0.207	-
	60	1.78	0.214	2.115	0.786	-	0.651	-
	60	3.56	5.629	0.661	-4.626	-	0.661	-
Verma	40	1.78	0.252	0.484	-	-	-	0.353
	40	3.56	1.042	0.372	-	-	-	0.003
	50	1.78	1.006	0.499	-	-	-	0
	50	3.56	2.680	0.617	-	-	-	0.616
	60	1.78	0.786	0.651	-	-	-	2.104
	60	3.56	0.111	3.887	-	-	-	0.589

#### 4.4.3. Parámetro cinético ajustado al modelo de Page modificado IV

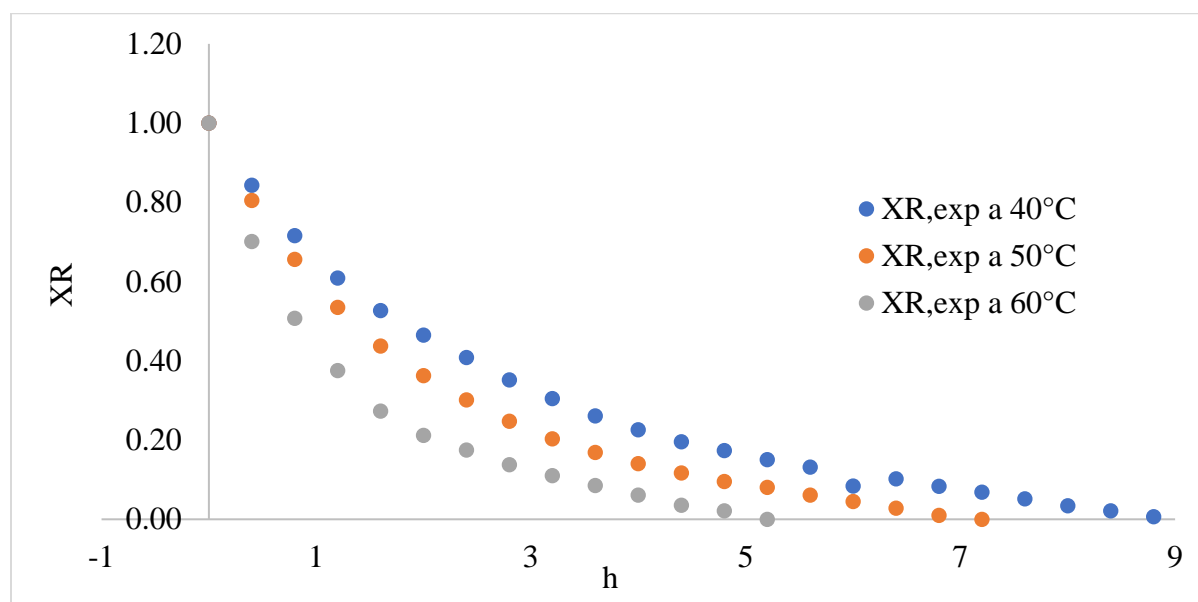
Ecuación de Page modificado IV

$$X_R = a \exp[-(kt^n)]$$

Obteniendo los resultados de Page modificado IV con una velocidad de 1.78 m/s, a temperaturas de 40, 50 y 60°C se obtiene la siguiente grafica.

**Figura 32**

*Curva de secado (XR) vs t(tiempo) de 40 °C, 50 °C y 60°C a velocidad de aire de 1.78 m/s*



**Tabla 19**

*Parámetros experimentales (a, k y n) de los modelos planteados con flujo de aire 1.78 m/s*

Modelo matemático	T (°C)	V (m/s)	Parámetro		
			a	k	n
Page modificado IV	40	1.78	0.989	0.384	0.985
	50	1.78	0.995	0.512	0.983
	60	1.78	1	0.824	0.895

Mediante Arrhenius nos permite modelar y cuantificar como la temperatura influye en la constante de velocidad de secado k.

Al comparar los parámetros del modelo de Page obtenidos en esta investigación con los reportados por Cerrón y Junchaya (2019), se observa una tendencia similar donde la constante de secado  $k$  (0.69, 0.83 y 1.11) aumenta con la temperatura, lo que indica una mayor velocidad de eliminación de humedad, donde la constante de  $k$  tiene un efecto significativo en la temperatura, por lo tanto, también en la velocidad de flujo de aire. Los valores de  $n$  se mantienen cercanos a los reportados por dichos autores (0.84 y 0.85), lo que sugiere un comportamiento de secado comparable en productos agrícolas. Estos resultados confirman la validez del modelo aplicado y permiten establecer una referencia para futuros estudios sobre la cinética de secado del maíz mote blanco gigante del Cusco.

Al comparar los resultados obtenidos con los de Figueroa y Porras, quienes trabajaron con temperaturas de 30, 40 y 50 °C y velocidades de 0.5 m/s y 1.0 m/s, se observa una tendencia similar en el comportamiento del modelo de Page. En ambos estudios, la constante de secado  $k$  (0.025, 0.040 y 0.060) aumenta con la temperatura, lo que confirma que un mayor gradiente térmico acelera la eliminación de humedad. No obstante, los valores de  $k$  de este trabajo son superiores, debido a las mayores velocidades de aire utilizadas (1.78 y 3.56 m/s), que intensifican la transferencia de calor y masa. Asimismo, los valores de  $n$  presentan un comportamiento comparable al de los antecedentes, lo que valida el modelo y demuestra que el maíz mote blanco gigante del Cusco sigue una cinética de secado similar a la de otros productos agrícolas reportados en la literatura.

Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con los de Salazar (2020), quien trabajó a temperaturas entre 40 y 70 °C y velocidades de 1.8 y 2.7 m/s, se observa que los valores de la constante de secado  $k$  variaron entre 0.27 y 0.72, y el exponente  $n$  entre 0.82 y 1.15. En la presente investigación, los valores de  $k$  fueron mayores (1.114 a 40 °C) y los de  $n$  ligeramente

menores ( $\approx 0.85$ ). Estas diferencias se deben principalmente a la estructura más compacta y menor porosidad del maíz mote blanco gigante del Cusco, que ofrece mayor resistencia a la difusión interna de humedad. Sin embargo, ambos estudios coinciden en que el modelo de Page describe adecuadamente el proceso de secado por convección, confirmando que la temperatura y la velocidad del aire son factores determinantes en la rapidez y eficiencia del secado de productos agrícolas.

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (20)$$

donde:

k: constante de secado (adimensional)

A: factor de frecuencia

$E_a$ : Energía de activación (J/mol)

R: constante de los gases (8.314 J/mol)

T: temperatura (°K)

Linealizando la ecuación de Arrhenius mediante logaritmo natural obtenemos la siguiente expresión.

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (21)$$

Teniendo la ecuación linealizada se realiza la tabulación con respecto a  $\ln(k)$  vs  $1/T$

## Tabla 20

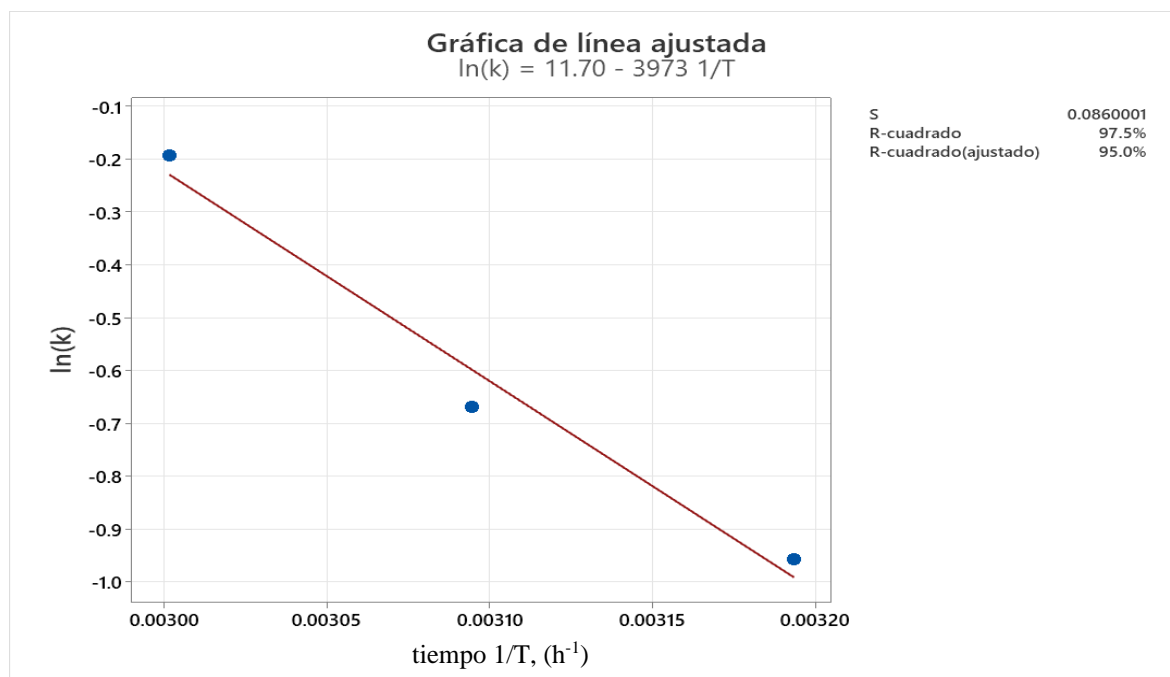
*Datos linealizados de  $T^\circ$  y  $\ln(k)$  para el cálculo de correlación con flujo de 1.78 m/s*

$1/T$	$\ln(k)$
<b>0.003193358</b>	-0.9568
<b>0.003094538</b>	-0.6684
<b>0.003001651</b>	-0.1929

Haciendo una regresión lineal mediante el programa minitab nos da los siguientes datos que muestra la Figura 33.

**Figura 33**

Gráfica de línea ajustada en función de  $\ln(k)$  vs  $1/T$  con velocidad de aire 1,78 m/s



Obteniendo la siguiente expresión desde la ecuación (21) con los datos de la Figura 34, se obtiene:

$$\ln(k) = -3973 \left( \frac{1}{T} \right) + 11.70$$

hacemos una comparación con la ecuación linealizada de Arrhenius

$$\ln(k) = -\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} \right) + \ln(A)$$

Donde resolviendo la comparación nos da lo siguiente:

$$-\frac{E_a}{R} = -3973 \text{ mol}$$

$$E_A = 3973 \left( 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol } ^\circ\text{K}} \right) = 33,033.80 \text{ J/mol}$$

$$\ln(A) = 11.70$$

$$A = 120,236.76$$

Teniendo los datos del valor de A(adimensional) y  $E_A$ , se puede calcular “k” mediante Arrhenius.

Reemplazamos en la ecuación de Arrhenius (20) se obtuvo la siguiente expresión.

$$k = 120,236.76 \cdot e^{-\frac{33,033.80 \text{ J/mol}}{(8.314)(T^{\circ}\text{K})}} \quad (22)$$

Cabe señalar que esta expresión es válida únicamente para una velocidad de aire constante (1.78m/s) por lo que k varía únicamente en función de la temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 21**

*Datos de parámetros y k aplicada a una regresión con Arrhenius con flujo de aire 1.78 m/s*

TEMPERATURA ( $T^{\circ}$ )	$T^{\circ}\text{K}$	a	k	n	(k) regresión con Arrhenius
40	313.15	0.9890	0.3841	0.9851	<b>0.3712</b>
50	323.15	0.9955	0.5125	0.9834	<b>0.5497</b>
60	333.15	1.0007	0.8245	0.8951	<b>0.7951</b>

El coeficiente de determinación  $R^2=97.5\%$  indica un excelente ajuste del modelo de Arrhenius a los datos experimentales de k, lo que sugiere que la temperatura tiene un impacto significativo y predecible sobre la constante de secado.

Siguiendo el mismo procedimiento aplicado para el flujo de aire de 1.78 m/s, se realizó el análisis para una velocidad de 3.56 m/s utilizando la ecuación de Arrhenius. Con los datos de la Tabla 22. Para la elaboración de la Figura 34, que muestra la relación lineal entre  $\ln(k)$  y  $1/T$ .



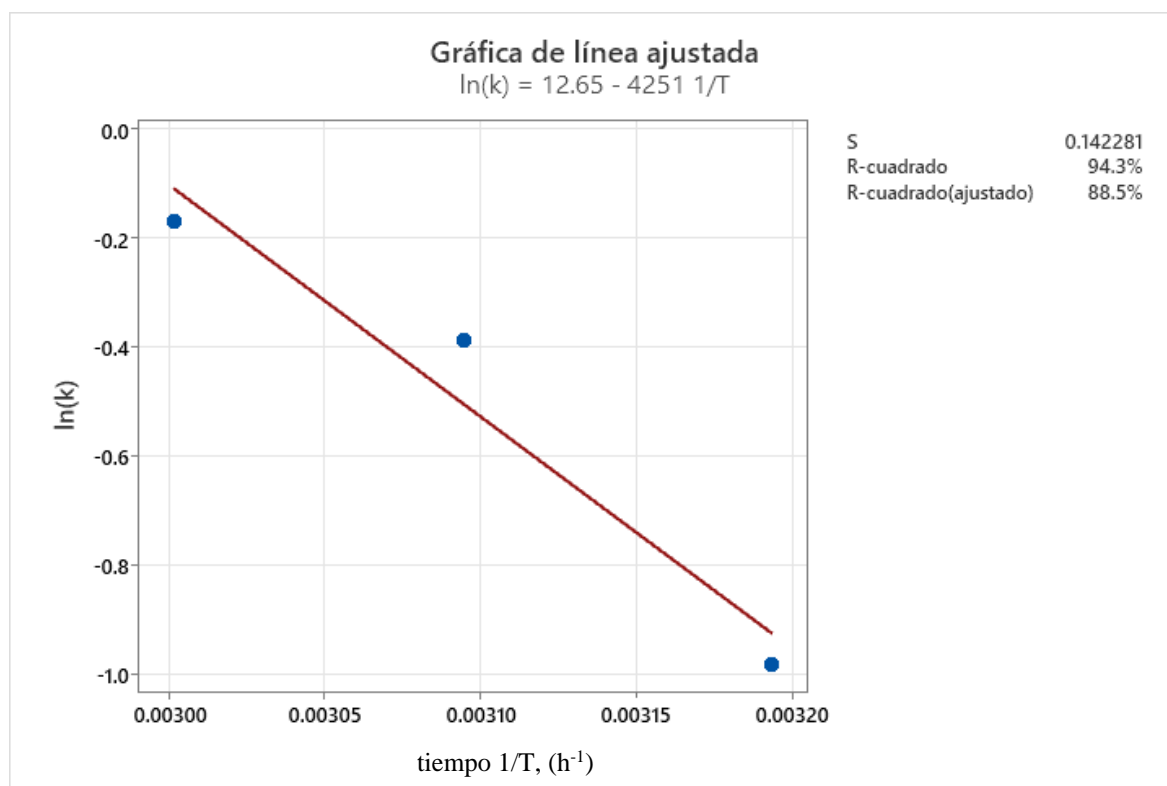
**Tabla 22**

*Datos no linealizados de  $T^\circ$  y  $\ln(k)$  para el cálculo de correlación con flujo de 3.56 m/s*

$1/T$	$\ln(k)$
<b>0.003193358</b>	-0.979782132
<b>0.003094538</b>	-0.387260947
<b>0.003001651</b>	-0.168418652

**Figura 34**

*Gráfica de línea ajustada en función de  $\ln(k)$  vs  $1/T$  con velocidad de aire 3.56 m/s*



A partir de la ecuación linealizada de Arrhenius y siguiendo el mismo procedimiento aplicado para la velocidad de 1.78 m/s, se realizó el cálculo matemático correspondiente para el flujo de 3.56 m/s, obteniéndose los valores presentados en la Tabla 23.

