

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL



“EFECTO DEL ESCALDADO Y TEMPERATURA EN LA CINÉTICO DE SECADO DE
LAS HOJAS DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd), VARIEDAD SALCEDO INIA

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. RICHARD PAQUITA NINARAQUI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PUNO - PERÚ

2015

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

“EFECTO DEL ESCALDADO Y TEMPERATURA EN LA CINÉTICA DE SECADO DE LAS
HOJAS DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd), VARIEDAD SALCEDO INIA”

TESIS

PRESENTADA POR:
Bach. RICHARD PAQUITA NINARAQUI
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

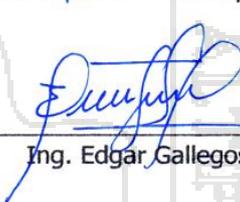
PRESIDENTE

:


Ing. M. Sc. Florentino V. Choquehuanca Cáceres

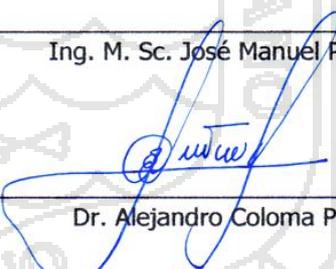
PRIMER MIEMBRO

:


Ing. Edgar Gallegos Rojas

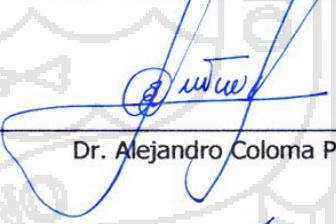
SEGUNDO MIEMBRO

:


Ing. M. Sc. José Manuel Prieto

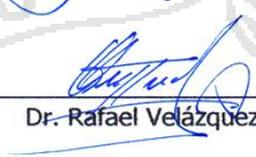
DIRECTOR DE TESIS

:


Dr. Alejandro Coloma Paxi

ASESOR DE TESIS

:


Dr. Rafael Velázquez Huallpa

PUNO - PERÚ

2015

ÁREA: Ingeniería y tecnología

TEMA: Propiedades físicas y estructurales

*“NOT EVERYTHING THAT CAN BE COUNTED COUNTS, AND
NOT EVERYTHING THAT COUNTS CAN BE COUNTED.”*

—ALBERT EINSTEIN



*Esta tesis es dedicada a la memoria de mi padre
Vicente quien pasó al mas allá en 2004, con amor
y admiración a mi madre Felipa y con mucha
gratitud a la familia Eduardo Palomino.*

AGRADECIMIENTOS

A nuestra Alma Mater la Universidad Nacional del Altiplano, en particular a los catedráticos de la Facultad de Ciencias Agrarias, por haberme impartido sus valiosas enseñanzas y compartido experiencias durante mi formación profesional.

Mi sincero agradecimiento al director de la presente tesis Dr. Alejandro Coloma Paxi, por sus consejos, aliento, sugerencias y directriz durante todo el desarrollo del proyecto.

Al Dr. Rafael Velázquez Huallpa por su asesoría y orientación para el desarrollo del trabajo de investigación.

Al Ing. M.Sc. Florentino V. Choquehuanca Cáceres por el apoyo brindado en la culminación del presente trabajo de investigación. Al Ing. M. Sc. Edgar Gallegos Rojas e Ing. M. Sc. José M. Prieto por sus consejos, correcciones y apoyo en la culminación del presente trabajo.

A mis compañeros de estudios que compartieron las aulas Universitarias durante nuestra formación profesional, a aquellos que siempre alentaron y aquellos que con su crítica y/o silencio inspiraron a ser una mejor persona.

Al personal administrativo de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial por su apoyo durante la ejecución del proyecto. Y a todas las personas que intervinieron directa o indirectamente en el desarrollo del trabajo de investigación mi aprecio y mi gratitud.

Mi gratitud y agradecimiento a mi madre Felipa por su cariño, comprensión, y el apoyo incondicional para concretar mis metas. Así mismo agradecer a mis hermanos, hermanas y familiares por su aliento durante este periodo de vida.

Finalmente un especial agradecimiento al Centro Cultural Peruano-Norteamericano y su plana docente, que mediante la enseñanza del idioma INGLÉS contribuye a formar ciudadanía con cultura globalizada. Particularmente permitiendo que la presente investigación sea basada en publicaciones recientes.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ANEXOS

SIMBOLOGIA

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. ORIGEN DEL CULTIVO DE LA QUINUA	3
2.2. QUINUA.....	3
2.2.1. Descripción Botánica	4
2.2.2. Variedad Salcedo INIA	5
2.2.3. Manejo de cultivo de la quinua	5
2.2.4. Cosecha	5
2.2.5. Post cosecha, transformación y Agroindustria.....	5
2.2.5.1. Secado de Granos	5
2.2.5.2. Limpieza y clasificación de granos.....	6
2.2.5.3. Almacenamiento	6
2.2.5.4. Eliminación de saponinas	6
2.3. USOS DE LA QUINUA	6
2.3.1. Tallo	6
2.3.2. Grano	6
2.3.3. La Hoja.....	7
2.3.3.1. Valor nutritivo de la hoja	8

2.4. PRODUCCIÓN DE QUINUA Y TENDENCIAS DEL CONSUMIDOR	9
2.5. INOCUIDAD DE LAS VERDURAS	10
2.5.1. Los tratamientos de lavado	10
2.5.1.1. Cloro	10
2.6. PRE-TRATAMIENTO DE VERDURAS PARA MEJORAR LA CALIDAD Y SEGURIDAD	10
2.6.1. Tipos de proceso de escaldado	12
2.6.1.1. Escaldado en agua	12
2.6.1.2. El escaldado a vapor	12
2.7. SECADO DE VERDURAS	12
2.7.1. Requerimiento de temperatura	14
2.7.2. Humedad y ventilación	14
2.7.3. Efecto del secado en el valor nutritivo de las verduras	14
2.7.4. Secado exitoso	15
2.7.5. Métodos de secado	16
2.7.5.1. Deshidratadores	16
2.7.5.2. Secado en horno	16
2.7.5.3. Secado al sol	17
2.7.5.4. Secado en sombra	17
2.7.6. Características de secado	18
2.7.6.1. Parámetros del producto	18
a. Humedad inicial	18
b. Medida de humedad en base seca y base húmeda	18
c. Contenido de Humedad de equilibrio	18
d. Humedad libre	19
e. Humedad crítica	19
f. Temperatura de bulbo seco	19
g. Temperatura de bulbo húmedo	19

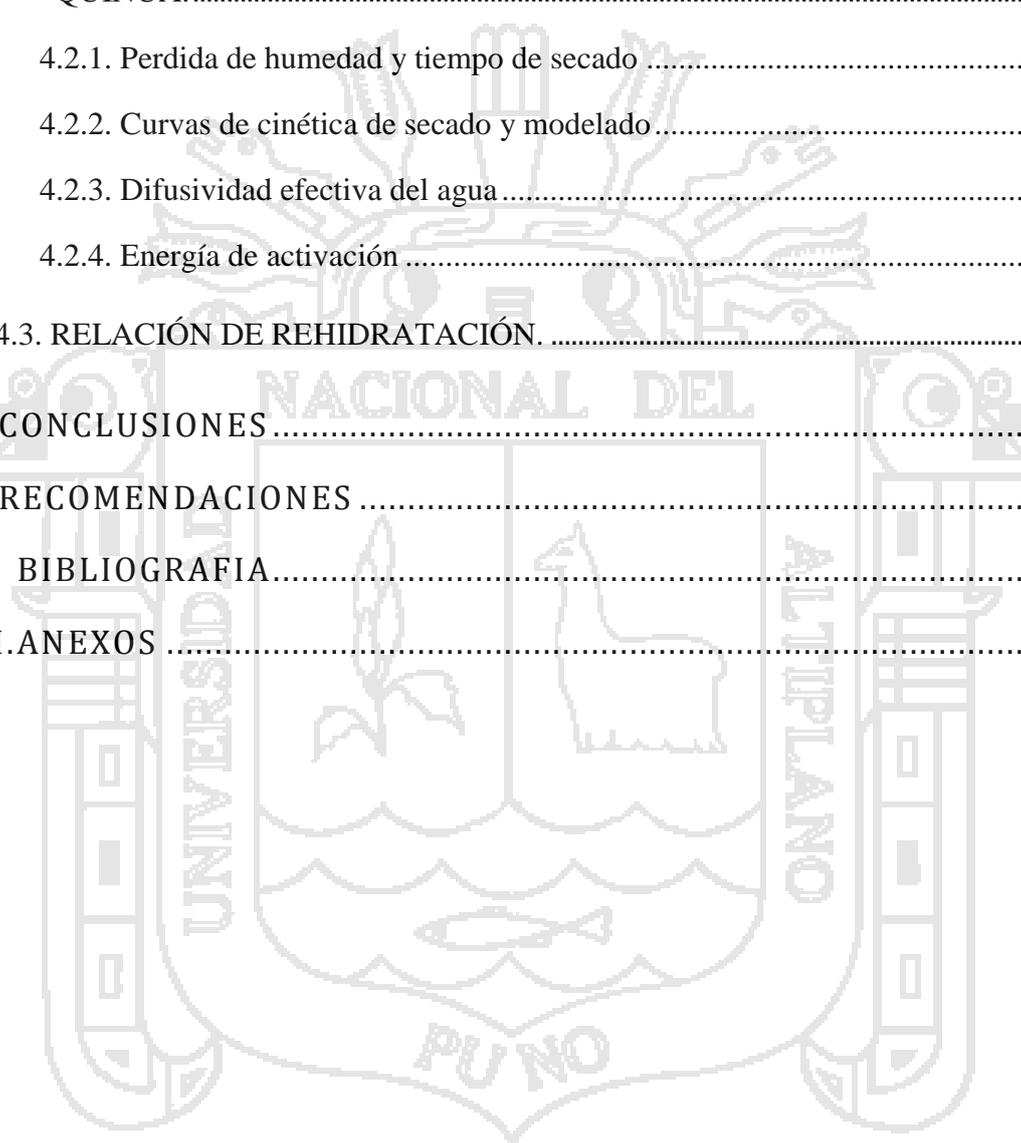
h. Temperatura máxima	19
2.8. CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO	20
2.8.1. Introducción	20
2.8.2. Determinación experimental de la velocidad de secado	20
2.8.3. Curvas de velocidad de secado para condiciones de secado constante.....	20
2.8.4. Gráfica de la curva de velocidad de secado	21
2.8.5. Etapas de la velocidad de secado	23
2.8.6. Factores que afectan la velocidad de secado	24
2.8.6.1. Superficie del producto	24
2.8.6.2. Temperatura	24
2.8.6.3. Velocidad de aire	24
2.8.6.4. Humedad del aire	24
2.9. DIFUSIÓN	25
2.9.1. Ley de Fick.....	25
2.9.2. Coeficiente de difusión.....	26
2.10. MODELOS MATEMATICOS PARA EL AJUSTE DE LOS DATOS	28
2.11. ÍNDICE DE REHIDRATACIÓN	28
III. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN.....	31
3.2. MATERIA PRIMA E INSUMOS	31
3.2.1. Materia prima	31
3.2.2. Insumos	31
3.3. EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS	31
3.3.1. Equipos para secado	32
3.3.2. Materiales y equipos de laboratorio	32
3.3.2.1. Químico Proximal.....	32
3.3.2.2. Materiales	32



3.3.2.3. Materiales en secado	33
3.3.3. Reactivos para análisis químico proximal.....	33
3.3.4. Otros	33
3.4. METODOLOGIA DEL PROCESO EXPERIMENTAL.....	34
3.4.1. Proceso del análisis químico proximal.....	34
3.4.1.1. Hojas de Quinua	34
3.4.1.2. Pesado/Selección	34
3.4.1.3. Desinfectado	35
3.4.1.4. Escaldado	35
3.4.1.5. Enfriado	35
3.4.1.6. Secado	35
3.4.2. Proceso para obtener las curvas de cinética de secado de las hojas de quinua	36
3.4.2.1. Hojas de Quinua	36
3.4.2.2. Clasificado	37
3.4.2.3. Desinfectado	37
3.4.2.4. Pesado	37
3.4.2.5. Escaldado	37
3.4.2.6. Secado	37
3.4.2.7. Envasado	38
3.4.2.8. Almacenado	38
3.4.3. Proceso para determinar la relación de rehidratación	38
3.4.3.1. Muestra Deshidratada	38
3.4.3.2. Pesado	38
3.4.3.3. Rehidratado	39
3.4.3.4. Pesado	39

3.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS	39
3.5.1. Determinación del efecto de escaldado en la composición químico proximal	39
3.5.1.1. Determinación de Humedad (AOAC, 1990)	39
3.5.1.2. Determinación de proteína total (AOAC, 1990).....	39
3.5.1.3. Determinación de grasa (AOAC, 1990)	40
3.5.1.4. Determinación de Cenizas (AOAC, 1990)	40
3.5.1.5. Determinación de fibra cruda (AOAC, 1990)	41
3.5.1.6. Determinación de carbohidratos totales.....	41
3.5.2. Obtención y determinación del efecto del escaldado y temperatura en la cinética de secado de las hojas de quinua	41
a. Pérdida de humedad y tiempo de secado	41
b. Determinación de curvas de la cinética de secado y modelado	42
c. Cálculo de la difusividad efectiva del agua.....	44
d. Cálculo de energía de activación.....	46
3.5.3. Determinación de relación de rehidratación.....	46
3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL	47
3.6.1. Determinación del efecto del escaldado en la composición químico proximal de las hojas de quinua	47
3.6.2. Obtención y determinación las curvas de cinética de secado de las hojas de quinua y rehidratación	48
3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	50
3.8. BALANCE DE MATERIA.....	51
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
4.1. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE ESCALDADO EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICO PROXIMAL.....	52
4.1.1. Proteína.....	53
4.1.2. Grasa.....	55

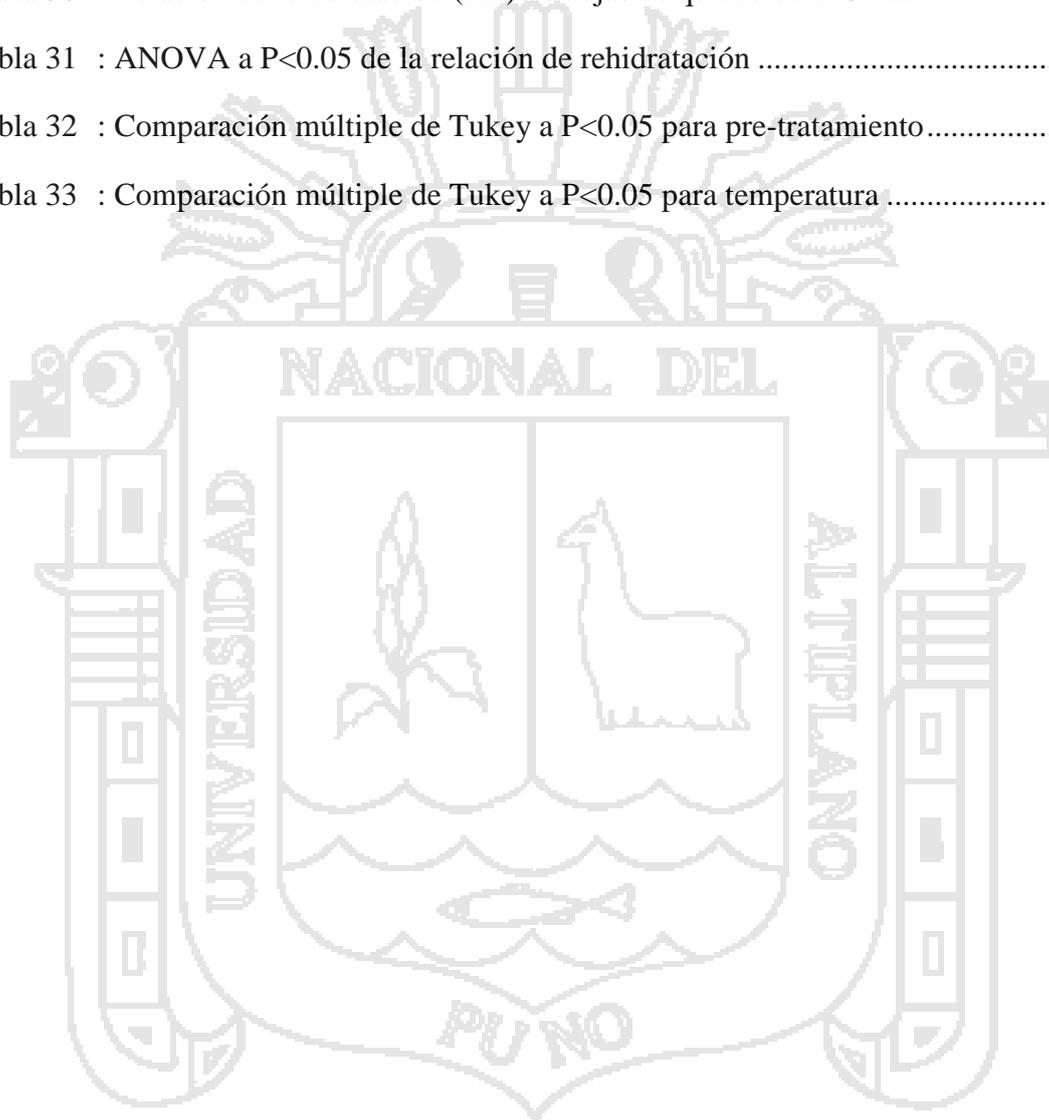
4.1.3. Ceniza.....	55
4.1.4. Fibra	57
4.1.5. Carbohidratos	59
4.2. OBTENCIÓN Y DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL ESCALDADO Y TEMPERATURA EN LA CINÉTICA DE SECADO DE LAS HOJAS DE QUINUA.....	61
4.2.1. Pérdida de humedad y tiempo de secado	61
4.2.2. Curvas de cinética de secado y modelado.....	66
4.2.3. Difusividad efectiva del agua.....	79
4.2.4. Energía de activación	84
4.3. RELACIÓN DE REHIDRATACIÓN.....	85
V. CONCLUSIONES.....	90
VI. RECOMENDACIONES	91
VII. BIBLIOGRAFIA.....	92
VIII. ANEXOS	98



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	: Utilización actual del grano de la quinua.....	7
Tabla 2	: Contenido químico proximal de las hojas de quinua fresca (% base seca)	9
Tabla 3	: Pasos para secar algunas verduras	15
Tabla 4	: Variación de la difusividad efectiva con la temperatura.....	27
Tabla 5	: Modelos matemáticos en estudio.....	28
Tabla 6	: Relación aproximada para el secado, encogimiento y rehidratación de vegetales selectos	30
Tabla 7	: Modelos empíricos utilizados para el ajuste de los datos experimentales	43
Tabla 8	: Tratamientos del proceso de investigación.....	47
Tabla 9	: Tratamientos del proceso de secado de las hojas de quinua	49
Tabla 10	: Composición químico proximal de las hojas de quinua (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.) variedad Salcedo INIA, expresada como (gr/100gr SS).....	52
Tabla 11	: Tabla ANOVA a $P < 0.05$ para proteína.....	54
Tabla 12	: Prueba de Tukey a $P < 0.01$ para proteína	54
Tabla 13	: Tabla ANOVA a $P < 0.05$ para grasa	55
Tabla 14	: Tabla ANOVA a $P < 0.05$ para ceniza.....	56
Tabla 15	: Prueba de Tukey a $P < 0.01$ para cenizas	57
Tabla 16	: Tabla ANOVA a $P < 0.05$ para fibra	57
Tabla 17	: Prueba de Tukey a $P < 0.01$ para fibra.....	58
Tabla 18	: Tabla ANOVA a $P < 0.05$ para carbohidratos	59
Tabla 19	: Prueba de Tukey a $P < 0.01$ para carbohidratos	60
Tabla 20	: Humedad inicial promedio de las hojas de quinua	61
Tabla 21	: Tiempo de secado de los diferentes tratamientos en minutos.....	64
Tabla 22	: ANOVA del tiempo de secado a $P < 0.05$	65
Tabla 23	: Comparación múltiple de Tukey a $P < 0.05$ para pre-tratamiento.....	65
Tabla 24	: Comparación múltiple de Tukey a $P < 0.05$ para temperatura	66

Tabla 25 : Valores del coeficiente de difusividad efectiva del agua D_{eff} (m ² /s).....	79
Tabla 26 : ANOVA a P<0.05 de la Difusividad efectiva del agua	80
Tabla 27 : Comparación múltiple de Tukey a P<0.05 para pre-tratamiento.....	80
Tabla 28 : Comparación múltiple de Tukey a P<0.05 para temperatura	81
Tabla 29 : Energía de activación obtenida para cada tratamiento de secado E_a (kJ/mol) 84	
Tabla 30 : Relación de rehidratación (RR) de hojas de quinua en 240 min.....	86
Tabla 31 : ANOVA a P<0.05 de la relación de rehidratación	87
Tabla 32 : Comparación múltiple de Tukey a P<0.05 para pre-tratamiento.....	87
Tabla 33 : Comparación múltiple de Tukey a P<0.05 para temperatura	88



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Potencial uso de la planta de la quinua	8
Figura 2 : Movimiento de humedad durante el secado.....	13
Figura 3 : Curva de los datos de humedad libre en función del tiempo	23
Figura 4 : Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad.....	23
Figura 5 : Flujograma de preparación de muestras para análisis químico proximal.	35
Figura 6 : Flujograma para obtener las curvas de cinética de secado	36
Figura 7 : Proceso para la rehidratación de las hojas de quinua.....	38
Figura 8 : Diagrama del secador de lecho fijo y adquisición de datos	42
Figura 9 : Balance de materia del proceso de secado de hojas de quinua	51
Figura 10 : Composición químico proximal de las hojas de quinua sometidas a diferentes pre-tratamientos.	53
Figura 11 : Variación de la humedad libre (X) en función del tiempo (t) para los diferentes tratamientos.....	67
Figura 12 : DR v/s tiempo de secado	68
Figura 13 : DR v/s contenido de humedad libre X.....	69
Figura 14 : Periodos de velocidades de secado para muestras sin pre-tratar (M0)	70
Figura 15 : Periodos de velocidades de secado para muestras escaldadas en agua (M1) .	71
Figura 16 : Periodos de velocidades de secado para muestras escaldadas en solución de NaCl al 3% (M2).....	72
Figura 17 : Curvas de relación de humedad MR en función del tiempo.....	74
Figura 18 : Variaciones de la relación de humedad (MR) de los datos experimentales y los ajustados por los modelos de Page y Midilli.	75
Figura 19 : Comparación de los valores de relación de humedades experimentales y ajustadas con los modelos de Page y Midilli.	76
Figura 20 : Ln(MR) v/s Tiempo y regresiones lineales por tratamiento.	79
Figura 21 : Variación de Ln(D_{eff}) para diferentes inversas de temperatura.....	84
Figura 22 : Relación de rehidratación de las muestras deshidratadas	86



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 : Resultados de medida de espesor y área de las hojas de quinua.....	99
a. Calculo de área para el secado de las hojas de quinua.....	99
b. Calculo del espesor de las hojas de quinua.....	100
Anexo 2 : Resultados de velocidad de secado de hojas de quinua	101
a. Escaldado en agua secado a 50°C (50M1)	101
b. Sin pre-tratar secado a 50°C (50M0)	102
c. Escaldado en solución de NaCl al 3% secado a 50°C (50M2)	103
d. Escaldado en agua secado a 60°C (60M1)	104
e. Sin pre-tratar secado a 60°C (60M0)	105
f. Escaldado en solución de NaCl al 3% secado a 60°C (60M2)	106
g. Escaldado en agua secado a 70°C (70M1)	107
h. Sin pre-tratar secado a 70°C (70M0)	108
i. Escaldado en solución de NaCl al 3% secado a 70°C (70M2)	109
Anexo 3 : Resultados de constantes y estadísticos de los modelos matemáticos estudiados	110
a. Constantes de los modelos estudiados	110
b. Estadísticos de los modelos matemáticos estudiados	111
Anexo 4 : Resultados del análisis ANOVA para parámetros R^2 , χ^2 , RMSE.....	113
Anexo 5 : Regresiones lineales en el cálculo de difusividad efectiva del agua.....	116
Anexo 6 : Cálculo de la energía de activación	116
a. Valores de las constantes del modelo de GAB para ciertas hortalizas	118
Anexo 7 : Imágenes de hojas de quinua	119
Anexo 8 : Certificado de análisis químico proximal	120

SIMBOLOGIA

Símbolo	Parámetro	Unidad
a, b, c	Parámetros cinéticos de modelos	
k, n	Constantes de secado	min ⁻¹
X	Contenido de humedad libre	kg agua/kg SS
DR	Velocidad de secado (drying rate)	kg agua/m ² .h
MR	Relación de humedad (moisture ratio)	
k	Pendiente	
L	Semiespesor de hojas de quinua	metros (m)
A	Area de secado	m ²
t	Tiempo de secado	minutos
M _t	Contenido de humedad en tiempo t	kg agua/kg SS
M _o	Contenido de humedad inicial	kg agua/kg SS
M _e	Contenido de humedad de equilibrio	kg agua/kg SS
SS, L _s	Sólido seco	Kg
N	Número de observaciones	
z	Numero de constantes del modelo	
MR _{exp}	Relación de humedad experimental	
MR _{pre}	Relación de humedad ajustado	
R ²	Coefficiente de correlación	
χ ²	Chi cuadrado	
MRSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio	
D _{eff}	Difusividad efectiva	m ² /s
D _o	factor pre-exponencial de Arrhenius	m ² /s
A	Área de secado de las muestras	m ²
E _a	Energía de activación	KJ/mol
R	Constante universal de gases	8.31451 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
RR	Relación de rehidratación	
W _d	Peso de la muestra seca	gr
W _r	Peso de la muestra rehidratada	gr
W	Peso muestra Inicial	gr
T _{abs}	Temperatura absoluta (°C+273.15)	K
P	Probabilidad	

RESUMEN

Efectos de pre-tratamiento (sin escaldar, escaldado en agua y escaldado en solución de NaCl 3%) y temperaturas del aire de secado (50, 60 y 70°C) en la composición químico proximal, la cinética de secado y relación de rehidratación de las hojas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) variedad Salcedo INIA fue investigado en un secador de lecho fijo con control adaptivo, se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial; el análisis de varianza (ANOVA) de doble vía y comparación múltiple de Tukey fueron utilizados para determinar las diferencias significativas de los datos ($P < 0.05$) para determinar el efecto del pre-tratamiento y temperatura en la composición químico proximal, el tiempo de secado, difusividad efectiva y relación de rehidratación. Los análisis químicos proximales fueron realizados de acuerdo al método estándar AOAC, las curvas de secado se construyeron mediante el registro continuo del peso en el tiempo hasta alcanzar la humedad libre de 0.1 kilogramos de agua por kilogramo de solido seco, y la rehidratación por inmersión. Para determinar el modelo que caracteriza el secado de las hojas de quinua los datos experimentales fueron ajustados a cinco modelos matemáticos para placa que son; Henderson y Pabis, Midilli, Logarítmico, Page y Lewis; evaluando su validez de acuerdo al coeficiente de determinación R^2 , reducido chi-cuadrado χ^2 y raíz cuadrada del error cuadrático medio RMSE. Los resultados mostraron que los tiempos de secado presentaron diferencia significativa ($P < 0.05$) con la temperatura, escaldado y la interacción, variando entre 388 a 135 minutos. Las curvas de velocidad de secado para las temperaturas de estudio fue de velocidad decreciente para muestras control, pero la velocidad constante fue observado en muestras pre-tratadas. El secado de hojas de quinua fue caracterizada por los modelos de Page y Midilli por presentar mejores ajustes con coeficientes de determinación R^2 altos de 0.9995 y 0.9985 con valores de RMSE y χ^2 bajos de 0.0053 - 0.016 y 4.01×10^{-5} - 1.23×10^{-4} respectivamente. La difusividad efectiva del agua varió de 3.871×10^{-12} a $1.175 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$. La energía de activación varió de 32.66 a 56.044 kJ/mol. Al evaluar la relación de rehidratación, las muestras escaldados en agua secados a 50°C presentaron el mejor índice. En cuanto a los contenidos químico proximales, la muestras escaldados en agua presentaron diferencias significativas $P < 0.05$ respecto a los demás pre-tratamientos pero los escaldados en solución de NaCl no presentaron diferencia significativa en el contenido de grasa, ceniza, fibra, y proteína con respecto a muestras sin escaldar. Concluyendo que en el secado de las hojas de quinua variedad Salcedo INIA el escaldado y temperatura del aire de secado influyen reduciendo significativamente los tiempos de secado, el proceso de secado es descrita por los modelos de Page y Midilli para las condiciones estudiadas, la mejor velocidad de secado se alcanza en muestras escaldadas a temperaturas de 70°C, por ende con mayor coeficiente de difusividad efectiva y disminución de la energía de activación, sin embargo el mejor coeficiente de rehidratación se obtiene cuando se escalda en agua. Por otro lado, el escaldado en NaCl retiene mejor los macronutrientes.

Palabras Clave: Hojas de quinua, pre-tratamiento, cinética de secado, difusividad efectiva del agua, energía de activación, modelado.

I. INTRODUCCIÓN

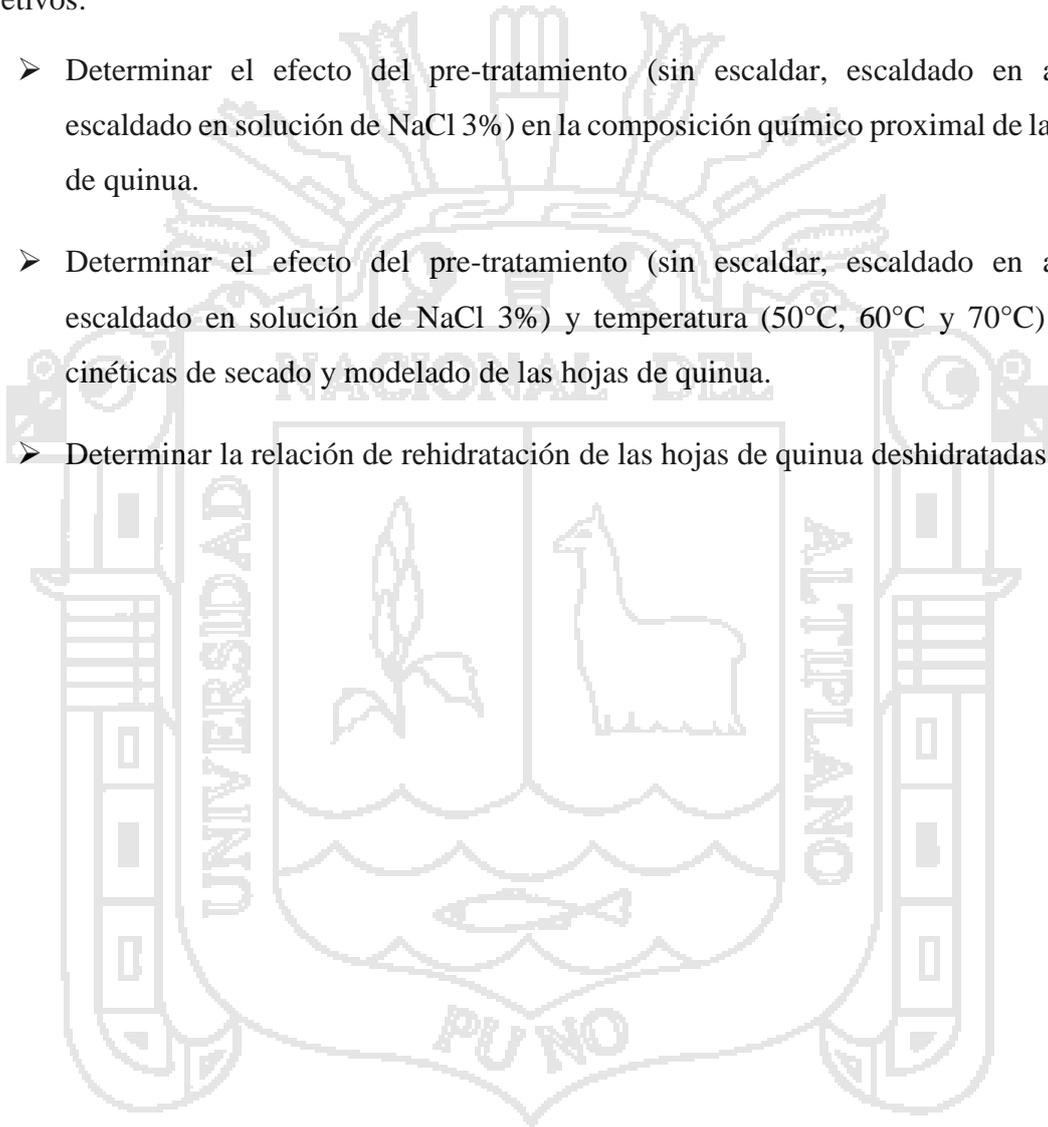
La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) ha sido por miles de años el principal alimento de las antiguas culturas andinas. Una especie hasta hace poco olvidado y subutilizada que es estratégica por su potencial en el fortalecimiento de las fuentes nutricionales. Debido a la estandarización de los sistemas de producción y patrones de consumo en el mundo globalizado que es carente de biodiversidad y conducente a la erosión de culturas tradicionales en alimentación. La quinua en nuestra región es aprovechada solo en la cosecha del grano dejando de lado la inflorescencia y las hojas, que son de alto valor biológico, durante el desarrollo fisiológico debido básicamente a la carencia de estrategia para el desarrollo que integre los diversos agentes de la cadena productiva, por la falta de información sobre las características nutricionales y por la falta de parámetros en los procesos de conservación como el secado para los productos con alto contenido de humedad por ende muy susceptibles al deterioro; lo mencionado se traduce en el reducido uso en la alimentación de los vegetales provenientes de cultivos locales tal es el caso de las hojas de quinua en nuestra entorno local.

El secado, que consiste en la reducción del contenido de humedad de los productos alimenticios permite obtener productos sólidos con un bajo contenido de agua, reducido peso para envasar, almacenar, distribuir y utilizar. En la mayoría de los procesos de secado el agua es eliminada por evaporación convectivo en la cual el calor es suministrado por aire caliente. Sin embargo durante el proceso se da lugar muchos cambios físicos, químicos y bioquímicos en el material procesado; el desarrollo de estos cambios depende además de pre-tratamientos aplicados. Los pre-tratamientos normalmente preceden al secado de frutas y vegetales para minimizar la ocurrencia de cambios adversos durante el secado y almacenaje posterior. Por otro lado, para mejorar el control en los procesos de secado es bastante importante disponer de modelos exactos para simular las curvas de secado bajo diferentes condiciones de proceso. Al no existir en el momento un modelo para las cinéticas de secado completamente satisfactorio para los alimentos en general es crucial la experimentación para las hojas de quinua. Pues conocer los factores que afectan la cinética de secado es esencial para el óptimo diseño y operación de los sistemas de secado que puedan permitir conservar las características del producto original y posean buenas características de rehidratación o reconstitución.

Las consideraciones mencionadas anteriormente nos motivó la necesidad de realizar el estudio de secado de las hojas de quinua considerando factores de escaldado (pre-tratamiento) y temperatura de secado sobre los efectos que estos tienen en: La composición química proximal, las cinéticas de secado, modelado y en la relación de rehidratación de las mismas.

Visto las necesidades y oportunidades mencionadas este trabajo tuvo los siguientes objetivos:

- Determinar el efecto del pre-tratamiento (sin escaldar, escaldado en agua y escaldado en solución de NaCl 3%) en la composición química proximal de las hojas de quinua.
- Determinar el efecto del pre-tratamiento (sin escaldar, escaldado en agua y escaldado en solución de NaCl 3%) y temperatura (50°C, 60°C y 70°C) en las cinéticas de secado y modelado de las hojas de quinua.
- Determinar la relación de rehidratación de las hojas de quinua deshidratadas.



II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. ORIGEN DEL CULTIVO DE LA QUINUA

No existe evidencia histórica de cuando y como fue domesticada la quinua (Nuñez, 1970). Aunque, algunos indicios de las semillas de quinua hallados en el norte de Chile sugieren que el uso de esta semilla puede remontarse a 3000 A.C.; sin embargo Uhle (1919) encontró evidencia histórica en Ayacucho Perú la cual dejó en duda la antigüedad de la quinua afirmando que la domesticación de la quinua se remonta a 5000 años A.C.

Rojas (2011) indica que la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) fue descrito botánicamente por primera vez por Willdenow en 1778 como una especie de Sudamérica, cuyo centro de origen, está en los andes de Perú y Bolivia. Esto fue corroborado por Gandarillas (1979b) quien menciona que su gama es bastante amplia, no solo por su importancia social y económica, porque es donde también la gran diversidad de ecotipos son encontrados, técnicamente tanto los cultivados y los silvestres.

La quinua fue importante en la dieta de las culturas pre-hispánicas de los andes peruanos. Los Incas apreciaron su alto valor nutricional, la fácil molienda de los granos hizo posible que la población rural tomara la ventaja de su valor nutricional. La capacidad de estos cultivos para resistir muy bajas temperaturas y el granizo los convierte irremplazable en los andes. A pesar de ello fue reducido su consumo después de 1940 cuando los países de Sudamérica comenzaron con la masiva importación del trigo. El consumo de quinua ha sustituido la carencia de proteína animal, y en muchas áreas la quinua es todavía la principal fuente de proteína (Tapia, 1997).

2.2. QUINUA

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willdenow) de la familia de Quenopodiáceas es un domesticado pseudo-cereal, sus granos son considerados a ser uno de los más completos nutricionalmente para la humanidad (López *et al.*, 2011). Presuntamente, se cultiva por todo Sudamérica de Colombia a Argentina y Chile, con una gran diversidad que fue encontrada en las áreas entre Sicuani (Perú) y Potosí (Bolivia), donde se ha adaptado a una variedad climática, suelo y principalmente la presencia cultural de diferentes genotipos y ecotipos (Maughan & Jellen, 2004; Mujica & Jacobsen, 2006).

Las semillas de la quinua han sido tradicionalmente consumidas como alimento por la población nativa de la región andina. Estas son ricas en proteínas y amino ácidos esenciales libres, almidón, minerales y grasas, pero además contiene pequeñas cantidades de muchas vitaminas y antioxidantes (Dogan & Karweand, 2003; López *et al.*, 2011; Reyes & Aytekin, 2014). Las poblaciones indígenas de los Andes tradicionalmente usaron las hojas de quinua, tallos y los granos para propósitos médicos. Atribuyendo a la quinua con propiedades para sanar heridas, reducir inflamaciones, aliviar dolores de muela y limpieza del tracto urinario (Reyes & Aytekin, 2014). Por otro lado, existe muy poca información concerniente al potencial nutracéutico de las partes verdes del cultivo de la quinua. Particularmente las hojas de pseudo-cereales, hasta ahora tratadas como desecho sin valor, son comestibles y pueden ser consumidas en ensaladas y además utilizar como un valioso suplemento para alimentos funcionales. Las hojas de quinua contienen abundante cantidad de ceniza (3.3%), fibra (1.9%), nitratos (0.4%), vitamina E (2.9mg α -TE/100g), vitamina C (1.2-2.3g/kg), sodio (289mg/100g) y 27-30g/kg de proteínas (Gawlik-Dziki *et al.*, 2013).

2.2.1. Descripción Botánica

La quinua es una planta herbácea de 80 cm a 3 m de alto, que se cultiva en altitudes entre 0 a 4000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), pero la mejor producción se produce entre 2500 a 3800 m.s.n.m. en lugares con 250-500 mm de precipitación anual y con temperaturas medias de 5 a 14°C (López *et al.*, 2011). Con tallo erecto, generalmente poco ramificado, cilíndrico a la altura del cuello, poliédrica, glabro, y según su tipo de ramificaciones pueden presentarse con un tallo y varias ramas laterales cortas características de la zona de altiplano o de ramas de igual tamaño, característico en los ecotipos que se cultivan en los valles interandinos (Tapia, 1997).

Las hojas son alternas, simples; los bordes dentados, pudiendo ser pronunciados o leves, según las variedades; lamina polimorfa, hojas inferiores romboidales, o triangulares, hojas superiores lanceadas o triangulares, planas u onduladas, algo carnosas, hojas jóvenes cubiertas de papilas esferoidales o globosas de 1.4mm de diámetro, blancas purpuras o rojas. A veces, las hojas son brillantes y carentes de papilas, de bordes más o menos (o profundamente) dentadas, 3 a 20 dientes; en el último caso las hojas son aserradas, peciolo largos, finos, acanalados en el lado superior. La coloración, en general, varía de verde claro a verde oscuro, las que a su vez se van transformando en amarillas, rojas o purpuras según su estado de maduración (Mujica y Jacobsen, 2000).

2.2.2. Variedad Salcedo INIA

Según Nolasco *et al.* (2013) la variedad Salcedo INIA es una variedad mejorada obtenida del cruce de las variedades “Real Boliviana” y “Sajama” ambas variedades propias de Bolivia, liberada por INIA (Instituto Nacional de Investigación Agraria) en 1995. Se caracteriza por tener tolerancia a heladas y sequías, periodo vegetativo de 120 días en la costa y 150 días en el Altiplano, mayor contenido de proteína en granos (14.5%). Esta variedad es requerida por la agroindustria y mercado exterior. Con buenos rendimientos en la costa peruana sobre los 3 000 kg/ha.