**Tabla 23**

*Datos de parámetros y k aplicada a una regresión con Arrhenius con flujo de aire 3.56 m/s*

TEMPERATURA (T°)	T°K	a	k	n	(k) regresión con Arrhenius
40	313.15	1.005	0.3754	0.9851	<b>0.3971</b>
50	323.15	0.994	0.6789	0.8614	<b>0.6044</b>
60	333.15	1.000	0.8450	1.0430	<b>0.8971</b>

Reemplazamos en la ecuación de Arrhenius (20) se obtuvo la siguiente expresión

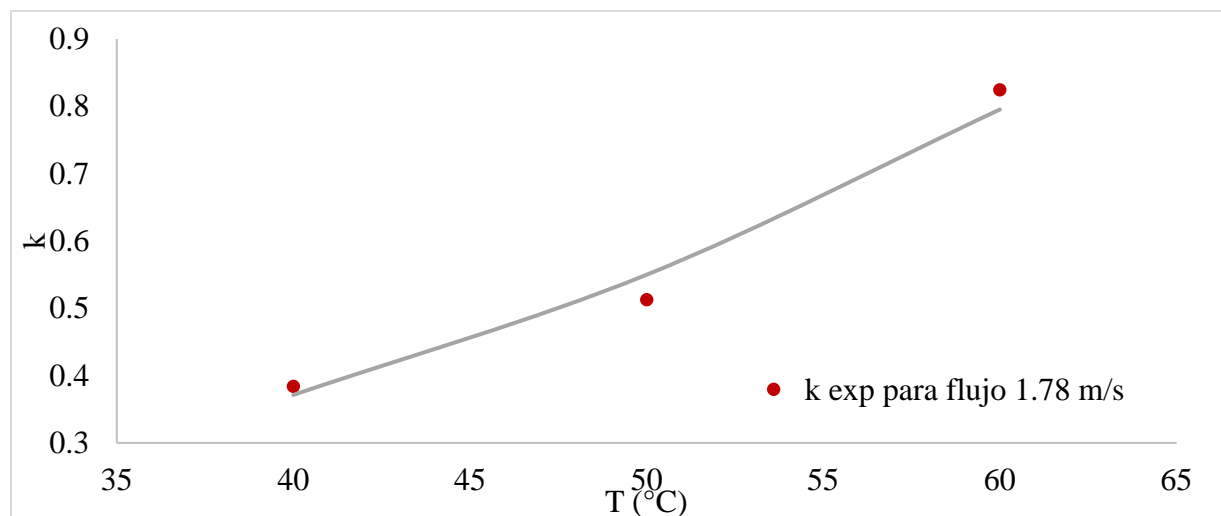
$$k = 312,280.87 \cdot e^{-\frac{35,343.33 \text{ J/mol}}{(8.314)(T^{\circ}\text{K})}} \quad (23)$$

- **Respecto a la constante de “a” y “n”**

En el ajuste del modelo de Page Modificado IV a los datos experimentales del secado del maíz mote, se observó que los parámetros a y n se mantuvieron relativamente estables entre los distintos tratamientos, presentando solo ligeras variaciones ante los cambios en la temperatura y la velocidad del aire. Esta estabilidad indica que dichos parámetros tienen una influencia menor sobre la velocidad global del proceso de secado, en comparación con la constante k, la cual mostró una mayor sensibilidad a las condiciones operativas.

**Figura 35**

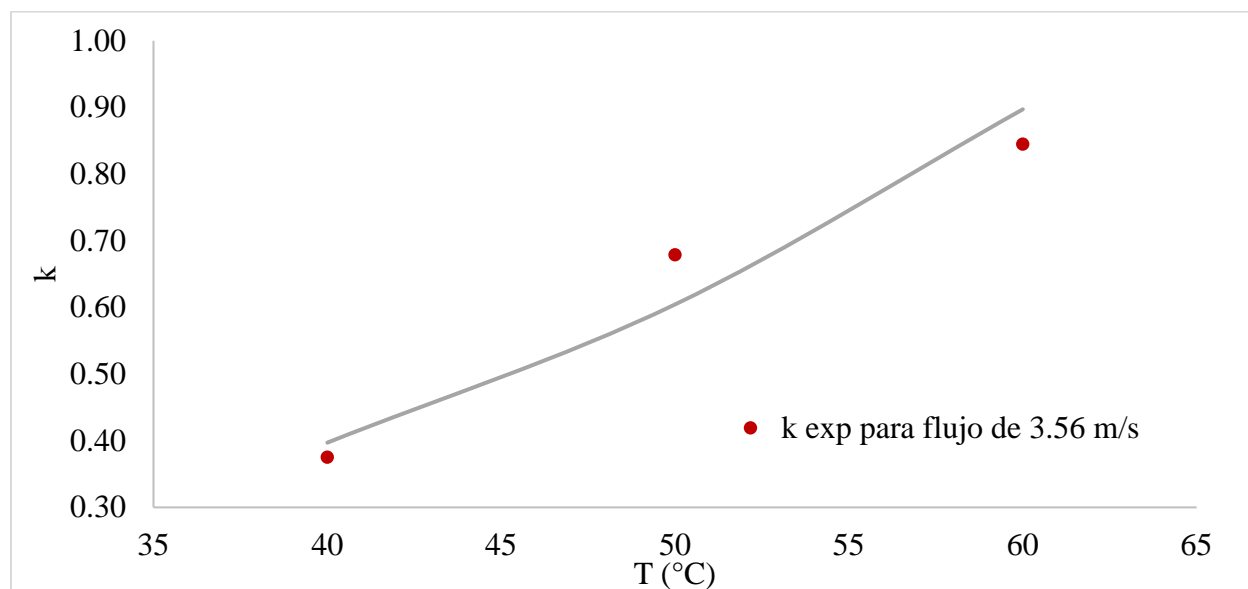
*Relación entre la constante de secado (k) y la temperatura con ajuste mediante la ecuación de Arrhenius (flujo de aire: 1.78 m/s)*



El  $R^2$  tiene un ajuste de 97.5%, obteniendo el valor de  $k$  mediante Arrhenius se puede hacer el modelo con page modificado IV

### Figura 36

*Relación entre la constante de secado ( $k$ ) y la temperatura con ajuste mediante la ecuación de Arrhenius (flujo de aire: 3.56 m/s)*



El  $R^2$  tiene un ajuste de 94.3%, obteniendo el valor de  $k$  mediante Arrhenius se puede hacer el modelo con page modificado IV

#### A. Comparación de XR experimental a temperaturas de 40, 50 y 60 °C con un flujo de aire de 1.78 m/s

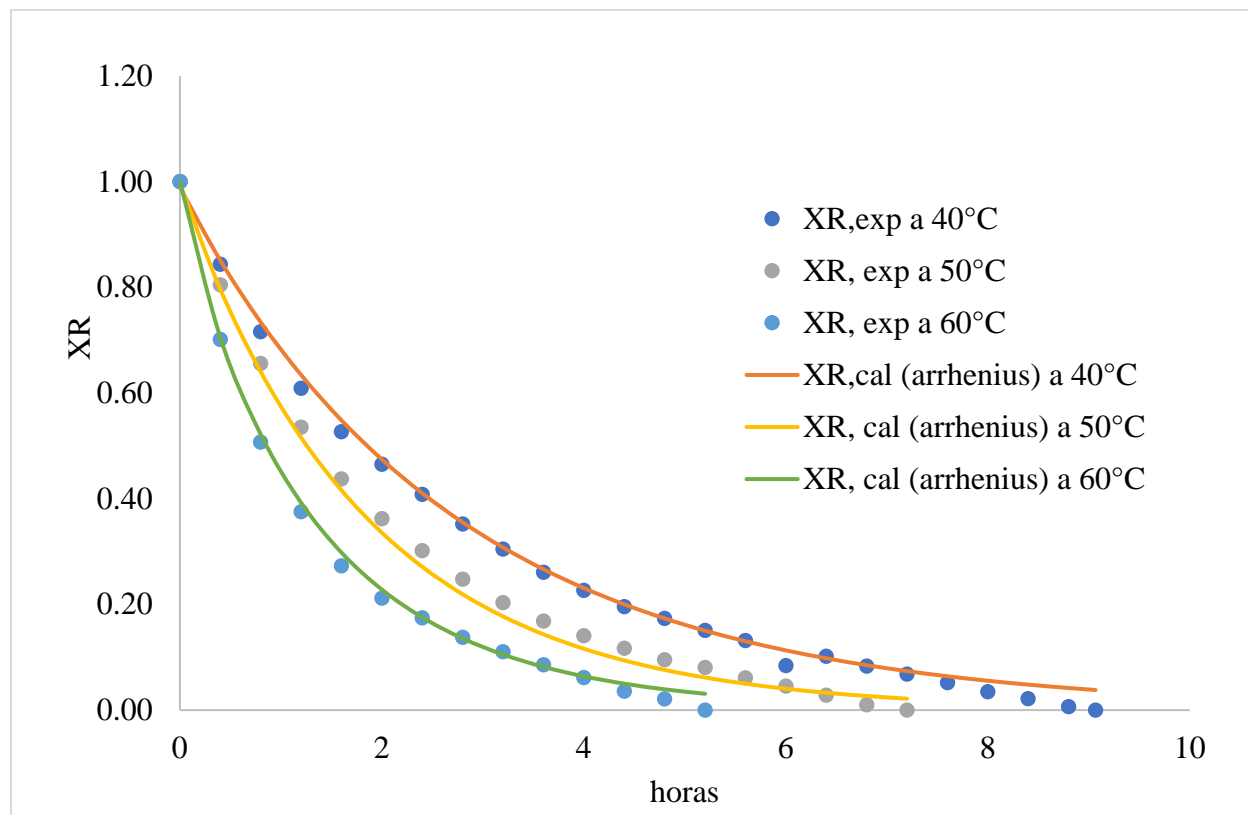
- Aplicando la ecuación encontrada mediante Arrhenius (21) para velocidad de aire 1.78:

$$k = 120,236.76 \cdot e^{-\frac{33,033.80 \text{ J/mol}}{(8.314)(T^{\circ}\text{K})}} \quad (24)$$

Se utilizaron los valores de  $k$  calculados con la ecuación de Arrhenius (21) para estimar la razón de humedad relativa (XR) a distintas temperaturas, considerando un flujo de aire constante de 1.78 m/s. La comparación entre los datos experimentales y los calculados mostró una buena concordancia, lo que confirma que el modelo de Arrhenius describe adecuadamente el comportamiento del secado bajo estas condiciones.

**Figura 37**

*Gráfica de tiempo vs XR con modelo de page modificado IV con flujo de aire 1.78 m/s*



**B. Comparación de XR experimental a temperaturas de 40, 50 y 60 °C con un flujo de aire de 3.56 m/s**

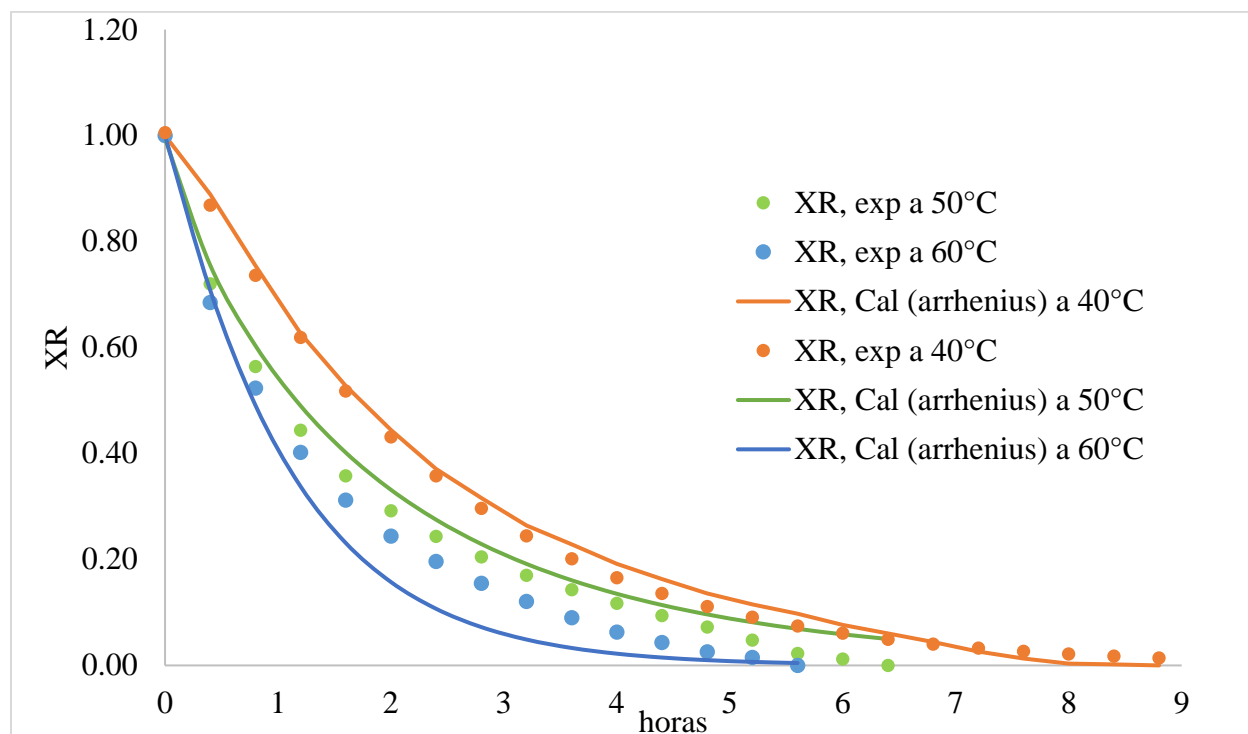
- Aplicando la ecuación encontrada mediante Arrhenius (22) para velocidad de aire 3.56:

$$k = 312,280.87 \cdot e^{-\frac{35,343.33 \text{ J/mol}}{(8.314)(T^{\circ}\text{K})}} \quad (25)$$

Con los valores de  $k$  calculados mediante la ecuación de Arrhenius (22), se estimó la razón de humedad relativa (XR) a diferentes temperaturas, considerando un flujo2 de aire constante de **3.56 m/s**. La comparación con los datos experimentales mostró una buena coincidencia, lo que indica que el modelo describe correctamente el proceso de secado en estas condiciones.

**Figura 38**

*Gráfica de tiempo vs XR con modelo de page modificado IV con flujo de aire 3.56 m/s*



### C. Determinación de la fórmula general de XR en función de la temperatura y la velocidad del aire, basada en la comparación de las ecuaciones obtenidas para ambos flujos

Para obtener una ecuación general de la razón de humedad relativa (XR) que considere al mismo tiempo la influencia de la temperatura y la velocidad del aire, se tomaron como base las ecuaciones obtenidas previamente mediante las ecuaciones de Arrhenius para los dos flujos de aire analizados: 1.78 m/s y 3.56 m/s. Estas ecuaciones permitieron calcular la constante de secado  $k$  en función de la temperatura para cada velocidad, lo que facilitó identificar cómo varía  $k$  cuando cambian simultáneamente ambos factores.

- Para velocidad de aire 1.78 m/s

$$k = 120,236.76 \cdot e^{-\frac{33,033.80 \text{ J/mol}}{(8.314)(T^{\circ}\text{K})}}$$

- Para velocidad de aire 3.56 m/s

$$k = 312,280.87 \cdot e^{-\frac{35,343.33 \text{ J/mol}}{(8.314)(T^{\circ}\text{K})}}$$

A partir del análisis de las constantes de secado  $k$  obtenidas para los flujos de aire de 1.78 m/s y 3.56 m/s, se observó que la velocidad del aire influye directamente en los parámetros de la ecuación de Arrhenius. Esta comparación permitió desarrollar una expresión general para  $k$ , que incluye tanto la temperatura ( $T$ ) como la velocidad del aire ( $v$ ) como variables. En esta nueva ecuación, los parámetros  $A(v)$  y  $E_A(v)$  fueron determinados empíricamente según los datos experimentales.

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{A_1 \cdot e^{-\left(\frac{E_1}{RT}\right)}}{A_2 \cdot e^{-\left(\frac{E_2}{RT}\right)}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n \quad (26)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n1}$$

Para determinar el valor de “ $n$ ” hacemos una comparación con la ecuación mencionada

$$\frac{0.3712}{0.3971} = \left(\frac{1.78 \text{ m/s}}{3.56 \text{ m/s}}\right)^{n1}$$

$$n1 = 0.09$$

Haciendo esa comparación se halla la nueva ecuación:

$$K_{general} = A \cdot e^{-\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \cdot v^{n1} \quad (27)$$

Los valores obtenidos de  $A$  y  $E_a$  se mantienen de la siguiente forma

$A$ : 113,236.76

$E_a$ : 33,033.80 J/mol

Las únicas variables de esta ecuación general son la temperatura y velocidad de aire

$$X_R = 0.98 \cdot \exp \left[ - \left( 113,236.76 \cdot \exp \left( - \frac{33.03 \text{ kJ/mol}}{8.314 \left( \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot ^{\circ}\text{K}} \right) \cdot T(^{\circ}\text{K})} \right) \cdot (v(\text{m/s})^{n1}) \cdot t^{0.98} \right) \right] \quad (28)$$

$$X_R = a * \exp \left[ - \left( 120,236.76 * \exp \left( - \frac{33,033.80 \text{ kJ/mol}}{8.314 \left( \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}} \right) \cdot T(^{\circ}\text{K})} \right) * t^n \right) \right]$$

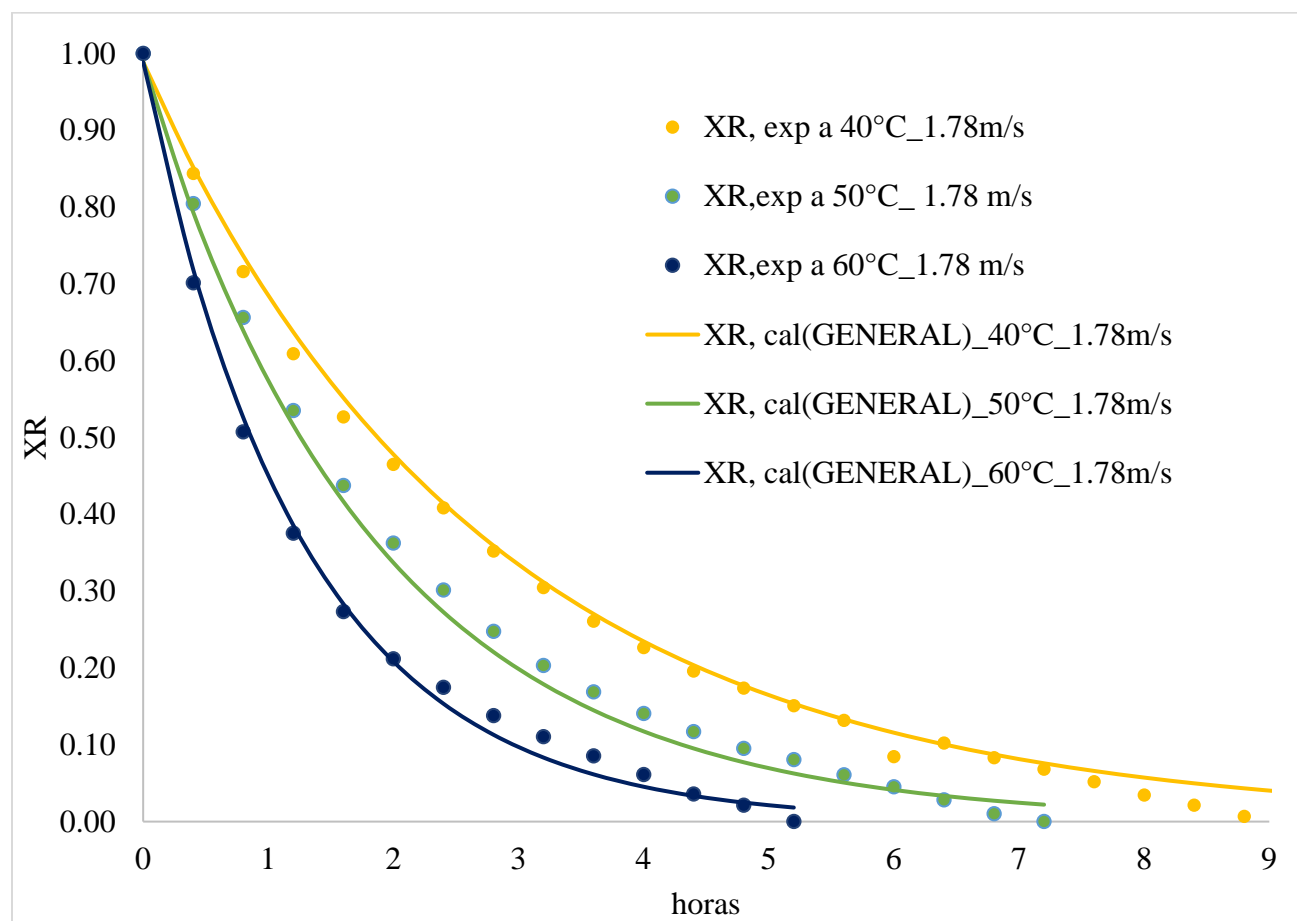
$$k = 120,236.76 \cdot e^{-\frac{33,033.80 \text{ J/mol}}{(8.314)(T^{\circ}\text{K})}}$$

$$X_R = a * \exp \left[ - \left( 312,280.87 * \exp \left( - \frac{35,343.33 \text{ kJ/mol}}{8.314 \left( \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}} \right) \cdot T(^{\circ}\text{K})} \right) * t^n \right) \right]$$

$$k = 312,280.87 \cdot e^{-\frac{35,343.33 \text{ J/mol}}{(8.314)(T^{\circ}\text{K})}}$$

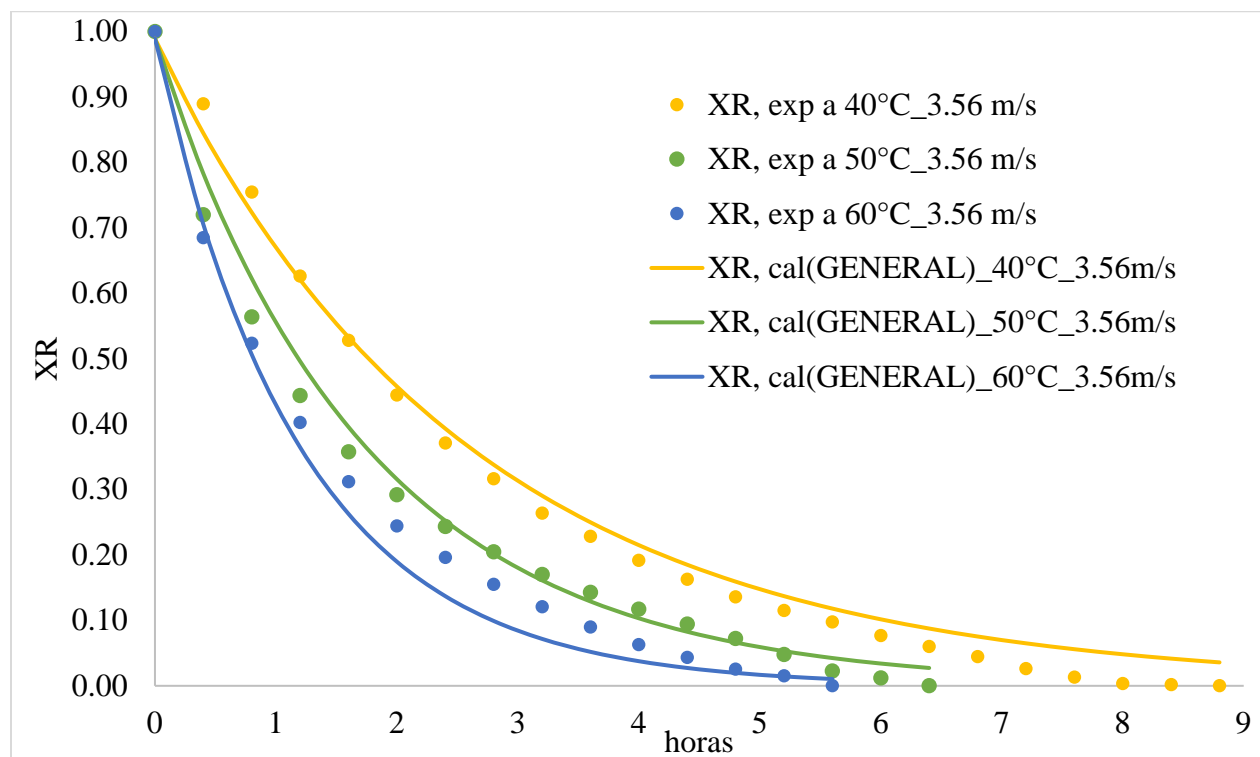
**Figura 39**

Gráfica de comparación de  $X_R$  experimental y calculado con la Ecuación General (28) a 1.78m/s



**Figura 40**

*Gráfica de comparación de XR experimental y calculado con la Ecuación General (28) a 3.56m/s*



La forma extendida del modelo de Arrhenius, obtenida a partir del modelo matemático de Page Modificado IV, mostrada en las Figuras 39 y 40, demuestra una mejor representación del comportamiento de secado del maíz mote blanco gigante del Cusco en comparación con los modelos convencionales, ya que incorpora el efecto de la velocidad del aire en sus parámetros. Los resultados obtenidos con los datos del Apéndice 11 evidencian que la Ecuación General (28) predice con mayor exactitud la cinética de secado para ambas velocidades evaluadas (1.78 m/s y 3.56 m/s).

El modelo seleccionado se presenta como una herramienta confiable para el análisis y la simulación del proceso, mostrando potencial para su aplicación en el diseño y optimización de sistemas de secado. Además, constituye una referencia valiosa para futuras investigaciones, permitiendo ampliar su uso a otros productos agrícolas con características similares.



En relación al trabajo de Fernández et al., (2013) quien también adecuo y realizo un modelo matemático donde se puede predecir de mejor manera la velocidad de hidratación a partir de la ecuación de Michaelis-Menten para la nixtamalización del grano de maíz. Del mismo modo Díaz (2009) calculó las constantes empíricas (a, b, c y k) mediante la ecuación de la forma tipo Arrhenius, demostrando que es posible determinar el efecto de la temperatura y la velocidad de aire para el proceso de secado. Así mismo también Ordóñez et al (2011) también logro demostrar el cambio de temperatura a partir de una relación lineal inversa con un coeficiente de determinación de 0.97 a través de la ecuación de Arrhenius.

#### **4.5. Evaluación de la calidad fisicoquímica del maíz mote Blanco Gigante del Cusco (*Zea mays* L.).**

##### **4.5.1. Determinación experimental de la humedad de equilibrio**

La humedad de equilibrio se definió como el punto en el cual el maíz mote ya no presentó variaciones significativas en su peso durante el secado, lo que indica que se ha alcanzado un equilibrio entre la presión de vapor del agua en el producto y en el aire circundante. Este valor fue determinado experimentalmente mediante el registro continuo de la masa de las muestras colocadas en bandejas tipo rejilla, hasta que la diferencia de peso entre mediciones consecutivas fue mínima o nula. En este estado, no existe transferencia neta de humedad entre el producto y el aire, aunque sus contenidos de agua no sean iguales (Cortés, 1980).

Los valores de humedad en equilibrio ( $X_{eq}$ ) obtenidos en Tabla 24, estuvieron entre 0.077 y 0.087 kg/kg s.s., con mínimas variaciones entre tratamientos. Se evidenció que, a mayor temperatura, el equilibrio se alcanzó en menos tiempo, aunque el valor final se mantuvo constante. Esta información fue clave para calcular la humedad reducida y ajustar con precisión los modelos cinéticos de secado.

**Tabla 24**

*Valores experimentales de humedad en equilibrio ( $X_{eq}$ ) según las condiciones de secado*

Temperatura (°C)	Velocidad del aire (m/s)	Humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ , kg/kg s.s.)
40	1.78	0.081
40	3.56	0.087
50	1.78	0.081
50	3.56	0.082
60	1.78	0.084
60	3.56	0.077

#### 4.5.2. Análisis fisicoquímico

**Figura 41**

*Evaluación de la calidad fisicoquímica.*

CARACTERÍSTICAS	NORMA TÉCNICA	VALOR OBTENIDO	
		60°C	50°C
Humedad (%)	Máximo 12.5	6%	8%
Proteína (%)	Mínimo 6	6.09%	6.12%
Grasa total (%)	Mínimo 2	1.18	1.92
Cenizas (%)	Mínimo 1.1	1.32	1.47
Alcalinidad (mg/100 NaHCO <sub>3</sub> )	Máximo 10	5 mg/100 NaHCO <sub>3</sub>	4.8 mg/100 NaHCO <sub>3</sub>
Aflatoxina	No detectable en 5ppb	No se detecto crecimiento de bacterias al 9no día de incuvación	

Como se muestra en la Figura 41, el maíz mote rehidratado (izquierda) conservó el volumen al absorber agua. Este fenómeno se debe a la interacción del agua con las moléculas de almidón y compuestos poliméricos, formando una matriz gelatinizada que aporta textura y suavidad al grano. Finalmente, se mantuvieron otras características de calidad como porcentaje de humedad, proteína, grasa total y ceniza, datos establecidos por la ficha técnica del Programa Nacional de Alimentación Escolar Qali Warma (Perú).

#### 4.5.3. Capacidad de rehidratación

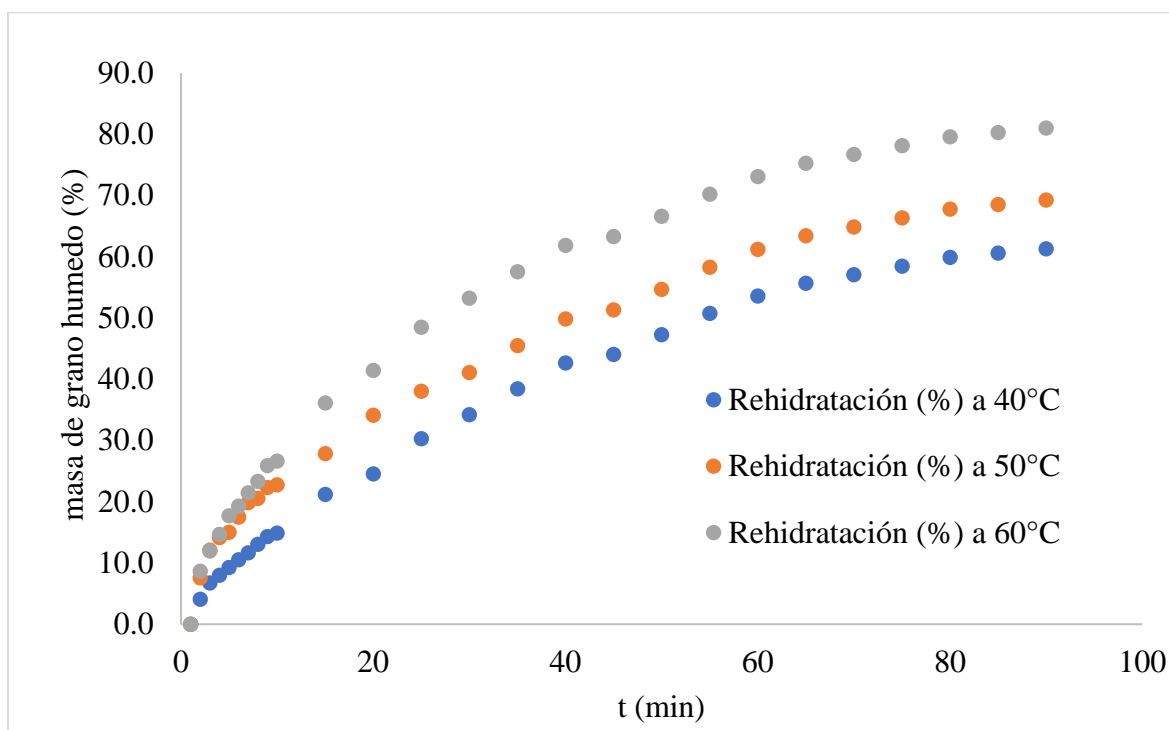
La rehidratación es un parámetro importante para evaluar la calidad del producto seco. Según Melquiades et al. (2009), a menor temperatura de secado se requiere un mayor tiempo de proceso, lo que provoca un mayor grado de encogimiento en el grano. Esto da lugar a estructuras

celulares más densas y rígidas, con espacios intercelulares menos definidos, que dificultan la difusión del agua durante la rehidratación.

**Tabla 25**

*Datos de la rehidratación de muestras de maíz deshidratado*

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Rehidratación (%) a 40°C</b>	<b>Rehidratación (%) a 50°C</b>	<b>Rehidratación (%) a 60°C</b>
<b>1</b>	0.00	0.00	0.00
<b>2</b>	4.07	7.58	8.63
<b>3</b>	6.73	12.10	11.94
<b>4</b>	7.99	14.14	14.68
<b>5</b>	9.26	15.01	17.70
<b>6</b>	10.52	17.49	19.28
<b>7</b>	11.64	19.83	21.44
<b>8</b>	13.04	20.55	23.31
<b>9</b>	14.31	22.30	25.90
<b>10</b>	14.87	22.74	26.62
<b>15</b>	21.18	27.84	36.12
<b>20</b>	24.54	34.11	41.44
<b>25</b>	30.29	38.05	48.49
<b>30</b>	34.22	41.11	53.24
<b>35</b>	38.43	45.48	57.55
<b>40</b>	42.64	49.85	61.87
<b>45</b>	44.04	51.31	63.31
<b>50</b>	47.27	54.66	66.62
<b>55</b>	50.77	58.31	70.22
<b>60</b>	53.58	61.22	73.09
<b>65</b>	55.68	63.41	75.25
<b>70</b>	57.08	64.87	76.69
<b>75</b>	58.49	66.33	78.13
<b>80</b>	59.89	67.78	79.57
<b>85</b>	60.59	68.51	80.29
<b>90</b>	61.29	69.24	81.01

**Figura 42***Curvas del proceso de rehidratación*

En la Figura 42 el proceso de rehidratación comienza en 4.07, 7.58 y 8.63 respectivamente es para 40, 50 y 60 °C, es cuando a los 40 minutos la pendiente empieza a formar una horizontal con un porcentaje de rehidratación de 42.64, 49.58 y 61.87%, llegando a una rehidratación final de 61.29, 69.24 y 81.01%. Estos resultados en comparación al trabajo de Lara (2017) quien reportó una rehidratación de 69.03 %, evidencian que el maíz mote Blanco Gigante del Cusco presenta una buena recuperación de textura, atribuida al proceso de retrogradación de la amilosa y la amilopectina, que permite al grano recuperar parcialmente su estructura original tras el secado.