2.2.3. Manejo de cultivo de la quinua

Rojas (2011) menciona que estudios realizados con el apoyo de diferentes universidades del área andina, han demostrado que los cultivos de quinua tienen una gran adaptabilidad a climas áridos y que se pueden realizar plantaciones tanto a alturas elevadas como al nivel del mar.

2.2.4. Cosecha

La cosecha se realiza una vez que las plantas llegan a la madurez fisiológica. Para llegar a esta fase transcurre de 5 a 8 meses, según el ciclo vegetativo de las variedades.

Los pasos de cosecha se dividen en cinco fases:

- Siega o corte.
- Formación de arcos o parvas.
- Golpeado o garroteo.
- Venteado y limpieza.
- Secado del grano.

2.2.5. Post cosecha, transformación y Agroindustria

Según Tapia & Fries (2007); tenemos las siguientes operaciones agroindustriales:

2.2.5.1. Secado de Granos

Según Espinoza (2011) el deshidratado se ha practicado desde los albores de la humanidad, no se sabe exactamente cuándo, el ser humano inicio el deshidratado de los alimentos. Probablemente por accidente, alguien dejó un alimento o fruta expuesta al sol y notó que se había secado pero que aún era comestible.

2.2.5.2. Limpieza y clasificación de granos

Práctica común ya que mejora los precios.

2.2.5.3. Almacenamiento

Sacos de polietileno

2.2.5.4. Eliminación de saponinas

Tradicional y mecánico por escarificación.

2.3. USOS DE LA QUINUA

Para establecer las posibilidades de desarrollo de las cadenas, es necesario identificar cada uno de los productos y subproductos que se pueden obtener de las hojas, el tallo y el grano de la planta de quinua, y sus usos reales y potenciales (Villacres *et al.*, 2011).

2.3.1. Tallo

El tallo tiene muchas vitaminas y minerales, que son aprovechadas para un proceso proteico para luego destinarlos a la alimentación animal.

Del tallo de la planta de quinua es posible obtener ceniza, concentrado para animales y celulosa, además el tallo también se aprovecha porque tiene una fibra natural y esto se usa en la industria como materia prima para la fabricación de papel y cartón que se detalla en la Figura 1.

2.3.2. Grano

El grano de quinua contiene en promedio 16,2% de proteína, un nivel muy superior al que representa el trigo (14%), el maíz (9,9%) y el arroz (7,5%), por citar solo los cereales más conocidos. Algunas variedades de esta semilla, llegan incluso a tener 20% de proteína (García, 2011).

Otra característica que resalta a este grano en comparación a otros granos tradicionales es el alto porcentaje de digestibilidad de sus proteínas hidrosolubles, constituidas por albuminas y globulinas, alcanzando el 80% (López *et al.*, 2011; Reyes & Aytakin, 2014). La cifra anterior significa que de 100 gramos de proteínas ingeridas por el ser humano 80 gramos son asimiladas; la cual es alta si se le compara con la carne 60%, la leche 72%,

el trigo 60% y el maíz 44%, el alimento con mejor digestibilidad es el huevo con el 95% (García, 2011).

Las saponinas son compuestos orgánicos de origen mixto que se encuentra en las semillas de la quinua, ya que provienen tanto de glucósidos triterpenoides (de reacción ligeramente ácida), como de esteroides derivados de perhidro 1,2 ciclopentano fenantreno. Estas moléculas se encuentran concentradas en la cascara de los granos. En las formas silvestres y las variedades amargas de la quinua, el contenido máximo (aproximado) de saponina es de un 2.8% (aunque el rango es variable de acuerdo con la especie y el ecotipo) que comparado con las exigencias actuales del mercado, que fijan como valor límite 0.05%, es extremadamente alto Salcines (2009). Estos compuestos no tienen una fórmula química bien definida por el origen dual explicado; pero se puede sugerir el siguiente esqueleto base $C_nH_{2n-8}O_{10}$.

Del grano de la quinua se obtiene saponina y el grano perlado. La saponina tiene potencial uso en la industria. Del grano perlado es posible obtener harina, hojuelas, extruidos, expandidos, granola y otros que se muestran en Tabla 1.

Tabla 1 : Utilización actual del grano de la quinua

PROCESO	PREPARACIÓN PRIMARIA	PREPARACIÓN FINAL	PROPIEDADES FUNCIONALES
Lavado escarificado	Grano entero perlado	Sopa, guiso, puré, refresco, pasteles	Textura, sabor
Molienda integral	Harina de quinua integral	Panes, galletas, mazamorras fideos, tartas, pasteles	Textura, sabor color, cuerpo.
Extrusor fermentación	Grano entero lavado, harina de quinua	Snack, expandido, bebida alcohólica	Textura, sabor
Laminador en frío	Hojuelas de quinua producidas con calor	Bebidas, sopas, dulces, yogurt.	Sabor, textura.

Fuente: Valencia (2005)

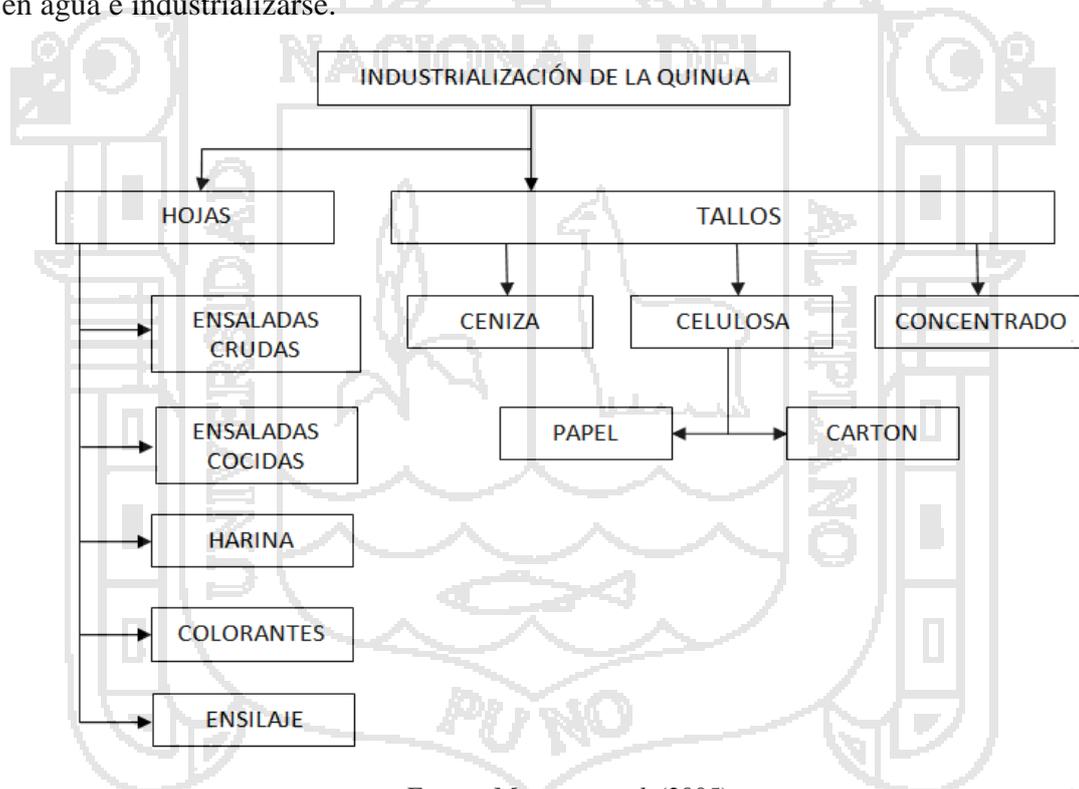
2.3.3. La Hoja

Esta posee pecíolo y lámina. Los pecíolos son acanalados en su lado superior, largos, delgados o muy variables. Las hojas de la parte inferior de la planta son de forma romboidal o triangular. Las más grandes llegan a medir hasta 10 – 15 cm de largo por 8 – 10 cm de ancho. Son de color verde cuando tiernas, semejante a espinacas y,

normalmente, están cubiertas de papilas, tanto en el as como en el envés (Peralta, 1985). Es posible el uso de la hoja como verdura; en reemplazo de la espinaca y de la lechuga; la inflorescencia en lugar del brócoli y del coliflor; La época oportuna para utilizar la hoja de quinua en la alimentación humana se encuentra entre 60 y 90 días después de germinada, es decir, antes de la floración, antes de este período o después de él se vuelve muy dura y lignificada (Tapia, 1997).

De las hojas de quinua se puede obtener harina, ensilaje, ensaladas crudas y ensaladas cocidas y otros Figura 1. Como las hojas de quinua son ricas en vitaminas y sales minerales, se puede utilizar como verduras en ensaladas y sopas (Salcines, 2009).

Del color de las hojas de quinua se puede obtener pigmentos de betacianina que se puede utilizar para la elaboración de colorantes vegetales, por la facilidad de solubilizarse en agua e industrializarse.



Fuente: Montoya *et al.* (2005).

Figura 1 : Potencial uso de la planta de la quinua

2.3.3.1. Valor nutritivo de la hoja

Según Mujica & Jacobsen (2006) consideran que las hojas de quinua son un gran alimento como verdura denominándose en el idioma nativo choq'a chiwa (verdura de los patos del lago). Estudios realizados (Galarza, 2010; Koziol, 1992; Schlick,

2000; Tapia, 1979) demostraron que el contenido de proteína de las hojas de la quinua es bastante considerable en base seca Tabla 2.

Se consume en muchas localidades de Perú, Bolivia y algunas de Ecuador, tanto frescas en ensaladas, como cocida en sopas o locros, es muy suave y agradable. Existe la creencia de que también es amarga y esto limita su consumo. Pero es necesario aclarar que la saponina solo se localiza en el grano y no en el resto de la planta, por lo tanto, la hoja no es amarga (Peralta, 1985).

Tabla 2 : Contenido químico proximal de las hojas de quinua fresca (% base seca)

COMPONENTE	GALARZA	KOZIOL	SCHLICK	TAPIA
Proteína	27.84	21.9	18.7	3.3 b.h.
Grasa	6	3.8	1	2.1 b.h.
Ceniza	19.86	19.1	24.7	
Carbohidratos	40.78	35	52.8	
Fibra	8.02	13.7	8.4	

Fuente: Adaptado de Galarza (2010), Koziol (1992), Schlick (2000) y Tapia (1979)

2.4. PRODUCCIÓN DE QUINUA Y TENDENCIAS DEL CONSUMIDOR

Según MINAGRI-DGESEP (2015) en la campaña agrícola 2014-2015 fue sembrado 70.1 mil hectáreas de quinua a nivel nacional con un crecimiento de 12.5% respecto a la campaña 2013-2014; del cual en la región Puno fue sembrada 34.6 mil hectareas y fueron cosechadas hasta fines de Abril del 2015 un acumulado anual de 27.3 mil toneladas con un rendimiento de 1.1 toneladas por hectárea. Los precios en chacra del grano de quinua son cercanos a S/. 6.00 por kilogramo mientras que en Lima Metropolitana en el periodo Enero-Abril 2015 variaron entre S/. 15.89 a S/. 14.16 con una tendencia a la baja.

Suca & Suca (2008) mencionan que los consumidores internacionales de la quinua mayoritariamente concentrados en norte América y Europa tienen un gran interés en el cuidado de la salud, medio ambiental y igualdad social. En tal sentido los nichos de mercado para productos orgánicos y ferias de muestras ofrecen interesantes alternativas y mejores precios de productor.

2.5. INOCUIDAD DE LAS VERDURAS

La mayoría de los microorganismos que han sido recuperados de las frutas y las verduras crudas durante la recolección no representan un riesgo para la salud humana, pero pueden causar deterioros. Durante la recolección, la higiene de los trabajadores del campo debe ser integral para asegurar la calidad microbiológica de las frutas y verduras frescas aunque depende también del grado de manipulación efectuada en el producto.

Se espera que los tejidos sanos sin alterar sean un sustrato pobre para el crecimiento de los microorganismos oportunistas, mientras que los tejidos dañados o fisiológicamente comprometidos se deterioraran más rápido y proporcionarán un sustrato mejor para el crecimiento microbiano. En las espinacas se encontraron cantidades elevadas de bacterias en las zonas en las que la cutícula estaba rota, la que dio como resultado la invasión del parénquima interno, mientras que en las hojas sanas y enteras no se observaron microorganismos (Babic & Watada, 1996).

2.5.1. Los tratamientos de lavado

La mayoría de las frutas y verduras frescas son lavadas, al menos una vez, durante su procesamiento y normalmente varias veces antes de llegar al consumidor. La adición de desinfectantes a las aguas de procesamiento se realiza con la intención de contrarrestar la carga microbiana del agua más que para reducir la carga microbiana del producto.

2.5.1.1. Cloro

El cloro es el agente desinfectante más comúnmente utilizado. Existen tres formas aprobadas para su uso: cloro gaseoso (Cl_2), hipoclorito cálcico (CaClO_2) e hipoclorito sódico (NaOCl) (Stopforth *et al.*, 2004). Sumergir el producto dentro de soluciones cloradas es utilizado ampliamente debido a que su implantación es fácil y de bajo costo. Sin embargo el uso de surfactantes u otros agentes en combinación con el cloro pueden afectar de forma adversa a las cualidades sensoriales del producto (Beuchat, 1998).

2.6. PRE-TRATAMIENTO DE VERDURAS PARA MEJORAR LA CALIDAD Y SEGURIDAD

La mayoría de los productos especialmente verduras necesitan ser escaldado antes de ser deshidratadas, congeladas, envasadas o empacadas para almacenar. Algunos vegetales

tales como los hongos y cebollas no necesitan ser escaldadas antes de deshidratar (Keith, 1984). El calor del escaldado ayuda a reducir o detener la actividad enzimática que puede causar cambios indeseables y reducir la calidad, al igual que los métodos de preservación ya que el secado no detiene. Las enzimas destruyen el color, sabor, textura y el valor nutritivo durante el secado y el almacenamiento, si los vegetales no son escaldados (Osaki & Gavranich, 1999). De acuerdo a Mepba *et al.* (2007) el escaldado a 88°C detiene todos los procesos de vida, inactiva enzimas, fija el color verde y remueve ciertos sabores desagradables comunes en hojas de verduras.

Ayorkor (2009) indica que el escaldado además protege ciertos nutrientes en el producto como las vitaminas. El escaldado además afloja los tejidos del producto por lo que se reduce el tiempo de secado, la cual es respaldado por Greve *et al.* (1994) y Waldrom *et al.* (2003) quienes demostraron que las células en el producto pierden su barrera integral cuando son escaldados así el agua es perdido rápidamente durante el secado que cuando no es escaldado. Otro efecto del escaldado es de que hace algunas verduras como el brócoli o la espinaca secan más compactos, y reduce el tiempo necesario para rehidratar las verduras antes de coccionar (Kendall *et al.*, 2004; Osaki & Gavranich, 1999).

Por otro lado, Jongen (2002) reportó que de todas formas siendo el escaldado un importante pre-proceso de tratamiento térmico de verduras, causa inevitables pérdidas y separación de nutrientes hidrosolubles como los minerales, vitaminas hidrosolubles y azúcares. El escaldado a vapor toma más tiempo, pero pocos nutrientes hidrosolubles son perdidos. Para minimizar la pérdida de nutrientes, el escaldado es realizado solo por el periodo de tiempo requerido. Sin embargo, es necesario que los productos alimenticios no sean sub-escaldados; las enzimas no serán inactivadas, y la calidad de los productos secados será inferior (Osaki & Gavranich, 1999).

El escaldado es realizado por exposición del producto fresco al agua en ebullición o vapor por un breve periodo de tiempo. Entonces las verduras deben ser rápidamente enfriadas en agua fría o a través del uso de enfriamiento evaporativo para prevenir la cocción. La calidad del agua usada para escaldar verduras puede tener un efecto en la textura de ciertas verduras. Aguas muy duras o otras soluciones como solución NaCl 3% (Severini *et al.*, 2005) puede causar el endurecimiento de verduras como las arvejas verdes (Osaki & Gavranich, 1999).

2.6.1. Tipos de proceso de escaldado

Existen diferentes tipos de escaldado algunos de ellos son: El escaldado en agua herviente, escaldado al vapor y escaldado en microonda.

2.6.1.1. Escaldado en agua

En una hervidora con una apropiada tapa. El agua se lleva a ebullición, el cesto o bolsa de escaldado conteniendo verduras es completamente sumergido. Controlando el tiempo lo pronto desde que el agua vuelve a rebullir. El agua de escaldado puede ser usada dos o tres veces. Es importante enfriar inmediatamente luego del escaldado. Esto se puede lograr a través de sumergir el cesto de verduras en recipientes con agua fría la cual además se puede utilizar como agua de escaldado. Las verduras nunca deben envasarse caliente (Osaki & Gavranich, 1999).

2.6.1.2. El escaldado a vapor

Este proceso se realiza por medio de agua en ebullición en una cacerola y poniendo el cesto de escaldado sobre la cacerola en la cual solo el vapor generado del agua en ebullición está en contacto con las verduras, y la cacerola rigurosamente tapada. El enfriado por evaporación es el mejor método para enfriar para esta forma de escaldado; este proceso de enfriamiento no adicionará agua a las verduras (Keith, 1984; Osaki & Gavranich, 1999). Las verduras entonces están listas para ser envasados, congelados o deshidratadas (secados). Sin embargo, Kendall *et al.* (2004) reporto que el escaldado en agua es recomendado sobre el escaldado a vapor o escaldado en microondas ya que el escaldado en agua alcanza una mayor igual penetración de calor que los otros dos métodos.

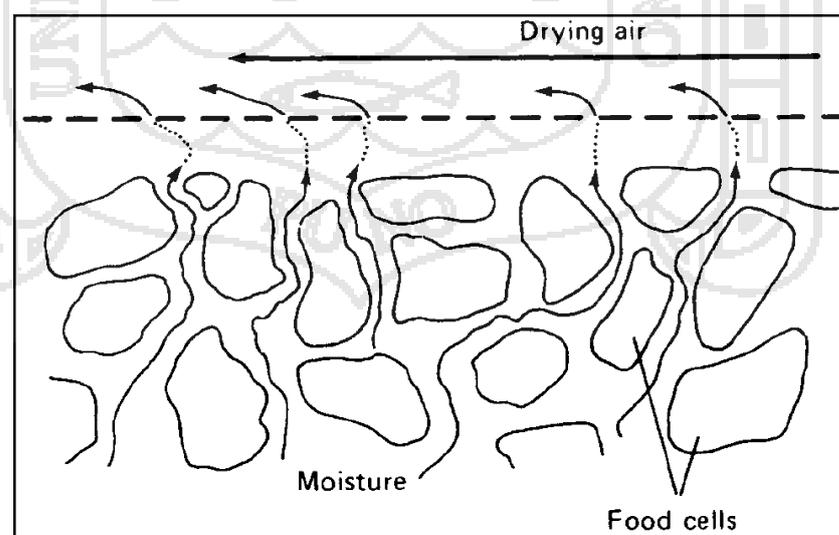
2.7. SECADO DE VERDURAS

Involucra la reducción de agua en lo más posible para detener la actividad enzimática como microbiológica así deteniendo el deterioro (Fellows, 2000). La humedad residual de los alimentos secados varía entre 2-30% dependiendo del tipo de alimento. El secado disminuye peso y volumen de los productos de ahí bajos costes de transporte y almacenamiento. Sin embargo, el secado conlleva algunos perdidas en el valor nutricional de los productos, por ejemplo pérdida de vitamina C, y cambios de color y apariencia que no pueden ser deseable (Kendall *et al.*, 2004).

Para una buena calidad del producto, las verduras son preparadas para el secado tan pronto es posible luego de la cosecha. Son escaldadas, enfriadas y dispuestas a ser deshidratadas sin retraso. Los alimentos deben ser secados rápidamente, pero no tan rápido ya que la superficie se vuelve dura antes de que la humedad interna se haya evaporado. El secado no debe interrumpirse, una vez iniciado el proceso, los alimentos no deben ser enfriados para volver a iniciar el secado posteriormente.

Los mecanismos de remoción de agua por el secado involucran dos procesos simultáneos a saber, transferencia de calor hacia el alimento para la evaporación de agua y transporte de eliminación del vapor de agua formado en el alimento. Por ello el secado es una operación basada en transferencia de calor y masa simultáneamente (Fellows, 2000; Jongen, 2002; Smith & Hui, 2004). Cuando el aire caliente circula sobre el alimento húmedo, el vapor de agua se difunde a través de la capa de superficie al aire circundante del alimento y es arrastrado por el aire en movimiento como se aprecia en la Figura 2. Dependiendo del modo de transferencia, los procesos de secado industrial pueden agruparse en dos categorías (Fellows, 2000):

Secado convectivo: el aire seco y caliente se usa para suministrar el calor necesario para evaporar y para remover el vapor de agua de la superficie del alimento. Los intercambios de masa y calor entre el aire y el producto son básicamente transferencia convectivo, aunque la conducción y radiación pueden estar involucradas en cierto sentido (Berk, 2009; Ratti, 2009).



Fuente: Fellows (2000)

Figura 2 : Movimiento de humedad durante el secado

Secado conductivo: el alimento húmedo es puesto en contacto con una superficie caliente (o en aplicaciones particulares, con vapor sobrecalentado). El agua del alimento es vaporizado (Berk, 2009).

2.7.1. Requerimiento de temperatura

Keith (1984) indica que durante la primera parte del secado, la temperatura del aire puede ser relativamente alta, es decir, 65°C a 70°C, de modo que la humedad puede ser evaporada rápidamente del alimento. Debido a la pérdida de calor durante la rápida evaporación, la temperatura del aire puede ser alta sin incrementar la temperatura de los alimentos. Pero tan pronto como la humedad de la superficie es perdida y el grado de evaporación decae, el alimento se calienta. Entonces la temperatura del aire debe ser reducida a 60°C. Al final del proceso de secado los alimentos pueden chamuscarse fácilmente, este debe ser observado cuidadosamente.

2.7.2. Humedad y ventilación

La rápida deshidratación es deseable en temperaturas altas con baja humedad, la proporción de deshidratación será más rápida. La humedad de aire reduce la velocidad de evaporación. Cuando el secado se realiza muy rápido a altas temperaturas, sin embargo, se producirá “causa endurecimiento”; esto significa de que las células en la parte exterior de la pieza alimentaria perderán la humedad rápidamente que las células del interior. La superficie se vuelve dura, evitando la salida de la humedad interna. Por esta razón, debe haber una adecuada ventilación alrededor del secador de alimentos (Fellows, 2000; Keith, 1984).

2.7.3. Efecto del secado en el valor nutritivo de las verduras

El secado, como todos los métodos de preservación, puede resultar en la pérdida de algunos nutrientes. Los efectos del secado en el valor nutritivo de las verduras incluyen:

- Contenido calórico: No cambia, pero es concentrada dentro de una pequeña masa como la humedad que es removida.
- Fibra: No cambia
- Tiamina, riboflavina, niacina: Algunas pérdidas durante el escaldado pero bastante buena retención si el agua utilizada para la rehidratación es consumido.

- **Minerales:** Algunos se pueden perder durante la rehidratación si el agua de remojo no se utiliza. El hierro no es destruido por el secado (Kendall *et al.*, 2004).
- **Vitamin A:** Es bien retenida si se controla la fuente de calor.
- **Vitamin C:** Mayormente destruido durante el escaldado y el secado de las verduras.

La pro-vitamina A y la vitamina C son especialmente propensas a la destrucción oxidativa en la presencia de calor, luz, oxígeno, enzimas, humedad e iones metálicos. Así el secado solar debido a la exposición de las verduras a la gran radiación solar particularmente los rayos ultravioleta (UV) promueve la catálisis oxidativa del β -caroteno para perder la actividad de la vitamina (Ayorkor, 2009; Jangam *et al.*, 2010; Supriya, 2009).

Tabla 3 : Pasos para secar algunas verduras

VERDURAS	preparación	Tiempo de escaldado* (min)	Tiempo de secado (hrs.)	Prueba de secado
Col	Lavar, remover hojas externas, cuartear de la mitad, cortar en tiras de 1/8" en espesor.	4	10-12	Crujiente, quebradizo
Apio	Asear tallos, lavar los tallos y hojas, picar los tallos	4	10-16	Muy quebradizo
Perejil, otras hierbas	Lavar, separar grupos, desechar largos o tallos duros	4	4-6	Copo
Espinaca, mostaza	Asear y lavar, sacudir o escurrir el exceso de humedad.	4	6-10	crujiente

*los tiempos de escaldado son para 914.4 a 1524 metros de altitud. Los tiempos serán ligeramente inferiores para altitudes menores y ligeramente superiores para altitudes mayores o por gran cantidad de verduras.

NOTA: las toxinas de variedades tóxicas de hongos no son destruidas por el secado o por el cocinado. Solamente un experto puede distinguir entre las variedades tóxicas y comestibles.

Fuente: Kendall *et al.* (2004)

2.7.4. Secado exitoso

Secar los alimentos de modo uniforme para alcanzar un secado exitoso necesita un esfuerzo y atención extra. Moviendo las muestras con frecuencia y cambiando las bandejas en el secador son esenciales ya que el calor no es la misma en todas las partes del secador. Para los mejores resultados, extender delgadas capas de tamaños uniformes de alimento en las bandejas del secador (Ayorkor, 2009). La Tabla 3 muestra los pasos recomendados para un exitoso secado de verduras.

El proceso de secado es complejo no tan exacto como el enlatado o congelado ya que en el deshidratado se involucra diferentes factores. El escaldado con agua caliente se lleva con frecuencia entre 75 y 95°C por entre 1 a 10 minutos, dependiendo del tamaño de las piezas individuales del vegetal. El tiempo típico para escaldado en agua a 95°C son 2-3 minutos para arvejas y brócoli, 4-5 minutos para col de Bruselas y 1-2 minutos para guisantes (Bayındırlı, 2010).

2.7.5. Métodos de secado

2.7.5.1. Deshidratadores

Kendall *et al.* (2004) indican que los deshidratadores eléctricos con control termostático son recomendados para el secado de alimentos a baja escala. Estas son relativamente accesibles, fáciles de utilizar en el secado de gran o pequeñas *batches* de alimentos. Los mejores deshidratadores tienen configurado el control del calor termostático y ventiladores que soplan aire caliente sobre los alimentos. Algunos modelos tienen una fuente de calor en la base con bandejas perforadas removibles apilados encima de la fuente de calor. Los alimentos de las bandejas bajas cerca de la fuente de calor con frecuencia secan más rápido que las bandejas de la parte superior, por lo tanto, las bandejas deben ser rotadas a lo largo del secado.

2.7.5.2. Secado en horno

El secado en horno es la forma simple para secar los alimentos ya que no necesitamos equipamiento especial. Es además más rápido que el secado al sol o el uso de un secador de alimentos. Sin embargo, el secado en horno puede ser utilizado solo en pequeña escala. El horno para secar los alimentos es preparado en la bajísima configuración y precalentado a 60°C. La unidad de caldera de un horno eléctrico no debe ser usada, porque la superficie del alimento secará muy rápido. La unidad debe cambiarse si no tiene control separado. Algunos hornos a gas tienen un apropiado piloto, la cual puede mantener el horno lo suficientemente caliente el horno para secar los alimentos. Es importante mantener la temperatura del horno de 60 a 70°C. de esta manera el termómetro puede ser insertado en la bandeja superior cerca de la media posterior donde se puede ver fácilmente, para ayudar a monitorear la temperatura cada media hora (Keith, 1984; Kendall *et al.*, 2004).

Cerca de 1 a 2 libras de alimento preparado es dispuesto en una simple capa en cada bandeja y una bandeja es dispuesta en cada rack del horno. Espaciando de 1-1/2 pulgadas esto permite a ambos lados, la delantera y posterior de las bandejas así que el aire puede circular por completo en el horno. Una carga ligera seca más rápido que una carga completa. La puerta del horno es ligeramente abierta durante el secado. Un ventilador eléctrico dispuesto en frente de la puerta del horno ayuda a mantener el aire circulando. La duración del tiempo depende de la clase y cantidad de alimento a ser secado, los métodos usados, y la temperatura de secado (Keith, 1984; Kendall *et al.*, 2004).

2.7.5.3. Secado al sol

El secado al sol es el antiguo método que no es tan sanitario como los otros métodos de secado. Un mejorado secador solar indirecto es usado recientemente, un secador de corriente natural, es una caja rectangular formado con dos cámaras una del calentamiento del aire y el otro de secado respectivamente. Las dos cámaras tienen vidrio claro en la parte superior. El secador es además pintado de color negro para la mejor absorción de calor (Jangam *et al.*, 2010).

Las verduras toman 3 a 7 días para ser secados en el sol. El periodo de tiempo depende del tipo de alimento y las condiciones atmosféricas. El calor natural es bajo y menor exigente que el secado controlado en un horno o un secador de alimentos. Para un mejor secado el secador debe ser rotado y dispuesto para encarar en la dirección del sol (Jangam *et al.*, 2010; Keith, 1984).

2.7.5.4. Secado en sombra

Algunas verduras especialmente las verduras de hojas y hierbas no se secan al sol porque la luz destruye el aroma natural y ciertos nutrientes tales como β -caroteno y vitamina C, resultando en productos de baja calidad.

El secado en ambiente abierto no es bien satisfactorio como el secado en horno, porque la temperatura no puede ser controlada y esta es normalmente baja. Además, el producto puede ser expuesto a condiciones insanas de la suciedad del aire como atraer animales. Cuando se realice, el producto puede ser cubierto de cerca con manteles para prevenir contaminación (Keith, 1984).

2.7.6. Características de secado

2.7.6.1. Parámetros del producto

a. Humedad inicial

El contenido de humedad, es decir el agua evaporable existente en el producto se expresa con relación a su masa total o a su masa seca (Ratti, 2009).

b. Medida de humedad en base seca y base húmeda

La industria mide convencionalmente el contenido de humedad de un producto como la relación de masa de agua a la masa total del producto. Por ejemplo para un producto que contiene 40 Kg por cada 100 Kg, el contenido de humedad es expresado como 40%. Esta base de medida es conocida como base húmeda (BH). Para el análisis de secado es sin embargo es más conveniente medir el contenido de humedad en base seca (BS) (la relación de masa de agua a la masa de sólido seco). Que en el ejemplo anterior existe 40Kg de agua por cada 60Kg de sólidos seco, el contenido de humedad en base seca es 40/60 o 67% BS. Así el contenido de humedad en el producto es la concentración de agua en el producto (Geankoplis, 2007).

Usando el símbolo de W para humedad en base húmeda y M para humedad en base seca.

$$M = \frac{m_w}{m_s} \qquad W = \frac{m_w}{m_w + m_s}$$

Donde m_w es la masa de agua y m_s es la masa de sólidos en una muestra. Para convertir de base humedad a base seca se usa la Ecuación 1.

$$M = \frac{100W}{100 - W}$$

Ecuación 1

c. Contenido de Humedad de equilibrio

En general cuando un producto orgánico se mantiene en contacto con aire a temperatura y humedad constante hasta que se alcanza el equilibrio, este contenido de humedad se denomina contenido de humedad de equilibrio del producto bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad. En general el contenido de humedad se expresa en base seca. Para algunos sólidos, el valor del contenido de humedad de equilibrio depende de la dirección en la que se alcanza el equilibrio. Los

valores de contenido de humedad de equilibrio varían de acuerdo con que una muestra húmeda se seque por desorción o una muestra seca adsorba humedad por adsorción. En los cálculos de secado, se usa el valor de equilibrio por desorción, puesto que tiene mayor valor y tiene un interés particular (Geankoplis, 2007).

d. Humedad libre

La humedad libre es la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio. Solo se puede evaporar la humedad libre; el contenido de humedad libre en una muestra es la humedad por encima del contenido de humedad de equilibrio. Esta humedad libre se puede eliminar por secado con las condiciones dadas de porcentaje de humedad relativa (Geankoplis, 2007).

e. Humedad crítica

Es el contenido de humedad que posee el producto a secarse en el momento que hay una transición de velocidad de secado, es decir, del momento de secado a velocidad constante pasa a velocidad decreciente. El punto en el cual termina la intensidad constante y empieza a disminuir la intensidad de la desecación se denomina contenido crítico de humedad (Perry & Chilton, 1981).

f. Temperatura de bulbo seco

Ibarz *et al.* (2005) definen como aquella temperatura que se mide con termómetro común.

g. Temperatura de bulbo húmedo

Ibarz *et al.* (2005) conceptualiza como la temperatura que resulta de la evaporación del agua en una gasa húmeda colocada sobre el bulbo de un termómetro común. La temperatura de bulbo húmedo siempre será inferior a la temperatura de bulbo seco. La evaporación hace disminuir la temperatura del agua mientras que el aire se acerca a las condiciones de saturación.

h. Temperatura máxima

Perry & Chilton (1981) definen como la temperatura que soporta el producto sin cambiar sus propiedades, está en función a la madurez, humedad y tipo de producto.

2.8. CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO

2.8.1. Introducción

Según Geankoplis (2007) para reducir el contenido de humedad en el secado de diversos materiales de proceso, por lo general se estima el tamaño del secador necesario, las diferentes condiciones de operación de humedad y la temperatura del aire empleado, y el tiempo necesario para lograr el grado de secado. No es posible predecir el contenido el contenido de humedad de equilibrio de diversos materiales, por lo que es necesario determinarlo por vías experimentales. De la misma manera, puesto que el conocimiento de mecanismos básicos de las velocidades de secado es bastante incompleto, en muchos casos es indispensable obtener algunas mediciones experimentales de las velocidades de secado.

2.8.2. Determinación experimental de la velocidad de secado

Para determinar experimentalmente la velocidad de secado de un material, se procede a colocar una muestra en una bandeja. Si se trata de material sólido se debe llenar por completo la base de la bandeja, de manera que solo quede expuesta a la corriente de aire de secado la superficie de dicho sólido. La pérdida de peso de humedad durante el secado puede determinarse a diferentes intervalos sin interrumpir la operación, colgando la bandeja de una balanza adaptada a un gabinete o a un ducto a través del cual fluye el aire de secado.

Al realizar experimentos de secado por lotes, deben tomarse ciertas precauciones para obtener datos útiles en condiciones que se semejen lo más posible a las que imperaran en operaciones a gran escala. La muestra no debe ser demasiada pequeña y se debe introducir a una bandeja similar a la que se usara en producción. La relación entre superficie de secado y superficie de no secado (superficie aislada) así como la profundidad del lecho del sólido debe ser similar. La velocidad, la humedad, la temperatura y la dirección del aire deben ser las mismas y constantes para simular un secado en condiciones constantes.

2.8.3. Curvas de velocidad de secado para condiciones de secado constante

Los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes, generalmente se expresa como peso total W del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos de t horas en el periodo de secado. Estos datos se pueden convertir a datos de

velocidad de secado por los siguientes procedimientos. Primero se recalculan los datos. Si W es el peso del sólido húmedo en kilogramos totales de agua más sólido seco y W_s es el peso del sólido seco en kilogramos.

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \frac{\text{Kg total de agua}}{\text{Kg de sólido seco}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Después de haber establecido las condiciones de secado constante, se determina el contenido de humedad de equilibrio X^* Kg de humedad de equilibrio/Kg de sólido seco. Con él se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre X en Kg de agua libre/Kg de sólido seco indicada en Ecuación 2 para cada valor de X_t .

$$X = X_t - X^*$$

Al sustituir los datos calculados, se traza una gráfica del contenido de humedad libre X en función del tiempo t en horas; como muestra la Figura 3. Para obtener una curva de velocidad de secado a partir de esta gráfica, se miden las pendientes de las tangentes a la curva según la Ecuación 3, lo cual proporciona Valores de dX/dt para ciertos valores de t . se calcula entonces la velocidad DR para cada punto con la expresión.

$$DR = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde DR es la velocidad de secado en Kg H₂O/h.m², L_s es Kg de sólido seco usado y A es el área superficial expuesta al secado en m². Para obtener DR en la Figura 3, se usó un valor de L_s/A de 21.5Kg/m². Entonces, la curva de velocidad de secado se obtiene graficando DR en función de contenido de humedad X , tal como se muestra en la Figura 4.

2.8.4. Gráfica de la curva de velocidad de secado

La eliminación de agua ocurre generalmente en una serie de etapas diferenciadas por la velocidad de secado, después de un corto periodo de estabilización lineal donde el sólido está a baja temperatura y la velocidad de evaporación aumenta a medida que sube la temperatura, se registra una etapa de velocidad de deshidratado constante, donde la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio (temperatura de bulbo húmedo

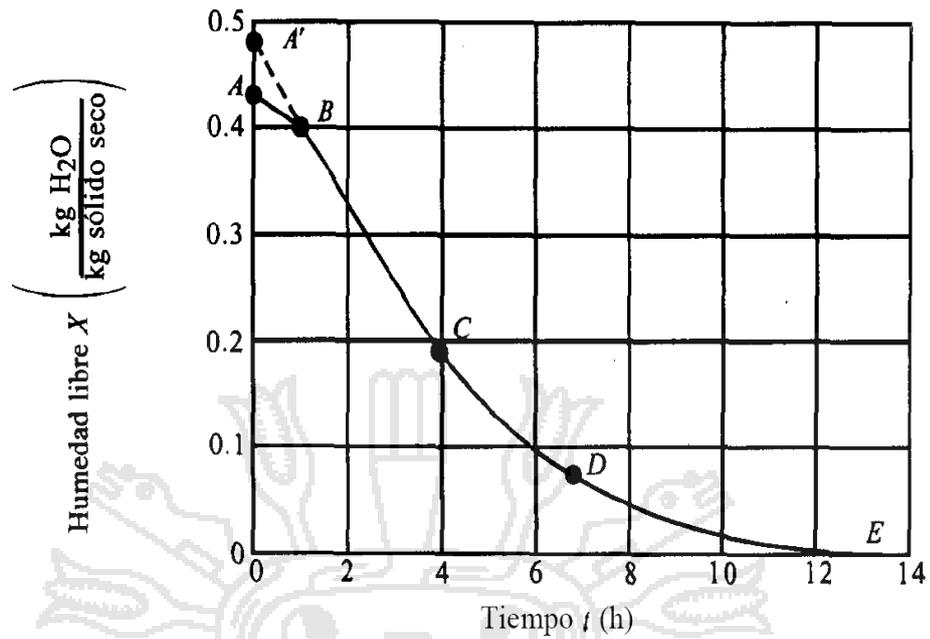
del aire), lo que provoca una reducción importante del contenido de agua a temperatura y velocidad de secado constante, mientras la superficie del sólido se mantiene saturada de agua que migra desde el interior a la misma velocidad que ocurre la evaporación en la superficie (Singh & Heldman, 1998).

En la Figura 3 se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante. Empezando en el tiempo cero, el contenido de humedad libre corresponde al punto A. al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación va en aumento. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al principio de la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en el punto A'. Este periodo inicial de ajuste en estado no estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado.

En la recta entre los puntos B y C de la Figura 3, indica que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. Este periodo de velocidad constante de secado corresponde a la línea BC en la Figura 4.

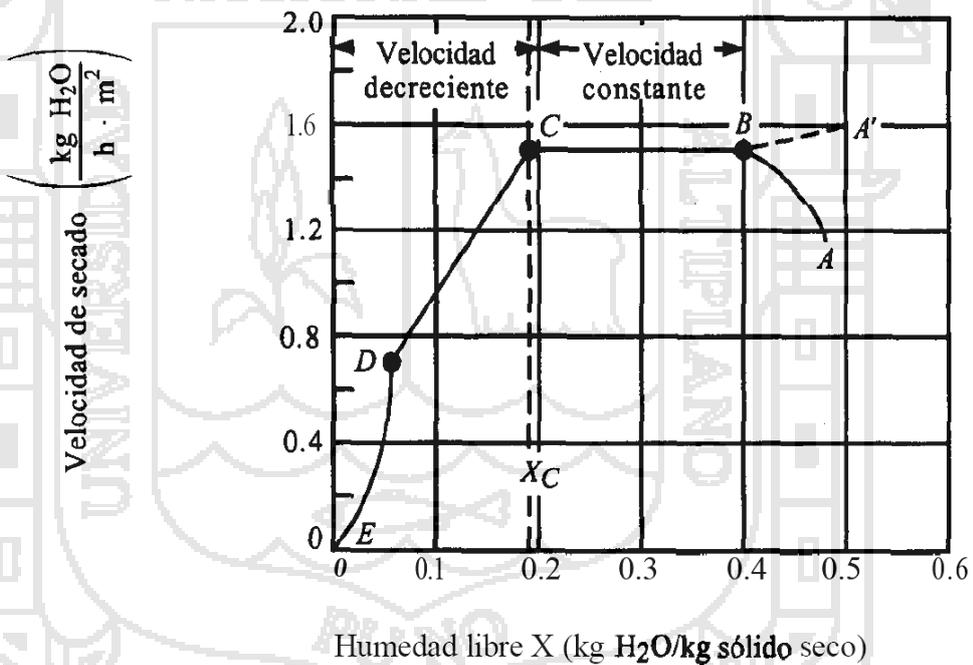
En el punto C de ambas gráficas, la velocidad de secado comienza a disminuir en el periodo de velocidad decreciente, hasta llegar al punto D. en este primer periodo de velocidad decreciente, la velocidad corresponde a la línea CD en la Figura 4 y por lo general es lineal.