#### 4.6. Balance de masa y energía

##### 4.6.1. Balance de masa y energía para el secado de maíz mote

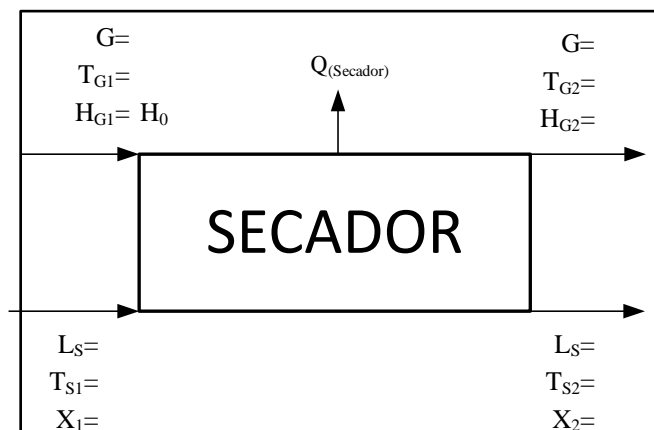
Para el balance de masa y energía se consideró los datos de humedad relativa del aire (15%), temperatura (23.4 °C) y presión atmosférica del aire (520 mmHg) estos datos fueron

obtenidos de los sensores que se encuentran instalados en el secador. Los datos de la masa de la muestra del maíz mote antes del secado era de 40.16 g y después del secado 26.86 g, el porcentaje de humedad inicial fue del maíz fue 38% y el final de 5.98%. Todo este proceso de secado fue realizado a una temperatura de 60 °C y velocidad de flujo de aire de 3.56 m/s durante 5 horas y 4 minutos de secado. La Figura 43 muestra el diagrama de flujo del bloque (BFD) del secador de bandejas tipo discontinuo o batch el trabajo una base de cálculo de un lote.

En relación al trabajo de Miranda (2011) se disminuyó la cantidad de humedad, proteínas y cenizas durante el secado, pero dentro de los límites permisibles de los alimentos, conservando sus características fisicoquímicas, así también lo demuestra Choque y Molina (2018) que mayor temperatura y flujo de aire aún se conserva las propiedades del producto.

### Figura 43

*Balance global de materia*



Teniendo los datos iniciales y finales en base húmeda, se realizó el cambio a base seca para tener un mejor manejo de datos que indica la Tabla 26.

Cantidad de sólido seco ( $L_s$ ):

$$L_s = (0.04016 \text{ kg sólido húmedo})(0.6129) = 0.0249 \text{ kg de s. s}$$

Cantidad de la humedad del sólido en base seca ( $X_1$  y  $X_2$ ):

$$X_1 = \frac{0.38}{1 - 0.38} = 0.6129 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de s. s}}$$

$$X_2 = \frac{0.0598}{1 - 0.0598} = 0.0636 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de s. s}}$$

**Tabla 26**

*Resumen en las condiciones del maíz mote en base seca*

<b>Datos</b>	<b>Producto húmedo (ingreso)</b>	<b>Producto seco (salida)</b>
total (kg)	0.04016	0.02686
agua (kg)	$0.04016(0.38) = 0.015$	0.00196
<b>sólido seco (kg)</b>	<b><math>0.04016 - 0.015 = 0.025</math></b>	<b>0.025</b>
H base seca (kgH <sub>2</sub> O/kg s.s)	$0.38 / (1 - 0.38) = \mathbf{61.29}$	$0.0598 / (1 - 0.0598) = \mathbf{6.36}$
H base húmeda (%)	<b>38%</b>	<b>5.98%</b>

Con los datos de ingreso en base seca se realiza el balance global de materia con la Ecuación 3.

$$(G)(H_1) + (L_1)(X_1) = (G)(H_2) + (L_F)(X_2)$$

Con las condiciones iniciales de temperatura, presión y humedad del gas (aire húmedo), se determinó “ $H_1$ ” que es la humedad del aire en base seca al ingreso al secador. Este dato se puede obtener por tablas psicrométrica, software PsyCalc o haciendo uso de las ecuaciones relacionadas a la humedad del aire. (ver Apéndice 2 y 3)

El valor obtenido de “ $H_1$ ” es **0.0038 kg H<sub>2</sub>O/kg a.s**; este dato se obtuvo con las ecuaciones relacionadas a la humedad del aire y corroboradas con el programa PsyCalc (Apéndice 6 y 8).

**Tabla 27**

*Datos iniciales para el balance de masa*

<b>Datos</b>	<b>ingreso</b>	<b>salida</b>
<b><math>L_I</math> y <math>L_F</math>:</b> Cantidad de producto húmedo y seco (kg)	0.04016	0.02686

<b>Ls:</b> cantidad de sólido seco (kg s.s)	<b>0.025</b>	<b>0.025</b>
<b>X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>:</b> Contenido de humedad de sólido en base seca (kgH <sub>2</sub> O/kg s.s)	0.6129	0.0636
<b>T<sub>s1</sub>, T<sub>s2</sub>:</b> Temperatura de ingreso y salida de sólido (°C)	20	54
<b>G:</b> Cantidad de aire necesario para secar en base seca (kg a.s)	G	G
<b>H<sub>G1</sub>, H<sub>G2</sub>:</b> Contenido de humedad del aire en base seca (kg H <sub>2</sub> O/kg a.s)	<b>0.00382</b>	H2
<b>T<sub>G1</sub>, T<sub>G2</sub>:</b> Temperatura de ingreso y salida del aire (°C)	60	52

Para determinar la cantidad de aire necesario en el secado “G”, se realizó con las ecuaciones de caudal (m<sup>3</sup>/h) y volumen húmedo del aire en base seca (m<sup>3</sup>/kg a.s). El caudal se determinó con la velocidad de ingreso de aire (m/s) al secador multiplicado por el área de ingreso (m<sup>2</sup>) como muestra la siguiente Tabla 28.

**Tabla 28**

*Datos para calcular caudal de ingreso de aire.*

<b>datos</b>	<b>valores</b>
<b>V: velocidad de aire (m/h)</b>	(3.56 m/s) (3600s/h) =12,816 m/h
<b>A: área de ingreso a secador (m<sup>2</sup>)</b>	0.0098 m <sup>2</sup>
<b>Q: caudal de ingreso de aire (m<sup>3</sup>/h)</b>	(12816 m/h) (0.0098m <sup>2</sup> ) = 125.597 m <sup>3</sup> /h

El secador está equipado con dos ventiladores, cada uno con un área de 49 cm<sup>2</sup>, lo que equivale a un área total de 0.0098 m<sup>2</sup> al considerar ambos ventiladores en conjunto

Para determinar el volumen específico del aire en base seca (V<sub>H</sub>) se usa la Ecuación 5.

$$V_H = \left[ \frac{1}{\overline{PM}_{\text{aire}}} + \frac{H_1}{\overline{PM}_{\text{agua}}} \right] \frac{RT}{P}$$

**Tabla 29**

*Datos para calcular el volumen húmedo específico del aire.*

<b>Datos</b>	<b>valores</b>
<b>V<sub>H</sub>:</b> volumen húmedo (m <sup>3</sup> /kg a.s)	<b>V<sub>H</sub></b>
<b>R:</b> constante de gases ideales (atm.m <sup>3</sup> /kg. mol. °K)	0.0825

<b>T:</b> temperatura con que ingresa el aire (°K)	296.55
<b>P:</b> presión (atm)	0.6842
<b>H<sub>G1</sub>:</b> contenido de humedad del aire en base seca (kg H <sub>2</sub> O/kg a.s)	0.0038
<b>PM<sub>aire</sub>:</b> peso molecular del aire (kg a.s/mol)	28.97
<b>PM<sub>agua</sub>:</b> peso molecular del agua (kg H <sub>2</sub> O/mol)	18.01

$$V_H = \left[ \frac{1}{28.97 \frac{\text{kg a.s}}{\text{kg mol}}} + \frac{0.0038 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg a.s}}}{18.01 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg mol}}} \right] \left[ \frac{\left( 0.0825 \frac{\text{atm.m}^3}{\text{kg.mol.}^\circ\text{K}} \right) (296.55^\circ\text{K})}{0.6842 \text{ atm}} \right]$$

$$V_H = 1.2418 \frac{\text{m}^3}{\text{kg a.s}}$$

Para determinar el valor de aire necesario para el secado “G”, se realiza la división de caudal necesario para el secado sobre el volumen húmedo del aire seco, esto esta expresado en la Ecuación 4, el proceso de secado se realizó durante 5.067 horas (125.597m<sup>3</sup>/h\*5.067 h), dando la cantidad de aire necesario de 636.31 m<sup>3</sup>.

$$G = \frac{Q}{V_H}$$

Donde:

Q = Cantidad de ingreso de aire durante 5.067 horas (m<sup>3</sup>)

V<sub>H</sub> = Volumen húmedo (m<sup>3</sup>/kg a.s)

$$G = \frac{636.31 \text{ m}^3}{1.2418 \frac{\text{m}^3}{\text{kg a.s}}}$$

$$G = 512.409 \text{ kg a.s}$$



Obteniendo el dato de valor de cantidad de aire necesario en base seca “G” que se necesita para secar, con el balance de masa se halla el valor de contenido de humedad del aire en base seca “H<sub>2</sub>”.

$$\begin{aligned}
 (G)(H_{G1}) + (L_s)(X_1) &= (G)(H_{G2}) + (L_s)(X_2) \\
 (512.409 \text{ kg a. s}) \left( 0.0038 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg a. s}} \right) + (0.025 \text{ kg s. s}) \left( 0.6129 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg s. s}} \right) \\
 &= (512.409 \text{ kg a. s})(H_2) + (0.025 \text{ kg s. s}) \left( 0.0636 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg s. s}} \right) \\
 H_2 &= 0.0038 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg a. s}}
 \end{aligned}$$

Obteniendo el valor de contenido de humedad del aire en base seca “H<sub>2</sub>” se completa el balance de masa. Este resultado en comparación al ejemplo 4.6 de Cáceres (2022), que la cantidad de diferencia de humedad del aire de ingreso y salida es mínima, esto se debe al secado con una porción pequeña de muestra a secar.

**Tabla 30**

*Datos finales del balance de masa.*

<b>Datos</b>	<b>ingreso</b>	<b>salida</b>
<b>L<sub>I</sub> y L<sub>F</sub>:</b> Cantidad de producto húmedo y seco (kg)	0.04016	0.02628
<b>L<sub>s</sub>:</b> cantidad de sólido a secar (kg s.s)	<b>0.025</b>	<b>0.025</b>
<b>X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>:</b> contenido de humedad de sólido en base seca (kgH <sub>2</sub> O/kg s.s)	0.61	0.049
<b>T<sub>s1</sub>, T<sub>s2</sub>:</b> temperatura de ingreso y salida de sólido (°C)	20	54
<b>G:</b> cantidad de aire necesario para secar en base seca (kg a.s)	<b>505.68</b>	<b>505.68</b>
<b>H<sub>G1</sub>, H<sub>G2</sub>:</b> contenido de humedad del aire en base seca (kg H <sub>2</sub> O/kg a.s °k)	<b>0.00382</b>	<b>0.00383</b>
<b>T<sub>G1</sub>, T<sub>G2</sub>:</b> temperatura de ingreso y salida de aire (°C)	60	52

Con los datos obtenidos en el balance de masa se realiza el balance de energía con la Ecuación 9.

$$(G)(H'_{G1}) + (L_s)(H'_{s1}) = (G)(H'_{G2}) + (L_s)(H'_{s2}) + q_{(\text{secador})}$$

**Tabla 31**

*Datos iniciales para el balance de energía.*

<b>Datos</b>	<b>ingreso</b>	<b>salida</b>
<b>Ls:</b> Cantidad de producto húmedo y seco (kg)	0.04016	0.02628
<b>Ls:</b> Cantidad de sólido a secar (kg)	<b>0.025</b>	<b>0.025</b>
<b>H'G<sub>1</sub>, H'G<sub>2</sub>:</b> Entalpía del aire de entrada y salida (kJ/kg a.s)	<b>H<sub>G1</sub></b>	<b>H<sub>G2</sub></b>
<b>T<sub>G1</sub>, T<sub>G2</sub>:</b> Temperatura de ingreso y salida del aire (°C)	60	52
<b>G:</b> Cantidad del aire necesario para secar en base seca (kg a.s)	505.68	505.68
<b>H's<sub>1</sub>, H's<sub>2</sub>:</b> Entalpía del sólido de entrada y salida (kJ/ kg s.s) (kg H <sub>2</sub> O/kg a.s °K)	<b>H's<sub>1</sub></b>	<b>H's<sub>2</sub></b>
<b>TS<sub>1</sub>, TS<sub>2</sub>:</b> Temperatura de ingreso y salida del sólido (°C)	20	54

En el balance de energía se considera que no se trata de un proceso adiabático, ya que se

ha identificado una pérdida de calor durante el proceso. Por lo tanto, el valor de “Q” no es cero y debe incluirse en el balance global de energía.

Para determinar las **entalpías de ingreso y salida del aire** se usó la Ecuación 10.

$$H'_G = C_s(T_G - T_0) + H_G\lambda_0$$

**Tabla 32**

*Cálculo de la entalpía del aire para la entrada y salida.*

<b>Datos:</b>	<b>ingreso</b>	<b>salida</b>
<b>H'G<sub>1</sub>, H'G<sub>2</sub>:</b> Entalpía de aire de ingreso y salida (kJ/kg a.s)	H'G <sub>1</sub>	H'G <sub>2</sub>
<b>C<sub>s1</sub>, C<sub>s2</sub>:</b> Calor húmedo de aire de ingreso y salida (kJ/kg a.s°K)	C <sub>s1</sub>	C <sub>s2</sub>
<b>T<sub>G1</sub>, T<sub>G2</sub>:</b> Temperatura de ingreso y salida del aire (°C)	60	52
<b>H<sub>G1</sub>, H<sub>G2</sub>:</b> Contenido de humedad del aire en base seca (kg H <sub>2</sub> O/kg a.s)	0.00382	0.00383
<b>λ<sub>0</sub>:</b> Calor latente del agua	λ <sub>0,G1</sub>	λ <sub>0,G2</sub>

Para hallar el calor húmedo de la mezcla de aire y vapor de agua “C<sub>s</sub>” se realiza con la Ecuación 11 donde:

$$C_{p_{\text{aire}}} : 1.005 \text{ kJ/kg a.s}^\circ\text{K} \quad \text{y} \quad C_{p_{\text{vapor}}} : 1.88 \text{ kJ/kg H}_2\text{O}^\circ\text{K}$$

$$C_s = C_{p_{\text{aire}}} + C_{p_{\text{vapor}}}(H_G)$$

**Determinando la entalpía de aire de entrada:**

$$C_{s1} = \left( 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a. s } ^\circ\text{K}} \right) + \left( 1.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O } ^\circ\text{K}} \right) \left( 0.00382 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg a. s}} \right)$$

$$C_{s1} = 1.0121 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a. s } ^\circ\text{K}}$$

Para determinar el calor latente de agua, se obtiene de las tablas de propiedades de vapor saturado. (ver Anexo 3)

$$\lambda_{0G1} = 2,609.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O}}$$

Con los datos obtenidos, se calcula la entalpía de **ingreso de aire** con la Ecuación 10.

$$H'_G = C_s (T_G - T_0) + (H_G)(\lambda_0)$$

$$H'_{G1} = \left( 1.0121 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a. s } ^\circ\text{K}} \right) (333.15 ^\circ\text{K} - 273.15 ^\circ\text{K}) + \left( 0.00382 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg a. s}} \right) \left( 2,609.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O}} \right)$$

$$H'_{G1} = 70.71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a. s}}$$

**Determinando la entalpía de salida del aire:**

$$C_{s2} = \left( 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a. s } ^\circ\text{K}} \right) + \left( 1.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O } ^\circ\text{K}} \right) \left( 0.00383 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg a. s}} \right)$$

$$C_{s2} = 1.0122 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a. s } ^\circ\text{K}}$$

Para determinar el calor latente de agua, se obtiene de las tablas de propiedades de vapor saturado. (ver Anexo 3).

$$\lambda_{0G2} = 2,574.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O}}$$

Con los datos obtenidos se calcula la entalpía de salida de aire con la Ecuación 10

$$H'_{G2} = (1.0122 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a. s } ^\circ\text{K}})(313.14^\circ\text{K} - 273.15^\circ\text{K}) + (0.00385 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg a. s}})(2574.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O}})$$

$$H'_{G2} = 50.40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a. s}}$$

**Para hallar las entalpías de ingreso y salida del sólido** a secar se usó la ecuación 12.

$$H'_s = (C_{p\text{sólido}})(T_s - T_0) + (X)(c_{p\text{agua}})(T_s - T_0)$$

**Tabla 33**

*Cálculo de la entalpía del sólido a secar para la entrada y salida.*

<b>Datos:</b>	<b>ingreso</b>	<b>salida</b>
<b>H's<sub>1</sub>, H's<sub>2</sub>:</b> entalpía de sólido de ingreso y salida (kJ/kg s.s)	<b>H'S<sub>1</sub></b>	<b>H'S<sub>2</sub></b>
<b>Cp sólido:</b> capacidad calorífica del maíz (kJ/kg-°K)	2.27	2.27
<b>Cp agua:</b> capacidad calorífica de agua (kJ/kg-°K)	4.187	4.187
<b>X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>:</b> contenido de humedad de sólido en base seca (kgH <sub>2</sub> O/kg s.s)	0.6129	0.0636
<b>T<sub>s1</sub>, T<sub>s2</sub>:</b> temperatura del sólido al ingreso y salida (°C)	20	54

El valor de Cp de sólido (capacidad calorífica del maíz blanco Cusco) es de 2.27 kJmol/kg°K

(Roque et al., 2016)

#### **Determinando la entalpía de entrada del sólido**

$$H'_{s1} = (2.27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg s. s } ^\circ\text{K}})(293.15^\circ\text{K} - 273.15^\circ\text{K})$$

$$+ (0.6129 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg a. s}})(4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgH}_2\text{O } ^\circ\text{K}})(293.15^\circ\text{K} - 273.15^\circ\text{K})$$

$$H'_{s1} = 96.72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg s. s}}$$

#### **Determinando la entalpía del sólido de salida:**

$$\begin{aligned}
 H'_{s2} &= \left(2.27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg s.s } ^\circ\text{K}}\right)(327.15^\circ\text{K} - 273.15^\circ\text{K}) \\
 &\quad + \left(0.0636 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg a.s}}\right)\left(4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgH}_2\text{O } ^\circ\text{K}}\right)(327.15^\circ\text{K} - 273.15^\circ\text{K}) \\
 H'_{s2} &= 136.96 \frac{\text{kJ}}{\text{kg s.s}}
 \end{aligned}$$

Teniendo los datos del balance de energía “entalpía de ingreso y salida de aire” hacemos un resumen como indica siguiente la Tabla 34.

**Tabla 34**

*Datos finales del balance de energía.*

<b>Datos:</b>	<b>ingreso</b>	<b>salida</b>
<b>G:</b> Cantidad de aire necesario para secar en base seca (kg a.s)	505.67	505.67
<b>H'G<sub>1</sub>, H'G<sub>2</sub>:</b> Entalpía de aire de ingreso y salida (kJ/kg a.s)	70.71	62.55
<b>Ls:</b> Cantidad de sólido a secar (kg s.s)	0.0249	0.0249
<b>H'S<sub>1</sub>, H'S<sub>2</sub>:</b> entalpía de sólido de ingreso y salida (kJ/kg s.s)	96.72	136.96

Corroborando el balance de energía con la Ecuación 9.

$$(G)(H'_{G1}) + (Ls)(H'_{S1}) = (G)(H'_{G2}) + (Ls)(H'_{S2}) + q_{\text{secador}}$$

$$(505.67 \text{ kg a.s}) \left(70.71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a.s}}\right) + (0.0248 \text{ kg s.s}) \left(96.724 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a.s}}\right) = (505.67 \text{ kg a.s}) \left(62.55 \frac{\text{kJ}}{\text{kg a.s}}\right) + (0.0248 \text{ kg s.s}) \left(136.96 \frac{\text{kJ}}{\text{kg s.s}}\right) + q$$

$$q_{\text{secado}} = 4,125.44 \text{ kJ}$$

Durante un ciclo de 5 horas, el secador industrial requirió 35,759.28 kJ de energía, con una pérdida de 4,125.44 kJ, lo que representa una eficiencia energética del 88.46% y una pérdida relativa del 11.54%. Estos valores indican un desempeño eficiente del equipo, ya que la pérdida se mantiene dentro de un rango aceptable para procesos térmicos industriales, aunque aún es posible optimizar el sistema para reducirla. Estos resultados se obtuvieron mediante el programa PsyCalc

ver Apéndice 4. Este resultado en comparación con el ejemplo 4.11 de Cáceres (2022) que llegó a obtener como consumo de calor específico 93,390.37 kJ/h para 50kg/h de muestra, el cual en gramos viene a ser 93.4 kJ/50gramos, esto tiene una comparación elevada debido a que se usó un precalentador de aire y la cantidad de muestra era mayor.

## CONCLUSIONES

- La cinética de secado ha podido ser evaluado a partir de los registros de humedad vs tiempo, analizando la curva de secado y velocidad de secado (R), permitiendo construir curvas experimentales y ser ajustados a modelos matemáticos con una buena correlación. También demostrar que a mayor temperatura y mayor velocidad de aire influye en la velocidad de secado.
- La velocidad del aire al ser incrementado de 1.78 m/s a 3.56 m/s reduce el tiempo de secado, esto se observó en los ensayos con temperaturas de 40, 50 y 60 °C dando una reducción de tiempo de 1, 0.8 y 0.4 horas respectivamente.
- Al incrementar la temperatura de 40 a 50 y 60 °C también reduce el tiempo de secado significativamente, la diferencia entre 40 a 50 °C fue de 1.8 horas mientras que de 50 a 60 °C 2 horas. Estos datos fueron con una velocidad de 1.78 m/s, los datos son similares si se trabaja con la velocidad de 3.56 m/s.
- Para los 10 modelos matemáticos la cinética de secado del Maíz mote blanco gigante del Cusco dieron un buen ajuste, teniendo un coeficiente de determinación mayor a 0.9 los modelos que mejor ajuste tuvieron fueron los siguientes; Midilli, modelo de los dos términos, Henderson & Pagis y Page modificado IV, estos modelos tuvieron un coeficiente de determinación mayor a 0.997.
- Las propiedades del Maíz mote blanco gigante del Cusco evaluados al final del secado, tuvieron un buen aspecto y una humedad de 6% las propiedades químicas y microbiológicas se encuentran dentro de la normativa, tanto el maíz mote seco e hidratado tuvieron un buen aspecto, por lo tanto, se concluye que el Maíz mote blanco gigante del Cusco puede llegar a ser secado a condiciones de 60 °C sin alterar las propiedades.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar futuras investigaciones enfocadas en optimizar la combinación de temperatura y velocidad del aire, priorizando la eficiencia energética sin comprometer la calidad fisicoquímica y microbiológica del producto.
- Implementar un sistema de control automático de temperatura y flujo de aire para mejorar el monitoreo de la cinética
- Monitorear la calidad microbiológica del producto durante el almacenamiento y encontrar posibles mejoras en el secado que amplíen la duración.
- Estudiar el comportamiento de otras variedades de maíz andino bajo las mismas condiciones.



## BIBLIOGRAFÍA

ADAM. (2025). *Analizadores de Humedad*.

Agro sur Perú. (2021). *Mote chico (Andahuaylas)*. catálogo de productos deshidratados.

<https://www.agrosurperu.com/product-page/mote-chico>

Almada, M., Stella C, M., Machaín, M., & Claude, J. (2005). Guía de uso de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*.

Aucancela G, C. E., & Chaves C, E. (2009). *Diseño y construcción de un secador de túnel para la deshidratación del maíz*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Babu, A. K., Kumaresan, G., Aroul Raj, V., & Velraj, R. (2018, junio 1). *Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models*. Elsevier. <https://sci-hub.se/10.1016/j.rser.2018.04.002>

Badui Dergal, S. (2006). *Química de los alimentos* (Pearson, Ed.; cuarta). [www.pearsoneducacion.net](http://www.pearsoneducacion.net)

Baker, C. (1997). Industrial Drying of Foods. *Blackie academic y professional, 1*.

Barreiro, N. (2016). *obtenção de farinha de casca de abacaxi e aplicação em sorvete*. Universidad Tecnológica Federal.

Berk, Z. (2018). Food Process Engineering and Technology. *ScienceDirect*, 1–710. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03186-8>

- Cáceres Huambo, B. N. (2022a). *Secado convectivo de alimentos y productos agrícolas* (1ra ed.). Biblioteca nacional del Perú.  
<https://isbn.bnpgob.pe/catalogo.php?mode=detalle&nt=130957>
- Cáceres Huambo, N. (2022b). *Secado convectivo de alimentos y productos agrícolas* (1ra ed.). Biblioteca nacional del Perú.  
<https://isbn.bnpgob.pe/catalogo.php?mode=detalle&nt=130957>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Trasferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones* (4ta ed.). McGraw-Hill Education.
- Cerrón, S., & Junchaya, J. (2019). Influencia de la temperatura del aire en la velocidad de secado de quinua germinada en un secador de bandejas [Universidad Nacional del Centro del Perú]. En *Universidad Nacional del Centro del Perú*.  
<http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5682>
- Charro E, M. M. (2015). *Obtención de plástico biodegradable a partir de almidón de patata* [Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/3788>
- Choque, M. L., & Molina, P. M. (2018a). *Influencia I de los métodos de secado en bandejas y en vacío sobre el germinado de quinua (chenopodium quinoa willd.) variedad pasankalla* [Universidad Nacional de San Agustín]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8699>
- Choque, M. L., & Molina, P. M. (2018b). *Influencia I de los métodos de secado en bandejas y en vacío sobre el germinado de quinua (chenopodium quinoa willd.) variedad pasankalla* [Universidad Nacional de San Agustín]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8699>
- Colina, M. L. (2010). *Deshidratación de alimentos*. Editorial Trillas Sa De C.

- Cuitiño de Vega, M. J., & Cardozo, V. (2018, octubre 10). *Maíz: Clasificación y usos potenciales*. Ergormix. [https://www.ergormix.com/agricultura/genetica-maiz/maiz-clasificacion-usos-potenciales\\_a42836/](https://www.ergormix.com/agricultura/genetica-maiz/maiz-clasificacion-usos-potenciales_a42836/)
- Díaz Ayala, F. (2009). Estudio del proceso de secado de nopal en una columna de charolas. *Cenidet*.
- El Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2020). *INACAL establece requisitos del maíz para impulsar su comercialización*. Plataforma digital única del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/inacal/noticias/305136-inacal-establece-requisitos-del-maiz-para-impulsar-su-comercializacion>
- Fellows, P. J. (2006). *Tecnologia do Processamento de Alimentos* (2da ed.). <https://www.estantevirtual.com.br/livro/tecnologia-do-processamento-de-alimentos-0V5-3583-000-BK>
- Figuerola, P., & Sherley, L. (2019). Evaluación del efecto de la temperatura y velocidad del aire en la rapidez de secado de la yuca en un secador de bandejas [Universidad Nacional del Centro del Perú]. En *Universidad Nacional del Centro del Perú*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6330>
- Fito Maupoey, P., Andrés Grau, A., Barat Baviera, J., & Albors Sorolla, A. (2016). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente* (Universitat Politècnica de València, Ed.). [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es)
- Galvez Condori, E. (2016). *Diseño de una secadora de quinua en el departamento de la Paz-Bolivia*. Universidad mayor de San Andres.

- García V, M. del S. (2013). *Diseño de un secador de bandejas para el secado de maíz, quinua y amaranto en la hacienda San Jorge*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Facultad de Ciencias.
- Geankoplis, C. J. (1998a). *Procesos de transporte y operaciones unitarias: Vol. tercera* (Compañía editorial Continental, Ed.). University of Minnesota.
- Geankoplis, C. J. (1998b). *Procesos de transporte y operaciones unitarias: Vol. tercera* (Compañía editorial Continental, Ed.). University of Minnesota.
- Green, D. w, & Perry, R. H. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (McGraw-Hill, Ed.; 8th ed.). University of Kansas.
- Hellevang, K. (1994, noviembre 23). Grain Drying Extension Agricultural Engineer. scientific article. *NDSU Extension service*. <https://www.researchgate.net/publication/279463815>
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGrawHill education,.
- Lara Espinoza, J. I. (2017). *Desarrollo de un producto pre-cocido deshidratado a base de maíz blanco nixtamalizado (pelado)* [Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6070>
- Lunven, p. (1993). El maíz en la nutrición humana. FAO. En *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)* (1ra edición).
- Marín B., E., Lemus M., R., Flores M., V., & Vega G., A. (2006). La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista chilena de nutrición*, 33(3), 527–538. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182006000500009>

- Melquíades, Y. I., López, C., & Rosas, M. E. (2009). Estudio de la Cinética de Rehidratación de Zanahoria (*Daucus Carota*) Deshidratadas Rehydration Kinetics Study of the Dehydrated Carrot (*Daucus carota*). *Scielo*, 20(3), 65–72. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4037it.08>
- Méndez Martínez, E. (2015, enero 1). *La resistencia del maíz en un pueblo totonaca de la Sierra de Papantla, Veracruz*. [https://www.researchgate.net/publication/381093521\\_La\\_resistencia\\_del\\_maiz\\_en\\_un\\_pueblo\\_totonaca\\_de\\_la\\_Sierra\\_de\\_Papantla\\_Veracruz](https://www.researchgate.net/publication/381093521_La_resistencia_del_maiz_en_un_pueblo_totonaca_de_la_Sierra_de_Papantla_Veracruz)
- Mendoza, G. D., Ricalde, R., & Hernández, G. (2017, abril 28). *Estructura del Almidón*. Ergonomix. [https://www.engormix.com/ganaderia/maiz-engorde-bovino/estructura-almidon\\_a40743/](https://www.engormix.com/ganaderia/maiz-engorde-bovino/estructura-almidon_a40743/)
- Ministerio de agricultura pesca y alimentación. (2012). *Secado y almacenamiento de los granos*. MAPA. <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/maquinaria-agricola/secado-grano.aspx>
- MINSA/DIGESA. (2008). NTS N° 071. *Ministerio de Salud del Peru*.
- Miranda Lara, G. (2011). Evaluación del proceso de secado de granos de cacao fermentado, en un secador de bandejas con convección forzada de aire. *Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui*.
- Mujumdar, A. (2015). *Handbook of Industrial Drying*. 4.
- Navarro, G., & Rivera, S. (2011). estudio de caso: Denominación de origen del maíz blanco gigante Cusco. *Indecopi*.

- Ordóñez, M., Gely, M., & Pagano, A. (2011). Estudio de las propiedades físicas de la cinética de secado de granos de maíz colorado duro. *UNICEN*.
- Perdon, A. A., Schonauer, S. L., & Poutanen, K. S. (2020). Breakfast Cereals and How They Are Made: Raw Materials, Processing, and Production. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04647-5>
- Programa nacional de alimentación escolar Qali Warma. (2022). Especificaciones Técnicas del maíz mote. *Ministerio de desarrollo social*.
- QALI WARMA, P. N. de A. E. (2022). Características del maíz mote. *Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social*.
- Quevado, ing. S. (2013). Manual técnico maíz blanco Urubamba (Blanco Gigante Cusco). *Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA*.
- Ripusundan L, P., Gonzalo G, R., & Marathée, J. P. (2001). El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción. *Organizacion de las naciones unidad para la agricultura y alimentación*, 46–48.
- Rivera, G., & Riveros, H. (2007). Estudio de caso sobre el proceso de obtención de la Denominación de Origen del Maíz Blanco Gigante Cusco – Perú y principales logros alcanzados . *FAO y IICA*.
- Roque, L., Arámbula, G., López, M., & Ortiz, hipólito. (2016). Nixtamalización de cinco variedades de maíz con diferente dureza de grano: impacto en consumo de combustible y cambios físicoquímicos. *Scielo*.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952016000600727](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952016000600727)

- Rudy, S., Dziki, D., Krzykowski, A., Gawlik-Dziki, U., Polak, R., Różyło, R., & Kulig, R. (2015). Influence of pre-treatments and freeze-drying temperature on the process kinetics and selected physico-chemical properties of cranberries (*Vaccinium macrocarpon* Ait.). *LWT*, 63(1), 497–503. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.03.067>
- Salazar, E. (2020). *Modelado de la cinética de secado por convección forzada de la semilla de pajuro (Erythrina edulis Triana)* [Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1823>
- Santiago, A., & Moreira, R. (2020). Drying of edible seaweeds. *Sustainable Seaweed Technologies: Cultivation, Biorefinery, and Applications*, 131–154. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817943-7.00004-4>
- sierra y selva exportadora. (2022). Mercado y Tendencias del Maíz Blanco Gigante del Cusco. *Ministerio de desarrollo agrario y riego*, 15–16.
- Singh, P. H. D. (2009). *Introducción a la ingeniería de los alimentos* (Segunda edición).
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2009). *Introducción a la ingeniería de los alimentos* (Acribia S.A). Academic Press. [www.rpaulsingh.com](http://www.rpaulsingh.com).
- Smith; Van Ness; Abbott. (1997). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química : Vol. Quinto Volumen* (Mc Graw Hill).
- Takhtajan, A. L. (1980). Outline of the classification of flowering plants (magnoliophyta). *The Botanical Review* 1980 46:3, 46(3), 225–359. <https://doi.org/10.1007/BF02861558>
- Toledo, R. T. (2007). *Fundamentals of Food Process Engineering* (third).
- Treybal, R. E. (1997). *Operaciones de transferencia* (F. lozano, Ed.; segunda). McGRAW-HILL.