En el punto D la velocidad de secado disminuye con más rapidez aun, hasta que llega al punto E, donde el contenido de humedad de equilibrio es X^* , y $X=X^*-X^*=0$. En el secado de algunos materiales, la región CD no existe, o bien; constituye la totalidad del periodo de velocidad decreciente.



Fuente: Geankoplis (2007)

Figura 3 : Curva de los datos de humedad libre en función del tiempo



Fuente: Geankoplis (2007)

Figura 4 : Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad

2.8.5. Etapas de la velocidad de secado

La eliminación de agua ocurre generalmente en una serie de etapas diferenciadas por la velocidad de secado, después de un corto periodo de estabilización lineal donde el sólido está a baja temperatura y la velocidad de evaporación aumenta a medida que sube

la temperatura, se registra una etapa de velocidad de deshidratado constante, donde la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio (temperatura de bulbo húmedo del aire), lo que provoca una reducción importante del contenido de agua a temperatura y velocidad de secado constante, mientras la superficie del sólido se mantiene saturada de agua que migra desde el interior a la misma velocidad que ocurre la evaporación en la superficie (Singh & Heldman, 1998).

2.8.6. Factores que afectan la velocidad de secado

Los factores que afectan al velocidad de secado son según Ratti (2009).

2.8.6.1. Superficie del producto

La subdivisión acelera el secado, porque una mayor área proporciona más superficie en contacto con el medio de calentamiento.

2.8.6.2. Temperatura

Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el medio de calentamiento y la muestra, mayor será la velocidad de transferencia de calor.

2.8.6.3. Velocidad de aire.

El aire en movimiento absorbe el vapor de agua de la superficie del alimento, previniendo así la creación de atmósfera saturada. La velocidad de aire actúa aumentando los coeficientes globales de transferencia de materia y de calor, lo que disminuye el tiempo de deshidratado de los alimentos.

2.8.6.4. Humedad del aire

El aire seco tiene el poder de absorber y retener la humedad, cuanto más seco se encuentre, mayor será la velocidad del proceso de secado. Para muchos productos la velocidad de secado al principio es constante y posteriormente decrece, a veces velocidades distintas. Respecto al agua perdida, el mayor porcentaje se elimina en un tiempo relativamente corto pero cuesta mucho más eliminar la humedad restante. La velocidad de aire afecta poco a la velocidad de deshidratado y la cantidad de agua contenida en el alimento fuertemente (Ratti, 2009).

2.9. DIFUSIÓN

La difusión se da en sólidos de estructura fina y en los poros capilares y pequeños espacios vacíos llenos con vapor, el vapor se difunde hacia afuera hasta que alcanza a la corriente global del aire (Ratti, 2009).

La difusión molecular o transporte molecular puede definirse como la transferencia de moléculas individuales a través de un fluido por medio de los desplazamientos individuales y desordenados de las moléculas. Se puede imaginar a las moléculas desplazándose en línea recta y cambiando su dirección al rebotar con otras moléculas cuando chocan. Puesto que las moléculas se mueven aleatoriamente, la difusión molecular es también conocida como proceso con trayectoria aleatoria.

El transporte en sólidos se puede clasificar en dos tipos de difusión: La difusión que sigue la ley de Fick según la Ecuación 4 y que no depende prioritariamente de la estructura del sólido y la difusión en sólidos porosos, en la que la estructura real y los canales vacíos reviste gran importancia.

2.9.1. Ley de Fick

A partir de la segunda ley de Fick, es posible obtener modelos semi-empíricos para determinar el coeficiente de difusión efectivo D_{eff} en geometría de placa infinita y con diversas condiciones de contorno y de operación (Crank, 1975).

$$\frac{dX}{dt} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$$

Ecuación 4

Una de las dificultades para analizar datos de difusión en el secado, es que la condición inicial para el periodo con control difusional corresponde a una distribución no uniforme de humedad en el sólido, especialmente cuando el periodo de velocidad constante precede al periodo de velocidad decreciente.

Durante el secado convectivo, con velocidad de aire suficientemente elevado, la resistencia externa es generalmente muy pequeña y la velocidad de secado es controlada por la difusión en el sólido. En estas condiciones, durante el periodo de velocidad decreciente, la humedad en la superficie está en equilibrio con el medio de secado y no hay agua libre.

2.9.2. Coeficiente de difusión

La difusión se define como el transporte neto debido al movimiento aleatorio. El coeficiente de difusión aumenta con la temperatura de secado. La forma de contacto de las muestras con el aire influye en los coeficientes.

La solución para la de difusión de Fick modificada para placa está dada por la Ecuación 5 para una lámina infinita, al asumir el movimiento unidimensional del volumen cambiante de humedad, temperatura constante e inconsiderable resistencia externa al coeficiente de difusividad como sigue:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot \frac{t}{4L^2}\right] \quad \text{Ecuación 5}$$

Para tiempos prolongados de secado la Ecuación 5 se simplifica a una forma restringida de la ecuación de difusión que viene dada por la Ecuación 6:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot \frac{t}{4\pi^2}\right) \quad \text{Ecuación 6}$$

La D_{eff} para placa infinita se obtiene de la pendiente (K) de la grafica $\ln MR$ versus tiempo que es una línea recta con pendiente negativa según K definido por Ecuación 7 y está relacionado al D_{eff} por:

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

MR= es la Relación de humedad

D_{eff} = coeficiente de difusividad efectivo (m^2s^{-1})

L= espesor medio de la placa en metros de la muestra

M = es el contenido de humedad en tiempo (t)

M_e = es el contenido de Humedad de equilibrio

M_o = es el contenido de humedad inicial

t= tiempo (minutos),

n = es el numero de términos en las series (n=1)

Para evaluar la influencia de la temperatura en la constante de secado, se relaciona con la ecuación de Arrhenius como:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT_{abs}}\right) \tag{Ecuación 8}$$

Donde:

D_0 = Constante de secado, m^2/s

E_a = Energía de activación, $kJ.mol^{-1}$

R = Constante universal de gases, $8.31451 J.mol^{-1}.K^{-1}$

T_{abs} = Temperatura absoluta, en K. ($^{\circ}C+273.15$)

La Ecuación 8 se puede reordenarse de la siguiente forma

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT_{abs}} \tag{Ecuación 9}$$

La energía de activación para la difusividad efectiva del agua es entonces posible obtener de la pendiente de la grafica de $\ln(D_{eff})$ contra $1/T_{abs}$ según Ecuación 9. En la Tabla 4 muestra algunos valores de difusividad efectiva y energía de activación para algunas frutas y vegetales.

Tabla 4 : Variación de la difusividad efectiva con la temperatura.

PRODUCTO	T ^o C	D _{eff} x10 ¹⁰ (m ² /s)	E _a (kJ/mol)
Manzana	75–105	11.48–21.95	23.951
Banana	30–70	1.3–7.8	39.8
Té verde	80–120	0.114–0.298	406.02
Brócoli	50–75	131.85–182.56	
Zanahoria	50–70	13.04–24.18	28.36
Hojas de menta	35–60	30.7–194.1	62.96
Papa	40–70	4.68–10.2	23.61

Fuente: Ratti (2009)

2.10. MODELOS MATEMATICOS PARA EL AJUSTE DE LOS DATOS

Los aspectos más relevantes en la tecnología de secado son el modelado matemático de los procesos y las corridas experimentales. El modelado se basa básicamente en el diseño de una serie de ecuaciones para describir el proceso lo más exacto posible. El modelado matemático de los procesos de secado son usados para diseñar nuevos sistemas de secado o mejorar los ya existentes y hasta para el control de los procesos de secado. Muchos modelos matemáticos han sido propuestos para describir los procesos de secado, de los cuales, los modelos de secado para placa fina se han utilizado ampliamente (Doymaz, 2014). En la Tabla 5 se presenta los cinco modelos matemáticos a los cuales se ajustó los datos experimentales en la presente investigación. En los modelos a , b , c y n son parámetros de los modelos, k es la constante de secado (1/min) y t es el tiempo de secado (min).

Los modelos de secado basados en la teoría de difusión de líquidos han sido preferidos por los investigadores en el área de secado de alimentos. Entre ellos se encuentran los modelos de Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis modificado. Estos modelos de secado no solo permiten predecir el mejor proceso, sino que también ofrecen herramientas para predecir las condiciones de almacenamiento y empaque; además, ayudan a establecer el contenido final de humedad de los productos agrícolas y los requisitos del proceso de secado (Torregroza-Espinosa *et al.*, 2014).

Tabla 5 : Modelos matemáticos en estudio

Nombre del modelo	Modelo	Referencias
Henderson y Pabis	$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt)$	Doymaz (2014), Simha & Gugalia (2013)
Midilli	$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli <i>et al.</i> (2002), Ratti (2009) y Simha & Gugalia (2013)
Logarítmico	$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt) + c$	Doymaz (2014), Ratti (2009)
Page	$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^n)$	Doymaz (2014), Ratti (2009)
Lewis	$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt)$	Doymaz (2014), Ratti (2009)

2.11. ÍNDICE DE REHIDRATACIÓN

Existe reporte de investigaciones en los cuales se mide la capacidad del material deshidratado para rehidratarse como una medida del daño que ha recibido la muestra en el secado. El índice en mención normalmente se expresan en diferentes formas y con frecuencia el mismo índice es directamente nombrado. El índice más común usado para expresar la rehidratación del tejido seco de las plantas es la relación de rehidratación (RR) definido por la Ecuación 10 como (Doymaz, 2014):

$$RR = \frac{\text{masa rehidratada}}{\text{masa sin rehidratar}}$$

Ecuación 10

La relación de rehidratación se usa para expresar la rehidratación de productos secados como zanahorias, champiñones, peras, papa y hojas de cilantro. En la Tabla 6 se muestra valores de relación de rehidratación para verduras seleccionadas. La relación de rehidratación es muchas veces conocida como capacidad de rehidratación. Para facilitar una descripción matemática de los fenómenos de rehidratación, es común correlacionar los datos experimentales de reconstitución de acuerdo con el tiempo a una relación polinomial de segundo orden como sigue:

$$RR = at^2 + bt + c$$

Junto con la ganancia de agua durante la rehidratación los componentes solubles pueden disolverse. El incremento de masa que se observa es el resultado neto de aquellos procesos, y no brinda información de la cantidad de agua absorbida o masa perdida de solido soluble en particular (Jokić *et al.*, 2009).

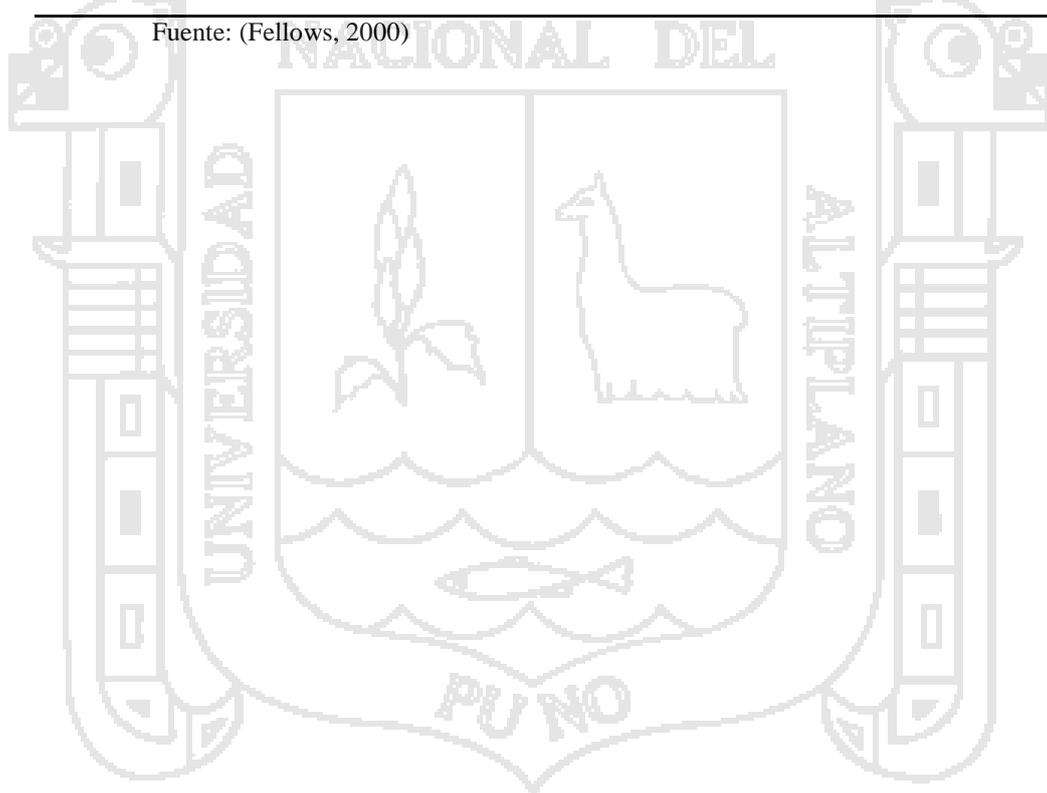
Por otro lado, las condiciones en la cual los procesos de rehidratación se realizan tienen un efecto significativo en las características del producto final rehidratado y determinará su aceptabilidad del consumidor. Estas condiciones pueden ser controladas y optimizadas en determinados procesos y para ciertos productos alimenticios. Sin embargo, en otros casos no es posible el cambio ni la optimización de las condiciones para la rehidratación y reconstitución de los alimentos deshidratados, el caso particular en máquinas surtidoras automáticas donde el mezclado y el tiempo de contacto entre las partículas y el agua es limitado, en productos destinados para reconstitución a bajas temperaturas, o cuando el consumo toma lugar luego de un corto periodo de tiempo reconstitución. Algunos parámetros de proceso que pueden ser controlados incluye la temperatura, composición

media del líquido (viscosidad, densidad), presencia de materia insoluble, y el patrón de mezclado (Rao *et al.*, 2005).

Tabla 6 : Relación aproximada para el secado, encogimiento y rehidratación de vegetales selectos

Vegetal	Relación de secado	Relación de encogimiento	Relación de rehidratación
Rodajas de zanahoria	7.5	12.0	7.0
Rodajas de cebolla	7.0	8.0	5.5
Espinaca	13.0	13.5	5.0
Flakes de tomate	14.0	20.0	5.0
Pimiento verde	17.0	22.0	8.0

Fuente: (Fellows, 2000)



III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

El presente trabajo de investigación se realizó en los siguientes lugares:

- a. Localidad de Laraqueri del distrito de Pichacani-Laraqueri de la Provincia y departamento de Puno. Donde se sembró quinua y se obtuvo las hojas de quinua.
- b. Laboratorio de Evaluación Nutricional de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano. Donde se realizó los análisis químico proximales.
- c. Laboratorio de Ingeniería de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano. Donde se realizó las pruebas de secado y rehidratación.

3.2. MATERIA PRIMA E INSUMOS

3.2.1. Materia prima

Para esta investigación se utilizó hojas de quinua variedad Salcedo INIA (entre 70 a 90 días desde la germinación) sembradas en la localidad Laraqueri del Distrito de Pichacani-Laraqueri Provincia y Departamento de Puno.

Considerando la necesidad de trabajar con materia prima uniforme se adquirió semilla certificada (Quinua: Cultivar Salcedo INIA) del Instituto Nacional de Innovación Agraria E.E. ILLPA-Puno con una pureza varietal del 99.8%. Procediéndose la siembra en la localidad de Laraqueri en los primeros días del mes de octubre del 2014 por ello los análisis previos se realizaron en los primeros días mes de enero del 2015. Se sembró un segundo lote en el mes enero del 2015 las mismas que se utilizaron en los procesos experimentales de secado en el mes de abril del 2015.

3.2.2. Insumos

Los insumos que se utilizaron en la presente investigación son:

- Cloruro de sodio (NaCl).
- Agua destilada.

3.3. EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS

Para la presente investigación se hizo uso de los siguientes:

3.3.1. Equipos para secado

- ❖ Secador de lecho fijo con circulación de aire forzado (implementado con control adaptivo Software Labview).
- ❖ Balanza analítica (Marca METLER TOLEDO, capacidad min. 0.01gr y máx. 3000gr)
- ❖ Balanza de precisión (marca RADWAG WTB 2000 con puerto RS-232, capacidad 0.01 a 2000gr)
- ❖ Selladora manual (marca IMPULSE SEALER)
- ❖ Vernier digital (marca Stanley, precisión 0.01mm)
- ❖ Termómetro digital (Marca BOECO, -50 a +300°C)
- ❖ Estufa eléctrica (Marca SHIVA, potencia 1000W)
- ❖ Refrigeradora (Marca COLDEX)
- ❖ Baño maría eléctrica con anillos (marca KERTLAB)

3.3.2. Materiales y equipos de laboratorio

3.3.2.1. Químico Proximal

- ❖ Equipo micro digestor Kjendhal (Marca PIREX)
- ❖ Equipo de extracción Soxhlet (consta de: condensador-flujo enfriador, trampa matraz)
- ❖ Secador a vacío (marca BINDER)
- ❖ Mufla, marca Labor Muszeripari. Muvek
- ❖ Determinador de humedad (Marca RADWAG modelo PMC50)
- ❖ Campana de desecación (marca PIREX)
- ❖ Balanza analítica (Marca METTLER TOLEDO precisión de 0.0001gr)

3.3.2.2. Materiales

- ❖ Cooler (Marca COLEMAN)
- ❖ Depósitos de plástico (Valdes, jarras)
- ❖ Olla de acero inoxidable de 5 litros de capacidad
- ❖ Pipetas volumétricas (Marca KIMAX USA, 10ml)
- ❖ Pera de decantación (Marca PIREX)
- ❖ Balones de digestión (Marca PIREX de 100ml)
- ❖ Probeta de 100ml (marca PIREX)

- ❖ Espátula (marca PIREX)
- ❖ Crisoles de porcelana, VSE 44-741
- ❖ Vasos de precipitado (PIREX de 50 y 100ml)
- ❖ Campana de desecación (Marca PIREX)
- ❖ Coladores sintéticos y metálicos
- ❖ Vaso de precipitado (Marca PIREX de 10-250 ml)
- ❖ Erlenmeyer (Marca PIREX de 250ml)

3.3.2.3. Materiales en secado

- ❖ Pipetas volumetricas (Marca KIMAX USA, 10 y 20ml)
- ❖ Bolsas de polipropileno (Brillomas)
- ❖ Probeta de 250ml (marca GIARDINO)
- ❖ Espátula (marca PIREX)

3.3.3. Reactivos para análisis químico proximal

- ❖ Acido bórico al 4% + indicador de pH.
- ❖ Acido clorhídrico (HCl) 0.5N y 0.1N
- ❖ Acido acético 0.1N.
- ❖ Acido sulfúrico (H_2SO_4)
- ❖ Cloroformo 0.1N
- ❖ Solvente Orgánico (Éter de petróleo concentración de 64.5%)
- ❖ Hidróxido de sodio 0.1N
- ❖ Solución buffer de pH 7.0 y 4.0
- ❖ Catalizador (sulfato de potasio + sulfato de cobre)
- ❖ Ioduro potásico (KI) 0.5N
- ❖ Tiosulfato sódico 0.01 y 0.1N.
- ❖ Indicador de Fenofltaleina (al 1% en etanol)

3.3.4. Otros

- ❖ Tijeras
- ❖ Cámara fotográfica marca Sony de 7.2 mega pixeles.

3.4. METODOLOGIA DEL PROCESO EXPERIMENTAL

El trabajo de investigación se realizó de acuerdo a los siguientes pasos:

- a. Las muestras se desinfectaron, se sometieron a pre-tratamiento de escaldado y luego fueron secados por el método estándar (AOAC, 1990). Una vez secado se efectuó el análisis químico proximal por triplicado.
- b. Las muestras (hojas de quinua) fueron desinfectados y se sometieron a pre-tratamientos de escaldado (M1 y M2) siendo M0 la muestra control y fueron secados en el secador de lecho fijo a tres diferentes niveles de temperatura (50, 60 y 70°C) con tres repeticiones por tratamiento. Las muestras secas fueron envasados en bolsas de polipropileno. Se procedió a evaluar las curvas de la cinética de secado de las muestras obteniendo la humedad libre (X), velocidad de secado (DR) y la relación de humedad (MR) que se ajustó con cinco modelos empíricos, se calculó de difusividad efectiva del agua (D_{eff}) y energía de activación (E_a).
- c. Se efectuó la prueba de rehidratación de las muestras deshidratadas por triplicado.

3.4.1. Proceso del análisis químico proximal

Para determinar el efecto del escaldado en la composición químico proximal de las hojas de quinua se procedió a seguir cuidadosamente la secuencia de operaciones mostrado en la Figura 5.

Descripción de operaciones

3.4.1.1. Hojas de Quinua

Para realizar el presente estudio se utilizó como materia prima hojas tiernas y enteras de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), Variedad Salcedo INIA. La misma que fue recolectada con ayuda de una tijera y transportada en un Cooler para evitar daño de las muestras y mantener la temperatura.

3.4.1.2. Pesado/Selección

Una vez transportada al laboratorio se procedió a seleccionar las hojas enteras y sanas de las hojas dañadas, dividiéndose en porciones homogéneos en tamaño y registrándose el peso inicial.

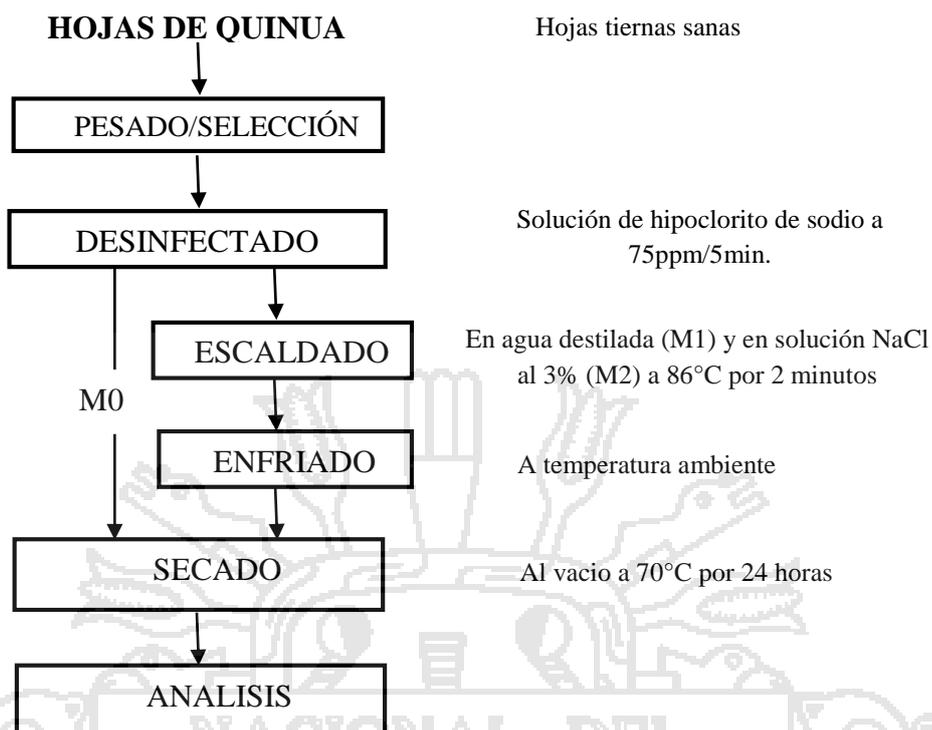


Figura 5 : Flujograma de preparación de muestras para análisis químico proximal.

3.4.1.3. Desinfectado

Se realizó con la finalidad de disminuir la carga microbiana de la materia prima en una solución de agua potable e hipoclorito de sodio a una concentración de 75ppm por cinco minutos.

3.4.1.4. Escaldado

Se efectuó en agua destilada (M1) y en solución de cloruro de sodio al 3% (M2). El proceso se realizó a condiciones de entorno constante 86°C y 2 minutos de duración.

3.4.1.5. Enfriado

Una vez transcurrido el tiempo de escaldado las muestras fueron retiradas del liquido de escaldado e enfriado en agua fría para prevenir la cocción del material experimental.

3.4.1.6. Secado

Una vez que la muestra ha alcanzado temperatura ambiente se eliminó el exceso de agua con papel toalla se pesó y en seguida se procedió a secar en un secador al vacío a 70°C por 24 horas para realizar el análisis químico proximal (AOAC, 1990).

3.4.2. Proceso para obtener las curvas de cinética de secado de las hojas de quinua

Para obtener las curvas de cinética de secado de las hojas de quinua en el presente trabajo de investigación se recurrió a la secuencia de operaciones que se detalla en la Figura 6 como sigue:

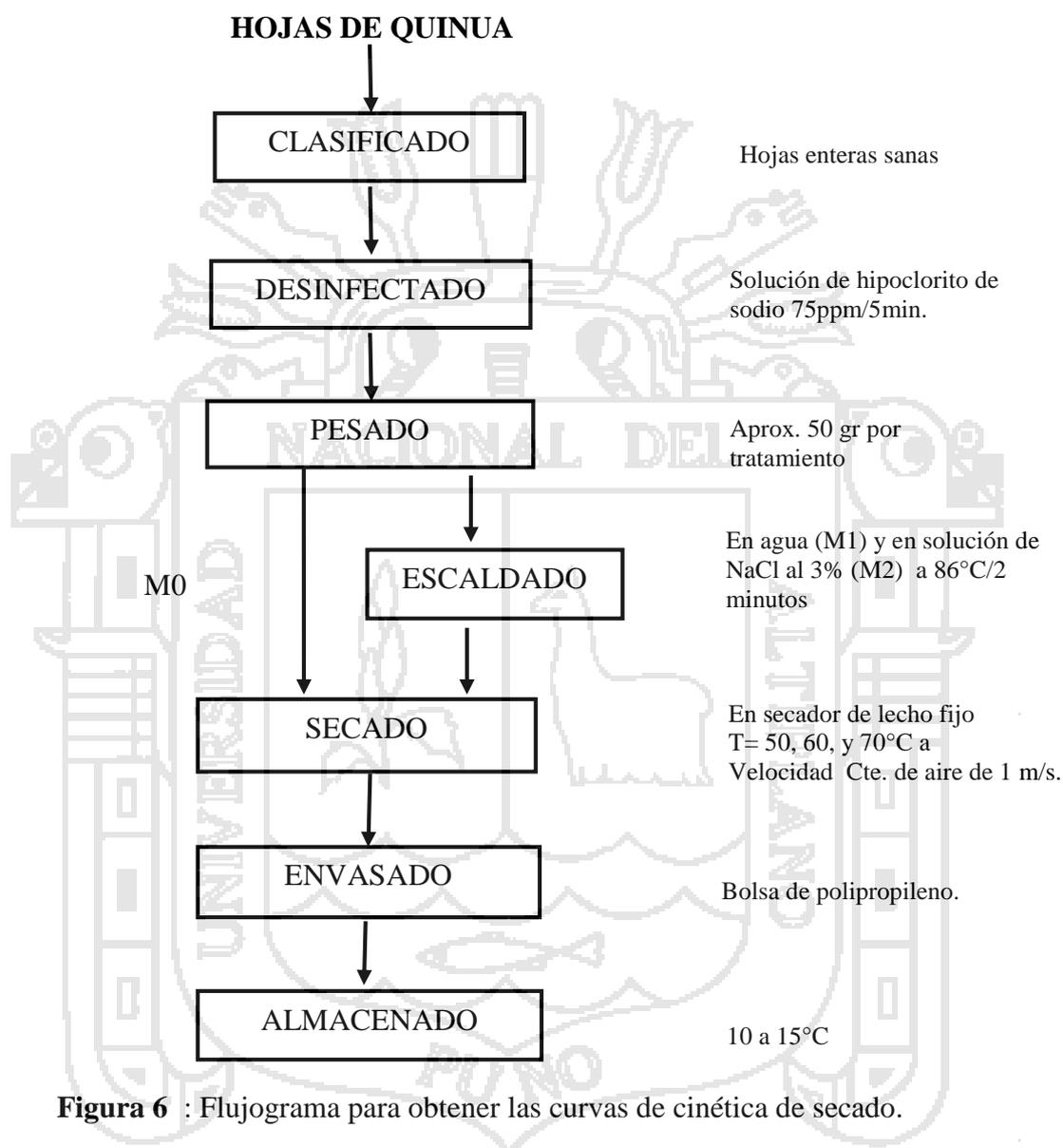


Figura 6 : Flujograma para obtener las curvas de cinética de secado.

Descripción de operaciones

3.4.2.1. Hojas de Quinua

La recolección de las hojas de quinua se efectuó al inicio del panojamiento, 70-90 días después de la siembra, manualmente con la ayuda de una tijera para seleccionar las hojas enteras y sanas, evitando dañar la planta en desarrollo.

3.4.2.2. Clasificado

Las hojas de quinua recolectadas fueron clasificadas, con el principal objetivo de eliminar algunas hojas defectuosas (amarillentas, quebradas, atacadas por insectos) que puedan influir en el secado.

3.4.2.3. Desinfectado

Se realizó una vez transportada al laboratorio en un balde con una solución de hipoclorito de sodio a 75ppm por 5 minutos, esta operación se realizó con la finalidad de reducir los agentes microbianos de la materia prima, transcurrido el tiempo se escurrió y se procedió a enjuagar para eliminar los residuos de cloro.

3.4.2.4. Pesado

Se pesaron las unidades experimentales en balanza analítica de aproximadamente 50 gr. a ser secados.

3.4.2.5. Escaldado

Esta operación se efectuó en una olla de acero inoxidable para las muestras M1 y M2, para esta operación se utilizó agua potable, la cual se calentó hasta el punto de ebullición, una vez alcanzado el punto de ebullición se agregó la muestra y se controló el tiempo una vez que el agua volvía a alcanzar la temperatura de 86°C por 2 minutos para todas las muestras, transcurrido el tiempo se retiró la muestra con la ayuda de un colador que permitió escurrir y se enfrió rápidamente. Se utilizó papel toalla para eliminar el exceso de agua extendiendo la muestra.

3.4.2.6. Secado

Las muestras de peso conocido, se extendieron uniformemente en las bandejas de secado y se dispusieron a la cámara de secado, que fue calentado previamente por 30 minutos a la temperatura de trabajo, la temperatura en bulbo seco del aire de ingreso a la cámara durante el proceso varió de 57±2, 67±2 y 76±2°C, en el centro de la cámara las temperaturas del aire variaron de 50±2, 60±2, y 70±3°C y en la salida de la cámara las temperaturas del aire variaron entre 43±3, 54±3 y 65±2 respectivamente para las tres temperaturas experimentales con una velocidad de aire constante de 1m/s para todos los casos; la humedad relativa del ambiente varió de 45 a 50%. La relación de pérdida de peso con respecto al tiempo fue registrada cada minuto a través del software en una base de datos con una precisión de ±0.01gr. evaluando el tiempo en

alcanzar la humedad libre de $X=0.1$ cercano el peso constante o equilibrio. Se realizó tres replicas para cada tratamiento.

3.4.2.7. Envasado

Una vez que la muestra alcanzó la humedad de equilibrio se procedió a enfriar y luego se envasó en bolsas de polipropileno sellándose herméticamente y rotulando apropiadamente.

3.4.2.8. Almacenado

Las muestras fueron almacenadas en un ambiente fresco, seco y fuera del alcance de la luz solar, con temperaturas de 10 a 15°C, hasta realizar las pruebas de rehidratación.

3.4.3. Proceso para determinar la relación de rehidratación

Para obtener la relación de rehidratación de las hojas de quinua deshidratados en el proceso anterior se recurrió a la secuencia de operaciones que se detalla en la Figura 7.

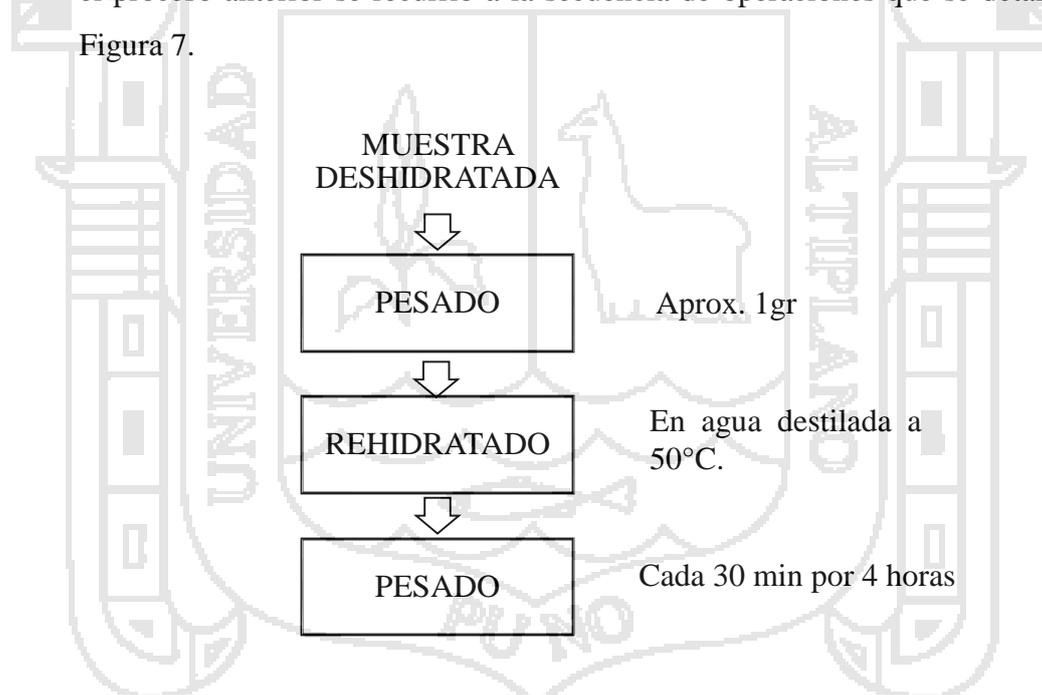


Figura 7 : Proceso para la rehidratación de las hojas de quinua

Descripción de operaciones

3.4.3.1. Muestra Deshidratada

Se utilizó muestras deshidratadas de hojas de quinua.

3.4.3.2. Pesado

Se peso aproximadamente 1gr de muestra con una precisión de 0.01gr

3.4.3.3. Rehidratado

Las muestras fueron introducidas en vasos con 100ml de agua destilada a temperatura constante de 50°C en baño maría. Agitando con una varilla de vidrio.

3.4.3.4. Pesado

Las muestras en proceso de rehidratación se pesaron discontinuamente a intervalos de 30 minutos por 240 minutos. Registrando los pesos para cada muestra que permitió analizar el proceso.

3.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS

3.5.1. Determinación del efecto de escaldado en la composición químico proximal

La finalidad de esta primera parte fue determinar el efecto del escaldado en la composición químico proximal de las hojas de quinua, para lo cual se realizaron los siguientes análisis:

3.5.1.1. Determinación de Humedad (AOAC, 1990)

Se realizó por desecación en estufa a 70°C de una muestra de 5 gramos, hasta lograr peso constante durante 24 horas, la determinación de humedad se hizo por diferencia de peso entre el peso inicial y el peso final obteniéndose en forma directa el porcentaje de humedad (AOAC, 1990).

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{g de muestra}}$$

3.5.1.2. Determinación de proteína total (AOAC, 1990)

Se determinó por el método semimicro Kjeldahl, usando el factor 6.25 para convertir el nitrógeno a proteína total. El procedimiento comprende tres etapas: digestión, destilación y titulación. Se pesó 0.1 g. de muestra seca, se llevó a un balón Kjeldahl, se agregó 2.5 ml. de Acido sulfúrico y se colocó en una cocina de digestión hasta que quede cristalizado. A la muestra digerida se agregó NaOH, e inmediatamente se conectó a vapor para que se produzca la destilación, se conecta el sistema de condensación y se recibe el destilado en el erlermeyer conteniendo solución de ácido bórico con contenido de indicadores de pH; la destilación terminó cuando hay un viraje de color. Luego se procedió con la titulación con HCl. Se tomó

registro del gasto del ácido y se procedió a realizar los cálculos con la siguiente fórmula:

$$\% N = \frac{\text{ml HCl} * \text{normalidad} * \text{Meq N}_2}{\text{g de muestra}} * 100$$

$$\% \text{ Proteína} = \% N \times F$$

$$F = \text{Factor de conversión (6.25)}$$

3.5.1.3. Determination de grasa (AOAC, 1990)

Se determinó mediante el método de Soxhlet, para lo cual se pesó 2 g de muestra seca, se empaquetó en un papel filtro Whatman N°2 se colocó el paquete en el cuerpo del aparato Soxhlet, tarado y libre de humedad (registrando el peso) y luego se agregó el hexano. Seguidamente se conectó a la fuente de calor, al calentarse se evapora el hexano y asciende a la parte superior, allí se condensa por condensación y cae sobre la muestra, regresando al balón por sifón. Se evapora el hexano remanente en el balón en una estufa a 60°C y se enfría en una campana. Para calcular el porcentaje de grasa se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Grasa} = \frac{(\text{peso de balón} + \text{grasa}) - (\text{peso de balón vacío})}{\text{peso de la muestra}}$$

3.5.1.4. Determinación de Cenizas (AOAC, 1990)

Se determinó calcinando 2 g de muestra seca en una mufla a una temperatura de 650°C, para lo cual la muestra se pesó en un crisol previamente tarado y deshumedecido. La calcinación se realizó en la mufla durante 4 horas hasta obtener un peso constante, pasado 30 minutos de calcinación se retira el crisol de la mufla dejándose enfriar, con un disgregador se rompe las partículas incineradas en forma uniforme y se introduce nuevamente a la mufla para culminar la calcinación. Transcurrido el tiempo se retira el crisol de la mufla y se dejó enfriar a temperatura ambiente, se colocó en un desecador y se procedió a pesar. El porcentaje de cenizas se determinó con la fórmula siguiente:

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{\text{Peso del crisol con muestra} - \text{peso de crisol vacío}}{\text{peso de la muestra}}$$

3.5.1.5. Determinación de fibra cruda (AOAC, 1990)

Se determinó mediante los siguientes pasos

Digestión ácida

Se pesó 3 g de muestra (exenta de grasa) en un vaso de 500 ml, la muestra con 200ml de solución de H₂SO₃ se puso a ebullición por 30 minutos. Transcurrido el tiempo se filtró la solución y se lavó con agua destilada caliente hasta neutralizar la acidez.

Digestión alcalina

Se añadió 200ml de solución NaOH al 1.25% y se puso en ebullición por 30 minutos. A continuación se filtró al vacío en una capsula de cerámica porosa, lavando con agua destilada caliente, a continuación se secó en estufa por 2 horas y se procedió a pesar (P1). Finalmente se dispuso en mufla para calcinar la materia orgánica obteniendo la ceniza y registrando el peso (P2). Para calcular el contenido de fibra se utilizó la siguiente relación:

$$\% \text{ Fibra Cruda} = \frac{P1 - P2}{\text{peso de la muestra}}$$

3.5.1.6. Determinación de carbohidratos totales

Se calculó por diferencia de 100, los porcentajes de humedad, proteína, grasa, ceniza y fibra, con la fórmula:

$$\% \text{ carbohidratos} = 100 - \%(\text{humedad} + \text{proteína} + \text{grasa} + \text{ceniza} + \text{fibra})$$

Los resultados obtenidos fueron registrados según Tabla 8 para cada tratamiento y por triplicado.

3.5.2. Obtención y determinación del efecto del escaldado y temperatura en la cinética de secado de las hojas de quinua

Con la finalidad de determinar el efecto del escaldado y temperatura en la cinética de secado, la difusividad efectiva del agua, energía de activación, y en el ajuste con los modelos matemáticos de los datos experimentales se procedió bajo el siguiente detalle:

a. Pérdida de humedad y tiempo de secado

Mediante el secado en el secador de lecho fijo con circulación de aire forzado basado en la tesis de Sarco & Valencia (2009) modificado según Figura 8 hasta

alcanzar peso constante para todos los tratamientos realizados Tabla 9. Para lo cual se pesó 50 g de muestra (hojas de quinua) previamente desinfectado, se pre-trató, y se extendió en las bandejas de la cámara de secado de forma uniforme, que fue previamente calentada por 30 minutos. Se suspendió el conjunto muestra y bandejas de la balanza ubicado en la parte superior de la cámara a continuación se puso en marcha el programa Pomiar Win para el registro automático del peso al tener conectada la balanza y el computador mediante cable RS 232. El peso de la muestra más las bandejas se registraron cada minuto durante todo el proceso de secado hasta alcanzar una humedad libre de 0.1 Kg. H₂O/Kg. SS (Akonor & Tortoe, 2014; Darvishi, 2012; Doymaz, 2012; Doymaz, 2014). La pérdida de peso de la muestra durante el secado se determinó por diferencia de la masa registrada en el tiempo (t) menos la masa final.