Valdés Marín, P. (2008, septiembre 4). *Manual de deshidratación I: frutas y hortalizas*. Frutas y hortalizas Marin. <https://manualdeshidratacion.blogspot.com/2008/09/frutas-y-hortalizas.html>

Verma, R. C., & Prasad, S. (1999). Kinetics of absorption of water by maize grains. *Journal of Food Engineering*, 39(4), 395–400. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00027-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00027-8)



## ANEXOS

## Anexo 1

*Especificaciones técnicas del mote del ministerio de desarrollo e inclusión social*

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ALIMENTOS QUE  
FORMAN PARTE DE LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO  
ALIMENTARIO 2022 DEL PROGRAMA NACIONAL DE  
ALIMENTACIÓN ESCOLAR QALI WARMA

	<b>PERÚ</b>	Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social	Viceministerio de Prestaciones Sociales	Programa Nacional de Alimentación Escolar QALI WARMA
Versión N° 01	<b>MOTE</b>			Resolución Ejecutiva N° D000233-2021-MIDIS/PNAEQW-DE
	CÓDIGO: CER-MT-2022			Pág. 1 de 4

**1. CARACTERÍSTICAS GENERALES**

<b>1.1 Denominación técnica</b>	Mote
<b>1.2 Tipo de alimentos</b>	No Perecible
<b>1.3 Grupo de alimentos</b>	Derivados de cereales
<b>1.4 Descripción general</b>	Granos de cereales (trigo o maíz entero) que han sido remojados en solución alcalina caliente, lavados y friccionados repetidamente con agua, luego de lo cual se someten a un proceso de secado.  No debe producirse mote de granos descompuestos, como consecuencia de ataque de hongos, roedores, insectos o granos fermentados.  Ver denominaciones individuales en los anexos

**2. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS****2.1. Características Organolépticas**

Características	Especificación	Referencia
Color	De acuerdo a la naturaleza del producto	Requisito del PNAEQW
Olor y sabor	De acuerdo a la naturaleza del producto, exento de olores y sabores extraños, sin indicios de rancidez o enmohecimiento	
Aspecto	Granos sueltos, exento de piedras, insectos vivos o muertos en cualquiera de sus estados fisiológicos u otras materias extrañas	

**2.2. Características Físico Químicas****2.2.1 Trigo mote**

Características	Especificación	Referencia
Humedad (%)	Máximo 12,5	NTP 205.035: 2019 TRIGO. Trigo mote. Requisitos
Proteínas (%)	Mínimo 10,0	
Grasa total (%)	Mínimo 1,0	
Cenizas (%)	Máximo 2,2	
Alcalinidad (%)	Máximo 10,0	
Aflatoxina	No detectable en 5 ppb	

**2.2.1 Maíz mote**

Características	Especificación	Referencia
Humedad (%)	Máximo 12,5	NTP 205.084: 2020 MAÍZ AMILÁCEO. Maíz mote. Requisitos
Proteínas (%)	Mínimo 6,0	
Grasa total (%)	Mínimo 2,0	
Cenizas (%)	Máximo 1,1	
Alcalinidad (%)	Máximo 10,0	
Aflatoxina	No detectable en 5 ppb	

**Firma Digital**  
PROGRAMA NACIONAL  
DE ALIMENTACIÓN ESCOLAR

Firmado digitalmente por  
CONTRERAS BONILLA Luis  
Herman FAU 2050154095 hard  
Motivo: Doy Vº Bº  
Fecha: 15.09.2021 10:02:35 -05:00

**Firma Digital**  
PROGRAMA NACIONAL  
DE ALIMENTACIÓN ESCOLAR

Firmado digitalmente por  
GUTIERREZ LOPEZ Luis Enrique  
FAU 2050154095 soft  
Motivo: Doy Vº Bº  
Fecha: 15.09.2021 21:50:34 -05:00

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ALIMENTOS QUE  
FORMAN PARTE DE LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO  
ALIMENTARIO 2022 DEL PROGRAMA NACIONAL DE  
ALIMENTACIÓN ESCOLAR QALI WARMA

	<b>PERÚ</b>	Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social	Viceministerio de Prestaciones Sociales	Programa Nacional de Alimentación Escolar QALI WARMA
Versión N° 01	<b>MOTE</b>			Resolución Ejecutiva N° D000233-2021-MIDIS/PNAEQW-DE
	CÓDIGO: CER-MT-2022			Pág. 2 de 4

### 2.3. Características Microbiológicas

Agente microbiano	Categoría	Clase	n	c	Límite por g	
					m	M
Mohos	2	3	5	2	10 <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup>

Fuente: R.M. N° 591-2008-MINSA "Norma Sanitaria que establece los Criterios Microbiológicos de Calidad Sanitaria e Inocuidad para los Alimentos y Bebidas de Consumo Humano" Criterio V.1 Granos secos.

### 3. PRESENTACIÓN

#### 3.1 Presentación y envases

Los envases utilizados deben ser de primer uso y sellados herméticamente, de acuerdo a las siguientes características:

Envase	Tip o	Material	Capacidad
Envase primario	Bolsa	Polietileno (PE) o Polipropileno o Polipropileno Biorientado (BOPP) Bilaminado o Trilaminado	Hasta 1,00 kg
Envase secundario	Caja	Cartón corrugado	Establecido por el fabricante
	Bolsa	Polietileno	
	Caja	Cartón corrugado	
Embalaje (opcional) (*)	Saco	Polipropileno	

(\*) El embalaje es utilizado para fines de transporte y distribución.

#### 3.2 Vida útil

Establecida por el fabricante, según la declaración en el Registro Sanitario ante la autoridad sanitaria competente.

#### 3.3 Rotulado

El rotulado debe ajustarse a lo establecido en el artículo 80° y 117° del Reglamento sobre Vigilancia y Control Sanitario de Alimentos y Bebidas, aprobado por Decreto Supremo N° 007-98-SA, debiendo contener en el envase de presentación unitaria la siguiente información mínima:

- Nombre del producto
- Declaración de los ingredientes y aditivos empleados en la elaboración del producto
- Peso neto
- Nombre o razón social y dirección del fabricante
- Nombre o razón social y dirección del envasador y/o distribuidor (\*)
- Código de lote
- Fecha de vencimiento
- Condiciones de conservación
- Código de Registro Sanitario

(\*) Requisito adicional en caso de fraccionamiento.

El rótulo debe estar consignado en el envase de presentación unitaria, en idioma castellano, con caracteres de fácil lectura, en forma completa y clara, visible, legible e indeleble, el mismo que no debe desprenderse ni borrarse. La información del rotulado no debe inducir a engaño al

**Firma Digital**  
PROGRAMA NACIONAL  
DE ALIMENTACIÓN ESCOLAR

Firmado digitalmente por:  
CONTRERAS BONILLA Luis  
Herrero FAU 20550154065 hard  
Motivo: Doy V° B°  
Fecha: 15.09.2021 10:02:35 -05:00

**Firma Digital**  
PROGRAMA NACIONAL  
DE ALIMENTACIÓN ESCOLAR

Firmado digitalmente por:  
GUTIERREZ LOPEZ Luis Enrique  
FAU 20550154065 soft  
Motivo: Doy V° B°  
Fecha: 15.09.2021 21:50:34 -05:00

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ALIMENTOS QUE  
FORMAN PARTE DE LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO  
ALIMENTARIO 2022 DEL PROGRAMA NACIONAL DE  
ALIMENTACIÓN ESCOLAR QALI WARMA

	<b>PERÚ</b>	Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social	Viceministerio de Prestaciones Sociales	Programa Nacional de Alimentación Escolar QALI WARMA
Versión N° 01	<b>MOTE</b>			Resolución Dirección Ejecutiva N° D000233- 2021-MIDIS/PNAEQW- DE
	CÓDIGO: CER-MT-2022			Pág. 3 de 4

consumidor. No se permite el uso de etiqueta autoadhesiva para ninguna información del rotulado, que pretenda reemplazar la información consignada en el rotulado original, en ningún caso, a excepción de lo dispuesto por la autoridad sanitaria competente, siempre que no se refiera a la composición original del producto y cuya disposición no reemplace ni oculte la información del rotulado original.

#### 4. REQUISITOS DE CERTIFICACIÓN OBLIGATORIOS

##### 4.1 Documentación Obligatoria

- Copia simple de la consulta web del Registro Sanitario del producto y anotaciones según corresponda, expedido por la DIGESA, el que debe corresponder al producto, marca, envase y presentación, vigente durante el periodo de atención.
- Copia simple de la Resolución Directoral que otorga Validación Técnica Oficial del Plan HACCP emitida por la DIGESA, otorgada para la línea de proceso del producto requerido, vigente durante la fabricación del producto. En caso de fraccionamiento del producto, debe presentar la copia simple de la Resolución Directoral que otorga la Validación Técnica Oficial del Plan HACCP emitida por la DIGESA, para la línea de fraccionamiento y envasado.

##### 4.2 Certificación Obligatoria

- Original o copia expedida (no copia simple) o copia legalizada notarialmente del certificado o informe de inspección de lote, emitido por un Organismo de Inspección acreditado ante INACAL-DA, el mismo que debe adjuntar original o copia simple de los informes de ensayo de las características organolépticas y fisicoquímicas establecidas en las especificaciones técnicas del producto (por código de lote y presentación), realizados por un Laboratorio de Ensayo acreditado por el INACAL-DA.
- Original o copia simple de los informes de ensayo de las características microbiológicas, realizados con métodos de ensayo acreditados para el producto (por código de lote y presentación), por un Laboratorio de Ensayo acreditado por el INACAL-DA, "con el símbolo de acreditación".
  - En caso no exista laboratorio de ensayo, que cuente con método de ensayo acreditado para el producto, se puede utilizar métodos de ensayo no acreditados realizados por un laboratorio de ensayo acreditado por el INACAL-DA.

Los ensayos se realizan considerando lo siguiente:

- Análisis Organoléptico y Físico químico**

El número de unidades de muestra para los ensayos organolépticos y fisicoquímicos es por una vía de acuerdo a la NTP-ISO 2859-1:2013 (revisada el 2018): *Procedimientos de muestreo para inspección por atributos. Parte 1: Esquemas de muestreo clasificados por límite de calidad aceptable (LCA) para inspección lote por lote. 4a Edición*, nivel de inspección especial S4, plan de muestreo simple para inspección normal y LCA 0.65 (para efecto de extracción de la muestra).

**Firma Digital**  
PROGRAMA NACIONAL  
DE ALIMENTACIÓN ESCOLAR

Firmado digitalmente por  
CONTRERAS BONILLA Luis  
Hernán FAU 20550154065 hard  
Motivo: Doy Vº Bº  
Fecha: 15.09.2021 10:02:35 -05:00

**Firma Digital**  
PROGRAMA NACIONAL  
DE ALIMENTACIÓN ESCOLAR  
QALI WARMA

Firmado digitalmente por  
GUTIERREZ LOPEZ Luis Enrique  
FAU 20550154065 soft  
Motivo: Doy Vº Bº  
Fecha: 15.09.2021 21:50:34 -05:00



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ALIMENTOS QUE  
FORMAN PARTE DE LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO  
ALIMENTARIO 2022 DEL PROGRAMA NACIONAL DE  
ALIMENTACIÓN ESCOLAR QALI WARMA

	<b>PERÚ</b>	Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social	Viceministerio de Prestaciones Sociales	Programa Nacional de Alimentación Escolar QALI WARMA
Versión N° 01	<b>MOTE</b>			Resolución Dirección Ejecutiva N° D000233- 2021-MIDIS/PNAEQW- DE
	CÓDIGO: CER-MT-2022			Pág. 4 de 4

• Análisis Microbiológico

El número de unidades de muestra para los ensayos microbiológicos debe ser de acuerdo al plan de muestreo establecido en la Norma Sanitaria que establece los Criterios Microbiológicos de Calidad Sanitaria e Inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano aprobado por Resolución Ministerial N° 591-2008/MINSA. No se permite compositar, salvo indicación expresa en la norma sanitaria en mención.

Se aceptan certificados o informes de inspección e informes de ensayo con fecha de emisión no mayor a seis (06) meses, los mismos que deben estar vigentes hasta el plazo máximo de liberación correspondiente; asimismo, no se acepta que mediante carta o adenda se rectifiquen los resultados de análisis emitidos en el documento original, ni las revalidaciones que amplíen la vigencia de los certificados o informes de inspección e informes de ensayo.

El alimento debe cumplir con lo establecido en las "Generalidades" de las Especificaciones Técnicas de Alimentos del Programa Nacional de Alimentación Escolar Qali Warma.

**5. ANEXOS**

**5.1 Denominaciones Individuales**

CÓDIGO	NOMBRE DEL ALIMENTO
CER-MT-01-2022	TRIGO MOTE
CER-MT-02-2022	MAÍZ MOTE

**Firma Digital**  
PROGRAMA NACIONAL  
DE ALIMENTACIÓN ESCOLAR

Firmado digitalmente por:  
CONTRERAS BONILLA Luis  
Hernán FAU.20560154065 hard  
Motivo: Doy V° B°  
Fecha: 15.09.2021 10:02:35 -05:00

**Firma Digital**  
PROGRAMA NACIONAL  
DE ALIMENTACIÓN ESCOLAR  
QALI WARMA

Firmado digitalmente por:  
GUTIERREZ LOPEZ Luis Enrique  
FAU.20560154065 soft  
Motivo: Doy V° B°  
Fecha: 15.09.2021 21:50:34 -05:00

Fuente: QALI WARMA, (2022)

## Anexo 2

Constantes de Antoine.

<i>Apéndice 6.2</i> Constantes de Antoine			
	$\text{Log } P^o = A - \frac{B}{t + C}$		
	$P = \text{mm de Hg} \quad t = ^\circ\text{C}$		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Metano	6.61184	389	266
Etano	6.80266	656.4	256
Propano	6.82973	813.2	248
Butano	6.83029	845.9	240
Pentano	6.85221	1064.63	232
Hexano	6.87776	1171.53	224.336
Heptano	6.90246	1268.115	216.9
Benceno	7.429	1628.32	279.56
Tolueno	6.953	1343.94	219.38
Etil ciclohexano	6.80266	656.4	256
Acetona	7.02447	1161	224
Alcohol etílico	8.04494	1554.3	222.65
Alcohol metílico	7.87863	1473.11	230
Agua	8.10765	1750.286	235 de 0° a 60°C
Agua	7.96681	1668.21	228 de 60 a 150°C

Fuente: Introducción a la termodinámica en ingeniería química, Smith *et al* (1997).

### Anexo 3

#### Propiedades del vapor saturado.

TABLA A.4.2 Propiedades del vapor saturado.

Temperatura (°C)	Presión de vapor (kPa)	Volumen específico (m³/kg)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/(kg K))	
		Líquido	Vapor saturado	Líquido ( $H_f$ )	Vapor saturado ( $H_g$ )	Líquido	Vapor saturado
0,01	0,6113	0,0010002	206,136	0,00	2.501,4	0,0000	9,1562
3	0,7577	0,0010001	168,132	12,57	2.506,9	0,0457	9,0773
6	0,9349	0,0010001	137,734	25,20	2.512,4	0,0912	9,0003
9	1,1477	0,0010003	113,386	37,80	2.517,9	0,1362	8,9253
12	1,4022	0,0010005	93,784	50,41	2.523,4	0,1806	8,8524
15	1,7051	0,0010009	77,926	62,99	2.528,9	0,2245	8,7814
18	2,0640	0,0010014	65,038	75,58	2.534,4	0,2679	8,7123
21	2,487	0,0010020	54,514	88,14	2.539,9	0,3109	8,6450
24	2,985	0,0010027	45,883	100,70	2.545,4	0,3534	8,5794
27	3,567	0,0010035	38,774	113,25	2.550,8	0,3954	8,5156
30	4,246	0,0010043	32,894	125,79	2.556,3	0,4369	8,4533
33	5,034	0,0010053	28,011	138,33	2.561,7	0,4781	8,3927
36	5,947	0,0010063	23,940	150,86	2.567,1	0,5188	8,3336
40	7,384	0,0010078	19,523	167,57	2.574,3	0,5725	8,2570
45	9,593	0,0010099	15,258	188,45	2.583,2	0,6387	8,1648
50	12,349	0,0010121	12,032	209,33	2.592,1	0,7038	8,0763
55	15,758	0,0010146	9,568	230,23	2.600,9	0,7679	7,9913
60	19,940	0,0010172	7,671	251,13	2.609,6	0,8312	7,9096
65	25,03	0,0010199	6,197	272,06	2.618,3	0,8935	7,8310
70	31,19	0,0010228	5,042	292,98	2.626,8	0,9549	7,7553
75	38,58	0,0010259	4,131	313,93	2.635,3	1,0155	7,6824
80	47,39	0,0010291	3,407	334,91	2.643,7	1,0753	7,6122
85	57,83	0,0010325	2,828	355,90	2.651,9	1,1343	7,5445

Fuente: Introducción a la ingeniería de los alimentos, Singh y Helman (2009)

## Anexo 4

*Propiedades de transferencia de calor del agua líquida.*

**A.2.11 Propiedades de transferencia de calor del agua líquida  
(UNIDADES SI)**

$T$ (°C)	$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg·K)	$\mu \times 10^3$ (Pa·s, o kg/m·s)	$k$ (W/m·K)	$N_{Pr}$	$\beta \times 10^4$ (1/K)	$(g\beta\rho^2/\mu^2) \times 10^{-8}$ (1/K·m <sup>3</sup> )
0	273.2	999.6	4.229	1.786	0.5694	13.3	-0.630	
15.6	288.8	998.0	4.187	1.131	0.5884	8.07	1.44	10.93
26.7	299.9	996.4	4.183	0.860	0.6109	5.89	2.34	30.70
37.8	311.0	994.7	4.183	0.682	0.6283	4.51	3.24	68.0
65.6	338.8	981.9	4.187	0.432	0.6629	2.72	5.04	256.2
93.3	366.5	962.7	4.229	0.3066	0.6802	1.91	6.66	642
121.1	394.3	943.5	4.271	0.2381	0.6836	1.49	8.46	1300
148.9	422.1	917.9	4.312	0.1935	0.6836	1.22	10.08	2231
204.4	477.6	858.6	4.522	0.1384	0.6611	0.950	14.04	5308
260.0	533.2	784.9	4.982	0.1042	0.6040	0.859	19.8	11030
315.6	588.8	679.2	6.322	0.0862	0.5071	1.07	31.5	19260

*Fuente:* Procesos de transporte y operaciones unitarias, Geankoplis, (1998)



## Anexo 5

### Resultado microbiológico de muestra de maíz secado al aire libre



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON  
REGISTRO N° LE - 031



#### INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL N° AG-163838

Pag 1 / 1

Organismo acreditado : INSPECTORATE SERVICES PERÚ S.A.C  
Registro de Acreditación : N° LE - 031  
Cliente : PROCESADORA ANDINA S.A.  
Dirección : AV. EL SANTUARIO NRO. 1127 URB. ZARATE (ALTURA DE CDRA 11 DE GRAN CHIMU) LIMA - LIMA - SAN JUAN DE LURIGANCHO  
Producto : M5: MAIZ GIGANTE DEL CUSCO  
Número de Muestras : 1 muestras  
Presentación : Bolsa de polipropileno  
Procedencia de la muestra : Muestra proporcionada por el Cliente  
Información proporcionada por el cliente (b) : M5  
-Código Productor : 080622NM1  
-Nombre Productor : DONATO CCORIMANYA  
-Cuartel/Lote (Cod.Parcela/Sector) : 200622M-26  
-Muestreador (Turno/Equipo) : SHIRLEY PRADO  
-Respons. muestra : SHIRLEY PRADO  
-Fec. muestreo : 20/06/2022  
Fecha de recepción de las muestras : 23/06/2022  
Fecha de inicio de análisis : 23/06/2022  
Fecha de término de análisis : 28/06/2022  
Orden de Trabajo (OT) : 13657-22

-M5

Parámetro	Resultado	L.C.	Unidad
Escherichia coli	< 10	10	ufc/g

#### Método

Escherichia coli (conteo en placa)

AOAC 991.14 21st Edition 2019 Coliform and Escherichia coli Counts in Foods. Dry Ready-to-Eat Film (Petrifilm E coli/Coliform Count Plate and Petrifilm Coliform Count Plate) Methods

L.C.: Límite de cuantificación

(b) Esta información es proporcionada por el cliente por lo que el laboratorio no se hace responsable de la misma.

Callao, 28 de Junio de 2022

Inspectorate Services Perú S.A.C  
A Bureau Veritas Group Company

Firmado Digitalmente por  
CINTHIA ANYELA RAMOS YNJANTE  
Fecha: 01/07/2022 09:25:09 AM  
C.B.P.: 10624  
Supervisor de Laboratorio

Los resultados presentados aplican a la muestra como se recibió.  
Los resultados se relacionan solamente con los temas sometidos a ensayo.  
El laboratorio no se hace responsable cuando la información proporcionada(b) pueda afectar la validez de los resultados.  
Este resultado de análisis no puede ser reproducido total o parcialmente sin la autorización expresa de Inspectorate Services Perú S.A.C.  
No existe responsabilidad por parte de Inspectorate Services Perú S.A.C. en relación a la información proporcionada respecto a los límites máximos permitidos.  
«bajo» significa no cuantificable después del límite de cuantificación indicado.  
Av. Elmer Faucett N° 444, distrito del Callao, Provincia Constitucional del Callao - Perú Central: (511) 613 - 8080  
www.bureauveritas.com





## Anexo 6

*Resultado de análisis físico químico de granos de maíz.*



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

## FACULTAD DE CIENCIAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO  
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

### INFORME DE ANÁLISIS

Nº0245-23-LAQ

SOLICITANTE: CESAR SISA CONDORHUAMAN  
INSTITUCION: E.P. INGENIERIA QUIMICA  
MUESTRA : MAIZ SECADO  
1.- 60°C  
2.- 50°C  
FECHA : 07/06/2024

	60°C	50°C
Proteína %	6.09	6.12
Grasa %	1.18	1.92
Ceniza %	1.32	1.47
Alcalinidad mg/100 NaHCO <sub>3</sub>	5.00	4.80

MANUAL DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS R. Lees

Cusco, 23 de Junio 2024



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco  
Unidad de Prestación de Servicios de Análisis  
*[Firma]*  
Miguel Ángel Herrera Arévalo  
RESPONSABLE DEL LABORATORIO  
DE ANÁLISIS QUÍMICO

## Anexo 7

### Resultado microbiológico de granos de maíz seco



**SAN GABRIEL**  
LABORATORIO DE BIOLOGÍA MOLECULAR

**LABORATORIO DE BIOLOGIA MOLECULAR SAN GABRIEL E.I.R.L.**  
 AV. CULTURA 1706 B-2 SOTANO, EDIFICIO GONGORA, SECTOR  
 HUAMANTIANA COSTADO GRIFO PECSA.  
 CONTACTOS: +051946717441, +051914293337  
 E-mail: labmolsangabriel@gmail.com

 Laboratorio Molecular San Gabriel

 @lab.sangabriel

---

**Código** P-03  
**Paciente** CESAR AGUSTO SISA CONDORHUAMAN  
**DNI** 76223337  
**Edad** 29 años  
**Sexo** MASCULINO

**Fecha de impresión** 29-12-2024  
**Teléfono**  
**Procedencia** TODAS  
**Fecha de nacimiento** 26-12-1994  
**Fecha de atención** 20-12-2024

**INFORME DE RESULTADO DE MICROBIOLOGIA**

TIPOS DE MUESTRA	METODO
GRANOS DE MAIZ BLANCO	CULTIVO

**RESULTADO**

NO HUBO CRECIMIENTO DE BACTERIAS AL NOVENO DIA DE INCUBACION



**BLGO. DAVID PAUCCAR HUILLCAHUAMAN**  
 CBP. 16747  
 LABORATORIO DE BIOLOGIA MOLECULAR



**BLGO. KAMILA VALERIE PUMA CALVO**  
 CBP. 16128 VERIFICADOR  
 LABORATORIO DE BIOLOGIA MOLECULAR

Blgo. DAVID PAUCCAR HUILLCAHUAMAN  
 CBP. 16747  
 Analizador  
 Blgo. KAMILA VALERIE PUMA CALVO  
 CBP. 16128  
 Verificador

*TU BIENESTAR ES NUESTRO COMPROMISO*

## APÉNDICE

### Apéndice 1

*Datos de contenido en base húmeda y tiempo.*

tiempo (h)	40°C		50 °C		60 °C	
	1.78 m/s	3.56 m/s	1.78 m/s	3.56 m/s	1.78 m/s	3.56 m/s
	peso (g)	peso (g)	peso (g)	peso (g)	peso (g)	peso (g)
0.00	36.85	37.00	40.50	42.19	36.40	40.00
0.13	36.08	36.60	39.60	40.43	34.84	37.65
0.27	35.50	36.18	38.80	39.30	33.85	36.70
0.40	34.95	35.73	38.00	38.44	32.89	35.93
0.53	34.40	35.19	37.40	37.69	31.94	35.19
0.67	33.90	34.68	36.70	37.00	31.18	34.55
0.80	33.40	34.18	36.10	36.35	30.61	33.82
0.93	32.89	33.67	35.60	35.70	30.00	33.21
1.07	32.50	33.20	35.05	35.20	29.47	32.70
1.20	32.10	32.71	34.55	34.74	29.06	32.24
1.33	31.75	32.30	34.10	34.38	28.60	31.76
1.47	31.42	31.95	33.70	33.97	28.20	31.39
1.60	31.10	31.58	33.30	33.59	27.86	31.02
1.73	30.80	31.20	32.93	33.30	27.60	30.78
1.87	30.60	30.91	32.62	33.00	27.40	30.51
2.00	30.35	30.62	32.34	32.71	27.14	30.19
2.13	30.10	30.30	32.05	32.47	27.02	30.00
2.27	29.86	30.03	31.80	32.25	26.84	29.78
2.40	29.66	29.78	31.56	32.06	26.70	29.62
2.53	29.42	29.57	31.31	31.88	26.56	29.37
2.67	29.21	29.36	31.09	31.72	26.40	29.20
2.80	28.98	29.15	30.87	31.54	26.27	29.02
2.93	28.77	28.95	30.67	31.41	26.15	28.70
3.07	28.56	28.75	30.47	31.25	26.05	28.73
3.20	28.40	28.55	30.30	31.08	25.95	28.62
3.33	28.21	28.40	30.13	30.96	25.84	28.45
3.47	28.03	28.26	29.99	30.83	25.73	28.32
3.60	27.87	28.14	29.86	30.71	25.66	28.24
3.73	27.73	27.99	29.73	30.61	25.53	28.03
3.87	27.60	27.85	29.60	30.48	25.45	27.84
4.00	27.45	27.72	29.50	30.37	25.37	27.75
4.13	27.32	27.59	29.40	30.26	25.25	27.63

4.27	27.20	27.50	29.29	30.16	25.14	27.60
4.40	27.08	27.39	29.20	30.06	25.07	27.53
4.53	27.00	27.28	29.10	29.90	25.02	27.50
4.67	26.90	27.18	29.00	29.85	24.95	27.30
4.80	26.81	27.08	28.92	29.77	24.90	27.23
4.93	26.70	27.00	28.85	29.62	24.84	27.16
5.07	26.60	26.91	28.78	29.52	24.72	
5.20	26.53	26.84	28.73	29.44	24.65	
5.33	26.45	26.78	28.65	29.30		
5.47	26.36	26.72	28.56	29.20		
5.60	26.30	26.64	28.48	29.10		
5.73	26.26	26.58	28.39	29.00		
5.87	26.20	26.50	28.34	29.03		
6.00	26.14	26.40	28.28	28.96		
6.13	26.07	26.36	28.21	28.91		
6.27	26.01	26.30	28.12	28.87		
6.40	25.94	26.21	28.06	28.80		
6.53	25.85	26.18	27.98	28.76		
6.67	25.78	26.13	27.90			
6.80	25.71	26.03	27.83			
6.93	25.65	26.00	27.81			
7.07	25.59	25.93	27.75			
7.20	25.53	25.82	27.70			
7.33	25.44	25.82	27.60			
7.47	25.39	25.74				
7.60	25.33	25.67				
7.73	25.25	25.66				
7.87	25.20	25.64				
8.00	25.12	25.56				
8.13	25.06	25.55				
8.27	25.01	25.58				
8.40	24.96	25.54				
8.53	24.89					
8.67	24.81					
8.80	24.78					
8.93	24.76					
9.07	24.70					

## Apéndice 2

*Cálculo del contenido de humedad en base seca a condiciones de (40°C y 1.78m/s)*

El experimento inicia con una humedad inicial de 38%, con un peso inicial húmedo de 36.85 g

$$X_{bs} = \frac{(0.38)(36.85 \text{ g})}{(36.85 \text{ g}) * (1 - 0.38)} = 0.613 \text{ g H}_2\text{O/g s. s} \quad \text{1er valor de } X_{bs}$$

$$X_{bs} = \frac{(0.38)(36.85 \text{ g}) - (36.85 \text{ g} - 36.08 \text{ g})}{(36.85 \text{ g}) * (1 - 0.38)} = 0.579 \text{ g H}_2\text{O/g s. s} \quad \text{2do valor de } X_{bs}$$

$$X_{bs} = \frac{(0.38)(36.85 \text{ g}) - (36.85 \text{ g} - 35.5 \text{ g})}{(36.85 \text{ g}) * (1 - 0.38)} = 0.554 \text{ g H}_2\text{O/g s. s} \quad \text{3er valor de } X_{bs}$$

### Apéndice 3

*Datos de contenido de humedad en base seca y tiempo.*

tiempo (h)	40°C		50 °C		60 °C	
	1.78 m/s	3.56 m/s	1.78 m/s	3.56 m/s	1.78 m/s	3.56 m/s
	<b>Xbs</b>	<b>Xbs</b>	<b>Xbs</b>	<b>Xbs</b>	<b>Xbs</b>	<b>Xbs</b>
0.00	0.613	0.5748	0.5873	0.5873	0.600	0.587
0.13	0.579	0.5578	0.5520	0.5211	0.531	0.494
0.27	0.554	0.5399	0.5207	0.4785	0.488	0.457
0.40	0.530	0.5207	0.4893	0.4462	0.446	0.426
0.53	0.506	0.4978	0.4658	0.4180	0.404	0.396
0.67	0.484	0.4761	0.4384	0.3920	0.371	0.371
0.80	0.462	0.4548	0.4149	0.3676	0.345	0.342
0.93	0.440	0.4331	0.3953	0.3431	0.319	0.318
1.07	0.423	0.4131	0.3737	0.3243	0.295	0.298
1.20	0.405	0.3922	0.3541	0.3070	0.277	0.279
1.33	0.390	0.3748	0.3365	0.2935	0.257	0.260
1.47	0.375	0.3599	0.3208	0.2780	0.240	0.246
1.60	0.361	0.3441	0.3051	0.2637	0.225	0.231
1.73	0.348	0.3279	0.2906	0.2528	0.213	0.221
1.87	0.339	0.3156	0.2785	0.2415	0.204	0.211
2.00	0.328	0.3033	0.2675	0.2306	0.193	0.198
2.13	0.317	0.2896	0.2561	0.2216	0.188	0.190
2.27	0.307	0.2781	0.2463	0.2133	0.180	0.182
2.40	0.298	0.2675	0.2369	0.2062	0.174	0.175
2.53	0.288	0.2586	0.2271	0.1994	0.167	0.165
2.67	0.279	0.2496	0.2185	0.1934	0.160	0.159
2.80	0.268	0.2407	0.2099	0.1866	0.155	0.152
2.93	0.259	0.2322	0.2020	0.1817	0.149	0.139
3.07	0.250	0.2237	0.1942	0.1757	0.145	0.140
3.20	0.243	0.2152	0.1875	0.1693	0.141	0.136
3.33	0.235	0.2088	0.1809	0.1648	0.136	0.129
3.47	0.227	0.2028	0.1754	0.1599	0.131	0.124
3.60	0.220	0.1977	0.1703	0.1554	0.128	0.121
3.73	0.214	0.1913	0.1652	0.1516	0.122	0.112
3.87	0.208	0.1854	0.1601	0.1467	0.119	0.105
4.00	0.201	0.1798	0.1562	0.1426	0.115	0.101
4.13	0.196	0.1743	0.1523	0.1385	0.110	0.096

4.27	0.191	0.1705	0.1480	0.1347	0.105	0.095
4.40	0.185	0.1658	0.1444	0.1309	0.102	0.092
4.53	0.182	0.1611	0.1405	0.1249	0.100	0.091
4.67	0.177	0.1568	0.1366	0.1230	0.097	0.083
4.80	0.173	0.1526	0.1335	0.1200	0.095	0.081
4.93	0.169	0.1492	0.1307	0.1144	0.092	0.078
5.07	0.164	0.1454	0.1280	0.1106	0.087	0.077
5.20	0.161	0.1424	0.1260	0.1076	0.084	
5.33	0.158	0.1398	0.1229	0.1023		
5.47	0.154	0.1373	0.1193	0.0986		
5.60	0.151	0.1339	0.1162	0.0948		
5.73	0.149	0.1313	0.1127	0.0911		
5.87	0.147	0.1279	0.1107	0.0922		
6.00	0.144	0.1236	0.1084	0.0896		
6.13	0.141	0.1219	0.1056	0.0877		
6.27	0.138	0.1194	0.1021	0.0862		
6.40	0.135	0.1156	0.0997	0.0835		
6.53	0.131	0.1143	0.0966	0.0820		
6.67	0.128	0.1122	0.0935			
6.80	0.125	0.1079	0.0907			
6.93	0.123	0.1066	0.0899			
7.07	0.120	0.1036	0.0876			
7.20	0.117	0.0990	0.0856			
7.33	0.113	0.0990	0.0817			
7.47	0.111	0.0956				
7.60	0.109	0.0926				
7.73	0.105	0.0921				
7.87	0.103	0.0913				
8.00	0.099	0.0879				
8.13	0.097	0.0875				
8.27	0.095	0.0887				
8.40	0.092	0.0870				
8.53	0.089					
8.67	0.086					
8.80	0.085					
8.93	0.084					
9.07	0.081					