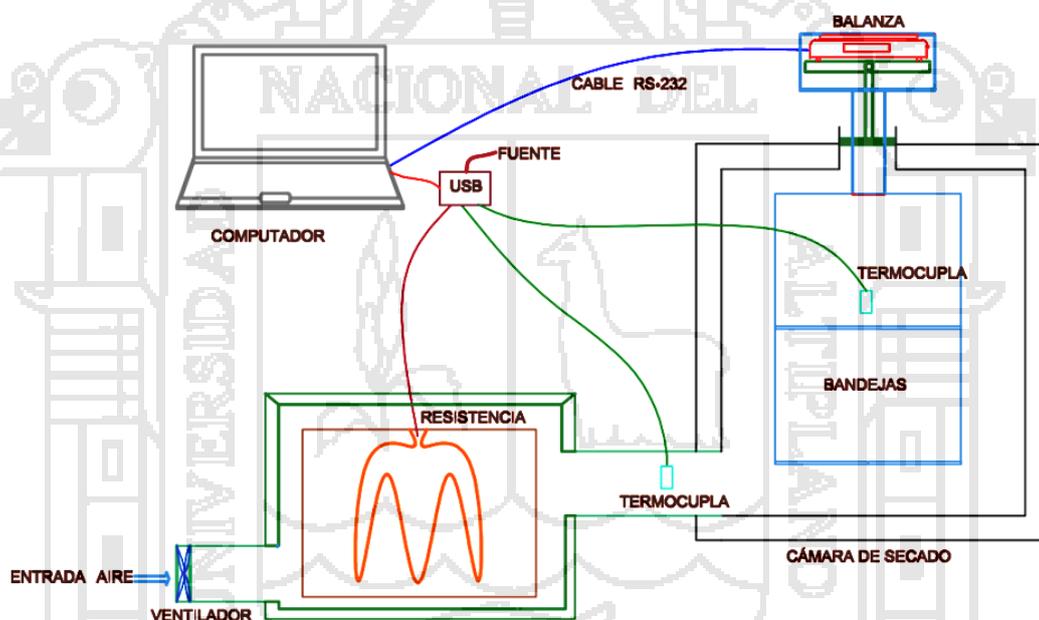


Figura 8 : Diagrama del secador de lecho fijo y adquisición de datos

b. Determinación de curvas de la cinética de secado y modelado

Al concluir los tratamientos de secado de las hojas de quinua, se procedió a realizar las curvas de secado para cada experimento, las que relacionan la humedad de la muestra en función del tiempo de secado (t).

El peso de las muestras dependientes del tiempo fue convertido para los tiempos dados en términos de contenido de humedad libre X usando la Ecuación 2 como Kg.H₂O/Kg. SS. La curva de secado para cada experimento fue obtenido trazando el contenido de humedad libre X de las muestras en función del tiempo de secado.

Para calcular las curvas de velocidad de secado, fue usado el modelo simplificado mencionado por Geankoplis (2007) que se detalla a continuación:

$$DR = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \tag{Ecuación 11}$$

Donde DR es la velocidad de secado en Kg H₂O/h.m², L_s es Kg de solido seco usado y A es el área superficial expuesto al secado en m².

La humedad de la muestra se expresó como relación de humedad MR (moisture ratio) calculado de acuerdo a la Ecuación 12 para las tres repeticiones por tratamiento.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \tag{Ecuación 12}$$

En dónde M₀ es el contenido inicial de humedad de la muestra (Kg. H₂O/Kg. SS), M_t es el contenido de humedad en tiempo t (Kg. H₂O/Kg. SS) y M_e es la humedad de equilibrio (Kg. H₂O/Kg. SS). Debido a que el valor de M_e es relativamente pequeño en comparación a M_t ó M₀, se asume igual a cero y reduciéndose la expresión a $MR = M_t / M_0$ (Agarry *et al.*, 2013; Akonor & Amankwah, 2012; Akonor & Tortoe, 2014; Darvishi, 2012; Doymaz, 2014; Motevali *et al.*, 2013; Taheri-Garavanda *et al.*, 2011).

Tabla 7 : Modelos empíricos utilizados para el ajuste de los datos experimentales

Nombre del modelo	Modelo
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Logaritmico	$MR = a \exp(-kt) + c$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Lewis	$MR = \exp(-kt)$

Utilizando el programa OrigenPro 2015 los valores experimentales MR se ajustaron por regresión no lineal a cinco modelos matemáticos de cinéticas de secado: Henderson-Pabis, Midilli, logarítmico, Page y Lewis. Las ecuaciones correspondientes de cada modelo se muestran en Tabla 7.

Para cada modelo se determinó el coeficiente de determinación múltiple R cuadrado (R^2), coeficiente Chi cuadrado (χ^2) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) entre los valores experimentales y los valores ajustados definidos como:

$$R^2 = \frac{N \sum_{i=1}^N MR_{pred,i} MR_{exp,i} - \sum_{i=1}^N MR_{pred,i} \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{\sqrt{\left(N \sum_{i=1}^N MR_{pred,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{pred,i} \right)^2 \right) \left(N \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i} \right)^2 \right)}} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N}} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N - z} \quad \text{Ecuación 15}$$

En donde $MR_{exp,i}$ y $MR_{pre,i}$ corresponden a los MR experimentales y predichos respectivamente, N es el número de observaciones y z el número de constantes cinéticas de los modelos. El modelo que mejor describe la cinética de secado de las muestras fue elegido como el modelo con el mayor valor R^2 y con el menores valores de χ^2 como RMSE.

c. Cálculo de la difusividad efectiva del agua

Asumiendo que durante el secado el agua se difunde desde las regiones internas (con alto contenido de humedad) hacia la superficie (con bajo contenido de humedad) donde se evapora si la cantidad de calor suministrada es suficiente. Este mecanismo es descrito por la segunda Ley de Fick de la Ecuación 4, que se transcribe a continuación como Ecuación 16 (Crank, 1975; Ratti, 2009; Smith & Hui, 2004):

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} \tag{Ecuación 16}$$

Dónde m es el contenido de humedad (Kg H₂O/Kg SS), t es el tiempo (s), x es una coordenada espacial y D_{eff} es el coeficiente de difusión efectivo (m²/s) (Doymaz, 2014). Si la difusión ocurre en tres dimensiones la Ecuación 4 toma la forma:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 m}{\partial z^2} \right) \tag{Ecuación 17}$$

Las soluciones de la Ecuación 17 para determinar la relación de humedad (MR) en términos de series infinitas a través de soluciones analíticas son diferentes dependiendo de la geometría de las muestras como láminas, cilindros, esferas y paralelepípedos con las apropiadas condiciones iniciales y limites como sigue:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad 0 < x < L, \quad M = M_0 \\ t > 0, \quad x = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \\ t > 0, \quad x = L, \quad M = M_0 \end{aligned} \tag{Ecuación 18}$$

Para el presente estudio se consideró la geometría como lámina, donde los límites según la Ecuación 18 indican: La primera condición que la humedad es inicialmente distribuida en la muestra de forma uniforme. La segunda implica que la transferencia de masa es simétrica con respecto al centro de la lámina. Y la tercera condición indica que la humedad en la superficie del producto alcanza el equilibrio instantáneamente con las condiciones del aire circundante.

La solución para la de difusión de Fick en tales condiciones para una lámina infinita, al asumir el movimiento unidimensional del volumen cambiante de humedad, temperatura constante y coeficientes de difusividad, y inconsiderable resistencia externa puede ser como sigue:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot \frac{t}{4L^2} \right] \tag{Ecuación 19}$$

Donde D_{eff} es la difusibilidad efectiva del agua (m²/s), L es el semi-espesor de la lámina (m), y n es el integral positivo. Para tiempos prolongados de secado la Ecuación 19 anterior se simplifica a una forma restringida de la ecuación de difusión que viene dada por la Ecuación 20:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot \frac{t}{4L^2}\right) \quad \text{Ecuación 20}$$

La misma que puede convertirse como ecuación lineal a:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 \times D_{eff}}{4 \times L^2} \quad \text{Ecuación 21}$$

La difusividad efectiva del agua entonces se calculó de la pendiente de la línea recta al trazar los datos experimentales del secado en términos de $\ln(MR)$ versus tiempo de secado de la Ecuación 21.

d. Cálculo de energía de activación

La difusividad efectiva del agua puede relacionarse con la temperatura mediante la ecuación de Arrhenius como (Jongen, 2002; Ratti, 2009):

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

D_0 = factor pre exponencial de Arrhenius, m^2/s

E_a = Energía de activación, $kJ.mol^{-1}$

R = Constante universal de gases, $8.31451 J.mol^{-1}.K^{-1}$

T = Temperatura en grados Celsius.

La Ecuación 22 puede reordenarse de la siguiente forma

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R(T+273.15)} \quad \text{Ecuación 23}$$

La energía de activación para la difusividad de agua fue entonces posible obtener de la pendiente de la Ecuación 23 al graficar $\ln(D_{eff})$ contra $1/(T+273.15)$.

3.5.3. Determinación de relación de rehidratación

Los experimentos de re-hidratación para todas las muestras fueron llevados a cabo en agua destilada en baño maría a $50^\circ C (\pm 1^\circ C)$, el tiempo de rehidratación fue de 240 minutos (Doymaz, 2014). Para tal fin se utilizó aproximadamente 1g de muestras secas y fueron añadidas a 100ml de agua destilada, en vasos de 250ml. Las muestras fueron retiradas del líquido cada 30 minutos, antes del pesado el exceso de agua fue retirado de las muestras con la ayuda de papel toalla de manera cuidadosa. El peso de las muestras secas y rehidratadas fueron medidas con una balanza electrónica digital (Mettler

TOLEDO, monoblock, Switzerland) con una precisión de 0.01gr. la relación de rehidratación (RR) fue calculado con la Ecuación 24.

$$RR = \frac{W_r}{W_d}$$

Ecuación 24

Donde:

W_r = peso de muestra rehidratado (gr.)

W_d = peso de la muestra usado para la rehidratación (gr.)

3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL

Los diseños experimentales empleados en el presente trabajo de investigación se detallan a continuación:

3.6.1. Determinación del efecto del escaldado en la composición químico proximal de las hojas de quinua

Factores de estudio

Pre-tratamiento (M)

- M0 = sin escaldado (Control)
- M1 = escaldado en agua
- M2 = escaldado en solución NaCl al 3%

VARIABLES DE RESPUESTA

Contenido químico proximal

- Indicadores % (proteína, grasa, ceniza, fibra y carbohidratos)

Tabla 8 : Tratamientos del proceso de investigación.

		AGUA	PROTEINA	GRASA	CENIZA	FIBRA	CARBOHIDRATOS
M0	1						
	2						
	3						
M1	1						
	2						
	3						
M2	1						
	2						
	3						

Para lo cual el diseño estadístico para la determinación del efecto del escaldado en la composición químico proximal de las hojas de quinua fue el DCA (diseño completamente al azar) con tres repeticiones.

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ecuación 25}$$

Dónde:

Y_{ij} : variable de respuesta en la observación en la J- ésimo experimental, sujeto al i- ésimo tratamiento.

μ : Es el efecto de la media general o constante común.

α_i : Es el efecto del i-ésimo tratamiento

ε_{ij} : Efecto verdadero de la j-ésima unidad (réplica), sujeto al i-ésimo tratamiento (error experimental).

3.6.2. Obtención y determinación las curvas de cinética de secado de las hojas de quinua y rehidratación

Donde los factores de estudio fueros los siguientes:

Factores de estudio

Pre-tratamiento (M)

- M0 = sin escaldado (Control)
- M1 = escaldado en agua
- M2 = escaldado en solución NaCl al 3%

Temperatura (T)

- T1 = 50°C
- T2 = 60°C
- T3 = 70°C

Variables de respuesta

- Tiempo de secado (minutos)
- Difusividad (m^2/s)
- Relación de rehidratación

Tabla 9 : Tratamientos del proceso de secado de las hojas de quinua

FACTORES		TRATAMIENTOS
PRE-TRATAMIENTO	TEMPERATURAS	Tratamientos
M0 = sin escaldado	T1 = 50	M0T1=50M0
	T2 = 60	M0T2=60M0
	T3 = 70	M0T3=70M0
M1 = escaldado en agua	T1 = 50	M1T1=50M1
	T2 = 60	M1T2=60M1
	T3 = 70	M1T3=70M1
M2 = escaldado en NaCl	T1 = 50	M2T1=50M2
	T2 = 60	M2T2=60M2
	T3 = 70	M2T3=70M2

En donde el diseño estadístico utilizado para la determinación del efecto del escaldado y temperatura en la cinética de secado de la hojas de quinua fue el diseño completamente al azar con un arreglo factorial como: 3²x3 obteniéndose 9 tratamientos con 27 observaciones, cuyo modelo aditivo lineal es el siguiente (Ibañez, 2009).

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \tag{Ecuación 26}$$

Donde:

Y_{ijk} = Es la respuesta de la k-esima observación bajo el j-esimo nivel del factor pre-tratamiento, sujeta al i-esimo nivel del tratamiento de Temperatura.

μ = Media general o poblacional a la cual pertenecen las observaciones.

α_i = Efecto del i-esimo nivel del factor Pre-tratamiento

β_j = Efecto del j-esimo nivel del factor Temperatura

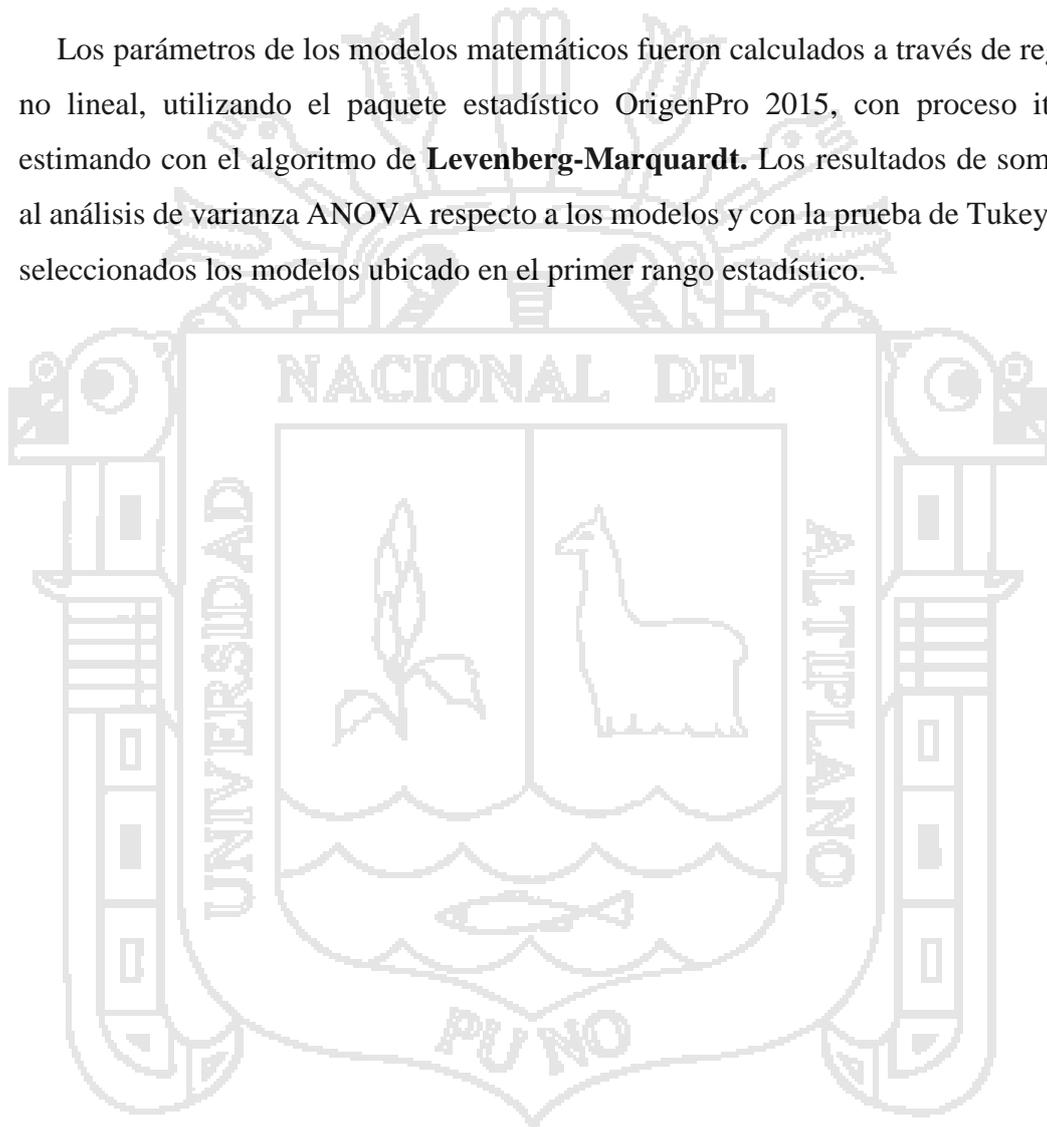
$(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción del i-ésimo nivel del factor M, en el j-ésimo nivel del factor T.

ϵ_{ijk} = Efecto del error experimental distribuido como ϵ_{ijk} .

3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico se utilizó el paquete estadístico OrigenPro 2015 con el que se realizó el análisis de varianza ANOVA de los efectos de M (Pre-tratamiento), T (temperatura de secado), y la interacción MxT. Para los tratamientos significativos se realizó la prueba de Tukey seleccionando el tratamiento ubicado en el primer rango estadístico.

Los parámetros de los modelos matemáticos fueron calculados a través de regresión no lineal, utilizando el paquete estadístico OrigenPro 2015, con proceso iterativo estimando con el algoritmo de **Levenberg-Marquardt**. Los resultados de sometieron al análisis de varianza ANOVA respecto a los modelos y con la prueba de Tukey fueron seleccionados los modelos ubicado en el primer rango estadístico.



3.8. BALANCE DE MATERIA

El balance de materia del proceso de secado, en el secador de lecho fijo, de las hojas de quinua en la Figura 9 indica los cambios del contenido de agua y sólidos secos.

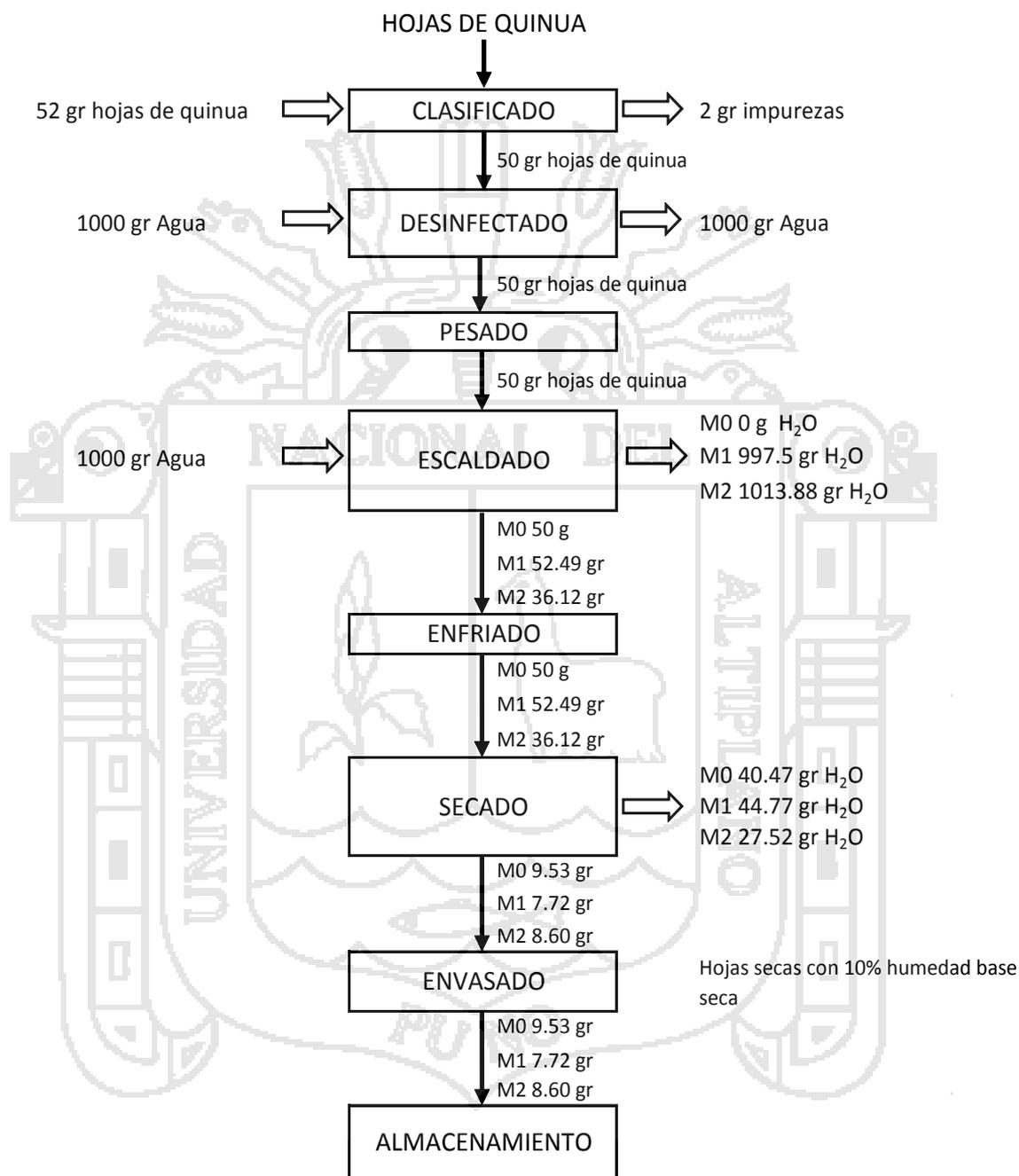


Figura 9 : Balance de materia del proceso de secado de hojas de quinua

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE ESCALDADO EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICO PROXIMAL

Los resultados de la composición químico proximal de las hojas de quinua sin y con pre-tratamiento en términos de sólido seco con sus respectivas desviaciones estándar y con letras diferentes que indican diferencia significativa al $P < 0.05$ se presenta en la Tabla 10 calculados de acuerdo al reporte emitido por el Laboratorio de Evaluación Nutricional la misma que se aprecia en el Anexo 8, en la Figura 10 se presenta la grafica de los diferentes componentes en términos de base seca, las líneas verticales indican la amplitud de las respectivas desviaciones estándar y letras diferentes indican diferencia significativa al $P < 0.05$.

A continuación realizamos una comparación de las medias y la discusión respectiva para cada componente, para lo cual se realizó un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA) al 95% de confianza y para los tratamientos significativos se realizó una comparación múltiple de medias (Tukey) al 99% de confianza para determinar los tratamientos que son diferentes unos de otros.

Tabla 10 : Composición químico proximal de las hojas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) variedad Salcedo INIA, expresada como (gr/100gr SS)

COMPONENTES	CONTROL (M0)	ESCALDADO EN AGUA (M1)	ESCALDADO EN NaCl (M2)
Proteína	30.47±0.26 ^a	28.37±0.42 ^b	29.88±0.11 ^a
Grasa	8.49±0.12 ^c	8.13±0.31 ^c	8.47±0.28 ^c
Ceniza	20.03±0.27 ^d	17.17±0.42 ^e	20.95±0.35 ^d
Carbohidratos	28.00±0.61 ^f	36.27±0.51 ^g	27.85±0.29 ^f
Fibra	13.00±0.18 ^h	10.07±0.02 ⁱ	12.85±0.23 ^h

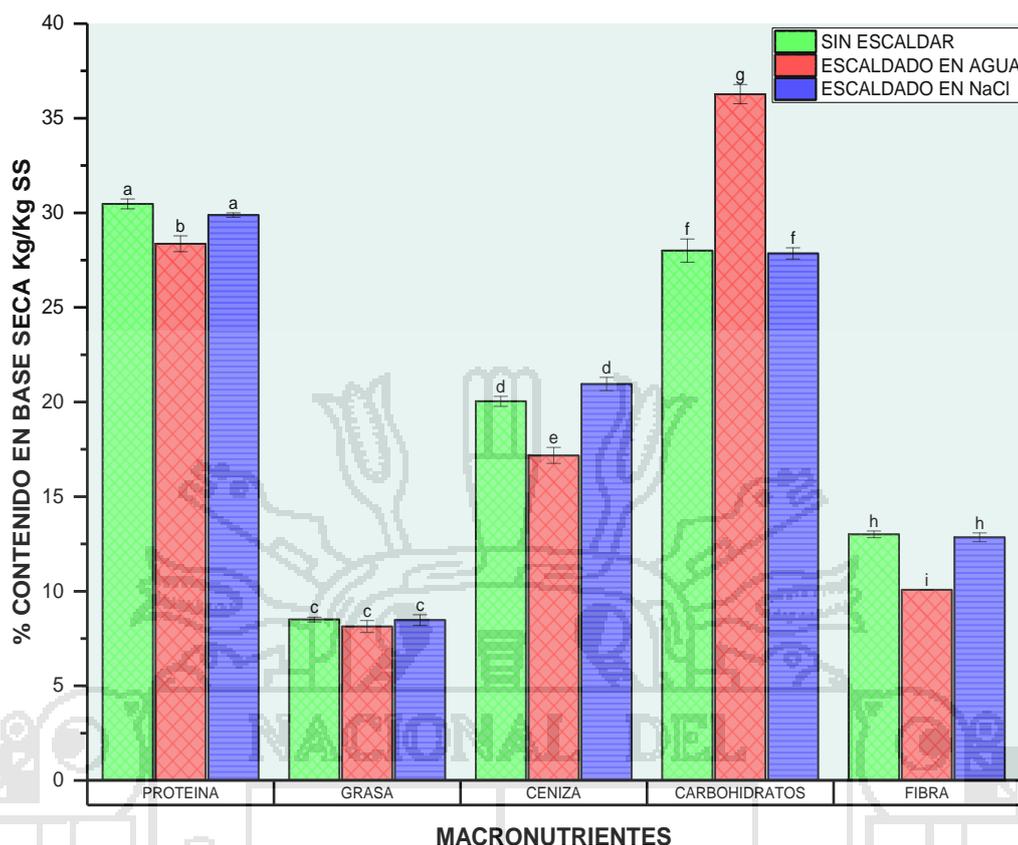


Figura 10 : Composición química proximal de las hojas de quinua sometidas a diferentes pre-tratamientos.

4.1.1. Proteína

Realizando una comparación del contenido proteico de la muestra M0 variando de 28.37 a 30.47% de la Tabla 10 con los valores reportados por Tapia (1979) quien indica un valor de 3.3% en base húmeda la cual es menor a los resultados de la presente investigación según Anexo 8, pero ligeramente superior a los valores expresados en base seca reportados por Schlick (2000), Koziol (1992) y Galarza (2010) valores que varían de 18.7% a 27.84%, esta diferencia se atribuye a la variedad y de las muestras con la que se trabaja.

Al analizar el contenido proteico de las muestras sometidas a pre-tratamientos y el control El ANOVA en la Tabla 11 evidencia una diferencia altamente significativa ($P < 0.05$) entre los valores de proteína registrados por cada uno de los pre-tratamientos, con un nivel de confianza de 95%, es decir que existe una diferencia estadística de las medias del contenido proteico entre los tratamientos a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 11 : Tabla ANOVA a $P < 0.05$ para proteína

F. de V.	G.L.	Suma de Cuadrado	Cuadrado Medio	Fc	P	Sig.
Tratamientos	2	7.08642	3.54321	41.4518	3.0739×10^{-4}	**
Error	6	0.51287	0.08548			
Total (Corr.)	8	7.59929				

** Al nivel de 0.05, las medias son significativamente diferentes

CV=0.989%

La prueba de Tukey ($P < 0.01$) para determinar las medias que son significativamente diferentes unos de otros de la Tabla 12 indica que el contenido proteico medio de la muestra M1 es significativamente diferente de las muestras M0-M2 que son relativamente homogéneas al nivel de 0.01 como evidencia la Figura 10; siendo la muestra M1 la que posee menor media 28.37% y la muestra M0 con mayor media 30.47%.

El contenido proteico en las muestras M1 (28.37%) fueron inferiores que M2 (29.88) este resultado se atribuye a la hidrólisis durante el escaldado en la cual se perdió las proteínas hidrosolubles y/o compuestos nitrogenados no proteicos. Así como es sostenido por previas investigaciones (Jongen, 2002; Reyes *et al.*, 2004) que siendo el escaldado un proceso de tratamiento térmico conlleva a inevitables pérdidas de compuestos hidrosolubles especialmente en el escaldado en agua. Pero contradiciendo con Ayorkor (2009) que reporto una diferencia no significativa del contenido proteico para muestras frescas y escaldadas de *M. Oleifera* y *M. stenopetala* atribuyendo la misma a la diferencia de especie.

Tabla 12 : Prueba de Tukey a $P < 0.01$ para proteína

Pre-tratamiento	N° Obs.	Media	Grupos
M0	3	30.47	X
M2	3	29.88	X
M1	3	28.36	X

Comparación	Dif. media	SEM	LCL	UCL	SIG.
M1-M0	-2.10667	0.23872	-3.17524	-1.0381	1
M2-M0	-0.59	0.23872	-1.65857	0.47857	0
M1-M2	1.51667	0.23872	0.4481	2.58524	1

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.01

Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.01

4.1.2. Grasa

Realizando una comparación del contenido de grasa de la muestra control 8.49% de la Tabla 10 con los valores reportados por Tapia (1979) quien indica un valor de 2.1% la cual es muy inferior ya que está expresado en base húmeda, pero por encima a los valores reportados en base seca por Schlick (2000), Koziol (1992) y Galarza (2010) valores que varían de 1% a 6%.

Al analizar el contenido de grasa de las muestras sometidas a pre-tratamientos con el control El ANOVA en la Tabla 13 indica que no existe diferencia significativa ($P > 0.05$) entre los valores de grasa registrados para cada uno de los pre-tratamientos, con un nivel de confianza de 95%, es decir que no existe una diferencia estadística entre las medias del contenido graso de los tratamientos a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 13 : Tabla ANOVA a $P < 0.05$ para grasa

F. de V.	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Fc	P	Sig.
Tratamientos	2	0.25549	0.12774	1.97985	0.218	n.s.
Error	6	0.38713	0.06452		6	
Total (Corr.)	8	0.64262				

CV=3.037%

El contenido graso en las muestras escaldados en Agua (8.13%) fueron inferiores que los escaldados en NaCl (8.47%) y que no varían ampliamente del contenido graso de la muestra control (8.49%) estos resultado se atribuye a la poca solubilidad de la grasa durante el proceso de escaldado. Estos resultados están sustentados por diferentes estudios (Ayorkor, 2009; Jongen, 2002; Reyes *et al.*, 2004; Supriya, 2009) indicando que siendo el escaldado un proceso de tratamiento térmico conlleva inevitables pérdidas de compuestos hidrosolubles por el contrario los compuestos lipídicos son mejor retenidas con los pre-tratamientos y/o fijadas especialmente el β -caroteno y la clorofila que son termo resistentes; así mismo el proceso de escaldado mejora la porosidad de las hojas de los vegetales lo que reduce el tiempo de secado resultando en mayor concentración de materia seca.

4.1.3. Ceniza

Realizando una comparación del contenido de ceniza de la muestra control 20.03% de la Tabla 10 con los valores reportados por Schlick (2000), Koziol (1992) y Galarza (2010) el resultado se encuentra dentro de los valores promedio de 19.1% a 24.7%

Al analizar el contenido de ceniza de las muestras sometidas a pre-tratamientos con el control El ANOVA en la Tabla 14 indica que existe diferencia estadística altamente significativa ($P < 0.05$) entre los valores de ceniza registrados para cada uno de los pre-tratamientos, con un nivel de confianza de 95%, es decir que existe una diferencia estadística entre las medias del contenido de ceniza de los tratamientos a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 14 : Tabla ANOVA a $P < 0.05$ para ceniza

F. de V.	G.L.	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Fc	P	Sig.
Tratamientos	2	23.28309	11.64154	93.7154	2.9845×10^{-5}	**
Error	6	0.74533	0.12422	7		
Total (Corr.)	8	24.02842				

** Al nivel de 0.05, las medias son significativamente diferentes

CV=1.818%

La prueba de Tukey ($P < 0.01$) para determinar las medias que son significativamente diferentes de otros de la Tabla 15 indica que el contenido medio de ceniza de la muestra M1 es diferente de M0-M2 como evidencia la Figura 10; siendo la muestra M2 la que posee mayor media 20.95% y la muestra M1 la que presenta menor media 17.17%; en base seca, indicando que al llevarse el escaldado en agua los minerales se difunden al agua del escaldado en mayor proporción que los minerales ganados en el escaldado en solución de NaCl donde existe absorción de sal por parte del la muestra M0.

El contenido de cenizas en las muestras M1 (17.17%) fueron inferiores que para la muestra M0 (20.03%), este resultado se atribuye a la pérdida de minerales durante el escaldado en agua en la cual las sales minerales de las hojas de quinua se difunden con más facilidad en el agua, lo contrario ocurre en la muestra M2 ya que esta última presenta los iones sodio y cloro que son absorbidos por la muestra hasta el equilibrio durante el proceso de escaldado. Fundamentándose estos resultados en los estudios de Mepba *et al.* (2007) quienes indican que tanto el escaldado y la cocción causaron

significativa $P < 0.05$ reducción de minerales (K, Na, Ca, Zn, Fe y P) en amaranto, espinaca y otros vegetales; de estos minerales K, Ca, P y Mg fueron reportados en mayores concentraciones en las hojas de quinua por Galarza (2010) y Schlick (2000) este último indica además que la variación en el contenido de minerales se atribuye a la diferente composición del suelo. Por otro lado Ayorkor (2009) indica que el contenido de ceniza fue menor en hojas escaldadas en relación a las no escaldadas tanto de *M. Oleifera* como *M. stenopetala* atribuyendo dicha variación a la solubilidad de estos micro elementos en el escaldado.

Tabla 15 : Prueba de Tukey a $P < 0.01$ para cenizas

Pre-tratamiento	N° Obs.	Media	Grupos Homogéneos		
M2	3	20.95	X		
M0	3	20.03333	X		
M1	3	17.17333	X		

Comparación	Dif. media	SEM	LCL	UCL	SIG.
M1-M0	-2.86	0.28778	-4.14818	-1.57182	1
M2-M0	0.91667	0.28778	-0.37151	2.20485	0
M1-M2	3.77667	0.28778	2.48849	5.06485	1

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.01

Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.01

4.1.4. Fibra

Al realizar una comparación del contenido de fibra de la muestra control 13.0% de la Tabla 10 con los valores reportados por Schlick (2000), Koziol (1992) y Galarza (2010) el resultado se encuentra dentro de los valores promedio de 8.02% a 13.7%.

Al analizar del contenido de ceniza de las muestras sometidas a pre-tratamientos con el control El ANOVA en la Tabla 16 indica que existe diferencia estadística altamente significativa ($P < 0.05$) entre los valores del contenido medio de fibra registrados para cada una de los tratamientos, con un nivel de confianza de 95%, es decir que existe una diferencia estadística altamente significativa entre las medias del contenido de fibra de los tratamientos a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 16 : Tabla ANOVA a $P < 0.05$ para fibra

F. de V.	G.L.	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Fc	P	Sig.
Tratamientos	2	16.32142	8.16071	288.81793	1.0865x10 ⁻⁶	**
Error	6	0.16953	0.02826			
Total (Corr.)	8	16.49096				

** Al nivel de 0.05, las medias son significativamente diferentes

CV=1.404%

La prueba de Tukey (P<0.01) para determinar aquellas medias que son significativamente diferentes de otros de la Tabla 17 indica que el contenido medio de fibra en la muestra M1 es diferente de las muestras M0 y M2 como es evidente al observar en la Figura 10. Resaltando que M0 la que posee mayor media 13.00% y la muestra M1 la que presenta menor media 10.07%, en base seca, lo que nos indica que al llevarse el escaldado en solución de NaCl induce la retención de la fibra soluble en las estructuras internas de la muestra a comparación del escaldado en agua.

Tabla 17 : Prueba de Tukey a P<0.01 para fibra

Pre-tratamiento	N° Obs.	Media	Grupos Homogéneos
M0	3	13.00333	X
M2	3	12.84333	X
M1	3	10.07	X

Comparación	Dif. media	SEM	LCL	UCL	SIG.
M1-M0	-2.93333	0.13725	-3.5477	-2.31896	1
M2-M0	-0.16	0.13725	-0.77437	0.45437	0
M1-M2	2.77333	0.13725	2.15896	3.3877	1

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.01

Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.01

El contenido de fibra en las muestras escaldados en Agua (10.07%) fueron muy inferiores que los escaldados en NaCl (12.85%), estos resultados se puede atribuir a la perdida de fibra soluble durante el escaldado en agua mientras que en el escaldado en solución de NaCl el contenido de fibra es perdida pero en una menor proporción gracias a que la solución de NaCl promueve fijar la fibra soluble en las hojas de quinua. Fundamentándose estos resultados en los estudios de (Ayorkor, 2009; Mepba *et al.* 2007) quienes indican que tanto el escaldado y la cocción causan significativa variación

de fibra cruda ($P < 0.05$) en amaranto, moringa, espinaca y otros vegetales; en los estudios en las hojas de quinua por Schlick (2000) indica de que el contenido de fibra aumenta cuando existe alto estrés medio ambiental a la que se exponen los cultivos. Por otro lado Galarza (2010) y Ayorkor (2009) recalcan de que el contenido de fibra en los alimentos es de suma importancia para el flujo gastrointestinal por lo que el contenido en fibra de las hojas de quinua presenta gran potencial.

4.1.5. Carbohidratos

Al realizar una comparación del contenido de carbohidratos de la muestra control 28.0% de la Tabla 10 con los valores reportados por Schlick (2000), Koziol (1992) y Galarza (2010) el resultado se encuentra ligeramente por debajo del rango comprendido de 35.0% a 52.8%.

Efectuando el análisis del contenido de carbohidratos de las muestras sometidas a pre-tratamientos con el control El ANOVA en la Tabla 18 indica que existe diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) entre los valores del contenido de carbohidratos registrados para cada uno de los pre-tratamientos, con un nivel de confianza de 95%, es decir que existe una diferencia estadística entre las medias del contenido de carbohidratos de los tratamientos a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 18 : Tabla ANOVA a $P < 0.05$ para carbohidratos

F. de V.	G.L.	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Fc	P	Sig.
Tratamientos	2	139.25469	69.62734	289.3771	1.08027×10^{-6}	**
Error	6	1.44367	0.24061			
Total (Corr.)	8	140.69836				

** Al nivel de 0.05, las medias son significativamente diferentes

CV=1.60%

La prueba de Tukey ($P < 0.01$) para determinar aquellas medias que son significativamente diferentes de otros de la Tabla 19 indica que la media del contenido de carbohidratos de la muestra M1 es diferente de M0 y M2 estas últimas no son diferentes. Se evidencia que la muestra M1 con mayor media 36.27% y la muestra M2 la que presenta menor media 27.85%, en base seca, por ende los carbohidratos representan un mayor porcentaje de materia seca en la muestra M1.

El contenido de carbohidratos en las muestra M2 (27.85%) fueron inferiores que en M1 (36.27%), este resultado se atribuye a la pérdida de carbohidratos en el medio de escaldado de la muestra M2, en la cual los azúcares de las hojas de quinua se difunden con más facilidad en la solución de escaldado que en la solución de escaldado de la muestra M1. El contenido superior de carbohidrato en M1 se explica con el hecho de que al llevarse el escaldado en agua los demás componentes químicos se reducen además de que la humedad en base húmeda de la muestra M1 es superior a M0 y M2 debido básicamente al factor medio de escaldado. Al relacionar estos resultados con productos similares como los mencionados estudiados en la literatura (Ayorkor, 2009; Mepba *et al.*, 2007) mencionan que los efectos del proceso sobre el contenido de carbohidratos son mínimos pero igualmente encontraron diferencia entre especies.

Tabla 19 : Prueba de Tukey a $P < 0.01$ para carbohidratos

Pre-tratamiento	N° Obs.	Media	Grupos Homogéneos		
M1	3	36.27000	X		
M0	3	28	X		
M2	3	27.85333	X		

Comparación	Dif. media	SEM	LCL	UCL	Sig
M1 M0	8.27	0.40051	6.47719	10.06281	1
M2 M0	-0.14667	0.40051	-1.93948	1.64615	0
M2 M1	-8.41667	0.40051	-10.20948	-6.62385	1

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.01

Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.01

4.2. OBTENCIÓN Y DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL ESCALDADO Y TEMPERATURA EN LA CINÉTICA DE SECADO DE LAS HOJAS DE QUINUA.

Antes de realizar los experimentos de secado se calculó el área que se exponía al secado considerando que las hojas de quinua variedad Salcedo INIA presentan una forma triangular (López *et al.*, 2011; Mujica & Jacobsen, 2000; Rojas, 2011; Salcines, 2009), como se puede ver en Anexo 7 Imagen 2, por lo que se tomó medida del área y el peso de las hojas según el Anexo 1a donde indica que para un peso de 50 gramos el área estimado es 0.1047m^2 considerando un error del 5% se obtuvo el valor de 0.1099m^2 , la misma que fue utilizado para el cálculo de las velocidades de secado Anexo 2, el área estimado está por debajo del área de las bandejas del secador de lecho fijo indicado como 0.11024m^2 (Flores & Valero, 2011; Sarco & Valencia, 2009), este resultado nos indica buena estimación pues existió espacio libre cuando se extendió las muestras en las bandejas del secador que como se aprecia en el Anexo 7 Imagen 6. Por otro lado se calculó el espesor de las hojas de quinua con un vernier digital según el Anexo 1b que resultó con un estimado de $0.5167 \pm 0.093\text{mm}$ de la cual la mitad del espesor es 0.2583mm la misma que se utilizó en el cálculo de la difusividad del agua Anexo 2 y se detalla más adelante.

4.2.1. Perdida de humedad y tiempo de secado

En la evaluación de la pérdida de humedad durante el secado se consideró el contenido inicial de agua y el tiempo en que las muestras alcanzaron el valor de humedad libre de $X=0.1 \text{ kg H}_2\text{O/kg SS}$.

Tabla 20 : Humedad inicial promedio de las hojas de quinua

Muestra	Humedad (% b.h.)*	X (kg H ₂ O/kg SS) *	X (kg H ₂ O/kg SS) Secado
M0	82.69 ± 0.17	4.777	4.782
M1	86.63 ± 0.05	6.479	6.477
M2	78.12 ± 0.11	3.570	3.571

* contenido de humedad durante análisis químico proximal

La humedad inicial de las hojas de quinua sin pre-tratamiento (M0) utilizadas en el presente trabajo de investigación según Anexo 8 reordenando en la Tabla 20 fue de 82.69 ± 0.17 expresados en base húmeda; en términos porcentuales este valor corresponde a 0,8269 kilogramos de agua por kilogramo de sólido húmedo ó 4.777 kg H₂O/kg SS. Las muestra M1 presentó 86.63 ± 0.05 en términos porcentuales lo que equivale a decir 0.8663 kilogramos de agua por cada kilogramo de muestra ó 6.479 kg H₂O/kg SS; mientras que para las muestras M2 se obtuvo 78.12 ± 0.11 en términos porcentuales indicando que existe 0.7812 kilogramos de agua por kilogramo de muestra ó 3.570 kg H₂O/kg SS. Estos resultados son superiores a los valores reportados por (Galarza, 2010; Koziol, 1992; Schlick, 2000) para hojas de quinua en estado fresco, equivalente a 77.80 ± 0.33 en términos porcentuales correspondiendo a 0.7780 kilogramos de agua por cada kilogramo de muestra ó 3.505 kg H₂O/kg SS. Estos resultados se atribuyen a la poca humedad relativa que se tiene en el Altiplano y como consecuencia los cultivos presentan características propias aun dentro de la misma especie (Ayorkor, 2009).

Los resultados de la humedad inicial en el proceso de secado de las muestras se presenta en las tablas del Anexo 2 y la representación grafica se presenta en la Figura 11 donde varió de 6.475 a 6.482; de 4.774 a 4.789 y 3.565 a 3.578 kg H₂O/kg SS para la muestras M1, M0 y M2 respectivamente; existiendo clara evidencia de que la humedad inicial para los diferentes pre-tratamientos permaneció con promedio estable. Estos valores concuerdan en la tendencia de los resultados del Anexo 8. Dando a entender que la humedad inicial de las muestras M0 varía como consecuencia de las condiciones ambientales y el proceso de desinfección de la cual no se eliminó el agua remanente por completo. En la muestra M1 se apreció un incremento de humedad inicial como consecuencia de la expansión de los tejidos y las células durante el pre-tratamiento la misma que no se remueve con facilidad luego del escaldado, considerando además la variación en el espesor de las hojas de quinua la misma afecta en la cantidad de agua absorbida durante el pre-tratamiento. Para el caso de la muestra M2 la Figura 11 indica que los valores de la humedad inicial disminuyen a comparación de la muestra M1 y también son inferiores que los valores para la muestra control M0, así el escaldado en solución de NaCl remueve cerca del 19.48% del contenido de agua libre del material experimental, la misma tendencia se mantiene en todos los tratamientos según tablas del Anexo 2.

Tiempo de secado en alcanzar humedad libre del 10% en solido seco

La variación del tiempo de secado experimentales hasta un nivel de humedad libre en las muestras de $X \approx 0.10$ kg H₂O/kg SS para todos los tratamientos se presenta en la Tabla 21, donde el tiempo está expresado como media \pm SD seguido de letras diferentes indicando diferencia significativa al $P < 0.05$.

Para alcanzar los contenidos de humedad de equilibrio al nivel de 0.10 ± 0.05 kg H₂O/kg SS fueron necesarios tiempos de 242.333, 184.667, 139.667, 388.667, 199.333, 164.667, 210, 200.333 y 135.333 minutos para las muestras 50M1, 60M1, 70M1, 50M0, 60M0, 70M0, 50M2, 60M2, y 70M2 respectivamente basado en las tablas del Anexo 2. Siendo la diferencia en tiempo de secado alrededor de 2.872 veces del secado más lento (50M0) con los más rápidos (70M2 y 70M1). Así la muestra M0 a 50°C fue la que demostró lenta remoción de agua, alcanzando un valor de humedad $X \approx 0.1$, en un tiempo cercano de 388.667 minutos mientras que la misma muestra a 70°C presentó una remoción similar de humedad en 164.667 minutos. La muestra M1 a 50 °C alcanzo un valor aproximado de $X = 0.1$ en 242.333 minutos pero a 70°C la misma muestra alcanzó dicho valor de humedad a los 139.667 minutos aproximadamente. Finalmente la muestra M2 a 50°C alcanzo los mismos niveles de humedad libre a los 210 minutos y a 70°C presentó la máxima remoción de humedad entre todos los tratamientos en aproximadamente 135.333 minutos.

Por otro lado aunque no fue objetivo de la presente investigación cabe mencionar que los tiempos en la que se alcanza la humedad de equilibrio ya sea de adsorción (cuando un producto con bajo contenido de humedad se expone a un ambiente de humedad relativa elevada) o desorción (cuando un producto con alto contenido de humedad se expone a un ambiente con baja humedad relativa) son determinados además de la temperatura por la humedad relativa (HR) del aire, la cual en nuestra región Puno varia de 45 a 50% (Dirección General de Calidad Ambiental, 2013) que es relacionado a la actividad de agua (a_w). Para este enfoque de alcanzar la humedad de equilibrio, la humedad libre (X) del material de secado o rehidratado se grafica en función de la a_w , la cual se conoce como las isothermas y se determinan a presión constante y normalmente en estado estático. Esta relación ha sido ampliamente estudiada para lograr una descripción matemática de los procesos con diversas ecuaciones, entre las que encontramos el modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET) que tienen un rango de

aplicación de solo en a_w 0.3 – 0.4, el modelo de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB) con un rango de aplicabilidad más amplio de 0.1 a 0.9 de a_w (Timmermann *et al.*, 2001). Valores de constantes de desorción para el modelo de GAB para algunos vegetales según literatura se aprecia en Anexo 6a. La actividad de agua varía de 0 a 1 siendo bastante importante en la estabilidad de alimentos pues limita el crecimiento microbiano, así no existe proliferación microbiana a a_w menores de 0.5 la que normalmente representa un contenido de humedad de 10 a 12 % en los materiales alimenticios (Rao *et al.*, 2005). Es por ello que en la presente investigación el secado fue detenido a 10% humedad en base seca.

Tabla 21 : Tiempo de secado de los diferentes tratamientos en minutos.

Tratamiento	Rep.	Tiempo (min)	SEM	Coef. Varianza (%)
50M1	3	242.33±2.52 ^b	1.453	1.04
60M1	3	184.67±5.03 ^d	2.906	2.73
70M1	3	139.67±3.51 ^f	2.028	2.51
50M0	3	388.67±4.04 ^a	2.333	1.04
60M0	3	199.33±5.13 ^c	2.963	2.57
70M0	3	164.67±4.73 ^e	2.728	2.87
50M2	3	210±2.65 ^c	1.528	1.26
60M2	3	200.33±2.52 ^c	1.453	1.26
70M2	3	135.33±4.04 ^f	2.333	2.99

Al efectuar el análisis de varianza ANOVA del tiempo de secado la misma que se muestra en la Tabla 22 indica que existe diferencia estadística altamente significativa ($P < 0.05$) entre los pre-tratamientos, la temperatura y la interacción pre-tratamiento-temperatura, registrados para cada una de los tratamientos, con un nivel de confianza de 95%, es decir que existe una diferencia estadística entre las medias del tiempo de secado de los tratamientos a un nivel de confianza del 95%, resaltando que existe una clara reducción del tiempo de secado en las muestras pre-tratadas y al aumentar la temperatura del aire de secado para un determinado pre-tratamiento. Por ello se realizó las comparaciones múltiples de Tukey para determinar las medias que son significativamente diferentes de otros.

Tabla 22 : ANOVA del tiempo de secado a $P < 0.05$

F. de V.	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor P	Sig.
Pre-tratamiento	2	25962.000	12981.000	842.517	0	**
Temperatura	2	82624.889	41312.444	2681.337	0	**
Interacción	4	30384.444	7596.111	493.017	0	**
Modelo	8	138971.333	17371.417	1127.472	0	
Error	18	277.333	15.407	--	--	
Total corregido	26	139248.667	--	--	--	

**Al nivel de 0.05, las medias son significativamente diferentes

Pre-tratamiento

La prueba de Tukey ($P < 0.05$) para determinar las medias que son significativamente diferente de otros de la Tabla 23 indica que el tiempo de secado medio para las muestras con respecto al pre-tratamiento presentan diferencia significativa unas de otras y no presentan relativa homogeneidad al nivel de 0.05; siendo el pre-tratamiento M0 la que posee mayor media 250.889 minutos y el pre-tratamiento M2 con la menor media de 181.889 minutos.

Tabla 23 : Comparación múltiple de Tukey a $P < 0.05$ para pre-tratamiento

Pre-tratamiento	N° Obs.	Media	Grupos Homogéneos
M0	9	250.889	X
M1	9	188.889	X
M2	9	181.889	X

Comp.	Dif. media	SEM	Valor q	Prob	Alfa	Sig	LCL	UCL
M0-M1	62	1.850	47.386	0	0.05	1	57.28	66.72
M2-M1	-7	1.850	5.350	0.004	0.05	1	-1.72	-2.28
M2-M0	-69	1.850	52.736	0	0.05	1	-3.72	-64.28

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.05

Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.05

Temperatura

La prueba de Tukey ($P < 0.05$) para determinar las medias que son significativamente diferente de otros, la Tabla 24 indica que el tiempo de secado de las muestras con respecto a la temperatura de secado presentan diferencia significativa entre cada

temperatura de secado por lo que no presentan relativa homogeneidad al nivel de 0.05; siendo la temperatura de 50°C la que posee mayor media 280.333 minutos y la temperatura de 70°C con la menor media de 146.556 minutos.

Tabla 24 : Comparación múltiple de Tukey a $P < 0.05$ para temperatura

Temperatura	N° Obs.	Media	Grupos Homogéneos
50	9	280.333	X
60	9	194.778	X
70	9	146.556	X

Com p.	Dif. media	SEM	q Value	Pr ob	Alp ha	Si g	LCL	UCL
60-50	-85.556	1.850	65.389	0	0.05	1	-90.278	-80.833
70-50	-133.778	1.850	102.24	0	0.05	1	-138.500	-129.055
70-60	-48.222	1.850	36.856	0	0.05	1	-52.945	-43.500

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.05

Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.05

A partir de estos resultados se deduce que mientras mayores sean las temperaturas y cuando se pre-tratan las muestras previo al secado, menores son los tiempos requeridos para el secado de las hojas de quinua. Esta misma tendencia fue reportado por investigaciones previas en secado de: rodajas de tomate (Abano *et al.*, 2011), piña (Agarry *et al.*, 2013), zanahoria (Aghbashlo *et al.*, 2009), tomillo (Da Rocha *et al.*, 2012), *Diospyros kaki* L. (Doymaz, 2012), champiñones (Doymaz, 2014), fruto de murtila (Espinoza, 2011), manzanas (Jokić *et al.*, 2009), cubos de papa (Severini *et al.*, 2005), hojas y tallo de cilantro (Silva *et al.*, 2008), y hojas de espinaca (Upadhyaya *et al.*, 2012). Para los productos en mención fueron demostrados que al aumentar la temperaturas de aire se secado en combinación con pre-tratamientos previo al secado, los tiempos de secado disminuyen en forma drástica en comparación al secado a temperaturas bajas y muestras sin pre-tratar.

4.2.2. Curvas de cinética de secado y modelado

En la Figura 11 se representa las curvas del contenido de humedad libre (X) en función del tiempo (t) de secado para todos los tratamientos según las tablas del Anexo 2 donde los resultados se presentan a intervalos de 5 minutos para tener mejor contraste. En general nos muestra que el contenido inicial de agua o humedad libre (X) varió de 3.565 hasta 6.482 kg agua/kg de sólido seco y el de humedad libre al final del proceso varió entre 0.096 a 0.11 kg agua/kg de sólido seco en las muestras secas. Así mismo se observa que el contenido de agua disminuyó con más facilidad cuando las muestras fueron sometidas a pre-tratamiento, y con el incremento de la temperatura del aire de secado. Se aprecia además que la remoción de la humedad libre fue más rápida durante los primeros 100 minutos para todos los tratamientos y luego se hizo más lenta hasta alcanzar un valor cercano a cero (equilibrio).

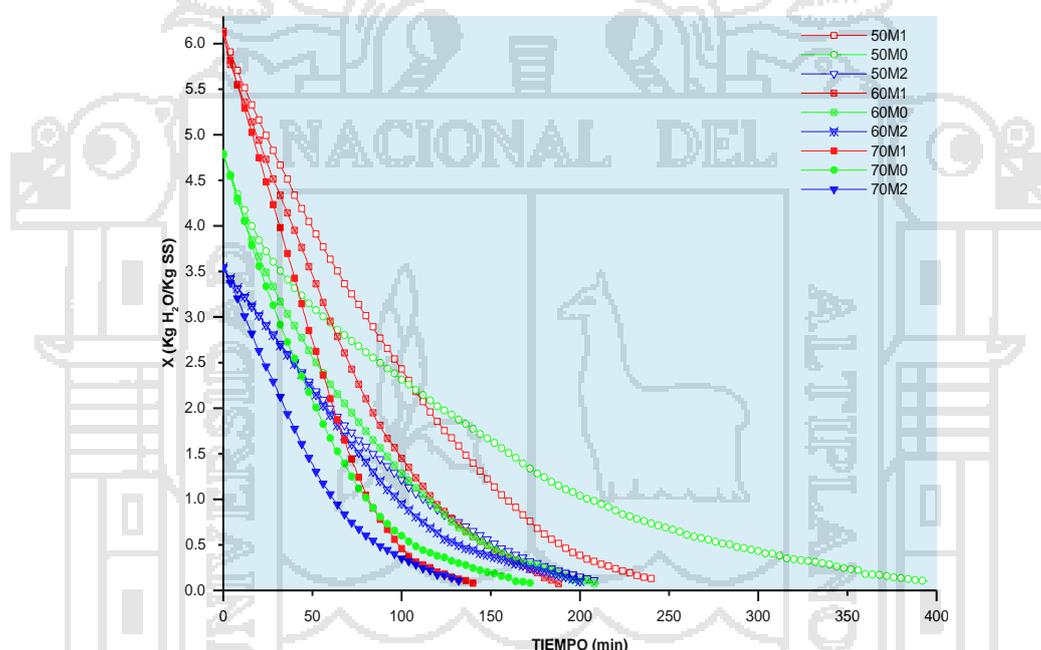


Figura 11 : Variación de la humedad libre (X) en función del tiempo (t) para los diferentes tratamientos.

Los resultados en mención indican claramente que los pre-tratamientos y el aumento de la temperatura contribuye al incremento de la permeabilidad de las membranas celulares de las hojas de quinua, conllevando al incremento de la difusividad del agua lo que reduce significativamente el tiempo de secado como se vio en la sección anterior. Patrones similares fueron reportados en investigaciones previas en secado de: rodajas de tomate (Abano *et al.*, 2011; Taheri-Garavanda *et al.*, 2011), alfalfa (Darvishi, 2012), rodajas de papa (Darvishi *et al.*, 2013), *Diospyros kaki* L. (Doymaz, 2012), champiñones

(Doymaz, 2014), cubos de papa (Severini *et al.*, 2005), y hojas de espinaca (Upadhyaya *et al.*, 2012).

Velocidad de secado

La curva de velocidad de secado (DR) en función del tiempo (t) que se representa en la Figura 12 nos muestra que en los primeros 100 minutos las tasas de evaporación de agua son altas, para las muestras pre-tratadas a comparación de la muestra control, posteriormente disminuyen lentamente a medida que la humedad de la matriz de las muestras son liberadas con más dificultad. A partir de estos resultados se deduce que cuando se aplica pre-tratamiento y mientras mayores sean las temperaturas del proceso de secado, las velocidades de evaporación del agua se incrementan para deshidratar las hojas de quinua. Estos resultados concuerdan con lo mencionado en publicaciones previas del secado de: rodajas de tomate por Abano *et al.* (2011), piña por Agarry *et al.* (2013), tomillo por Da Rocha *et al.* (2012), *Diospyros kaki* L. por Doymaz (2012), champiñones por Doymaz (2014), cubos de papa por Severini *et al.* (2005), y hojas de espinaca por Upadhyaya *et al.* (2012) quienes afirman que cuando se pre-tratan las muestras en combinación con corrientes de aire a mayores temperaturas, la tasa de evaporación del agua desde el material experimental se incrementa con estudios previos en diferentes productos alimentarios.

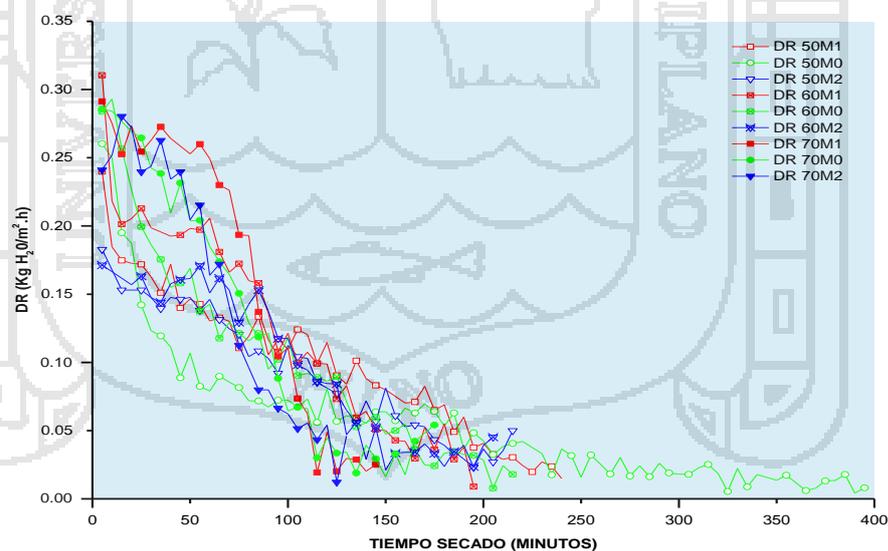


Figura 12 : DR v/s tiempo de secado

La Figura 13 representa los cambios en la velocidad de secado (DR) como una función del contenido de humedad libre (X) para todos los tratamientos, basados en los valores obtenidos del Anexo 2. Las muestras secadas a temperaturas de 70°C

presentaron las mayores velocidades de secado seguido de los secados a 60°C y finalmente con lenta velocidad de secado fueron las muestras secadas a 50°C, además se evidencia que a medida el contenido de humedad libre en la matriz del producto va reduciéndose la velocidad de secado decae pero con bastante fluctuación; estos resultados concuerdan con estudios previos en el secado de vegetales de hojas como la espinaca (Prasad & Prasad, 2013) y el tomillo (Da Rocha *et al.*, 2012). Como se puede apreciar en esta figura la velocidad de periodo decreciente fue mayoritariamente la que predominó tanto en las muestras pre-tratadas y la muestra control durante el secado a diferentes temperaturas. Ello significa que el mecanismo físico que genera el movimiento de la humedad en las muestras es gobernada predominantemente por difusión del vapor de agua o agua ligada a través del tejido seco hacia el aire seco en velocidades cada vez más lentas que la velocidad de evaporación desde la superficie (Doymaz, 2014).

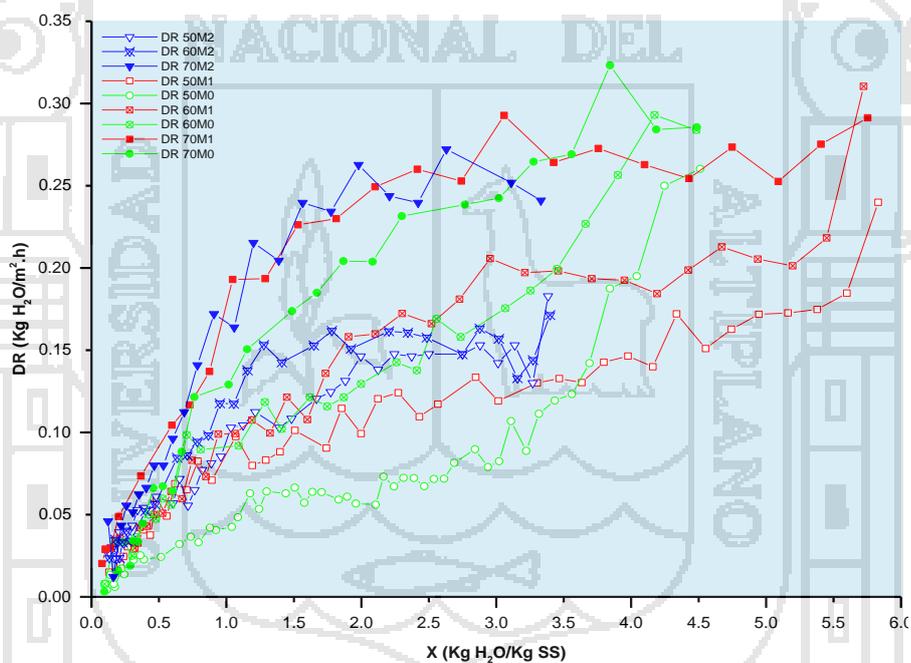


Figura 13 : DR v/s contenido de humedad libre X

Por otro lado en la Figura 13 resalta que las muestras pre-tratadas presentan dos periodos de secado: a velocidad constante y a velocidad decreciente; el período de secado a velocidad constante ocurrió para muestras pre-tratadas M2 en mayor proporción seguida de muestras M1; pero la muestra M0 presentó básicamente el periodo a velocidad decreciente en varios tramos. El mismo comportamiento es observado en la Figura 12 donde se observa que cuando termina el periodo a velocidad constante las velocidades de evaporación del agua decrece con mayor pendiente y el

proceso de secado termina en menor tiempo, por otro lado en los tratamientos donde el secado es a velocidad decreciente en mayor proporción los tiempos de secado son más prolongados y la velocidad de secado va decreciendo paulatinamente, este último comportamiento es evidente en muestras M0 para diferentes temperaturas.

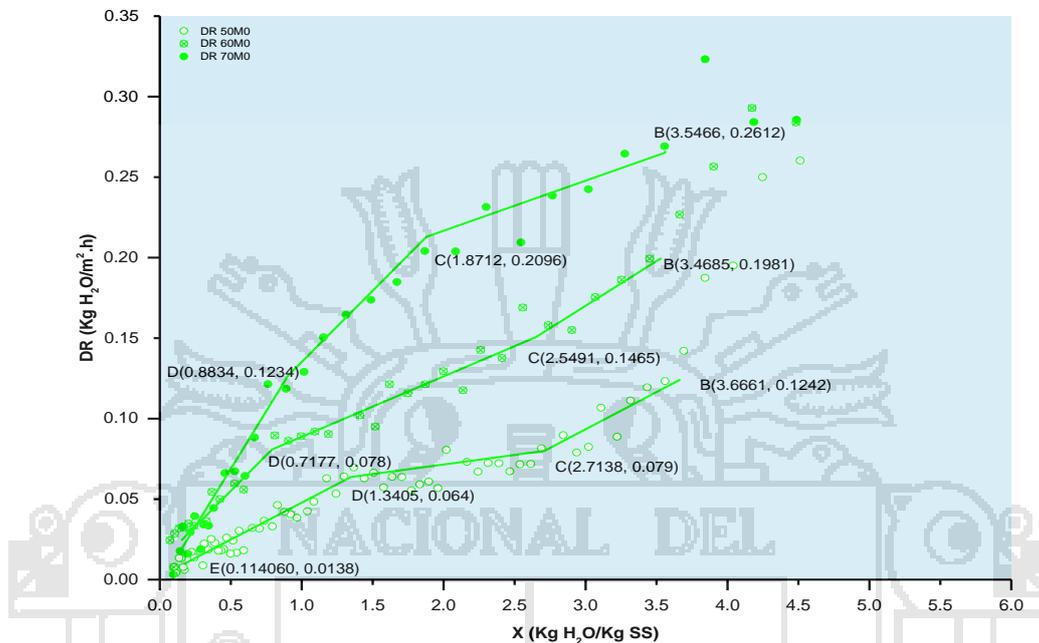


Figura 14 : Periodos de velocidades de secado para muestras sin pre-tratar (M0)

En la Figura 14 se presenta los periodos de velocidad de secado de muestras M0 en el secado a las tres temperaturas de estudio, la figura está basado en las tablas del Anexo 2. Se observa que la integridad del proceso de secado se dio a velocidad decreciente de tres tramos. Las velocidades de secado se estabilizaron en el punto B con valores de 0.124, 0.198 y 0.261 kg H₂O/m².h en contenidos de humedad libre de 3.666, 3.469 y 3.567 Kg H₂O/Kg SS para las temperaturas de secado de 50, 60 y 70°C respectivamente. Las velocidades de secado se mantuvieron mayores en los tramos B-C, C-D y D-E para temperaturas de 70°C seguida de 60°C y a 50°C presentaron valores más bajos. En el punto E la velocidad de secado fue próximo a 0.0138 kg H₂O/m².h. Los valores de velocidad de secado de las hojas de quinua son similares con valores hallados por Prasad & Prasad (2013) en el secado de espinaca, sin pre-tratamiento de 50 a 80°C, quienes no observaron el periodo a velocidad constante, lo anterior también fue reportado por Darvishi (2012) en el secado de alfalfa a varios potencias de microondas. Por otro lado estudios previos en secado de: rodajas de tomate (Abano *et al.*, 2011), alfalfa (Darvishi, 2012), tomillo (Da Rocha *et al.*, 2012), champiñones (Doymaz, 2014), manzana (Meisami-asl & Rafiee, 2009) y hojas de espinaca (Prasad & Prasad, 2013; Simha &

Gugalia, 2013) concuerdan que la velocidad de secado aumenta al incrementar la temperatura, asimismo indican que la difusión es el mecanismo físico que gobierna el movimiento de humedad en las muestras.

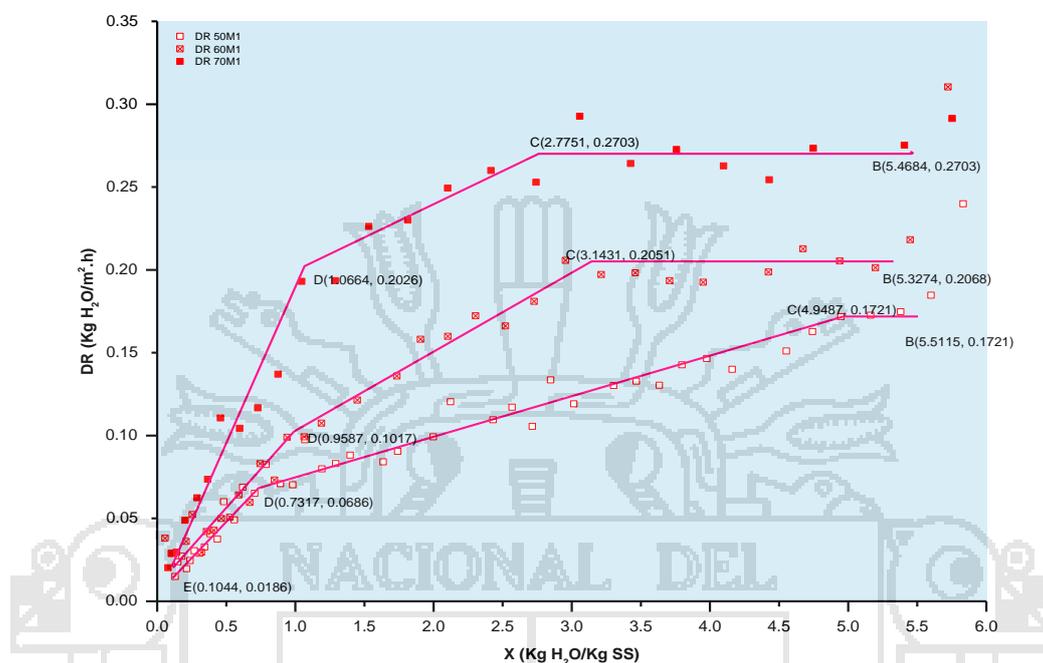


Figura 15 : Periodos de velocidades de secado para muestras escaldadas en agua (M1)

En la Figura 15 se presenta los periodos de velocidad de secado de muestras M1 en el secado a las tres temperaturas de estudio, grafica basado en las tablas del Anexo 2. Se observa que el proceso de secado se dio a velocidad constante y a velocidad decreciente de 2 tramos. Las velocidades de secado se estabilizaron en el punto B con valores de 0.172, 0.207 y 0.27 kg H₂O/m².h en contenidos de humedad libre de 5.112, 5.327 y 5.468 Kg H₂O/Kg SS para las temperaturas de secado de 50, 60 y 70°C respectivamente. La humedad crítica indicado como el punto C disminuyó conforme se aumenta la temperatura de secado de 4.948, 3.143 y 2.775 Kg H₂O/Kg para 50, 60 y 70°C respectivamente. Las velocidades de secado se mantuvieron mayores en los tramos B-C, C-D y D-E para temperaturas de 70°C seguida de 60°C y a 50°C presentaron valores más bajos. En el punto E la velocidad de secado fue próximo a 0.0186 kg H₂O/m².h. Estos resultados concuerdan con Jokić *et al.* (2009) quien encontró que las muestras pre-tratadas de papa presentan velocidades de secado mayores que las muestran sin pre-tratar, asimismo Doymaz (2014) encontró que tanto las muestras pre-tratadas y sin pre-tratar presentan ambos periodos de secado.

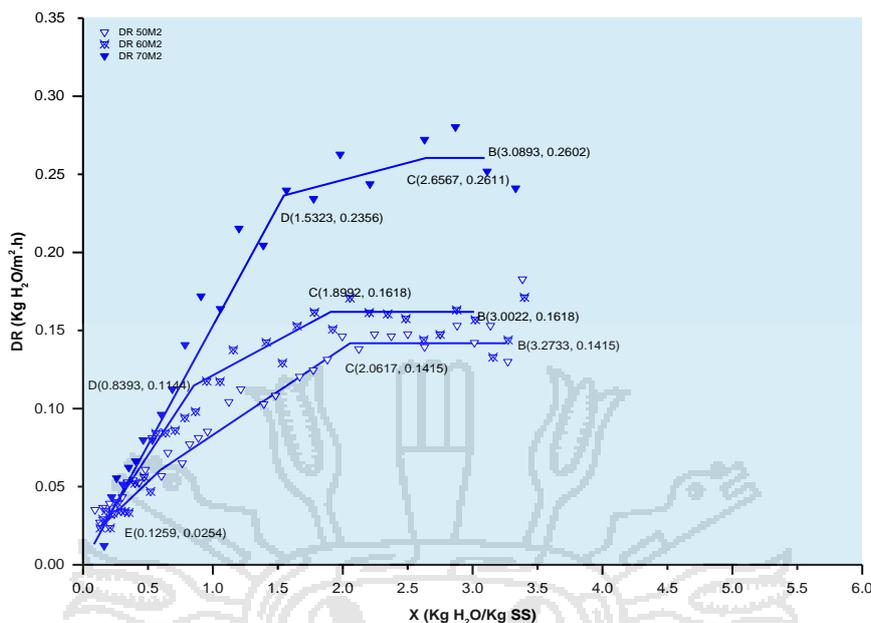


Figura 16 : Periodos de velocidades de secado para muestras escaldadas en solución de NaCl al 3% (M2)

En la Figura 16 se presenta los periodos de velocidad de secado de muestras M2 en el secado a las tres temperaturas de estudio, grafica basado en las tablas del Anexo 2. Se observa que el proceso de secado se dio a velocidad constante y a velocidad decreciente de 2 tramos. Las velocidades de secado se estabilizaron en el punto B con valores de 0.142, 0.1627 y 0.26 kg H₂O/m².h en contenidos de humedad libre de 3.273, 3.002 y 3.089 Kg H₂O/Kg SS para las temperaturas de secado de 50, 60 y 70°C respectivamente. La humedad crítica indicado como el punto C fue identificado en valores de 2.062, 1.899 y 2.656 Kg H₂O/Kg para 50, 60 y 70°C respectivamente. Las velocidades de secado se mantuvieron mayores en los tramos B-C, C-D y D-E para temperaturas de 70°C seguida de 60°C y a 50°C presentaron valores más bajos. En el punto E la velocidad de secado fue próximo a 0.0254 kg H₂O/m².h. Similar resultado reportó Abano *et al.* (2011) en el secado de rodajas de tomate indicando que para mayor temperatura no se observó el periodo a velocidad constante.

Durante el periodo de velocidad constante la temperatura de las muestras se considera que permaneció cerca de la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado hasta que alcanza la humedad crítica, debido al efecto enfriador del agua en evaporación. Aunque no fue determinado con exactitud el punto de la humedad crítica, soportando lo anterior en Rao *et al.* (2005) quienes mencionan que frecuentemente es difícil la

determinación exacta del contenido de humedad crítica debido al encogimiento que ocurre durante el secado; pero indicaron que el contenido de humedad crítica al final del periodo de velocidad constante varía entre 3.5 a 5 Kg agua/Kg de solido seco para vegetales. Por otro lado en prolongados periodos de secado a velocidad constante incrementa la retención de nutrientes debido al enfriamiento por evaporación, el producto permanece a baja temperatura (Rao *et al.*, 2005; Ratti, 2009).

Durante el periodo de secado de velocidad decreciente. Todos los tratamientos M0, M1 y M2 presentaron dos tramos decrecientes lo que significa que las hojas de quinua se comportan como producto higroscópico. Según Ratti (2009) durante el primer tramo, el plano de evaporación se mueve desde la superficie hacia el interior del alimento, y el vapor de agua se difunde a través del solido seco al aire de secado; en el segundo tramo ocurre cuando la presión parcial del vapor de agua es menor a la presión de vapor saturado y el secado se da por desorción. Teóricamente la temperatura de la superficie se elevó hasta alcanzar la temperatura de bulbo seco de la cámara de secado al final del proceso. Adicionalmente Fellows (2000) menciona que inicialmente los factores más importantes son similares a aquellos en el periodo de velocidad constante, pero gradualmente la velocidad del movimiento del agua (transferencia de masa) se vuelve el factor controlante. Los mecanismos que operan mayoritariamente dependen de la temperatura del aire y el tamaño de las muestras alimentarias. Estas no son afectos por la humedad relativa del aire (excepto en la determinación del contenido de humedad de equilibrio) y la velocidad del aire.

La variación en la velocidad de secado con el pre-tratamiento se sustenta en lo mencionado por Fellows (2000) quien indica que la composición y la estructura de los alimentos son determinantes, por ejemplo en el apio y la carne el movimiento de humedad se da con más rapidez en forma longitudinal que perpendicular a la estructura similarmente, la humedad es removida más fácilmente de los espacios intercelulares que dentro de las células. Al cambiar la estructura celular con el escaldado se incrementó la velocidad de secado pero afectó adversamente el rehidratado que se verá más adelante. Adicionalmente, la alta concentración de solutos que en este caso fue el cloruro de sodio incrementó la viscosidad y disminuyó la actividad de agua y así reduciendo la velocidad del movimiento de humedad.

Modelado o ajuste de las curvas de secado

Al convertir los contenidos de humedad (X) en relación de humedad (MR) según Ecuación 12. La Figura 17 representa la relación de humedad (MR) en función del tiempo de secado para todos los tratamientos según tablas del Anexo 2. Donde se aprecia que la relación de humedad (MR) adimensional al inicio del proceso es 1 y va reduciéndose conforme la humedad es removida en el proceso al igual que la humedad libre y es característico del secado de alimentos como indica Rao *et al.* (2005).

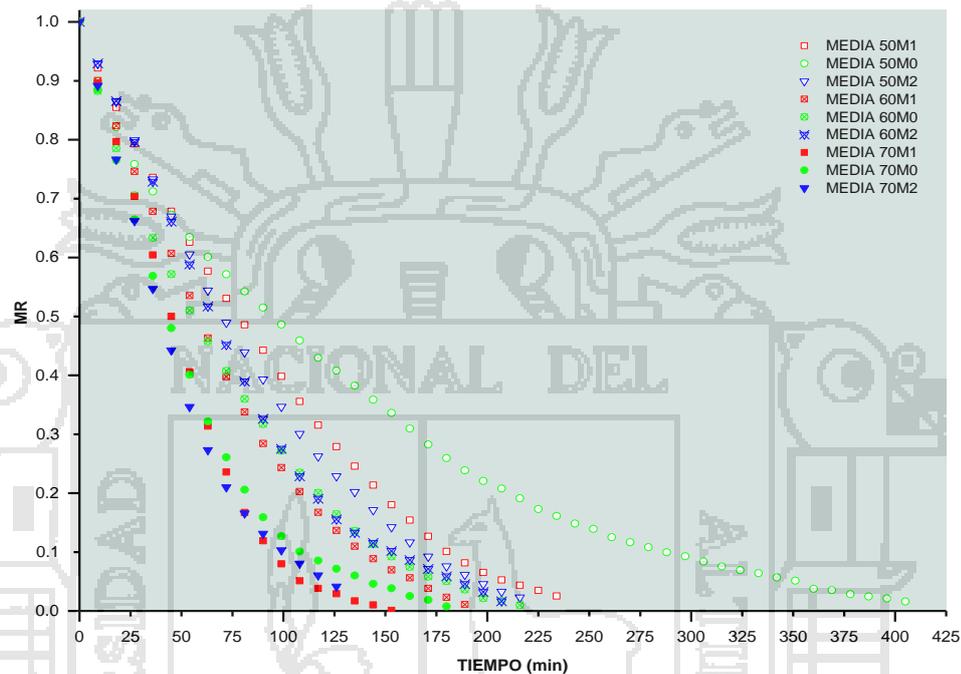


Figura 17 : Curvas de relación de humedad MR en función del tiempo

Los resultados de los indicadores estadísticos correspondientes a los modelos se detallan en el Anexo 3b. El mejor modelo fue elegido como aquel con alto valor de R^2 y menores valores de χ^2 y RMSE resultando ser el modelo de Page seguida del modelo de Midilli las mismas que describen la cinética de secado de las hojas de quinua. De acuerdo a los resultados presentados en Anexo 4 el valor de R^2 obtenido para los modelos de Page y Midilli son significativamente mayores ($p < 0,05$) que el valor de R^2 obtenido para los modelos de logarítmico, Lewis y Henderson-Pabis. Además el valor de χ^2 y RMSE obtenido para los modelos de Page y Midilli son significativamente menores ($p < 0,05$) que los valores de χ^2 y RMSE obtenidos para los modelos de logarítmico, Lewis y Henderson-Pabis. Según Anexo 3b se aprecia que para tiempos cortos el modelo de Page presenta mejor correlación sin embargo para tiempos prolongados de secado, caso de muestras M0, el modelo de Midilli es la que produce el

mejor ajusta con valores MR experimentales. Estos resultados muestran que los valores de los parámetros estadísticos R^2 , χ^2 , y RMSE para el modelo de Page variaron de 0.992390 a 0.99954, 0.000040 a 0.000507, y 0.005330 a 0.404650 respectivamente, mientras para el modelo de Midilli los valores de los mismos parámetros variaron de 0.9925 a 0.9985, 0.000123 a 0.000488, y 0.0167 a 0.3987 respectivamente. Por otro lado el menor valor R^2 reportado fue para el modelo de Henderson-Pabis con valores superiores a 0.9539 en la muestra 70M1, el mayor valor RMSE y χ^2 reportados fue para el mismo modelo de Henderson-Pabis con valores inferiores a 0.6986 y 4.57×10^{-3} en la muestra 70M1.