## Apéndice 4

### *Cálculo de velocidad de secado*

La cinética de secado se determinó a partir de velocidad de secado (R), definida como la pérdida de humedad del sólido húmedo por unidad de tiempo y por unidad de área. Esta expresado en la Ecuación 15.

$$R = -\frac{L_s}{A_t} \frac{dX}{dt}$$

El área de secado se calculó considerando las dimensiones de la bandeja empleada en el secador de laboratorio, de 0.11 m × 0.11 m, y una sola muestra por bandeja con la Ecuación 16

$$A_t = L * A * n = 0.11 \text{ m} * 0.11\text{m} * 1 = 0.0121 \text{ m}^2$$

Dado que la muestra fue colocada sobre una rejilla perforada, el secado ocurrió por ambas caras del grano, por lo que se consideró el doble del área expuesta al aire:

$$A_t = 0.0121 \text{ m}^2 * 2 = 0.0242 \text{ m}^2$$

Para el tratamiento realizado a 40 °C con una velocidad de aire de 1.78 m/s, se utilizó una muestra húmeda de 36.85 g, con un contenido de humedad de 38 % (base húmeda). A partir de estos datos, se calculó la masa de sólido seco (Ls).

$$L_s = (0.0368 \text{ kg sólido húmedo})(0.62) = 0.0228\text{kg s.s}$$

Para hacer el cálculo de velocidad de secado usamos la masa de sólido seco (Ls=0.0228 kg) y el área total de secado (A<sub>t</sub>= 0.0242 m<sup>2</sup>), se calculó la velocidad de secado con los valores de humedad en base seca (X<sub>bs</sub>) y tiempo (t), usando la Ecuación 15



$$R = \left( \frac{0.0228}{0.0242} \right) \frac{(0.6129 - 0.579)}{(0.13 - 0)} = 0.239 kg \cdot s/m^2 \quad \text{1er intervalo de velocidad}$$

$$R = \left( \frac{0.0228}{0.0242} \right) \frac{(0.579 - 0.554)}{(0.27 - 0.13)} = 0.180 kg \cdot s/m^2 \quad \text{2do intervalo de velocidad}$$

$$R = \left( \frac{0.0228}{0.0242} \right) \frac{(0.529 - 0.554)}{(0.40 - 0.27)} = 0.174 kg \cdot s/m^2 \quad \text{3er intervalo de velocidad}$$

## Apéndice 5

*Datos para la gráfica de velocidad de secado*

40°C				50 °C				60 °C			
1.78 m/s		3.56 m/s		1.78 m/s		3.56 m/s		1.78 m/s		3.56 m/s	
Xbs	R(kg/h.m <sup>2</sup> )	Xbs	R(kg/h.m <sup>2</sup> )	Xbs	R(kg/h.m <sup>2</sup> )	Xbs	R(kg/h.m <sup>2</sup> )	Xbs	R(kg/h.m <sup>2</sup> )	Xbs	R(kg/h.m <sup>2</sup> )
0.579	0.239	0.5578	0.124	0.552	0.279	0.521	0.545	0.531	0.483	0.4939	0.729
0.554	0.180	0.5399	0.130	0.521	0.248	0.479	0.351	0.488	0.307	0.4565	0.292
0.529	0.174	0.5195	0.149	0.489	0.248	0.446	0.266	0.446	0.298	0.4258	0.240
0.506	0.164	0.4978	0.158	0.464	0.201	0.418	0.232	0.404	0.294	0.3965	0.229
0.484	0.158	0.4758	0.160	0.440	0.186	0.392	0.214	0.371	0.236	0.3709	0.200
0.462	0.152	0.4544	0.156	0.419	0.170	0.368	0.201	0.344	0.189	0.3421	0.225
0.442	0.143	0.4331	0.155	0.397	0.170	0.345	0.183	0.319	0.177	0.3179	0.189
0.424	0.127	0.4126	0.149	0.377	0.161	0.326	0.161	0.296	0.158	0.2976	0.158
0.407	0.124	0.3935	0.139	0.358	0.149	0.308	0.146	0.276	0.143	0.2794	0.143
0.391	0.112	0.3752	0.133	0.341	0.136	0.292	0.136	0.257	0.133	0.2603	0.149
0.377	0.102	0.3584	0.122	0.324	0.136	0.277	0.121	0.240	0.118	0.2452	0.118
0.363	0.096	0.3426	0.115	0.307	0.130	0.264	0.108	0.226	0.102	0.2306	0.115
0.351	0.087	0.3279	0.107	0.292	0.118	0.252	0.099	0.214	0.087	0.2183	0.096
0.339	0.084	0.3143	0.099	0.278	0.112	0.241	0.087	0.202	0.081	0.2079	0.081
0.328	0.077	0.3020	0.090	0.265	0.102	0.231	0.087	0.193	0.065	0.1980	0.077
0.317	0.077	0.2901	0.086	0.253	0.093	0.222	0.074	0.185	0.059	0.1905	0.059
0.307	0.071	0.2790	0.081	0.243	0.084	0.213	0.068	0.177	0.053	0.1825	0.062
0.297	0.068	0.2689	0.074	0.233	0.077	0.205	0.065	0.171	0.046	0.1746	0.062
0.288	0.068	0.2590	0.0719	0.224	0.071	0.199	0.056	0.164	0.043	0.1675	0.056
0.279	0.065	0.2496	0.068	0.216	0.062	0.193	0.050	0.159	0.037	0.1603	0.056
0.270	0.062	0.2407	0.065	0.209	0.059	0.187	0.050	0.154	0.034	0.1540	0.050
0.261	0.062	0.2326	0.059	0.202	0.053	0.181	0.043	0.149	0.034	0.1476	0.050

0.253	0.059	0.2249	0.056	0.195	0.053	0.176	0.043	0.145	0.031	0.1417	0.046
0.245	0.053	0.2177	0.053	0.189	0.046	0.171	0.043	0.141	0.031	0.1357	0.046
0.238	0.053	0.2109	0.050	0.184	0.046	0.166	0.040	0.136	0.029	0.1306	0.040
0.230	0.053	0.2045	0.046	0.178	0.043	0.161	0.037	0.133	0.026	0.1254	0.040
0.224	0.046	0.1986	0.043	0.173	0.043	0.157	0.037	0.129	0.026	0.1206	0.037
0.217	0.046	0.1924	0.045	0.168	0.037	0.152	0.037	0.125	0.026	0.1159	0.037
0.211	0.046	0.1866	0.042	0.164	0.034	0.148	0.034	0.122	0.025	0.1119	0.031
0.205	0.043	0.1811	0.040	0.160	0.033	0.144	0.034	0.118	0.024	0.1079	0.031
0.198	0.043	0.1760	0.037	0.155	0.033	0.140	0.034	0.115	0.024	0.1044	0.028
0.193	0.040	0.1709	0.037	0.151	0.031	0.136	0.034	0.112	0.023	0.1008	0.028
0.187	0.037	0.1658	0.037	0.148	0.031	0.132	0.029	0.108	0.023	0.0970	0.029
0.182	0.037	0.1611	0.034	0.144	0.029	0.128	0.033	0.105	0.022	0.0933	0.029
0.178	0.031	0.1564	0.034	0.140	0.029	0.124	0.034	0.102	0.022	0.0899	0.026
0.173	0.031	0.1522	0.031	0.137	0.027	0.120	0.033	0.099	0.021	0.0865	0.026
0.169	0.034	0.1480	0.030	0.134	0.026	0.117	0.029	0.096	0.021	0.0833	0.025
0.164	0.031	0.1441	0.029	0.130	0.025	0.113	0.029	0.093	0.020	0.0802	0.025
0.160	0.031	0.1402	0.028	0.127	0.024	0.110	0.028	<b>0.091</b>	0.020	0.0774	0.022
0.156	0.028	0.1367	0.026	0.124	0.023	0.107	0.025			0.0746	0.022
0.152	0.028	0.1333	0.025	0.121	0.023	0.104	0.022			0.0720	0.020
0.148	0.025	0.1299	0.025	0.119	0.022	0.101	0.026			0.0694	0.020
0.145	0.025	0.1267	0.023	0.116	0.021	0.098	0.022			0.0669	0.020
0.142	0.023	0.1237	0.022	0.113	0.021	0.096	0.022			<b>0.0644</b>	0.020
0.138	0.023	0.1207	0.022	0.111	0.019	0.093	0.022				
0.135	0.022	0.1180	0.020	0.109	0.019	0.091	0.015				
0.132	0.022	0.1155	0.019	0.106	0.018	0.090	0.012				
0.129	0.021	0.1129	0.0186	0.104	0.018	0.088	0.012				
0.126	0.021	0.1105	0.017	0.102	0.018	0.087	0.011				
0.124	0.020	0.1084	0.015	0.099	0.018	<b>0.085</b>	0.011				
0.121	0.020	0.1063	0.015	0.097	0.018						



## Apéndice 6

### *Cálculo del contenido de humedad absoluta (Y)*

Input Values...	
23.40	°C db
15.00	% RH
520	mm Hg











Output Values...	
23.40	°C db
8.36	°C wb
15.00	% RH
33.48	kJ/kg
4.15	°C dp
3.91	g/kg
1.24	m³/kg
.432000	kPa VP
3896	PPMw
6232	PPMv
3.16	g/m³

El valor obtenido fue convertido de gramos a kilogramos, resultando en una humedad absoluta del aire de salida de  $Y=0.00391$  kg H<sub>2</sub>O/kg aire seco, utilizada en los cálculos del balance de masa del secado de la Figura 33.

## Apéndice 7

### *Cálculo de constante de secado para el ajuste a modelos matemáticos (Lewis)*

Para determinar la constante de secado en base a los datos experimentales de humedad residual y tiempo, se usó el módulo de *Solver* en Microsoft Excel empleando el método de mínimos cuadrados, y la metodología detallada a continuación para los datos de la Tabla 16.

Archivo		Inicio		Insertar		Disposición de página		Fórmulas		Datos		Revisar		Vista		Ayuda			
 Obtener datos ▾		 Desde el texto/CSV		 Fuentes recientes		 Conexiones existentes		 Actualizar todo ▾		 Consultas y conexiones		 Propiedades		 Editar vínculos		 Ordenar		 Filtrar	
		De la web																	
		From Table/Range																	

Parámetros de Solver

Establecer objetivo:

Para: ☐ Máx ☒ Mín ☐ Valor de:

Cambiando las celdas de variables:

Sujeto a las restricciones:

☒ Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:

Método de resolución

Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

Ayuda Resolver Cerrar

En la columna 7 de la Tabla 16, se calculó  $X_{R,calc}$ , que representa el valor de humedad residual calculado mediante *Solver*, para ello se creó una celda para el valor de  $k_M$  y se le asignó un valor inicial (celda  $\$K\$15$ , que se fijó) en la ecuación del modelo de Lewis, se copió la fórmula al resto de valores.

En la columna 8 de la Tabla 16, se halla la diferencia del valor experimental y el calculado de la humedad residual (celda **I15**), y se elevó al cuadrado, se copió la fórmula para todos los datos y se suman los valores, esa es la celda que se debe minimizar (celda **I10**), cambiando la celda que corresponde a  $k_M$  (celda **K15**). Una vez encontrada la solución se obtuvo el valor de  $k_M=0.005$ .

## Apéndice 8

*Determinación de la humedad del aire en base seca antes de ingresar al secador*

**Determinar la presión de vapor**, mediante la ecuación de Antoine (Ecuación 6), (relación entre temperatura y presión saturada), los valores adimensionales a 23.4 °C de la ecuación de Antoine se obtuvieron del Anexo 2.

$$\text{Log } P^{\circ} = A - \frac{B}{T + C} = 8.1076 - \frac{1750.28}{23.4 + 235} = 1.326$$

$$P^{\circ} = 21.207 \text{ mmHg}$$

**Determinar la presión parcial del agua** mediante la ecuación de humedad relativa por diferencia de presiones. (Ecuación 7). El dato de la humedad relativa del aire fue (15%), obtenido mediante el sensor de humedad del secador

$$RH = \left( \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) * 100\%$$

Donde:

$\rho_w$ : presión parcial del agua (mmHg)

$\rho_s$ : presión de vapor de agua (mmHg)

$$\rho_w = \frac{RH * \rho_s}{100\%}$$

$$\rho_w = \frac{15\% * 21.207 \text{ mmHg}}{100\%}$$

$$\rho_w = 3.181 \text{ mmHg}$$



**Determinar el ingreso de humedad** del aire en base seca (Ecuación 8)

$$H_1 = \left( \frac{\rho_w}{P - \rho_w} \right) \left( \frac{\overline{PM}_{agua}}{\overline{PM}_{aire}} \right)$$

$$H1 = \left( \frac{3.181 \text{ mmHg}}{520 \text{ mmHg} - 3.181 \text{ mmHg}} \right) \left( \frac{18 \text{ kg } H_2O}{28.97 \text{ kg aire seco}} \right)$$

$$H1 = 0.0038 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg a. s}}$$

Al ingresar al software PsyCalc las condiciones iniciales de temperatura de bulbo seco (23.4 °C), humedad relativa (15 %) y presión atmosférica (520 mmHg), se obtiene como resultado una humedad del aire en base seca de 3.91 g/kg de aire seco, lo que indica la cantidad de vapor de agua presente por cada kilogramo de aire seco en esas condiciones ambientales. Apéndice 3

## Apéndice 9

### *Obtención de humedad del aire en base seca*

Input Values...

23.40	°C db
15.00	% RH
520	mm Hg

Output Values...

23.40	°C db
8.36	°C wb
15.00	% RH
33.48	kJ/kg
4.15	°C dp
3.91	g/kg
1.24	m³/kg
.432000	kPa VP
3896	PPMw
6232	PPMv
3.16	g/m³

## Apéndice 10

### Obtención de entalpías del aire (ingreso y salida)

Entalpia de aire (entrada a secador)	Entalpia de aire (salida de secador)
<div> Edit Tools Help </div> <div> Input Values... </div> <div> 60.00 °C db </div> <div> 3.89 g/kg </div> <div> 520 mm Hg </div> <div> Output Values... </div> <div> 60.00 °C db </div> <div> 19.21 °C wb </div> <div> 2.15 % RH </div> <div> 70.64 kJ/kg </div> <div> -4.21 °C dp </div> <div> 3.89 g/kg </div> <div> 1.39 m³/kg </div> <div> .429676 kPa VP </div> <div> 3875 PPMw </div> <div> 6198 PPMv </div> <div> 2.80 g/m³ </div>	<div> Edit Tools Help </div> <div> Input Values... </div> <div> 52.00 °C db </div> <div> 3.85 g/kg </div> <div> 520 mm Hg </div> <div> Output Values... </div> <div> 52.00 °C db </div> <div> 17.19 °C wb </div> <div> 3.12 % RH </div> <div> 62.38 kJ/kg </div> <div> -4.33 °C dp </div> <div> 3.85 g/kg </div> <div> 1.35 m³/kg </div> <div> .425285 kPa VP </div> <div> 3835 PPMw </div> <div> 6135 PPMv </div> <div> 2.84 g/m³ </div>

La diferencia de entalpía entre el aire de ingreso y el de salida del secador es de 8.26 kJ/kg a.s. Al multiplicar este valor por la cantidad de aire seco utilizado en el proceso (505.67 kg a.s.), se obtiene una pérdida de energía total de 4,176.89 kJ, lo que representa la energía térmica no aprovechada por el equipo durante el proceso de secado.

## Apéndice 11

*Datos experimentales y datos reemplazados en la formula general*

	40°C a velocidad 3.56 m/s		50°C a velocidad 3.56 m/s		60°C a velocidad 3.56 m/s	
tiempo h	XR, exp	XR FORMULA GENERAL	XR, exp	XR FORMULA GENERAL	XR, exp	XR FORMULA GENERAL
0.0	1.000	0.989	1.000	0.989	1.000	0.989
0.4	0.889	0.845	0.720	0.783	0.685	0.705
0.8	0.754	0.724	0.564	0.623	0.523	0.506
1.2	0.626	0.621	0.444	0.496	0.402	0.364
1.6	0.528	0.533	0.358	0.396	0.312	0.263
2.0	0.444	0.457	0.292	0.316	0.244	0.190
2.4	0.371	0.393	0.243	0.252	0.196	0.137
2.8	0.316	0.338	0.205	0.202	0.155	0.099
3.2	0.264	0.291	0.170	0.161	0.121	0.072
3.6	0.228	0.250	0.143	0.129	0.090	0.052
4.0	0.192	0.215	0.117	0.103	0.063	0.038
4.4	0.163	0.185	0.094	0.083	0.043	0.027
4.8	0.136	0.159	0.072	0.066	0.026	0.020
5.2	0.115	0.137	0.048	0.053	0.015	0.014
5.6	0.098	0.118	0.022	0.042	0.000	0.010
6.0	0.077	0.102	0.012	0.034		
6.4	0.060	0.088	0.000	0.027		
6.8	0.044	0.075				
7.2	0.026	0.065				
7.6	0.013	0.056				
8.0	0.003	0.048				
8.4	0.002	0.042				
8.8	0.000	0.036				