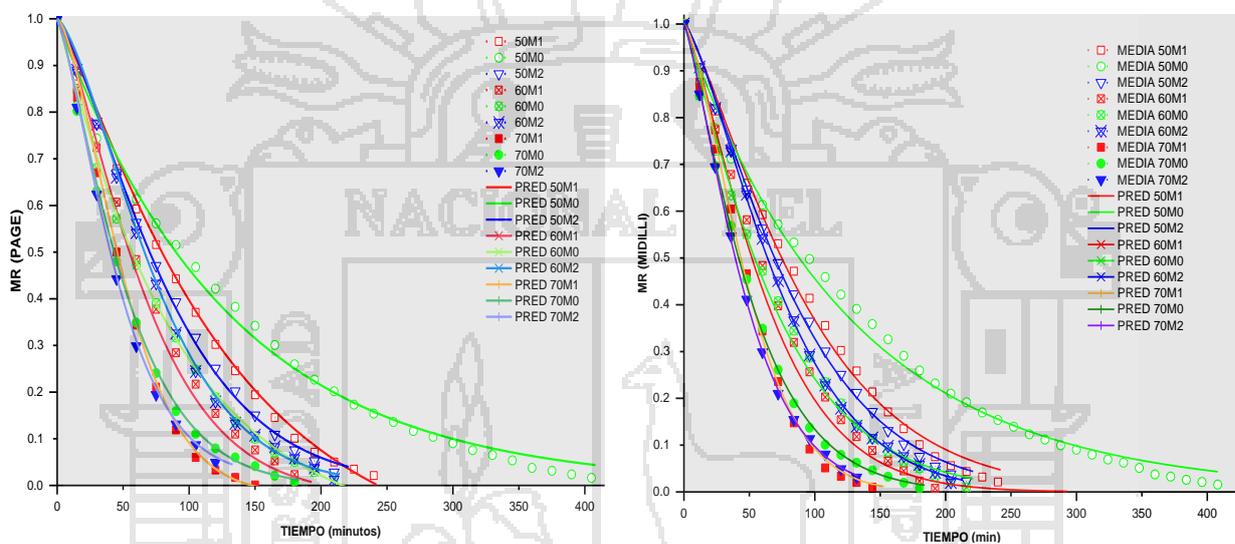


Figura 18 : Variaciones de la relación de humedad (MR) de los datos experimentales y los ajustados por los modelos de Page y Midilli.

La Figura 18 muestra las curvas de los datos experimentales MR con aquellos valores ajustados con el modelo de Page y Midilli como función del tiempo de secado para todos los tratamientos estudiados. Se puede apreciar que hubo una buena concordancia entre los valores de relación de humedad (MR) experimental y ajustados.

Igualmente al graficar los valores predichos por los dos modelos en función de los valores experimentales Figura 19 se reafirma la buena estimación pues se encuentran alrededor de la línea diagonal de 45° . Estos resultados demuestran que los datos experimentales obtenidos se ajustan mejor al modelo de Page y Midilli en comparación al resto de los modelos.

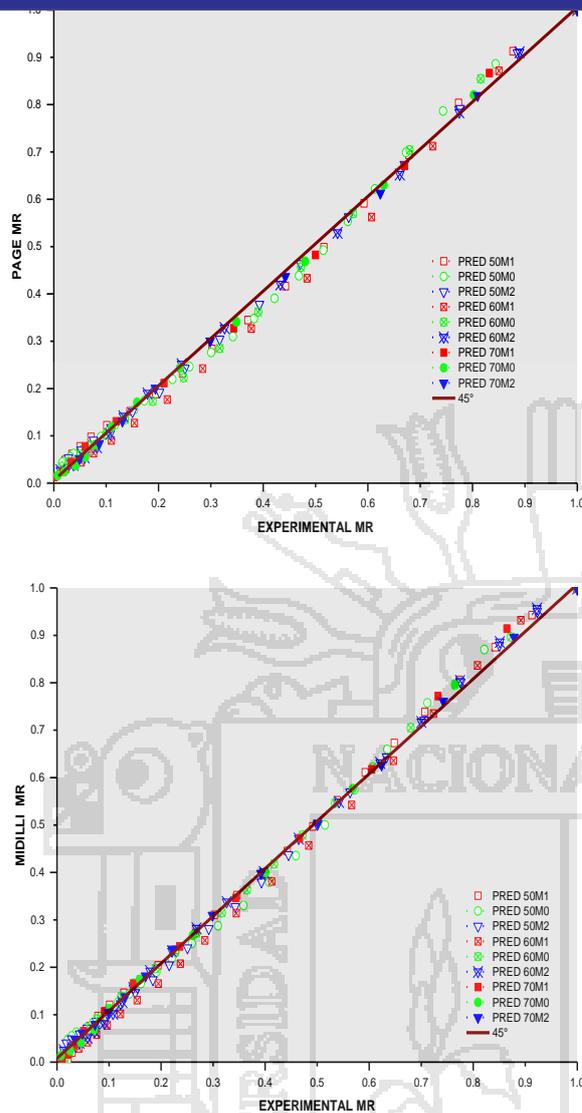


Figura 19 : Comparación de los valores de relación de humedades experimentales y ajustadas con los modelos de Page y Midilli.

Los resultados del modelado de la presente investigación concuerdan con los resultados obtenidos por Akonor & Amankwah (2012) quienes encontraron que el modelo de Page tenía la mejor correlación para el secado de las hojas frescas de *Amaranthus hybridus* y *Xanthosoma sagittifolium* secados en un secador solar con temperaturas de 49.8 y 48.7°C respectivamente; estudios de Upadhyaya *et al.* (2012) en el secado de espinaca (*Spinacia oleracea*) con velocidad de aire constante de 2.2 m/s, muestra control y pre-tratamiento de escaldado y temperaturas de secado entre 55 a 75°C concluyeron que el modelo de Page presentó la mejor correlación; asimismo Abano *et al.* (2011) obtuvieron que el mejor ajuste se obtuvo con el modelo de Page en el secado de rodajas de tomate (*Lycopersicon esculentum*) entre temperaturas de 50 a 80°C además indicaron que los ajustes de los modelos logarítmico y Henderson Pabis se

desvarón de los datos experimentales especialmente para valores de MR bajos, en el estudio del secado de tomillo entre 30 a 70°C realizado por Da Rocha *et al.* (2012) el modelo de Page resultó tener el mejor ajuste a los datos experimentales independientemente de la temperatura de secado; así mismo Darvishi *et al.* (2013) también determinaron que el modelo de Page resultó tener mejor correlación en el secado de rodajas de papa (*Solanum tuberosum*) en el secado a diferentes niveles de potencia en microondas a intervalos de 50 W de 250 a 500 W. Por otro lado en el secado de las rodajas de champiñones sin tratar y tratadas con ácido cítrico al 0.4% en temperaturas de 40 a 70°C realizado por Doymaz (2014) determinó que el modelo logarítmico describió mejor a las curvas de secado para los dos casos; en el modelado de la cinética de secado de rodajas de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) realizado por Taheri-Garavanda *et al.* (2011) para temperaturas de 40,60 y 80°C, humedades relativas de 20, 40 y 60% y velocidad de aire 2m/s determinaron que el modelo de Midilli *et al.* describieron la característica de secado del tomate; así mismo en el estudio de cinéticas de secado de las hojas y tallo de cilantro (*Coriandrum sativum*) a temperaturas de 50 a 80°C con y sin escaldado y con velocidad de aire constante de 1.5 m/s realizada por Silva *et al.* (2008) concluyeron que el modelo de Midilli *et al.* describe mejor la cinética de secado tanto de las hojas como el tallo del cilantro bajo las condiciones estudiadas.

Con los antecedentes mencionados es posible inferir que el modelo que mejor se ajuste a los datos experimentales depende altamente del producto sometido al proceso de secado, así como de las condiciones en que este se encuentre (entero, láminas o rodajas) además de las condiciones propias establecidas en el proceso (temperaturas, pre-tratamiento y velocidad del aire). Además se evidencia que para periodos cortos de secado el modelo de Page tiene mejor ajuste y para periodos largos en modelo de Midilli ajusta mejor al tener varios constantes.

Constantes cinéticas de los modelos.

Los resultados del valor de las constantes, hallados por regresión no lineal, de los modelos considerados de la Tabla 7 se muestran en el Anexo 3a. De acuerdo a los resultados obtenidos para cada tratamiento de secado se observa que el valor de la constante “k” (min^{-1}) presente en los modelos de Midilli, logarítmico, Page, Lewis y Henderson-Pabis tiende a aumentar si las muestras son pre-tratadas y a medida que aumenta la temperatura de secado. Este resultado concuerda con lo obtenido por varios

autores (Riquelme *et al.*, 2009; De Rueda *et al.*, 2012; Espinoza, 2011; Stamm *et al.*, 2012) en donde se comprueba que este constante cinético es dependiente de la temperatura y muestra una tendencia a aumentar con el pre-tratamiento por otro lado indican que las constantes “n”, “a”, y “b” podrían estar más ligados a la estructura del tejido del alimento y a la velocidad del aire de secado, más que a la temperatura.



2.2.3. Difusividad efectiva del agua

La representación gráfica de los valores de $\ln(MR)$ experimentales en función del tiempo para cada tratamiento y las respectivas regresiones lineales correspondientes se muestran en Figura 20 y las pendientes de las regresiones lineales como los coeficientes de determinación para cada tratamiento se muestran en el Anexo 5, las pendientes fueron determinados a variar entre -4.35×10^{-4} a -1.43×10^{-4} . Los altos valores del coeficiente de determinación ($R^2 > 0.97064$), y la no existencia de un patrón en el gráfico de residuales vs el valor ajustado de D_{eff} indican que la segunda ley de la difusión de Fick explica al menos el 95% de los valores experimentales. Los valores de error estándar ínfimos del Anexo 5 indican que la Ecuación 21 predice la relación de humedad durante el secado de las hojas de quinua.

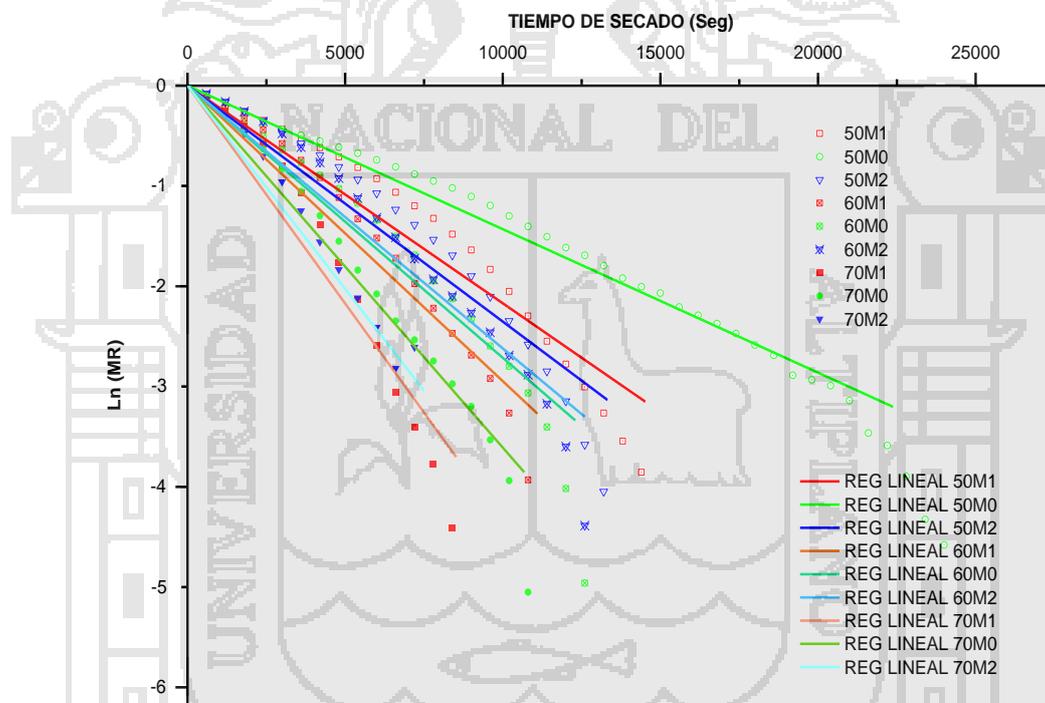


Figura 20 : $\ln(MR)$ v/s Tiempo y regresiones lineales por tratamiento.

Tabla 25 : Valores del coeficiente de difusividad efectiva del agua D_{eff} (m^2/s)

Temp (°C)	M0	M1	M2
50	3.871×10^{-12}	5.870×10^{-12}	6.364×10^{-12}
60	7.340×10^{-12}	7.970×10^{-12}	7.087×10^{-12}
70	9.763×10^{-12}	1.175×10^{-11}	1.097×10^{-11}

Los valores de la difusividad efectiva del agua (D_{eff}) calculados se presentan en la Tabla 25 donde se denota que al dar el pre-tratamiento y incrementar la temperatura de secado, los valores de la difusividad efectiva incrementaron desde $3.871 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ en la muestra 50M0 hasta un máximo de $1.175 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ para la muestra 70M1. Los resultados mostraron diferencias altamente significativas según ANOVA en la Tabla 26 ($P < 0.01$) debidas al pre-tratamiento, la temperatura y como significativa en la interacción ($P < 0.05$) resaltando que existe un claro aumento de la difusividad efectiva del agua en las muestras pre-tratadas y al aumentar la temperatura del aire de secado para un determinado pre-tratamiento. Se efectuó las comparaciones múltiples de Tukey para determinar las medias que son significativamente diferentes de otros.

Tabla 26 : ANOVA a $P < 0.05$ de la Difusividad efectiva del agua

F. de V.	G.L.	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio del Error	F valor	P valor	Sig.
Pre-tratamiento	2	7.58×10^{-24}	3.79×10^{-24}	29.234	1.16×10^{-04}	**
Temperatura	2	9.03×10^{-23}	4.52×10^{-23}	348.52	2.98×10^{-09}	**
Pre-trat x temp	4	2.01×10^{-24}	5.02×10^{-25}	3.872	4.25×10^{-02}	*
Modelo	8	9.99×10^{-23}	1.25×10^{-23}	96.377	8.27×10^{-08}	
Error	9	1.17×10^{-24}	1.30×10^{-25}			
Total corregido	1	1.01×10^{-22}				

** Al nivel de 0.01, las medias son significativamente diferentes

* Al nivel de 0.05, las medias son significativamente diferentes

Pre-tratamiento

La prueba de Tukey ($P < 0.05$) para determinar las medias que son significativamente diferente de otros de la Tabla 27 indica que la difusividad efectiva del agua media para las muestras con respecto al pre-tratamiento presentan diferencia significativa, la muestra M0 con respecto a M1-M2 que presentan relativa homogeneidad al nivel de 0.05; siendo el pre-tratamiento M1 la que posee mayor media 8.53×10^{-12} y el pre-tratamiento M0 (muestras control) con la menor media 6.99×10^{-12} .

Tabla 27 : Comparación múltiple de Tukey a $P < 0.05$ para pre-tratamiento



Tratamiento	N° Obs.	Media	Grupos Homogéneos
M1	6	8.53×10^{-12}	X
M2	6	8.12×10^{-12}	X
M0	6	6.99×10^{-12}	X

Comp.	Dif. media	SEM	Valor q	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
M1-M0	1.534×10^{-12}	2.079×10^{-13}	10.43559	1.11×10^{-4}	0.05	1	9.535×10^{-13}	2.114×10^{-12}
M2-M0	1.128×10^{-12}	2.079×10^{-13}	7.67283	0.00109	0.05	1	5.474×10^{-13}	1.70×10^{-12}
M2-M1	-4.061×10^{-13}	2.079×10^{-13}	2.76276	0.17959	0.05	0	-9.864×10^{-13}	1.743×10^{-13}

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.05

Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.05

Temperatura

La prueba de Tukey ($P < 0.05$) para determinar las medias que son significativamente diferente de otros de la Tabla 28 indica que la difusividad efectiva del agua media para las muestras con respecto a la temperatura de secado presentan diferencia significativa entre cada temperatura de secado por lo que no presentan relativa homogeneidad al nivel de 0.05; siendo la temperatura de 70°C la que posee mayor media 1.08×10^{-11} y la temperatura de 50°C con la menor media 5.33×10^{-12} .

Tabla 28 : Comparación múltiple de Tukey a $P < 0.05$ para temperatura

Temperatura	N° Obs.	Media	Grupos Homogéneos
70	6	1.08×10^{-11}	X 1 1
60	6	7.53×10^{-12}	X 1 2
50	6	5.33×10^{-12}	X 1 2

Comp.	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
-------	----------	-----	---------	------	-------	-----	-----	-----

	2.201x10 ⁻¹²							
70-50	5.454x10 ⁻¹²	2.079x10 ⁻¹³	37.10827	0	0.05	1	4.874x10 ⁻¹²	6.034x10 ⁻¹²
70-60	3.253x10 ⁻¹²	2.079x10 ⁻¹³	22.13371	1.749x10 ⁻⁷	0.05	1	2.673x10 ⁻¹²	3.833x10 ⁻¹²

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.05

Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.05

Los resultados obtenidos de D_{eff} están en el rango normal esperado de 10^{-12} a 10^{-8} m²/s para materiales alimentarios (Abano *et al.*, 2011; Darvishi, 2012; Doymaz, 2014). Estudios previos en productos alimenticios similares a las hojas de quinua reportaron 1.95×10^{-9} y 2.09×10^{-9} m²/s para *Amaranthus hybridus* y *Xanthosoma sagittifolium* respectivamente (Akonor & Amankwah, 2012), valores entre 1.70×10^{-10} y 7.12×10^{-10} m²/s para tiras de champiñones (Doymaz, 2014), de 10×10^{-9} - 10×10^{-10} en el secado de espinaca (Simha & Gugalia, 2013), de 3.69×10^{-12} a 1.19×10^{-10} m²/s en el secado del tomillo entre 30 a 60°C (Da Rocha *et al.*, 2012); al respecto de esta variación entre los materiales alimenticios Rao *et al.* (2005) indican de que la presencia de grasas disminuye significativamente la difusividad del agua así por ejemplo en el caso del secado de las semillas enteras de soya presentó difusividades de 1×10^{-12} a 3×10^{-12} m²/s mientras que las muestras desgrasadas permanecían con difusividades del orden de 5.4×10^{-12} m²/s bajo las mismas condiciones del entorno. Así mismo la presión tiene un efecto negativa en la difusividad del agua, debido a que la difusividad del vapor de agua es inversamente proporcional a la presión en tal sentido la compresión reduce la porosidad y la difusividad efectiva del agua.

Bajo estas consideraciones podemos acotar que el contenido de grasa en las hojas de quinua del 0 en base húmeda y la Tabla 10 en base seca donde no presentó diferencia significativa para los pre-tratamientos tuvo como efecto que el coeficiente de difusividad efectiva del agua permanezca entre los valores reportados, considerando además que el espesor de las hojas de quinua también influyó para mantener los D_{eff} bastante bajo a comparación de otras investigaciones pues muchas veces utilizan verduras de hojas picadas y tienden en las bandejas como si fuera uniforme sin considerar que existe espacio libre entre el material tendido tal fue el caso de Akonor & Amankwah (2012) sin embargo nuestros resultados de D_{eff} concuerdan con los valores obtenidos por Prasad & Prasad (2013) quienes secaron espinaca sin tratamiento a temperaturas de 50 a 80°C y reportaron valores entre 2.150 a 9.710×10^{-12} m²/s.

encogimiento (Ratti, 2009) indica que factores que también influyen en la difusión efectiva del agua son la velocidad de circulación del aire de secado que en la presente investigación fue constante, los tipos de procedimientos y condiciones experimentales para determinar los contenidos de agua, los métodos usados para el tratamiento de los datos obtenidos, y la heterogeneidad de las estructuras alimenticias.

Por otro lado es importante mencionar los cambios de forma y encogimiento de las hojas de quinua que se dio lugar en el proceso de secado en la presente investigación aunque no fue objetivo de la misma. El encogimiento (relación del volumen antes del secado entre el volumen del material experimental seco o expresado como función de una determinada dimensión) y la deformación observada de las hojas de quinua en la Imagen 9 a comparación con el material experimental inicial Imagen 6 del Anexo 7 fueron inevitables así como menciona Jangam *et al.* (2010) estos cambios son debidos al calentamiento y la remoción de agua de la matriz alimentaria que causa estrés en la estructura celular, lo que se manifiesta en el colapso celular, deformación de la forma y contracción de los capilares. Asimismo Rao *et al.* (2005) indican que el modelo general que asume la formación de una capa seca en la parte externa de la muestra y la existencia de la parte no secada en el centro del material experimental generalmente concuerda con los datos experimentales; este último detalle pareció ser más real en el secado de las hojas de quinua pues explicaría el encogimiento irregular de las muestras ya que como se sabe la deshidratación no es uniforme en el material. Concerniente al coeficiente de encogimiento Ratti (2009) indica de que esta depende del método de secado y del material experimental pues su valor se acerca a la unidad para el secado convencional, al vacío y secado con microondas, pero son mucho menores en productos secados por liofilización; así menos del 10% de encogimiento en el producto final es normalmente esperado para productos liofilizados comparados con 80% a 90% cuando el secado es llevado a cabo con aire caliente convencional. En tal sentido fenómenos como el encogimiento y la migración de solutos son posibles factores que no se tomaron en consideración en el presente estudio han podido influenciar en la difusividad efectiva del agua.

2.2.7. Energía de activación

La energía de activación fue calculada al graficar $\ln(D_{eff})$ en función de la inversa de la temperatura ($1/(T+ 273.15)$) según indicada en la Ecuación 23. Los parámetros de regresión lineal a la ecuación de Arrhenius linealizada y los parámetros correspondientes se muestra en Anexo 6. Con las ecuaciones del Anexo 6 se relaciona la dependencia del D_{eff} con la temperatura de las muestras M0, M1 y M2, las mismas que fueron graficados y se presenta en la Figura 21 que evidencia una dependencia lineal con la Temperatura.

Tabla 29 : Energía de activación obtenida para cada tratamiento de secado E_a (kJ/mol)

Temperatura (°C)	M0	M1	M2
50	56.0443	41.8555	32.6622
60	55.6467	41.5585	32.4305
70	55.2723	41.2789	32.2123

En la Tabla 29 se presenta los valores calculados de la energía de activación (E_a), Como se puede apreciar la energía de activación inicial para 50°C son 56.044, 41.855 y 32.66 kJ/mol para M0, M1 y M2 respectivamente. Los valores del coeficiente de determinación ($R^2 > 0.960, 0.993$ y 0.88 para M0, M1 y M2 respectivamente) indican que la dependencia de D_{eff} con la temperatura del aire de secado está representada por la ecuación de Arrhenius para todos los tratamientos.

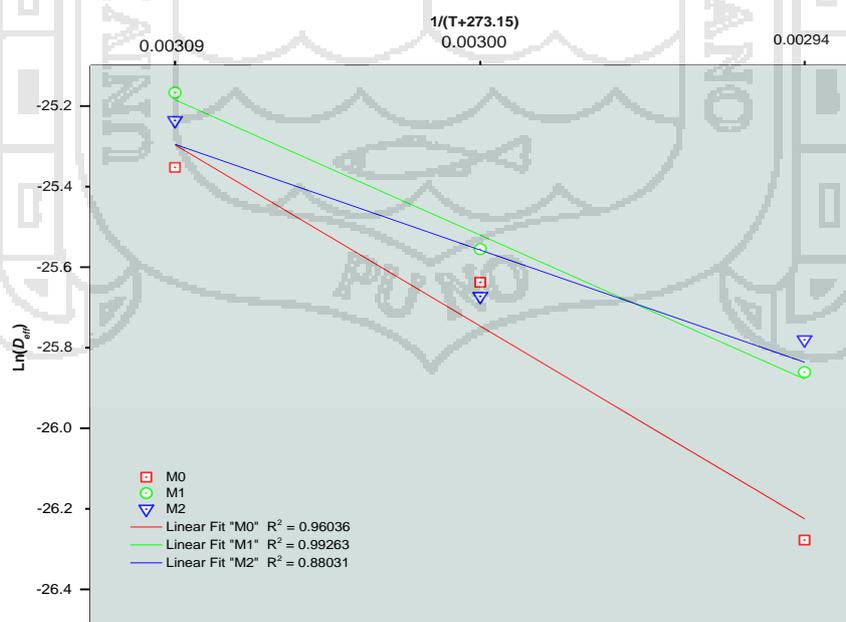


Figura 21 : Variación de $\ln(D_{eff})$ para diferentes inversas de temperatura

Los valores de la energía de activación se encuentran dentro del rango general para los materiales alimenticios de 12.7–110 kJ/mol Doymaz (2014). Al respecto Darvishi *et al.* (2013) resaltan que los valores altos de la energía de activación (E_a) indican menor sensibilidad del coeficiente de difusión efectivo a la temperatura, en tal sentido la muestra M0 a una temperatura de 50°C tiene la menor sensibilidad ($E_a = 56.044$ kJ/mol) mientras que la muestra M2 a 70°C tiene la mayor sensibilidad ($E_a = 32.21$ kJ/mol). Los valores de los resultados obtenidos en el presente estudio están por debajo de los valores encontrados para tomillo 77.16 kJ/mol (Da Rocha *et al.*, 2012), hojas de menta 62.96 kJ/mol citado por Ratti (2009); bastante similar a los valores para espinaca 50.851 kJ/mol (Prasad & Prasad, 2013), valores para champiñones sin tratar y con pre-tratamiento 35.04 y 37.21 kJ/mol (Doymaz, 2014); pero son ligeramente superiores a los valores reportados en estudios para rodajas de tomate 22.28 kJ/mol (Abano *et al.*, 2011), adicionalmente estos últimos señalaron que un proceso controlado por la difusión tiene una energía de activación menor a 34 kJ/mol, por lo tanto los valores estimados de E_a para la presente investigación sugieren que la difusión del agua en las hojas de quinua es un mecanismo limitante para trabajar a bajas temperaturas sin embargo a mayores temperaturas del secado no hay mucha resistencia a la deshidratación por difusión de las hojas de quinua particularmente en la muestra M2 que representa relativa baja demanda de energía.

4.3. RELACIÓN DE REHIDRATACIÓN.

La rehidratación es un importante atributo de calidad para los productos secados. La relación de rehidratación indica los cambios físicos y químicos durante el secado como influencia de las condiciones del proceso, pre-tratamiento y composición de las muestras en solido seco. Los valores de la relación de rehidratación de las muestras calculados con la Ecuación 24 al cabo de 240 minutos se presentan en la Tabla 30, reportado como $\text{media} \pm \text{SD}$ letras diferentes indican diferencias significativas al $P < 0.05$, y la evolución del peso en las muestras que se sometieron a rehidratación a intervalos de 30 minutos se presenta en la Figura 22. La figura nos muestra que la rehidratación de las muestras se da con mayor proporción en los primeros 60 minutos en las muestras M1 y M2 pero en las muestras M0 la rehidratación es bastante lenta y es casi constante a partir de los 30 minutos en adelante de rehidratación. Así mismo se observa que la rehidratación de las muestras pre-tratadas M1 resultó con la mayor relación de rehidratación, seguida de las muestras M2 mientras que la muestra control

Respecto con los niveles más bajos de relación de rehidratación (RR) este comportamiento no varía mucho con la temperatura con la que se secaron las muestras, por lo que las curvas de la relación de rehidratación se encuentran agrupadas por el pre-tratamiento a la que se sometieron. Viendo a detalle es bastante notorio que la muestra 50M1 presentó la mayor relación de rehidratación de 4.759 ± 0.158 con diferencia significativa $P < 0.05$ al cabo de 240 minutos mientras que las muestras sin pre-tratamiento previo al secado M0 presentaron la menor RR sin diferencia significativa $P < 0.05$ respecto a la temperatura a la que fueron secados.

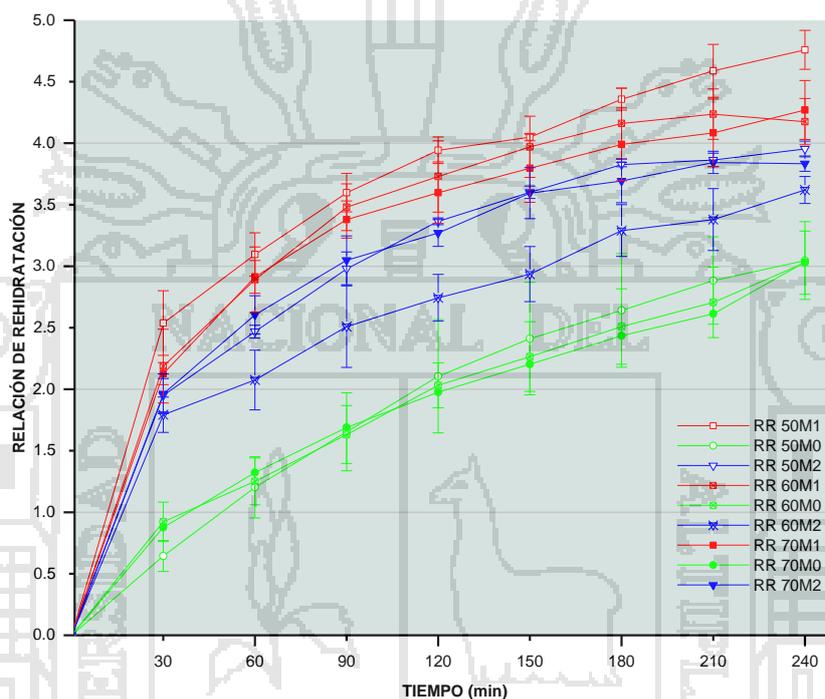


Figura 22 : Relación de rehidratación de las muestras deshidratadas

Tabla 30 : Relación de rehidratación (RR) de hojas de quinua en 240 min.

Temperatura (°C)	M0	M1	M2
50	3.046 ± 0.316^d	4.759 ± 0.158^a	3.953 ± 0.064^{bc}
60	3.029 ± 0.257^d	4.175 ± 0.188^b	3.620 ± 0.110^c
70	3.033 ± 0.125^d	4.270 ± 0.240^{ab}	3.834 ± 0.062^{bc}

Al someter al análisis de varianza, Tabla 31, de dos vías ANOVA los valores de rehidratación finales de la Tabla 30 indica que al nivel de $p < 0.05$ los valores de las

medias son significativamente diferentes para los factores individuales de tiempo y temperatura pero para la interacción resultó no tener significancia, es decir cada factor actúa independientemente. Debido a la imprecisión de estos indicadores se realizó las comparaciones múltiples de Tukey para determinar las medias que son significativamente diferentes de otros.

Tabla 31 : ANOVA a $P < 0.05$ de la relación de rehidratación

F. de V.	G.L.	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio del Error	F valor	P valor	Sig.
Pre-tratamiento	2	8.42919	4.21459	118.4791	4.3574×10^{-11}	**
Temperatura	2	0.45254	0.22627	6.36083	0.00814	**
Pre-trat x temp	4	0.30882	0.0772	2.17033	0.1137	n.s.
Modelo	8	9.19054	1.14882	32.29516	3.871×10^{-9}	
Error	1	0.6403	0.03557			
Total corregido	2	9.83085				

** Al nivel de 0.05, las medias son significativamente diferentes

CV=16.41%

n.s Al nivel de 0.05, las medias no son significativamente diferentes

Pre-tratamiento

La prueba de Tukey ($P < 0.05$) para determinar las medias que son significativamente diferente de otros que se detalla según la Tabla 32 indica que la rehidratación media para las muestras con respecto al pre-tratamiento recibido son significativamente diferente unas de otras y no presentan homogeneidad al nivel de 0.05; siendo la muestra M1 la que posee mayor media 4.40 y la muestra M0 con la menor media 3.04.

Tabla 32 : Comparación múltiple de Tukey a $P < 0.05$ para pre-tratamiento

Pre-tratamiento	N° Obs.	Media	Grupos Homogéneos
M1	9	4.40144	X
M2	9	3.80244	X
M0	9	3.03622	X

Comp.	Dif. Media	SEM	Valor Q	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
M1-M0	1.36522	0.08891	21.7154	0	0.05	1	1.13831	1.59213
M2-M0	0.76622	0.08891	12.18763	2.096×10^{-7}	0.05	1	0.53931	0.99313

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.05

Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.05

Temperatura

La prueba de Tukey ($P < 0.05$) para determinar las medias que son significativamente diferente de otros según la Tabla 33 indica que la rehidratación media para las muestras con respecto a la temperatura de secado presenta diferencia significativa entre las temperaturas de 50 y 60°C, pero no presenta diferencia significativa entre las los grupos de 50-70 y 70-60°C las mismas presentan relativa homogeneidad al nivel de 0.05; siendo a temperatura de 50°C la que posee mayor media 3.91 y a temperatura de 60°C la menor media 3.61.

Tabla 33 : Comparación múltiple de Tukey a $P < 0.05$ para temperatura

Temperatura	N° Obs.	Media	Grupos Homogéneos
50°C	9	3.91967	X
70°C	9	3.71222	X X
60°C	9	3.60822	X

Comp.	Dif. Media	SEM	Valor Q	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
60-50	-0.31144	0.08891	4.95387	0.00682	0.05	1	-0.5384	-0.0845
70-50	-0.20744	0.08891	3.29964	0.07655	0.05	0	-0.4344	0.01947
70-60	0.104	0.08891	1.65424	0.4856	0.05	0	-0.1229	0.33091

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.05

Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.05

Esta observación puede deberse al trastorno estructural de las células causado por el calor del agua de escaldado y el uso del NaCl. Los resultados obtenidos muestran una mejor relación de rehidratación a comparación de los valores del 2.3 al 3.4 hallados para *Diospyros kaki* L. rehidratadas por 240 minutos para muestras secadas entre 50 y 70°C (Doymaz, 2012), del 2 al 2.5 en la rehidratación por 240 minutos en champiñones (*Agaricus bisporus*) secadas sin tratamiento y tratadas en solución de ácido cítrico al 0.5% secadas entre 40 a 70°C (Doymaz, 2014). Mientras Severini *et al.* (2005) reportaron relación de rehidratación de entre 0.5 a 3 para cubos de papa deshidratadas por diferentes métodos que previamente fueron pre-tratadas (escaldadas en agua

destinada, berración salina, aplicación de microondas en agua destilada con sacarosa o solución salina). Sin embargo Akonor & Tortoe (2014) mencionan que, aunque la reconstitución de productos deshidratados es deseable una alta estructura porosa puede llevar a la pérdida de sólidos solubles que resulta perjudicial para los productos.

Cabe mencionar que en los últimos años el estudio de los procesos de re-hidratación ganó gran importancia. Sin embargo, en los trabajos publicados en rehidratación, es común encontrar inconsistencia en los procedimientos de medida como en los cálculos de los índices de rehidratación de los alimentos secos. Las fuentes más significativas de variabilidad en los procedimientos experimentales cuando se mide la rehidratación de los alimentos deshidratados radican en la relación entre la muestra seca y el líquido, variando de 1:5 a 1:50; la temperatura del medio de rehidratación, variando de 5 a 100°C, el tiempo del experimento, con frecuencia entre pocos minutos hasta 24 horas. Por otra parte, diferentes estudios examinan ya sea una o varias partículas, las cuales son devueltas o no al líquido de rehidratación luego del pesado correspondiente, de acuerdo al método utilizado. Las muestras son en algunos casos secados en papel, escurridos en tamiz, o centrifugados para remover el exceso de líquido en la superficie, la cual es evidente en la rehidratación de productos secados: Chayote (Akonor & Tortoe, 2014), *Diospyros kaki* L. (Doymaz, 2012), Champiñones (Doymaz, 2014) y manzana (Jokić *et al.*, 2009). Las divergencias mencionadas limitan el análisis, en consecuencia el uso de los índices calculados de rehidratación en el intento de modelado podría conducir a resultados erróneos (Ratti, 2009).

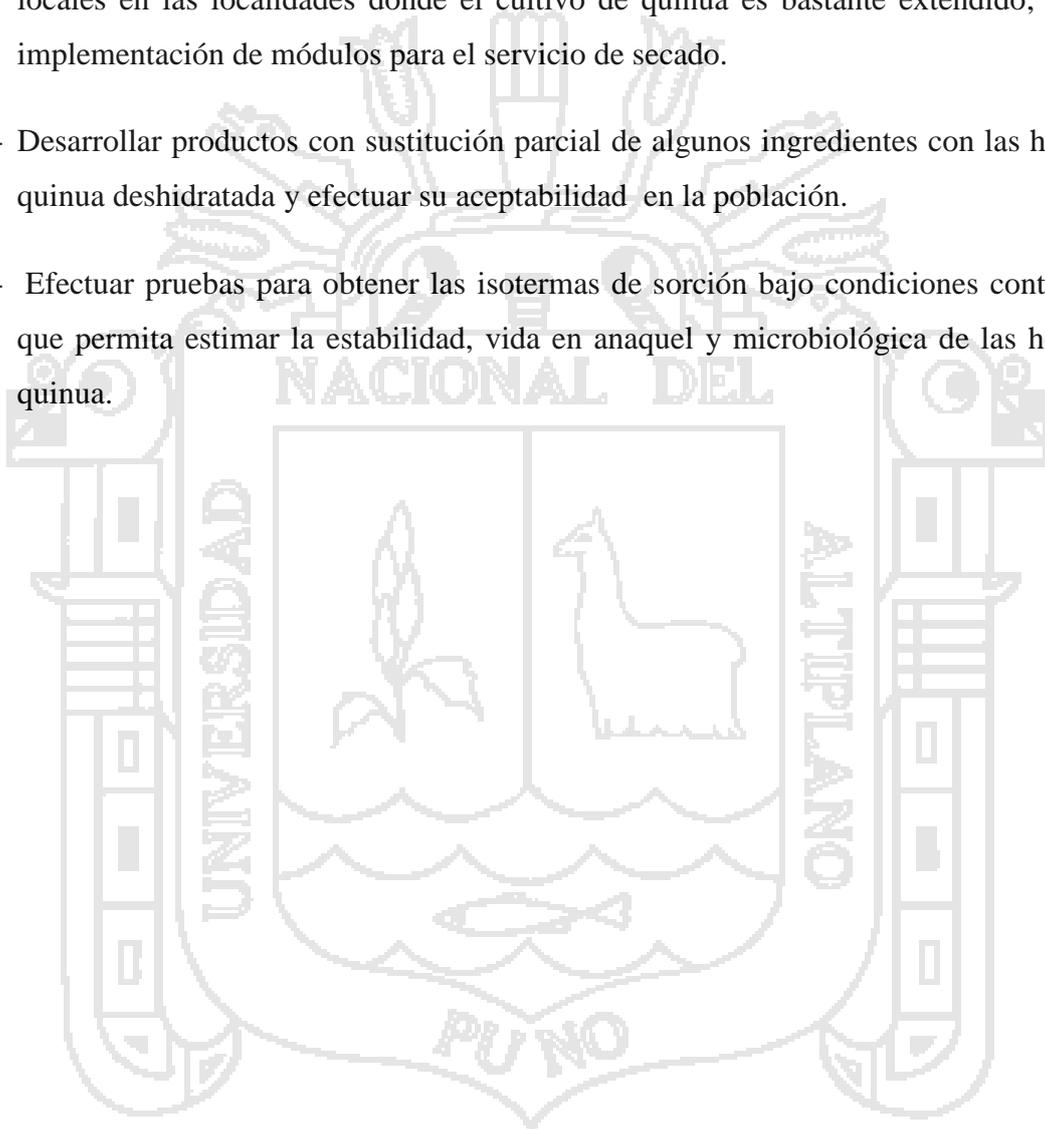
V. CONCLUSIONES

Bajo los objetivos planteados, se concluye:

- 1.- La composición química proximal de las hojas de quinua fue conservada mejor cuando se realizó el pre-tratamiento de escaldado en solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3% mejorando la retención de componentes hidrosolubles y sin diferencia significativa en proteína, grasa, ceniza y fibra respecto a la muestra sin pre-tratamiento.
- 2.- Con temperaturas de 50,60 y 70°C la velocidad de secado de las hojas de quinua sin escaldar varió de 0.014 a 0.26 kg H₂O/m².h y para hojas de quinua con pre-tratamiento de escaldado en agua de 0.018 a 0.27 kg H₂O/m².h con ello la humedad libre del 10% (base seca) se alcanzó en tiempos de 388 a 135 minutos mostrando que el escaldado y temperatura reducen el tiempo de secado. El análisis estadístico aplicado al ajuste de los datos experimentales con 5 modelos de la literatura, mostraron que los modelos de Page y Midilli mostraron buena convergencia con los datos experimentales del secado de las hojas de quinua. Los coeficientes de difusividad efectiva del agua durante el secado de las hojas de quinua bajo las condiciones estudiadas varió de 3.871×10^{-12} a $1.175 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. existiendo una influencia clara de temperatura y pre-tratamientos aplicados desde que la energía de activación se redujo de 56.044 a 32.66 kJ/mol.
- 3.- Las muestras con pre-tratamiento de escaldado en agua y secado a 50°C presentaron los mejor índices de rehidratación (4.75); mientras las muestras sin pre-tratamiento presentaron menores índices de rehidratación (3.03) y sin diferencia con la temperatura de secado.

VI. RECOMENDACIONES

- 1.- Realizar el estudio del efecto con otros pre-tratamientos en el secado de diferentes hojas de los cultivos alto-andinos en las propiedades funcionales y/o micronutrientes particulares. Asimismo se recomienda determinar el encogimiento que se produce durante el proceso.
- 2.- Plantear proyectos de aprovechamiento integral de cultivos alto-andinos a los gobiernos locales en las localidades donde el cultivo de quinua es bastante extendido, para la implementación de módulos para el servicio de secado.
- 3.- Desarrollar productos con sustitución parcial de algunos ingredientes con las hojas de quinua deshidratada y efectuar su aceptabilidad en la población.
- 4.- Efectuar pruebas para obtener las isotermas de sorción bajo condiciones controladas que permita estimar la estabilidad, vida en anaquel y microbiológica de las hojas de quinua.



- Abano, E., Ma, H., & Qu, W. (2011). Influence of Air Temperature on the Drying Kinetics and Quality of Tomato Slices. *J Food Process Technol*, 2(5), 1-9. doi: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7110.1000123>
- Agarry, S. E., Ajani, A. O., & Aremu, M. O. (2013). Thin Layer Drying Kinetics of Pineapple: Effect of Blanching Temperature – Time Combination. *Nigerian Journal of Basic and Applied Science*, 21(1), 1-10. doi: <http://dx.doi.org/10.4314/njbas.v20i1.1>
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Khani, S., & Ghasemi, M. (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. *Int. Agrophysics*, 23, 313-317.
- Akonor, P. T., & Amankwah, E. A. (2012). Thin Drying Kinetics of Solar-Dried *Amaranthus hybridus* and *Xanthosoma sagittifolium* Leaves. *J Food Process Technol*, 3 (8), 4. doi: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7110.1000174>
- Akonor, P. T., & Tortoe, C. (2014). Effect of Blanching and Osmotic Pre-treatment on Drying Kinetics, Shrinkage and Rehydration of Chayote (*Sechium edule*) during Convective Drying. *British Journal of Applied Science & Technology*, 4(8), 1215-1229.
- AOAC. (1990). *Official Methods of Analysis* (15th ed.). Washington DC, USA.
- Ayorkor, O. N. (2009). Effects of Blanching and Dehydration Methods on the Quality of Moringa leaf Powder used as Herbal Green tea. (Master of Science), Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Ghana.
- Babic, I., & Watada, A. E. (1996). Microbial population of fresh-cut spinach leaves affected by controlled atmospheres. *Postharvest Boil. Technol.* , 9, 187-193.
- Bayındırlı, A. (Ed.). (2010). *Enzymes in Fruit and Vegetable Processing U.S.A.*: Taylor & Francis Group.
- Berk, Z. (Ed.). (2009). *Food Process Engineering and Technology* (1st ed.). USA: Elsevier Inc.
- Beuchat, L. R. (1998). Food safety issues. Geneva, Switzerland.: World health organization.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion* (2nd ed.). London, UK: Oxford University Press.

- Da Rocha, R., Melo, E., Corón, J., Berbet, P., Donzato, S., & Tadeu, J. (2012). Cinética del Secado de Tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(6), 675–683.
- Darvishi, H. (2012). Mathematical Modeling, Moisture Diffusion and Energy Consumption in Thin Layer Drying of Alfalfa. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 12(4), 511-516. doi: 10.5829/idosi.mejsr.2012.12.4.1700
- Darvishi, H., Asl, A., Asghari, A., Najafi, G., & Gazori, H. (2013). Mathematical Modeling, Moisture Diffusion, Energy consumption and Efficiency of Thin Layer Drying of Potato Slices. *J Food Process Technol*, 4(3), 6. doi: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7110.1000215>
- Dirección General de Calidad Ambiental. (2013). *LÍNEA BASE AMBIENTAL EN CUENCA DEL LAGO TITICACA*. Lima-Perú: Ministerio del Ambiente-Viceministerio de Gestión Ambiental.
- Dogan, H., & Karweand, M. V. (2003). Physicochemical Properties of Quinoa Extrudates. *Food Science and Technology International*, 9(2), 101-114.
- Doymaz, I. (2012). Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.). *Energy Conversion and Management*, 56, 199-205.
- Doymaz, I. (2014). Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Convective Hot-Air Dried White Button Mushroom Slices. *Journal of Chemistry*, 2014, 8p. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/453175>
- Espinoza, J. L. (2011). Aplicacion de un Proceso de secado asistido Infrarrojo para la Deshidratacion del fruto de Murtilla (*Ugni molinae* Turcz.). (Tesis de grado Ingenieria de Alimentos), Universidad de Chile, Santiago-Chile.
- Fellows, P. (2000). *Food Processing Technology: Principles and Practices* (2nd ed.). England: Woodhead Publishing Ltd.
- Flores, M. J., & Valero, Y. Z. (2011). Determinación de la Cinetica de Deshidratación de la seta comestible (*Boletus edulis*) en dos tipos de secadores. (Tesis de Ingenieria Agroindustrial), Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú.
- Galarza, S. (2010). Elaboración de una Sopa Instantánea a base de las Hojas Verdes de Quinoa (*Chenopodium Quinoa* wild) para obtener un producto de Alto Valor

Graduado. (Tesis de Ingeniería Agroindustrial), Universidad Técnica de Cotacachi,
Latacunga, Ecuador.

- Gandarillas, H. (1979b). Genética y Origen. In M. Tapia (Ed.), *Quinoa y Kañiwa, cultivos andinos* (pp. 45-64). CIID Bogota, Colombia: Oficina Regional para América Latina.
- García, D. P. (2011). Desarrollo de un Producto de Panadería con Harina de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). (Memoria de Especialista en Ciencia y Tecnología de Alimentos), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- García, S. V., Schmalko, M. E., & Tanzariello, A. (2007). Isotermas de Adsorción y Cinética de Secado de Ciertas Hortalizas y aromáticas cultivadas en misiones. *RIA*, 36, 115-129.
- Gawlik-Dziki, U., Świeca, M., Sułkowski, M., Dziki, D., Czyz, J., & Baraniak, B. (2013). Antioxidant and anticancer activities of *Chenopodium quinoa* leaves extracts – In vitro study. *Food and Chemical Toxicology*, 57, 154-160. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2013.03.023>
- Geankoplis, C. J. (2007). *Procesos de Transporte y Principios de Procesos de Separación* (4ta ed.): editorial Patria.
- Greve, L. C., Shackel, K. A., Ahmadi, H., McArdle, R. N., Gohlke, J. R., & Labavitch, J. M. (1994). Impact of heating on Carrot Firmness: Contribution of cellular turgor. *J Agric Food Chem*, 42, 2896-2899.
- Ibañez, B. (2009). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Puno-Perú: Ed. Universitaria.
- Ibarz, A., Canovas, G., & Barbosa, G. (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Madrid- España: Mundi- Prensa.
- Jangam, S. V., Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (Eds.). (2010). *Drying of Foods, Vegetables and Fruits* (Vol. 1). Singapore.
- Jokić, S., Velić, D., Bilić, M., Lukinac, J., Planinić, M., & Bucić-Kojić, A. (2009). Influence of Process Parameters and Pre-treatments on Quality and Drying Kinetics of Apple Samples. *Czech J. Food Sci.*, 27(2), 88-94.
- Jongen, W. (Ed.). (2002). *Fruit and Vegetable Processing*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.
- Keith, M. (1984). *Drying Foods*.
http://www.aces.uiuc.edu/vista/html_pubs/DRYING/dryingfood.html

Kondan, F., Di Felice, F., & Doros, J. (2004). *Drying Vegetables*.

- Koziol, M. J. (1992). Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *J. Food Composition and Analysis*, 5, 35-68.
- López, L., Capparelli, A., & Nielsen, A. (2011). Traditional post-harve processing to make quinoa grains (*Chenopodium quinoa* var. quinoa) apt for consumption in Northern Lipez (Potosí, Bolivia): ethnoarchaeological and archaeobotanical analyses. *Archaeol Anthropol Sci*, 3, 49-70.
- Maughan, P., & Jellen, A. (2004). A genetic Linkage Map of Quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on AFLP, RAPD, and SSR markers. In M. Stevens, C. Coleman, M. Ricks, S. Mason, D. Jarvis, B. Gardunia & D. and Fairbanks (Eds.), *Theor Appl Genet* (Vol. 109, pp. 1188-1195).
- Meisami-asl, E., & Rafiee, S. (2009). *Mathematical Modeling of Kinetics of Thin-layer Drying of Apple (var. Golab)*. *Agricultural Engineering International*, (1185, XI). Karaj-Iran.
- Mepba, H. D., Eboh, L., & Banigo, D. E. B. (2007). Effects of Processing Treatments on the Nutritive Composition and Consumer Acceptance of some Nigerian Edible Leafy Vegetables. *African journal of Food Agriculture, Nutrition and Development*, 7(1), 18.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Vapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20, 1503-1513.
- MINAGRI-DGESEP. (2015). *Sistema Integrado de Estadística Agraria SIEA Estadística Mensual Abril 2015*. Lima-Perú: DGPA - DEEIA - MINAGRI 07 - 2015 Retrieved from www.minagri.gob.pe, www.siea.minagri.gob.pe.
- Montoya, L., Martínez, V., & Peralta, B. (2005). Análisis de las Variables Estratégicas para la conformación de una Cadena Productiva de la Quinoa en Colombia. *Revista Innovar. Edit. Unibiblos*, 25, 103 - 120.
- Motevali, A., Younji, S., Amiri Chayjan, R., Aghilinategh, N., & Banakar, A. (2013). Drying kinetics of Dill Leaves in a convective dryer. *International Agrophysics*, 27, 39-47. doi: 10.2478/v10247-012-0066-y
- Mujica, A., & Jacobsen, S. (2000). Potencial y perspectivas futuras de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Perú. *Mosaico científico* 2, 56-60.

- Majica, F., & Jacobsen, S. (2008). La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y sus parientes silvestres. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 449-457.
- Nolasco, O., Cruz, W., Santa Cruz, C., & Gutiérrez, A. (2013). Evaluación del Polimorfismo de ADN de Seis Variedades de *Chenopodium quinoa* Willd, Utilizando AFLP. *The Biologist*, 11(2), 277-286.
- Núñez, L. (1970). *La Agricultura Prehistorica en los Andes Meridionales*. Antofagasta, Chile: Universidad del Norte.
- Olurin, T. O., Adelekan, A. O., & Olosunde, W. A. (2012). Mathematical Modelling of Drying Characteristics of blanched field pumpkin (*Cucurbita pepo* L) slices. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 14(4), 246–254.
- Osaki, S., & Gavranich, C. (1999). *Blanching Vegetables for Freezing*: University of California Cooperative Extension.
- Peralta, E. (1985). La Quinoa ... Un Gran Alimento y su Utilización (pp. 23). Ecuador: Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- Perry, R., & Chilton, C. (1981). *Manual del Ingeniero Químico*. New York: Mc-Graw- Hill.
- Prasad, A., & Prasad, K. (2013). Studies on Kinetics of Moisture Removal from Spinach Leaves. *International Journal of Agriculture and Food Science Technology*, 4(4), 303-308.
- Rao, M., Rizvi, S. S. H., Datta., A. K. (Eds.). (2005). *Engineering Properties of Foods* (3rd. ed.). United States of America: Taylor & Francis Group.
- Ratti, C. (Ed.). (2009). *Advances in Food Dehydration* (Vol. 5). United States of America: Taylor & Francis Group.
- Reyes, J., & Aytakin, M. (Eds.). (2014). *International Cookbook for Quinoa: Food and Agriculture Organization*.
- Reyes, J., Cavalieri, R., & Powers, J. (2004). Blanching of Foods. In M. Dekker (Ed.), *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering* (pp. 5). Pullman, Washington, U.S.A.: Washington State University.
- Rojas, W. (Ed.). (2011). *Quinoa: An ancient Crop to contribute to World Food Security*: Regional Office for Latin America and the Caribbean, PROINPA.

- Sánchez, T. (2009). Cadena Agroalimentaria de la Quinua y la Maca Peruana y su comercialización en el Mercado Español. (Tesis de Doctorado), Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España.
- Sarco, J., & Valencia, L. (2009). Implementación de Control Adaptivo y Evaluación del secador de Lecho Fijo con Recirculación de Aire. (tesis de Ing. Agroindustrial), Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú.
- Schlick, G. (2000). Nutritional Characteristics and Biomass Production of *Chenopodium quinoa* grown in Controlled Environments. (Thesis in Master of Science), San Jose State University, U. S. A. Retrieved from http://scholarworks.sjsu.edu/etd_theses
- Severini, C., Baiano, A., De Pilli, T., Carbone, B., & Derossi, A. (2005). Combined Treatments of Blanching and Dehydration: Study on potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 68, 289-296.
- Silva, A. S., Almeida, F., Lima, E., Silva, F., & Gomes, J. P. (2008). Drying kinetics of coriander (*Coriandrum sativum*) leaf and stem. *Cienc. Tecnol. Aliment.*, 6(1), 13-19.
- Simha, P., & Gugalia, A. (2013). Thin layer Drying Kinetics and Modelling of *Spinacia oleracea* leaves. *International Journal of Applied Engineering Research*, 8, 1053-1066.
- Singh, P., & Heldman, D. (1998). *Introducción a la Ingeniería de Alimentos*. Zaragoza, España: Editorial Acribia S.A.
- Smith, J. S., & Hui, Y. H. (Eds.). (2004). *Food Processing Principles and Applications*. UK: Blackwell Publishing Ltd.
- Stopforth, J. D., J.S., I., Kendall, P. A., N., S. J. (2004). Survival of acid-adapted or non-adapted *Escherichia coli* O157:H7 in Apple wounds and surrounding tissue following chemical treatments and storage. *J. food Microbiol.*, 90, 51-61.
- Suca, F., & Suca, C. A. (2008). *Competitividad de la Quinua una Aplicación del Modelo de Michael Porter*. Lima.
- Supriya, V. (2009). Bioavailability of B-carotene as Influenced by Food Processing and Presence of Factors such as Spices. (Thesis in Doctor of Philosophy), Central food Technological Research Institute, Mysore, India.
- Taheri-Garavanda, A., S., R., & Keyhani, A. (2011). Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics of Tomato Influence of Air Dryer Conditions. *International*

Transactions Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies, 2(2), 147-160.

- Tapia, M. (1979). Valor Nutritivo. In M. Tapia, H. Gandarillas, S. Alandia, A. Cardoso & A. Mujica (Eds.), *La Quinoa y la Kañihua* (Vol. 40, pp. 228). Bogota-Colombia: Ed. IICA.
- Tapia, M. (1997). *Cultivos Andinos Subexplotados y su Aporte a la Alimentación*. Santiago, Chile: Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe,.
- Tapia, M. E., & Fries, A. M. (2007). *Guía de Campo de los Cultivos Andinos*. Lima, Perú: FAO y ANPE.
- Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? *Journal of Food Engineering*, 48, 19-31.
- Torregroza-Espinosa, A., Montes-Montes, E., Ávila-Gómez, A., & Remolina-López, J. (2014). Modelado de las Cinéticas de Secado de tres Variedades de Yuca industrial. *Dyna*, 81(186), 184-192.
- Uhle, M. (1919). La arqueología de Arica y Tocta. *Sociedad Ecuatoriana de Estudios Historicos*, 3, 1-48.
- Upadhyaya, A. K., Gupta, B., Garg, S., Singh, M., & Pandey, M. (2012). Mathematical Modeling of Hot Air Drying of Spinach Leaves in Universal Hot Air Oven. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology*, 1(4), 153-157.
- Valencia, J. D. (2005). Elaboración de Sopas Reconstituibles en Base de Carachi (*Orestia agassii* V.), Tarwi (*Lupinus mutabilis* S.), Quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) y Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* A.). (Tesis de Magister Scientiae), Universidad Nacional Agraria la Molina Lima Perú.
- Villacres, E., Peralta, E., Egas, L., & Mazon, N. (2011). Potencial Agroindustrial de la Quinoa, 146, 32.
- Waldrom, K. W., Parker, M. L., & Smith, A. C. (2003). Plant Cell Wall and Food Quality. A review. *J. Sc. Food Technol*, 2, 109-110.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1 - Resultados de medida de espesor y área de las hojas de quinua

a. Calculo de área para el secado de las hojas de quinua

N°	PESO (g)	BASE (cm)	ALTURA (cm)	AREA TRIANGULAR
1	0.8	4.8	5	12
2	0.23	3.2	3.6	5.76
3	0.47	4.5	5	11.25
4	0.55	4	5.5	11
5	0.29	3.4	4	6.8
6	0.56	4	4.5	9
7	0.25	2.8	4	5.6
8	0.25	3.4	4.3	7.31
9	0.58	4.5	5	11.25
10	0.3	3.5	4	7
11	0.19	2.9	3.5	5.075
12	0.38	3.5	4.5	7.875
13	0.25	3.5	4.5	7.875
14	0.28	2.5	3.8	4.75
15	0.38	3	4	6
16	0.68	4.5	5.5	12.375
17	0.28	4	4	8
18	0.23	2.8	3.5	4.9
19	0.28	3.5	4.5	7.875
20	0.29	3	4	6
21	0.26	3	4	6
22	0.3	3	3.8	5.7
23	0.32	3.8	4.3	8.17
24	0.2	2.5	3.5	4.375
25	0.38	3.2	3.5	5.6
26	0.25	3	3.8	5.7
SUMA	9.23 g	89.8 cm	109.6 cm	0.019324 m²
ESTIMACIÓN PARA		AREA		0.10468 m²
		Adicionando 5 % de error		0.1099m²

b. Cálculo del espesor de las hojas de quinua

Se tomó medida del espesor de los tres lados por cada hoja de quinua según Imagen 4 del Anexo 7. Los valores reportados se dan en milímetros (mm).

LADOS				
N°	1	2	3	PROMEDIO
1	0.44	0.54	0.46	0.480
2	0.36	0.42	0.39	0.390
3	0.44	0.57	0.47	0.493
4	0.45	0.48	0.42	0.450
5	0.52	0.75	0.57	0.613
6	0.47	0.58	0.52	0.523
7	0.48	0.66	0.54	0.560
8	0.45	0.59	0.43	0.490
9	0.46	0.55	0.76	0.590
10	0.48	0.59	0.52	0.530
11	0.57	0.76	0.72	0.683
12	0.46	0.48	0.4	0.447
13	0.51	0.65	0.49	0.550
14	0.46	0.53	0.42	0.470
15	0.54	0.67	0.57	0.593
16	0.56	0.71	0.51	0.593
17	0.38	0.44	0.52	0.447
18	0.43	0.5	0.4	0.443
19	0.46	0.53	0.44	0.477
20	0.55	0.55	0.46	0.520
21	0.42	0.54	0.51	0.490
22	0.53	0.6	0.47	0.533
PROMEDIO TOTAL (mm)				0.5167±0.069



ANEXO 2 - Resultados de Velocidad de Secado de Hojas de quinua

a. Escaldado en agua secado a 50°C (50M1)

Humedad Inicial (%)	Peso bandeja (g)	Área de bandeja (m ²)	SS (g)	Masa inicial (g)	X inicial Kg H ₂ O/Kg SS	Peso final (g)	L _s /A	Humedad de equilibrio Kg H ₂ O/Kg SS
86.63	1074.5	0.1099	7.018	52.49	6.377885437	7.73	0.06386	0.1015

TIEMPO (min)	MASA+ BANDEJA (g)	PESO (g)	HUMEDAD (g)	X Kg H ₂ O/Kg SS	MR	RD Kg H ₂ O/h.m ²	DR AJUST Kg H ₂ O/h.m ²	Ln(MR)
0	1126.99	52.49	45.47	6.378	1			0.0000
5	1124.75	50.25	43.24	6.059	0.9508	0.2441		-0.0504
10	1123.03	48.53	41.52	5.814	0.9130	0.1878		-0.0910
15	1121.41	46.91	39.89	5.582	0.8772	0.1778	0.17540	-0.1310
20	1119.80	45.30	38.28	5.353	0.8418	0.1756	0.17540	-0.1722
25	1118.20	43.70	36.68	5.125	0.8066	0.1748	0.17540	-0.2149
30	1116.68	42.18	35.16	4.909	0.7733	0.1655	0.16580	-0.2571
35	1115.27	40.77	33.76	4.709	0.7424	0.1536	0.16106	-0.2979
40	1113.67	39.17	32.15	4.480	0.7071	0.1749	0.15666	-0.3465
45	1112.37	37.87	30.85	4.295	0.6785	0.1423	0.15165	-0.3879
50	1111.01	36.51	29.49	4.100	0.6485	0.1490	0.14757	-0.4331
55	1109.68	35.18	28.16	3.911	0.6192	0.1451	0.14330	-0.4793
60	1108.46	33.96	26.94	3.738	0.5925	0.1326	0.13914	-0.5233
65	1107.22	32.72	25.71	3.562	0.5653	0.1351	0.13534	-0.5703
70	1106.01	31.51	24.49	3.389	0.5387	0.1324	0.13147	-0.6187
75	1104.98	30.48	23.47	3.242	0.5160	0.1124	0.12768	-0.6616
80	1103.87	29.37	22.36	3.084	0.4916	0.1211	0.12446	-0.7100
85	1102.63	28.13	21.11	2.907	0.4643	0.1359	0.12098	-0.7673
90	1101.65	27.15	20.13	2.767	0.4426	0.1074	0.11709	-0.8150
95	1100.55	26.05	19.04	2.611	0.4186	0.1192	0.11401	-0.8708
100	1099.53	25.03	18.02	2.466	0.3962	0.1114	0.11060	-0.9258
105	1098.38	23.88	16.86	2.301	0.3708	0.1263	0.10741	-0.9922
110	1097.26	22.76	15.74	2.141	0.3461	0.1225	0.10379	-1.0610
115	1096.33	21.83	14.81	2.009	0.3258	0.1010	0.10028	-1.1216
120	1095.26	20.76	13.75	1.857	0.3023	0.1165	0.09738	-1.1963
125	1094.42	19.92	12.90	1.737	0.2838	0.0920	0.09405	-1.2596
130	1093.64	19.14	12.12	1.626	0.2665	0.0856	0.09141	-1.3223
135	1092.70	18.20	11.18	1.491	0.2458	0.1029	0.08896	-1.4032
140	1091.87	17.37	10.36	1.374	0.2277	0.0897	0.08601	-1.4796
145	1091.10	16.60	9.58	1.264	0.2107	0.0846	0.08344	-1.5573
150	1090.35	15.85	8.84	1.158	0.1943	0.0813	0.08101	-1.6382
155	1089.45	14.95	7.93	1.028	0.1744	0.0991	0.07868	-1.7466
160	1088.79	14.29	7.27	0.935	0.1600	0.0715	0.07584	-1.8328
165	1088.13	13.63	6.61	0.841	0.1454	0.0722	0.07379	-1.9280
170	1087.36	12.86	5.84	0.731	0.1285	0.0839	0.07173	-2.0516
175	1086.76	12.26	5.24	0.645	0.1152	0.0662	0.05858	-2.1611
180	1086.12	11.62	4.60	0.554	0.1011	0.0700	0.05130	-2.2916
185	1085.66	11.16	4.14	0.488	0.0910	0.0500	0.04611	-2.3965
190	1085.10	10.60	3.58	0.409	0.0787	0.0611	0.03976	-2.5417
195	1084.75	10.25	3.23	0.359	0.0710	0.0382	0.03579	-2.6446
200	1084.37	9.87	2.85	0.305	0.0627	0.0414	0.03149	-2.7694
205	1084.06	9.56	2.55	0.261	0.0560	0.0333	0.02803	-2.8824
210	1083.79	9.29	2.28	0.223	0.0501	0.0295	0.02497	-2.9944
215	1083.51	9.01	1.99	0.183	0.0438	0.0309	0.02176	-3.1274
220	1083.28	8.78	1.76	0.150	0.0388	0.0250	0.01916	-3.2493
225	1083.10	8.60	1.58	0.124	0.0348	0.0200	0.01708	-3.3591
230	1082.85	8.35	1.33	0.088	0.0292	0.0276	0.01421	-3.5336
235	1082.62	8.12	1.11	0.056	0.0243	0.0242	0.01170	-3.7159
240	1082.49	7.99	0.97	0.036	0.0213	0.0152	0.01011	-3.8506
245	1082.29	7.79	0.77	0.009	0.0170	0.0212	0.00791	-4.0745



Humedad Inicial (%)	Peso bandeja (g)	Área de bandeja (m ²)	SS (g)	Masa inicial (g)	X inicial Kg H ₂ O/Kg SS	Peso final (g)	L _s /A	Humedad de equilibrio Kg H ₂ O/Kg SS
82.7	1074.5	0.1099	8.66	50.05	4.678	9.54	0.0788	0.1016

TIEMPO (min)	MASA+ BANDEJA (g)	PESO (gr)	HUMEDAD (g)	X Kg H ₂ O/Kg SS	MR	RD KgH ₂ O/h.m ²	DR AJUST Kg H ₂ O/h.m ²	Ln(MR)
0	1124.55	50.05	41.39	4.678	1.0000			0.000
5	1122.17	47.67	39.01	4.403	0.9424	0.2603		-0.059
10	1119.87	45.37	36.71	4.138	0.8870	0.2501		-0.120
15	1118.09	43.59	34.93	3.932	0.8439	0.1951		-0.170
20	1116.37	41.87	33.21	3.733	0.8024	0.1876		-0.220
25	1115.07	40.57	31.91	3.583	0.7709	0.1421		-0.260
30	1113.94	39.44	30.78	3.453	0.7437	0.1233		-0.296
35	1112.85	38.35	29.69	3.326	0.7172	0.1195		-0.332
40	1111.83	37.33	28.67	3.209	0.6926	0.1114		-0.367
45	1111.01	36.51	27.85	3.115	0.6729	0.0888		-0.396
50	1110.03	35.53	26.87	3.002	0.6493	0.1069		-0.432
55	1109.28	34.78	26.12	2.914	0.6310	0.0825		-0.460
60	1108.56	34.06	25.40	2.831	0.6136	0.0790		-0.488
65	1107.73	33.23	24.57	2.736	0.5937	0.0898		-0.521
70	1107.16	32.66	24.00	2.669	0.5797	0.0631	0.12599	-0.545
75	1106.41	31.91	23.25	2.583	0.5617	0.0816	0.11903	-0.577
80	1105.75	31.25	22.59	2.507	0.5458	0.0719	0.1126	-0.606
85	1105.09	30.59	21.93	2.431	0.5299	0.0717	0.1074	-0.635
90	1104.48	29.98	21.32	2.360	0.5150	0.0673	0.1012	-0.664
95	1103.82	29.32	20.66	2.284	0.4990	0.0723	0.0964	-0.695
100	1103.15	28.65	19.99	2.207	0.4830	0.0724	0.0918	-0.728
105	1102.54	28.04	19.38	2.136	0.4682	0.0671	0.0865	-0.759
110	1101.87	27.37	18.71	2.059	0.4520	0.0732	0.0781	-0.794
115	1101.35	26.85	18.19	1.999	0.4396	0.0560	0.0739	-0.822
120	1100.62	26.12	17.46	1.914	0.4217	0.0807	0.0714	-0.863
125	1100.10	25.60	16.94	1.854	0.4092	0.0568	0.0707	-0.894
130	1099.54	25.04	16.38	1.789	0.3957	0.0610	0.0700	-0.927
135	1099.00	24.50	15.84	1.727	0.3826	0.0591	0.0693	-0.961
140	1098.49	23.99	15.33	1.668	0.3703	0.0554	0.0685	-0.993
145	1097.90	23.40	14.74	1.601	0.3562	0.0637	0.0678	-1.032
150	1097.32	22.82	14.16	1.533	0.3421	0.0639	0.0671	-1.073
155	1096.79	22.29	13.63	1.473	0.3294	0.0573	0.0657	-1.110
160	1096.19	21.69	13.03	1.402	0.3147	0.0665	0.0651	-1.156
165	1095.61	21.11	12.45	1.336	0.3008	0.0630	0.0645	-1.201
170	1094.97	20.47	11.81	1.262	0.2853	0.0696	0.0639	-1.254
175	1094.38	19.88	11.22	1.194	0.2712	0.0641	0.0633	-1.305
180	1093.89	19.39	10.73	1.138	0.2593	0.0534	0.0627	-1.350
185	1093.32	18.82	10.16	1.071	0.2454	0.0630	0.0620	-1.405
190	1092.98	18.48	9.82	1.033	0.2373	0.0366	0.0615	-1.438
195	1092.54	18.04	9.38	0.981	0.2266	0.0484	0.0608	-1.485
200	1092.15	17.65	8.99	0.936	0.2172	0.0425	0.0601	-1.527
205	1091.85	17.35	8.69	0.902	0.2100	0.0325	0.0594	-1.561
210	1091.50	17.00	8.34	0.861	0.2015	0.0384	0.0588	-1.602
.
.
.
365	1084.66	10.16	1.50	0.071	0.0362	0.0060	0.0106	-3.320
370	1084.59	10.09	1.43	0.063	0.0344	0.0078	0.0102	-3.369
375	1084.46	9.96	1.30	0.049	0.0315	0.0132	0.0095	-3.457
380	1084.34	9.84	1.18	0.035	0.0285	0.0135	0.0088	-3.557
385	1084.18	9.68	1.02	0.016	0.0246	0.0179	0.0075	-3.706
390	1084.03	9.53	0.87	-0.001	0.0210	0.0161	0.0071	-3.863



Humedad Inicial (%)	Peso bandeja (g)	Área de bandeja (m ²)	SS (g)	Masa inicial (g)	X inicial Kg H ₂ O/Kg SS	Peso final (g)	L _s /A	Humedad de equilibrio Kg H ₂ O/Kg SS
78.126	1074.5	0.1099	7.82	35.75	3.472	8.6	0.0712	0.0997

TIEMPO (min)	MASA+ BANDEJA (g)	PESO (gr)	HUMEDAD (g)	X Kg H ₂ O/Kg SS	MR	RD Kg H ₂ O/h.m ²	DR AJUST Kg H ₂ O/h.m ²	Ln(MR)
0	1110.25	35.75	27.93	3.472	1.0000			0.0000
5	1108.99	34.49	26.67	3.311	0.9550	0.1372		-0.0460
10	1108.10	33.60	25.78	3.197	0.9230	0.0976		-0.0801
15	1107.05	32.55	24.73	3.062	0.8853	0.1149	0.14627	-0.1218
20	1106.07	31.57	23.75	2.937	0.8503	0.1067	0.14627	-0.1621
25	1105.02	30.52	22.70	2.803	0.8127	0.1149	0.14627	-0.2074
30	1104.00	29.50	21.68	2.673	0.7763	0.1108	0.14627	-0.2532
35	1103.04	28.54	20.72	2.550	0.7420	0.1047	0.14627	-0.2984
40	1102.03	27.53	19.71	2.421	0.7057	0.1108	0.14627	-0.3486
45	1101.02	26.52	18.70	2.292	0.6697	0.1098	0.14627	-0.4010
50	1100.01	25.51	17.69	2.162	0.6333	0.1108	0.14627	-0.4568
55	1099.06	24.56	16.74	2.041	0.5993	0.1037	0.14627	-0.5119
60	1098.05	23.55	15.73	1.912	0.5633	0.1098	0.14627	-0.5739
65	1097.15	22.65	14.83	1.797	0.5310	0.0986	0.14623	-0.6330
70	1096.29	21.79	13.97	1.687	0.5003	0.0935	0.14038	-0.6925
75	1095.47	20.97	13.15	1.581	0.4707	0.0905	0.13483	-0.7536
80	1094.75	20.25	12.43	1.490	0.4450	0.0783	0.12947	-0.8097
85	1094.00	19.50	11.68	1.394	0.4183	0.0813	0.11999	-0.8715
90	1093.30	18.80	10.98	1.304	0.3930	0.0773	0.11541	-0.9339
95	1092.66	18.16	10.34	1.223	0.3703	0.0691	0.10630	-0.9934
100	1091.89	17.39	9.57	1.124	0.3427	0.0844	0.10166	-1.0710
105	1091.17	16.67	8.85	1.032	0.3170	0.0783	0.09707	-1.1489
110	1090.47	15.97	8.15	0.942	0.2917	0.0773	0.09327	-1.2321
115	1089.88	15.38	7.56	0.867	0.2707	0.0640	0.08965	-1.3069
120	1089.32	14.82	7.00	0.796	0.2507	0.0610	0.08621	-1.3836
125	1088.79	14.29	6.47	0.728	0.2317	0.0579	0.08332	-1.4625
130	1088.34	13.84	6.02	0.671	0.2157	0.0488	0.07765	-1.5340
135	1087.96	13.46	5.64	0.622	0.2020	0.0417	0.07512	-1.5995
140	1087.47	12.97	5.15	0.559	0.1843	0.0539	0.07150	-1.6910
145	1087.08	12.58	4.76	0.509	0.1703	0.0427	0.06981	-1.7700
150	1086.52	12.02	4.20	0.437	0.1503	0.0610	0.06459	-1.8949
155	1086.10	11.60	3.78	0.384	0.1353	0.0457	0.06007	-2.0000
160	1085.74	11.24	3.42	0.337	0.1223	0.0396	0.05908	-2.1010
165	1085.36	10.86	3.04	0.290	0.1090	0.0407	0.05848	-2.2164
170	1085.00	10.50	2.68	0.243	0.0960	0.0396	0.05492	-2.3434
175	1084.70	10.20	2.38	0.205	0.0853	0.0325	0.05136	-2.4612
180	1084.43	9.93	2.11	0.171	0.0757	0.0295	0.04780	-2.5814
185	1084.21	9.71	1.89	0.142	0.0677	0.0244	0.04424	-2.6932
190	1083.94	9.44	1.62	0.107	0.0580	0.0295	0.04069	-2.8473
195	1083.78	9.28	1.46	0.087	0.0523	0.0173	0.03769	-2.9501
200	1083.53	9.03	1.21	0.055	0.0433	0.0274	0.03259	-3.1388
205	1083.34	8.84	1.02	0.031	0.0367	0.0203	0.03027	-3.3059
210	1083.10	8.60	0.78	0.000	0.0280	0.0264	0.02660	-3.5756



en [Bancarrota en agua de [0.0012]

Humedad Inicial (%)	Peso bandeja (g)	Área de bandeja (m ²)	SS (g)	Masa inicial (g)	X inicial Kg H ₂ O/Kg SS	Peso final (g)	L _s /A	Humedad de equilibrio Kg H ₂ O/Kg SS
86.62	1074.5	0.1099	7.02	52.48	6.375	7.73	0.0639	0.1011

TIEMPO (min)	MASA+ BANDEJA (g)	PESO (gr)	HUMEDAD (g)	X Kg H ₂ O/Kg SS	MR	RD Kg H ₂ O/h.m ²	DR AJUST KgH ₂ O/h.m ²	Ln(MR)
0	1126.98	52.48	45.46	6.375	1.0000			0.0000
5	1124.09	49.59	42.57	5.962	0.9363	0.3160		-0.0658
10	1122.05	47.55	40.53	5.673	0.8916	0.2220	0.19704	-0.1147
15	1120.18	45.68	38.66	5.405	0.8503	0.2048	0.19704	-0.1621
20	1118.26	43.76	36.74	5.133	0.8082	0.2089	0.19704	-0.2129
25	1116.28	41.78	34.76	4.850	0.7646	0.2165	0.19704	-0.2684
30	1114.43	39.93	32.91	4.587	0.7239	0.2021	0.19704	-0.3231
35	1112.71	38.21	31.19	4.342	0.6861	0.1876	0.19704	-0.3767
40	1110.92	36.42	29.40	4.087	0.6467	0.1958	0.19704	-0.4359
45	1109.12	34.62	27.60	3.830	0.6070	0.1968	0.19710	-0.4991
50	1107.27	32.77	25.75	3.567	0.5664	0.2016	0.18941	-0.5684
55	1105.43	30.93	23.91	3.305	0.5260	0.2006	0.18263	-0.6424
60	1103.52	29.02	22.00	3.032	0.4839	0.2093	0.17642	-0.7259
65	1101.83	27.33	20.31	2.792	0.4468	0.1841	0.16997	-0.8057
70	1100.28	25.78	18.76	2.572	0.4127	0.1690	0.16399	-0.8850
75	1098.68	24.18	17.16	2.343	0.3774	0.1754	0.15808	-0.9745
80	1097.19	22.69	15.67	2.131	0.3446	0.1626	0.15771	-1.0653
85	1095.71	21.21	14.19	1.921	0.3122	0.1609	0.14669	-1.1641
90	1094.45	19.95	12.93	1.740	0.2843	0.1384	0.13795	-1.2576
95	1093.44	18.94	11.92	1.597	0.2622	0.1098	0.12811	-1.3386
100	1092.31	17.81	10.79	1.436	0.2373	0.1236	0.12004	-1.4383
105	1091.38	16.88	9.86	1.303	0.2169	0.1014	0.11132	-1.5284
110	1090.38	15.88	8.86	1.161	0.1948	0.1095	0.10327	-1.6356
115	1089.45	14.95	7.93	1.029	0.1745	0.1010	0.09525	-1.7460
120	1088.53	14.03	7.01	0.897	0.1542	0.1008	0.08932	-1.8697
125	1087.85	13.35	6.33	0.800	0.1392	0.0745	0.08259	-1.9721
130	1087.07	12.57	5.55	0.690	0.1221	0.0845	0.07776	-2.1026
135	1086.52	12.02	5.00	0.611	0.1099	0.0607	0.07256	-2.2081
140	1085.92	11.42	4.40	0.526	0.0968	0.0653	0.06844	-2.3355
145	1085.45	10.95	3.93	0.458	0.0863	0.0517	0.06438	-2.4494
150	1084.98	10.48	3.46	0.392	0.0761	0.0509	0.06090	-2.5759
155	1084.58	10.08	3.06	0.335	0.0673	0.0437	0.05749	-2.6988
160	1084.19	9.69	2.67	0.279	0.0586	0.0429	0.05510	-2.8365
165	1083.91	9.41	2.39	0.239	0.0526	0.0300	0.05086	-2.9454
170	1083.42	8.92	1.90	0.170	0.0418	0.0533	0.04794	-3.1739
175	1083.09	8.59	1.57	0.122	0.0344	0.0368	0.04346	-3.3689
180	1082.57	8.07	1.05	0.049	0.0231	0.0562	0.04111	-3.7673
185	1082.25	7.75	0.73	0.002	0.0160	0.0353	0.03802	-4.1352



Humedad Inicial (%)	Peso bandeja (g)	Área de bandeja (m ²)	SS (g)	Masa inicial (g)	X inicial Kg H ₂ O/Kg SS	Peso final (g)	L _s /A	Humedad de equilibrio Kg H ₂ O/Kg SS
82.69	1074.5	0.1099	8.67	50.1	4.672	9.59	0.0789	0.1061
TIEMPO (min)	MASA+ BANDEJA (g)	PESO (gr)	HUMEDAD (g)	X Kg H ₂ O/Kg SS	MR	RD Kg H ₂ O/h.m ²	DR AJUST Kg H ₂ O/h.m ²	Ln(MR)
0	1124.60	50.10	41.43	4.672	1.0000			0.0000
5	1122.00	47.50	38.83	4.372	0.9371	0.2844		-0.0649
10	1119.31	44.81	36.14	4.062	0.8723	0.2935		-0.1367
15	1116.95	42.45	33.78	3.791	0.8155	0.2570		-0.2040
20	1114.87	40.37	31.70	3.551	0.7652	0.2272		-0.2676
25	1113.04	38.54	29.87	3.340	0.7211	0.1997		-0.3270
30	1111.34	36.84	28.17	3.143	0.6799	0.1865	0.16585	-0.3859
35	1109.73	35.23	26.56	2.957	0.6410	0.1757	0.16585	-0.4447
40	1108.30	33.80	25.13	2.793	0.6067	0.1553	0.16585	-0.4997
45	1106.85	32.35	23.68	2.626	0.5717	0.1583	0.16585	-0.5592
50	1105.30	30.80	22.13	2.447	0.5343	0.1693	0.16585	-0.6269
55	1104.04	29.54	20.87	2.301	0.5038	0.1379	0.16585	-0.6856
60	1102.73	28.23	19.56	2.150	0.4722	0.1428	0.16585	-0.7503
65	1101.65	27.15	18.48	2.026	0.4462	0.1178	0.15993	-0.8071
70	1100.47	25.97	17.30	1.889	0.4175	0.1297	0.15249	-0.8735
75	1099.35	24.85	16.18	1.761	0.3907	0.1215	0.14478	-0.9399
80	1098.29	23.79	15.12	1.638	0.3650	0.1159	0.13843	-1.0078
85	1097.18	22.68	14.01	1.510	0.3382	0.1215	0.13143	-1.0842
90	1096.31	21.81	13.14	1.409	0.3171	0.0952	0.12488	-1.1484
95	1095.37	20.87	12.20	1.301	0.2945	0.1022	0.11861	-1.2224
100	1094.29	19.79	11.12	1.176	0.2683	0.1186	0.11206	-1.3156
105	1093.46	18.96	10.29	1.080	0.2483	0.0906	0.10693	-1.3931
110	1092.61	18.11	9.44	0.983	0.2280	0.0920	0.10141	-1.4786
115	1091.80	17.30	8.63	0.889	0.2082	0.0892	0.09012	-1.5690
120	1091.01	16.51	7.84	0.798	0.1892	0.0864	0.08515	-1.6652
125	1090.19	15.69	7.02	0.703	0.1693	0.0897	0.08033	-1.7759
130	1089.28	14.78	6.11	0.599	0.1475	0.0986	0.07567	-1.9137
135	1088.80	14.30	5.63	0.543	0.1359	0.0527	0.07082	-1.9961
140	1088.29	13.79	5.12	0.484	0.1235	0.0560	0.06899	-2.0915
145	1087.74	13.24	4.57	0.421	0.1103	0.0597	0.0568	-2.2046
150	1087.30	12.80	4.13	0.371	0.0998	0.0475	0.0533	-2.3046
155	1086.85	12.35	3.68	0.318	0.0887	0.0501	0.04757	-2.4221
160	1086.35	11.85	3.18	0.260	0.0767	0.0546	0.04437	-2.5685
165	1086.01	11.51	2.84	0.222	0.0686	0.0363	0.04223	-2.6790
170	1085.79	11.29	2.62	0.196	0.0631	0.0249	0.03737	-2.7626
175	1085.56	11.06	2.39	0.170	0.0578	0.0242	0.03533	-2.8511
180	1085.26	10.76	2.09	0.135	0.0504	0.0334	0.03342	-2.9878
185	1084.94	10.44	1.77	0.098	0.0427	0.0349	0.03155	-3.1540
190	1084.64	10.14	1.47	0.064	0.0355	0.0325	0.02987	-3.3383
195	1084.35	9.85	1.18	0.030	0.0284	0.0320	0.02941	-3.5602
200	1084.09	9.59	0.92	0.000	0.0221	0.0286	0.02797	-3.8113



Humedad Inicial (%)	Peso bandeja (g)	Área de bandeja (m ²)	SS (g)	Masa inicial (g)	X inicial Kg H ₂ O/Kg SS	Peso final (g)	L _s /A	Humedad de equilibrio Kg H ₂ O/Kg SS
78.086	1074.5	0.1099	7.83	35.73	3.464	8.61	0.0712	0.100
TIEMPO (min)	MASA+ BANDEJA	PESO (gr)	HUMEDAD (g)	X Kg H ₂ O/Kg SS	MR	RD Kg H ₂ O/h.m ²	DR AJUST Kg H ₂ O/h.m ²	Ln(MR)
0	1110.23	35.73	27.90	3.464	1.0000			0.0000
5	1109.05	34.55	26.72	3.313	0.9578	0.1284		-0.0431
10	1108.07	33.57	25.74	3.187	0.9224	0.1079		-0.0808
15	1107.15	32.65	24.82	3.071	0.8897	0.0997		-0.1169
20	1106.08	31.58	23.75	2.933	0.8511	0.1176		-0.1612
25	1104.96	30.46	22.63	2.790	0.8110	0.1223	0.15398	-0.2095
30	1103.94	29.44	21.61	2.661	0.7747	0.1105	0.15398	-0.2553
35	1102.95	28.45	20.62	2.534	0.7392	0.1080	0.15398	-0.3022
40	1101.87	27.37	19.54	2.396	0.7004	0.1182	0.15398	-0.3561
45	1100.77	26.27	18.44	2.255	0.6609	0.1204	0.15398	-0.4142
50	1099.66	25.16	17.33	2.114	0.6212	0.1210	0.15398	-0.4762
55	1098.49	23.99	16.16	1.964	0.5791	0.1281	0.15398	-0.5462
60	1097.45	22.95	15.12	1.832	0.5420	0.1131	0.15398	-0.6125
65	1096.34	21.84	14.01	1.690	0.5022	0.1213	0.15398	-0.6888
70	1095.29	20.79	12.96	1.556	0.4646	0.1146	0.15398	-0.7666
75	1094.40	19.90	12.07	1.443	0.4328	0.0969	0.15330	-0.8375
80	1093.43	18.93	11.10	1.318	0.3977	0.1068	0.14734	-0.9220
85	1092.38	17.88	10.05	1.183	0.3600	0.1148	0.14230	-1.0215
90	1091.43	16.93	9.10	1.063	0.3262	0.1032	0.13673	-1.1204
95	1090.62	16.12	8.29	0.960	0.2973	0.0880	0.12539	-1.2131
100	1089.82	15.32	7.49	0.856	0.2683	0.0882	0.12081	-1.3156
105	1089.14	14.64	6.81	0.770	0.2442	0.0736	0.11622	-1.4099
110	1088.49	13.99	6.16	0.688	0.2210	0.0707	0.11239	-1.5098
115	1087.90	13.40	5.57	0.612	0.1998	0.0646	0.11332	-1.6107
120	1087.32	12.82	4.99	0.538	0.1789	0.0634	0.10300	-1.7207
125	1086.74	12.24	4.41	0.464	0.1582	0.0631	0.09309	-1.8437
130	1086.42	11.92	4.09	0.423	0.1467	0.0352	0.08404	-1.9196
135	1086.04	11.54	3.71	0.374	0.1328	0.0422	0.07515	-2.0188
140	1085.84	11.34	3.51	0.348	0.1257	0.0216	0.06630	-2.0738
145	1085.48	10.98	3.15	0.303	0.1129	0.0391	0.06136	-2.1816
150	1085.33	10.83	3.00	0.284	0.1077	0.0158	0.05544	-2.2287
155	1085.10	10.60	2.77	0.255	0.0994	0.0251	0.04691	-2.3083
160	1084.87	10.37	2.54	0.225	0.0910	0.0255	0.04117	-2.3965
165	1084.64	10.14	2.31	0.195	0.0826	0.0257	0.03759	-2.4935
170	1084.36	9.86	2.03	0.159	0.0727	0.0302	0.03399	-2.6212
175	1084.13	9.63	1.80	0.130	0.0646	0.0249	0.02977	-2.7403
180	1083.97	9.47	1.64	0.110	0.0587	0.0177	0.02629	-2.8347
185	1083.73	9.23	1.40	0.079	0.0502	0.0260	0.02381	-2.9919
190	1083.54	9.04	1.21	0.055	0.0433	0.0210	0.02016	-3.1397
195	1083.38	8.88	1.05	0.034	0.0375	0.0177	0.01722	-3.2835
200	1083.11	8.61	0.78	0.000	0.0279	0.0294	0.01475	-3.5806



g. Ecuación de agua secado a 70 °C (70M2)

Humedad Inicial (%)	Peso bandeja (g)	Área de bandeja (m ²)	SS (g)	Masa inicial (g)	X inicial Kg H ₂ O/Kg SS	Peso final (g)	L _s /A	Humedad de equilibrio Kg H ₂ O/Kg SS
86.631	1074.5	0.1099	7.0175	52.49	6.381	7.71	0.0639	0.099

TIEMPO (min)	MASA+ BANDEJA (g)	PESO (gr)	HUMEDAD (g)	X Kg H ₂ O/Kg SS	MR	RD Kg H ₂ O/h.m ²	DR AJUST Kg H ₂ O/h.m ²	Ln(MR)
0	1126.99	52.49	45.47	6.381	1.0000			0.0000
5	1124.27	49.77	42.76	5.994	0.9403	0.2966		-0.0616
10	1121.71	47.21	40.19	5.629	0.8839	0.2800		-0.1234
15	1119.36	44.86	37.84	5.293	0.8321	0.2570	0.25300	-0.1838
20	1116.81	42.31	35.29	4.930	0.7761	0.2783	0.25300	-0.2535
25	1114.44	39.94	32.92	4.592	0.7239	0.2589	0.25300	-0.3231
30	1111.99	37.49	30.47	4.243	0.6701	0.2674	0.25300	-0.4004
35	1109.45	34.95	27.93	3.881	0.6142	0.2775	0.25300	-0.4875
40	1106.98	32.48	25.47	3.530	0.5600	0.2688	0.25300	-0.5797
45	1104.26	29.76	22.74	3.142	0.5000	0.2979	0.25300	-0.6931
50	1101.90	27.40	20.38	2.806	0.4482	0.2574	0.25292	-0.8025
55	1099.48	24.98	17.96	2.460	0.3949	0.2646	0.24291	-0.9291
60	1097.15	22.65	15.63	2.129	0.3438	0.2537	0.23331	-1.0676
65	1095.01	20.51	13.49	1.824	0.2967	0.2341	0.22446	-1.2151
70	1092.90	18.40	11.38	1.523	0.2503	0.2303	0.21575	-1.3851
75	1091.10	16.60	9.58	1.266	0.2106	0.1970	0.20830	-1.5577
80	1089.30	14.80	7.78	1.010	0.1711	0.1965	0.20087	-1.7658
85	1088.02	13.52	6.50	0.828	0.1430	0.1395	0.19418	-1.9451
90	1086.93	12.43	5.41	0.673	0.1191	0.1187	0.16626	-2.1282
95	1085.96	11.46	4.44	0.534	0.0977	0.1063	0.14643	-2.3264
100	1084.93	10.43	3.41	0.387	0.0750	0.1126	0.12955	-2.5906
105	1084.24	9.74	2.72	0.289	0.0599	0.0749	0.11446	-2.8151
110	1083.66	9.16	2.14	0.207	0.0471	0.0636	0.09845	-3.0555
115	1083.48	8.98	1.96	0.181	0.0431	0.0197	0.08782	-3.1434
120	1083.02	8.52	1.51	0.116	0.0331	0.0498	0.07879	-3.4077
125	1082.83	8.33	1.32	0.089	0.0290	0.0206	0.06893	-3.5414
130	1082.56	8.06	1.04	0.050	0.0229	0.0301	0.06173	-3.7765
135	1082.29	7.79	0.77	0.012	0.0170	0.0292	0.05756	-4.0736
140	1082.22	7.72	0.70	0.001	0.0154	0.0080	0.05463	-4.1734



Modelo de Ecuación de Diferencias (MDE)

Humedad Inicial (%)	Peso bandeja (g)	Área de bandeja (m ²)	SS (g)	Masa inicial (g)	X inicial Kg H ₂ O/Kg SS	Peso final (g)	L _s /A	Humedad de equilibrio Kg H ₂ O/Kg SS
82.713	1074.5	0.1099	8.64	49.98	4.6840	9.51	0.0786	0.101

TIEMPO (min)	MASA+ BANDEJA (g)	PESO (gr)	HUMEDAD (g)	X Kg H ₂ O/Kg SS	MR	RD Kg H ₂ O/h.m ²	DR AJUST Kg H ₂ O/h.m ²	Ln(MR)
0	1124.48	49.98	41.34	4.684	1.0000			0.0000
5	1121.87	47.37	38.73	4.382	0.9368	0.2853		-0.0653
10	1119.27	44.77	36.13	4.081	0.8739	0.2840		-0.1348
15	1116.31	41.81	33.17	3.738	0.8023	0.3229	0.28319	-0.2202
20	1113.85	39.35	30.71	3.453	0.7428	0.2689	0.27353	-0.2974
25	1111.43	36.93	28.29	3.173	0.6842	0.2643	0.26401	-0.3795
30	1109.21	34.71	26.07	2.916	0.6306	0.2422	0.25393	-0.4612
35	1107.02	32.52	23.88	2.664	0.5778	0.2383	0.24469	-0.5486
40	1105.11	30.61	21.97	2.442	0.5314	0.2092	0.23560	-0.6322
45	1102.99	28.49	19.85	2.197	0.4802	0.2313	0.22761	-0.7336
50	1101.12	26.62	17.98	1.981	0.4351	0.2037	0.21879	-0.8323
55	1099.26	24.76	16.12	1.765	0.3899	0.2039	0.21102	-0.9419
60	1097.57	23.07	14.43	1.569	0.3490	0.1847	0.20324	-1.0528
65	1095.98	21.48	12.84	1.385	0.3105	0.1736	0.19007	-1.1696
70	1094.47	19.97	11.33	1.211	0.2741	0.1644	0.17381	-1.2943
75	1093.09	18.59	9.95	1.051	0.2408	0.1504	0.15842	-1.4240
80	1091.91	17.41	8.77	0.915	0.2122	0.1289	0.14434	-1.5503
85	1090.83	16.33	7.69	0.789	0.1860	0.1184	0.13227	-1.6822
90	1089.72	15.22	6.58	0.660	0.1591	0.1213	0.12118	-1.8383
95	1088.91	14.41	5.77	0.567	0.1395	0.0882	0.12301	-1.9694
100	1088.32	13.82	5.18	0.499	0.1253	0.0643	0.10314	-2.0771
105	1087.70	13.20	4.56	0.428	0.1104	0.0672	0.08870	-2.2036
110	1087.10	12.60	3.96	0.357	0.0958	0.0661	0.07816	-2.3460
115	1086.82	12.32	3.68	0.326	0.0891	0.0300	0.06715	-2.4180
120	1086.42	11.92	3.28	0.278	0.0793	0.0445	0.05632	-2.5351
125	1086.11	11.61	2.97	0.243	0.0718	0.0335	0.04412	-2.6335
130	1085.80	11.30	2.66	0.207	0.0643	0.0342	0.03863	-2.7448
135	1085.62	11.12	2.48	0.187	0.0601	0.0189	0.03303	-2.8121
140	1085.26	10.76	2.12	0.145	0.0514	0.0394	0.02995	-2.9690
145	1084.99	10.49	1.85	0.114	0.0448	0.0295	0.02349	-3.1049
150	1084.85	10.35	1.71	0.097	0.0413	0.0160	0.01866	-3.1874
155	1084.54	10.04	1.40	0.062	0.0340	0.0330	0.01604	-3.3822
160	1084.38	9.88	1.24	0.043	0.0301	0.0177	0.01064	-3.5049
165	1084.00	9.50	0.86	-0.002	0.0207	0.0422	0.00774	-3.8775



II. Ecuación de balanceo de masa y de secado a 70 °C (1012)

Humedad Inicial (%)	Peso bandeja (g)	Área de bandeja (m ²)	SS (g)	Masa inicial (g)	X inicial Kg H ₂ O/Kg SS	Peso final (g)	L _s /A	Humedad de equilibrio Kg H ₂ O/Kg SS
78.045	1074.5	0.1099	7.86	35.8	3.4580	8.62	0.0715	0.097

TIEMPO (min)	MASA+ BANDEJA (g)	PESO (gr)	HUMEDAD (g)	X Kg H ₂ O/Kg SS	MR	RD Kg H ₂ O/h.m ²	DR AJUST Kg H ₂ O/h.m ²	Ln(MR)
0	1110.30	35.80	27.94	3.458	1.0000			0.0000
5	1108.64	34.14	26.28	3.247	0.9407	0.181		-0.0612
10	1106.91	32.41	24.55	3.027	0.8787	0.189		-0.1293
15	1104.98	30.48	22.62	2.781	0.8097	0.211		-0.2111
20	1103.11	28.61	20.75	2.543	0.7427	0.204	0.26977	-0.2975
25	1101.46	26.96	19.10	2.334	0.6837	0.180	0.26977	-0.3803
30	1099.79	25.29	17.43	2.120	0.6237	0.183	0.26977	-0.4721
35	1097.98	23.48	15.62	1.890	0.5590	0.197	0.26977	-0.5816
40	1096.37	21.87	14.01	1.685	0.5013	0.176	0.26729	-0.6905
45	1094.72	20.22	12.36	1.476	0.4423	0.180	0.25580	-0.8157
50	1093.31	18.81	10.95	1.297	0.3920	0.154	0.24956	-0.9365
55	1091.83	17.33	9.47	1.108	0.3390	0.162	0.24399	-1.0818
60	1090.70	16.20	8.34	0.965	0.2987	0.123	0.23829	-1.2084
65	1089.52	15.02	7.16	0.814	0.2563	0.129	0.17925	-1.3613
70	1088.55	14.05	6.19	0.691	0.2217	0.106	0.16435	-1.5066
75	1087.78	13.28	5.42	0.593	0.1940	0.084	0.15000	-1.6399
80	1087.12	12.62	4.76	0.509	0.1703	0.072	0.13342	-1.7700
85	1086.57	12.07	4.21	0.439	0.1507	0.060	0.12019	-1.8927
90	1086.02	11.52	3.66	0.369	0.1310	0.060	0.10888	-2.0326
95	1085.56	11.06	3.20	0.311	0.1147	0.050	0.09948	-2.1657
100	1085.14	10.64	2.78	0.256	0.0993	0.047	0.09007	-2.3093
105	1084.78	10.28	2.42	0.211	0.0867	0.039	0.08226	-2.4457
110	1084.40	9.90	2.04	0.163	0.0730	0.042	0.07493	-2.6173
115	1084.10	9.60	1.74	0.125	0.0623	0.033	0.06888	-2.7753
120	1083.73	9.23	1.37	0.077	0.0490	0.041	0.06234	-3.0159
125	1083.65	9.15	1.29	0.067	0.0460	0.009	0.05724	-3.0791
130	1083.33	8.83	0.97	0.027	0.0347	0.035	0.04943	-3.3620
135	1083.11	8.61	0.75	-0.001	0.0270	0.023	0.04402	-3.6119

Anexo 3 : Resultados de constantes y estadísticos de los modelos matemáticos estudiados

a. Constantes de los modelos estudiados

Modelo	Tratamientos		Parametros			
			a	k	n	b
Midilli	50°C H ₂ O	50M1	1.0000	0.00367	1.1777	-3.8x10 ⁻⁰⁴
	50°C M0	50M0	0.9990	0.00769	1.0000	1.0x10 ⁻⁰⁶
	50°C NACL	50M2	1.0000	0.00233	1.3400	-1.0x10 ⁻¹⁰
	60°C H ₂ O	60M1	1.0000	0.00317	1.3420	-9.0x10 ⁻⁰⁵
	60°C M0	60M0	1.0000	0.00937	1.0529	-3.1x10 ⁻⁰⁴
	60°C NACL	60M2	0.9988	0.0015	1.4635	9.2x10 ⁻⁰⁶
	70°C H ₂ O	70M1	1.0000	0.00195	1.5341	-1.1x10 ⁻⁰⁴
	70°C M0	70M0	1.0000	0.00603	1.2594	-9.3x10 ⁻⁰⁶
	70°C NACL	70M2	0.9970	0.00493	1.3397	1.0x10 ⁻⁰⁴
Logarítmico			a	k	C	
	50°C H ₂ O	50M1	1.0010	0.00103	-0.0001	
	50°C M0	50M0	1.0465	0.00700	-0.0450	
	50°C NACL	50M2	0.9988	0.01170	0.0070	
	60°C H ₂ O	60M1	1.0640	0.01329	-0.0639	
	60°C M0	60M0	1.1100	0.01071	-0.1107	
	60°C NACL	60M2	1.0050	0.01227	-0.0075	
	70°C H ₂ O	70M1	1.0750	0.01650	-0.0722	
	70°C M0	70M0	1.0100	0.01705	-0.0252	
70°C NACL	70M2	1.0020	0.01978	-0.0010		
Page			k	n		
	50°C H ₂ O	50M1	0.00299	1.2624		
	50°C M0	50M0	0.00842	0.9850		
	50°C NACL	50M2	0.00280	1.3002		
	60°C H ₂ O	60M1	0.00406	1.3015		
	60°C M0	60M0	0.00679	1.1600		
	60°C NACL	60M2	0.00220	1.3841		
	70°C H ₂ O	70M1	0.00259	1.4817		
	70°C M0	70M0	0.00723	1.2221		
70°C NACL	70M2	0.00598	1.2953			
Lewis			k			
	50°C H ₂ O	50M1	0.01028			
	50°C M0	50M0	0.00795			
	50°C NACL	50M2	0.01140			
	60°C H ₂ O	60M1	0.01511			
	60°C M0	60M0	0.01365			
	60°C NACL	60M2	0.01247			
	70°C H ₂ O	70M1	0.01891			
	70°C M0	70M0	0.01832			
70°C NACL	70M2	0.01975				

Henderson-			a	k
Pabis	50°C H ₂ O	50M1	1.0000	0.01032
	50°C M0	50M0	0.9990	0.00762
	50°C NaCl	50M2	1.0000	0.01123
	60°C H ₂ O	60M1	1.0010	0.01556
	60°C M0	60M0	1.0050	0.01420
	60°C NaCl	60M2	1.0000	0.01294
	70°C H ₂ O	70M1	1.0000	0.01972
	70°C M0	70M0	1.0000	0.01878
	70°C NaCl	70M2	1.0000	0.02039

b. Estadísticos de los modelos matemáticos estudiados

Modelo		Tratamientos		Estadístico		
				χ^2	R ²	RMSE
Midilli	50°C H ₂ O	50M1		2.92x10 ⁻⁰⁴	0.9965	0.0697
	50°C M0	50M0		4.88x10 ⁻⁰⁴	0.9925	0.3987
	50°C NaCl	50M2		2.32x10 ⁻⁰⁴	0.9973	0.0508
	60°C H ₂ O	60M1		3.07x10 ⁻⁰⁴	0.9965	0.0586
	60°C M0	60M0		1.75x10 ⁻⁰⁴	0.9977	0.0771
	60°C NaCl	60M2		2.44x10 ⁻⁰⁴	0.9973	0.0515
	70°C H ₂ O	70M1		4.21x10 ⁻⁰⁴	0.9958	0.0635
	70°C M0	70M0		1.23x10 ⁻⁰⁴	0.9985	0.0452
	70°C NaCl	70M2		1.28x10 ⁻⁰⁴	0.9985	0.0167
Logarítmico	50°C H ₂ O	50M1		2.09x10 ⁻⁰³	0.9750	0.5007
	50°C M0	50M0		4.34x10 ⁻⁰⁴	0.9933	0.3548
	50°C NaCl	50M2		2.31x10 ⁻⁰³	0.9732	0.5073
	60°C H ₂ O	60M1		9.42x10 ⁻⁰⁴	0.9893	0.1809
	60°C M0	60M0		9.08x10 ⁻⁰⁵	0.9988	0.0401
	60°C NaCl	60M2		2.90x10 ⁻⁰³	0.9685	0.6145
	70°C H ₂ O	70M1		2.54x10 ⁻⁰³	0.9744	0.3858
	70°C M0	70M0		8.73x10 ⁻⁰⁴	0.9894	0.3212
	70°C NaCl	70M2		1.88x10 ⁻⁰³	0.9785	0.2476

Modelo		Tratamientos		Estadístico		
Page				χ^2	R^2	RMSE
	50°C H ₂ O	50M1		5.07x10 ⁻⁰⁴	0.9939	0.1221
	50°C M0	50M0		4.94x10 ⁻⁰⁴	0.9924	0.4047
	50°C NaCl	50M2		2.08x10 ⁻⁰⁴	0.9976	0.0460
	60°C H ₂ O	60M1		1.62x10 ⁻⁰⁴	0.9982	0.0312
	60°C M0	60M0		4.28x10 ⁻⁰⁴	0.9944	0.1896
	60°C NaCl	60M2		1.18x10 ⁻⁰⁴	0.9987	0.0252
	70°C H ₂ O	70M1		3.01x10 ⁻⁰⁴	0.9970	0.0461
	70°C M0	70M0		6.57x10 ⁻⁰⁵	0.9992	0.0243
	70°C NaCl	70M2		4.01x10⁻⁰⁵	0.9995	0.0053
Modelo		Tratamientos		Estadístico		
Lewis				χ^2	R^2	RMSE
	50°C H ₂ O	50M1		2.08x10 ⁻⁰³	0.9751	0.5042
	50°C M0	50M0		5.55x10 ⁻⁰⁴	0.9915	0.4548
	50°C NaCl	50M2		2.21x10 ⁻⁰³	0.9744	0.4901
	60°C H ₂ O	60M1		2.04x10 ⁻⁰³	0.9768	0.3949
	60°C M0	60M0		8.10x10 ⁻⁰⁴	0.9894	0.3597
	60°C NaCl	60M2		3.00x10 ⁻⁰³	0.9674	0.6412
	70°C H ₂ O	70M1		4.39x10 ⁻⁰³	0.9557	0.6760
	70°C M0	70M0		1.08x10 ⁻⁰³	0.9869	0.3986
	70°C NaCl	70M2		1.88x10 ⁻⁰³	0.9784	0.2525
Henderson-				χ^2	R^2	RMSE
Pabis						
	50°C H ₂ O	50M1		2.09x10 ⁻⁰³	0.9749	0.5045
	50°C M0	50M0		4.93x10 ⁻⁰⁴	0.9924	0.4039
	50°C NaCl	50M2		2.19x10 ⁻⁰³	0.9746	0.4831
	60°C H ₂ O	60M1		2.10x10 ⁻⁰³	0.9761	0.4056
	60°C M0	60M0		8.83x10 ⁻⁰⁴	0.9885	0.3913
	60°C NaCl	60M2		3.14x10 ⁻⁰³	0.9659	0.6684
	70°C H ₂ O	70M1		4.57x10⁻⁰³	0.9539	0.6986

70°C MO	70M0	1.13x10 ⁻⁰³	0.9862	0.4164
70°C NA CL	70M2	1.99x10 ⁻⁰³	0.9772	0.2649

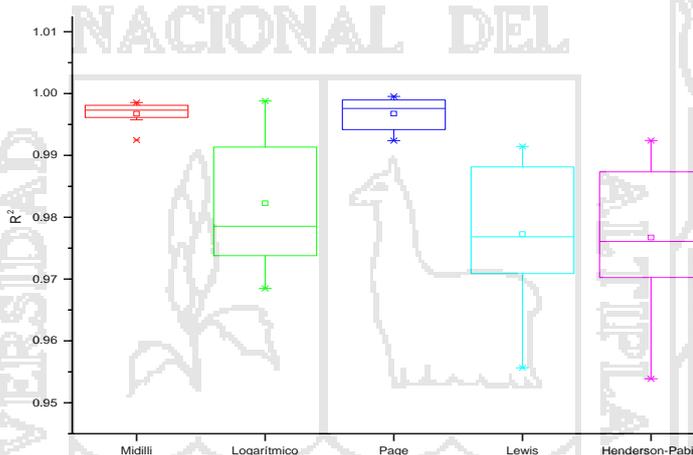
Anexo 4 : Resultados del análisis ANOVA para parámetros R², χ², RMSE

ANOVA para R² a P<0.05

F. de V.	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Value	Prob>F	Sig.
Model	4	0.004	9.17x10 ⁻⁰⁴	11.76786	2.07x10 ⁻⁰⁶	*
Error	40	0.003	7.79x10 ⁻⁰⁵			
Total	44	0.007				

*Al nivel de 0.05, las medias son significativamente diferentes

Modelo	N Análisis	Media	Desviación estándar	SE of Mean
Midilli	9	0.997	0.002	6.15x10 ⁻⁰⁴
Logarítmico	9	0.982	0.011	3.53x10 ⁻⁰³
Page	9	0.997	0.003	8.57x10 ⁻⁰⁴
Lewis	9	0.977	0.011	3.76x10 ⁻⁰³
Henderson-Pabis	9	0.977	0.012	3.94x10 ⁻⁰³



Medias y 95% Intervalos HSD de Tukey

Contraste múltiple HSD de Tukey a P<0.05 para R² según modelo

Pre-tratamiento	N° Obs.	Media	Grupos Homogéneos
Page	9	0.99677	X
Midilli	9	0.99674	X
Logarítmico	9	0.98227	X
Lewis	9	0.97728	X
Henderson-Pabis	9	0.97672	X

Modelo	Dif. Media	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
Logarítmico - Midilli	-0.0145	0.004	4.92	1.0x10 ⁻⁰²	0.05	1	-0.026	-0.003
Page - Midilli	0.0000	0.004	0.01	1.0x10 ⁺⁰⁰	0.05	0	-0.012	0.012
Page - Logarítmico	0.0145	0.004	4.93	1.0x10 ⁻⁰²	0.05	1	0.003	0.026
Lewis - Midilli	-0.0195	0.004	6.62	3.0x10 ⁻⁰⁴	0.05	1	-0.031	-0.008
Lewis - Logarítmico	-0.0050	0.004	1.70	7.5x10 ⁻⁰¹	0.05	0	-0.017	0.007
Lewis - Page	-0.0195	0.004	6.62	3.0x10 ⁻⁰⁴	0.05	1	-0.031	-0.008
Henderson Pabis - Midilli	-0.0200	0.004	6.81	2.0x10 ⁻⁰⁴	0.05	1	-0.032	-0.008
Henderson Pabis - Logarítmico	-0.0056	0.004	1.89	6.7x10 ⁻⁰¹	0.05	0	-0.017	0.006

Henderson Pabis - Page	-0.0201	0.004	6.81	2.0x10 ⁻⁰⁴	0.05	1	-0.032	-0.008
Henderson Pabis - Lewis	-0.0006	0.004	0.19	1.0x10 ⁺⁰⁰	0.05	0	-0.012	0.011

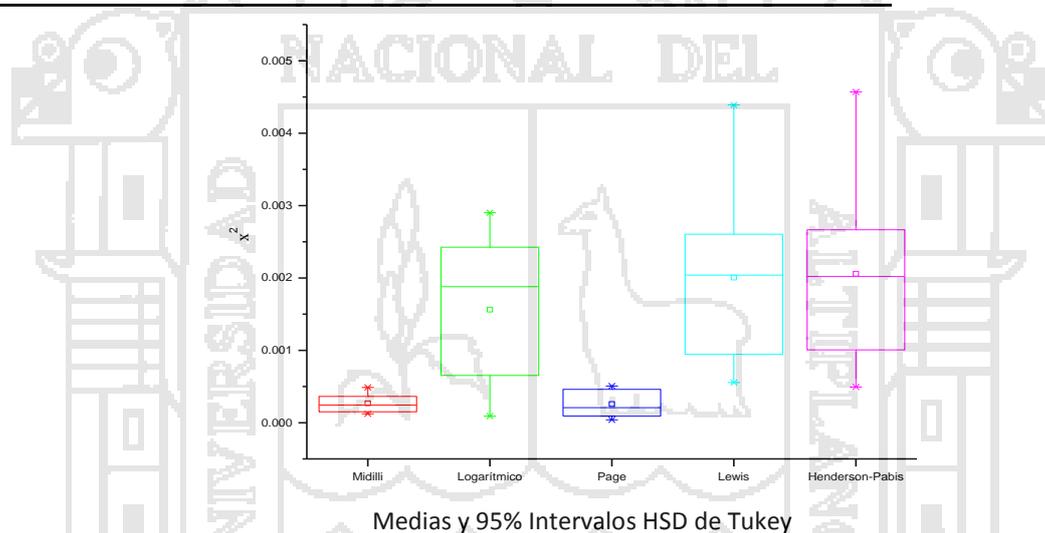
Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.05
 Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.05

ANOVA para χ^2 a P<0.05

F. de V.	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Value	Prob>F	Sig.
Model	4	2.94x10 ⁻⁰⁵	7.35x10 ⁻⁰⁶	9.27362	2.12x10 ⁻⁰⁵	*
Error	40	3.17x10 ⁻⁰⁵	7.92x10 ⁻⁰⁷			
Total	44	6.11x10 ⁻⁰⁵				

*Al nivel de 0.05, las medias son significativamente diferentes

Modelo	N Analysis	Media	Desviación estándar	SE of Mean
Midilli	9	2.7x10 ⁻⁰⁴	1.3x10 ⁻⁰⁴	4.17x10 ⁻⁰⁵
Logarítmico	9	1.6x10 ⁻⁰³	1.0x10 ⁻⁰³	3.33x10 ⁻⁰⁴
Page	9	2.6x10 ⁻⁰⁴	1.8x10 ⁻⁰⁴	6.06x10 ⁻⁰⁵
Lewis	9	2.0x10 ⁻⁰³	1.2x10 ⁻⁰³	3.93x10 ⁻⁰⁴
Henderson-Pabis	9	2.1x10 ⁻⁰³	1.2x10 ⁻⁰³	4.12x10 ⁻⁰⁴



Contraste múltiple de Tukey a P<0.05 para χ^2 según modelo

MODELO	Observaciones	Media	Grupos homogéneos
Henderson-Pabis	9	0.002057398	X
Lewis	9	0.002004976	X
Logarítmico	9	0.001562162	X X
Midilli	9	0.000267656	X
Page	9	0.000258156	X

Comp.	Dif. Media	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
Logarítmico - Midilli	0.0013	4.2x10 ⁻⁰⁴	4.36	2.9x10 ⁻⁰²	0.05	1	9.6x10 ⁻⁰⁵	2.5x10 ⁻⁰³
Page - Midilli	0.0000	4.2x10 ⁻⁰⁴	0.03	1.0x10 ⁺⁰⁰	0.05	0	-1.2x10 ⁻⁰³	1.2x10 ⁻⁰³
Page - Logarítmico	-0.0013	4.2x10 ⁻⁰⁴	4.39	2.7x10 ⁻⁰²	0.05	1	-2.5x10 ⁻⁰³	-1.1x10 ⁻⁰⁴
Lewis - Midilli	0.0017	4.2x10 ⁻⁰⁴	5.85	1.6x10 ⁻⁰³	0.05	1	5.4x10 ⁻⁰⁴	2.9x10 ⁻⁰³
Lewis - Logarítmico	0.0004	4.2x10 ⁻⁰⁴	1.49	8.3x10 ⁻⁰¹	0.05	0	-7.6x10 ⁻⁰⁴	1.6x10 ⁻⁰³
Lewis - Page	0.0018	4.2x10 ⁻⁰⁴	5.89	1.5x10 ⁻⁰³	0.05	1	5.5x10 ⁻⁰⁴	3.0x10 ⁻⁰³
Henderson Pabis - Midilli	0.0018	4.2x10 ⁻⁰⁴	6.03	1.1x10 ⁻⁰³	0.05	1	5.9x10 ⁻⁰⁴	3.0x10 ⁻⁰³



Henderson Pabis - Logarítmico	0.0005	4.2x10 ⁻⁰⁴	1.67	7.6x10 ⁻⁰¹	0.05	0	-7.0x10 ⁻⁰⁴	1.7x10 ⁻⁰³
Henderson Pabis - Page	0.0018	4.2x10 ⁻⁰⁴	6.06	1.0x10 ⁻⁰³	0.05	1	6.0x10 ⁻⁰⁴	3.0x10 ⁻⁰³
Henderson Pabis - Lewis	0.0001	4.2x10 ⁻⁰⁴	0.18	1.0x10 ⁺⁰⁰	0.05	0	-1.2x10 ⁻⁰³	1.3x10 ⁻⁰³

Sig. 1 indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.05

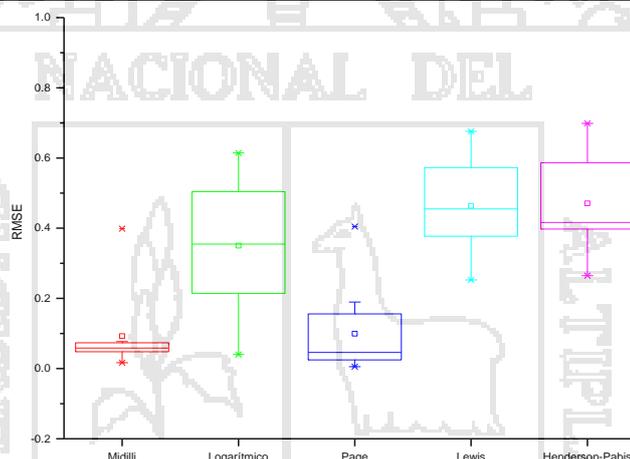
Sig. 0 indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.05

ANOVA para RMSE a P<0.05

F. de V.	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Value	Prob>F	Sig.
Modelo	4	1.27501	0.31875	16.12577	6.08x10 ⁻⁰⁸	*
Error	40	0.79067	0.01977			
Total	44	2.06568				

*Al nivel de 0.05, las medias son significativamente diferentes

Modelo	N Análisis	Mean	Desviación estándar	SE of Mean
Midilli	9	0.0924	0.116	0.0387
Logarítmico	9	0.3503	0.178	0.0595
Page	9	0.0994	0.129	0.0429
Lewis	9	0.4636	0.134	0.0446
Henderson Pabis	9	0.4707	0.138	0.0460



Medias y 95% Intervalos HSD de Tukey

Contraste múltiple de Tukey a P<0.05 para RMSE según modelo

MODELO	Observaciones	Media	Grupos homogéneos
Henderson Pabis	9	0.47074	X
Lewis	9	0.46357	X
Logarítmico	9	0.35031	X
Page	9	0.09937	X
Midilli	9	0.09243	X

Comp.	Dif. Media	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
Logarítmico - Midilli	0.258	0.066	5.50	3.2x10 ⁻⁰³	0.05	1	0.07	0.45
Page - Midilli	0.007	0.066	0.15	1.0x10 ⁺⁰⁰	0.05	0	-0.18	0.20
Page - Logarítmico	-0.251	0.066	5.35	4.3x10 ⁻⁰³	0.05	1	-0.44	-0.06
Lewis - Midilli	0.371	0.066	7.92	1.7x10 ⁻⁰⁵	0.05	1	0.18	0.56
Lewis - Logarítmico	0.113	0.066	2.42	4.4x10 ⁻⁰¹	0.05	0	-0.08	0.30
Lewis - Page	0.364	0.066	7.77	2.3x10 ⁻⁰⁵	0.05	1	0.17	0.55
Henderson Pabis - Midilli	0.378	0.066	8.07	1.2x10 ⁻⁰⁵	0.05	1	0.19	0.57

Henderson Pabis - Logarítmico	0.120	0.066	2.57	3.8×10^{-01}	0.05	0	-0.07	0.31
Henderson Pabis - Page	0.371	0.066	7.92	1.6×10^{-05}	0.05	1	0.18	0.56
Henderson Pabis - Lewis	0.007	0.066	0.15	$1.0 \times 10^{+00}$	0.05	0	-0.18	0.20

Sig. **1** indica que la diferencia entre las medias es significativa al nivel de 0.05

Sig. **0** indica que la diferencia entre las medias no es significativa al nivel de 0.05

Anexo 5 : Regresiones lineales en el cálculo de difusividad efectiva del agua

Tratamiento	Pendiente	Número de puntos	Error estándar	R ² Ajustado	Difusividad (D _{eff})
50-M1	-2.17×10^{-04}	243	2.38×10^{-06}	0.97158	5.870×10^{-12}
50-M0	-1.43×10^{-04}	374	5.09×10^{-07}	0.99528	3.871×10^{-12}
50-M2	-2.35×10^{-04}	223	2.74×10^{-06}	0.97064	6.364×10^{-12}
60-M1	-2.95×10^{-04}	186	3.23×10^{-06}	0.97816	7.970×10^{-12}
60-M0	-2.71×10^{-04}	206	2.54×10^{-06}	0.98228	7.340×10^{-12}
60-M2	-2.62×10^{-04}	211	2.61×10^{-06}	0.97942	7.087×10^{-12}
70-M1	-4.35×10^{-04}	143	6.23×10^{-06}	0.97143	1.175×10^{-11}
70-M0	-3.61×10^{-04}	179	2.41×10^{-06}	0.99206	9.763×10^{-12}
70-M2	-4.06×10^{-04}	126	5.14×10^{-06}	0.98018	1.097×10^{-11}

Anexo 6 : Cálculo de la energía de activación

Tratamiento	Pendiente (m)	Intercepto	D _{eff} Est	E _{ac}
-------------	---------------	------------	----------------------	-----------------

50-M0	-5147.59657	-10.29532	4.08x10 ⁻¹²	56.0442869
60-M0	-5147.59657	-10.29532	6.58x10 ⁻¹²	55.6467319
70-M0	-5147.59657	-10.29532	1.03x10 ⁻¹¹	55.2723479
50-M1	-3844.37028	-13.98134	5.77x10 ⁻¹²	41.8554539
60-M1	-3844.37028	-13.98134	8.25x10 ⁻¹²	41.5585486
70-M1	-3844.37028	-13.98134	1.15x10 ⁻¹¹	41.2789481
50-M2	-2999.98166	-16.55269	6.02x10 ⁻¹²	32.6622008
60-M2	-2999.98166	-16.55269	7.95x10 ⁻¹²	32.4305087
70-M2	-2999.98166	-16.55269	1.03x10 ⁻¹¹	32.2123204

Al recalcular los valores de la difusividad efectiva con las expresiones abajo detalladas, obtenidos de la Figura 21, fue posible estimar la energía de activación.

M0=Muestras control

$$D_{eff} = 3.38 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{5147.59657}{T + 273.15}\right)$$

M1=Muestras escaldado en agua

$$D_{eff} = 8.47 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{3844.37028}{T + 273.15}\right)$$

M2=Muestras escaldados en solución de NaCl al 3%

$$D_{eff} = 6.48 \times 10^{-8} \exp\left(-\frac{2999.98166}{T + 273.15}\right)$$

Bondad del ajuste de regresión lineal

	M0	M1	M2
Numero de puntos	3	3	3
Grados de libertad	1	1	1
χ²reducido	0.0178	0.00179	0.01991
Suma de cuadrados del error	0.0178	0.00179	0.01991
R²(COD)	0.96036	0.99263	0.88031

a. valores de las constantes del modelo de GAB para ciertas hortalizas

Producto	Constantes de la ecuación de GAB			X para $a_w=0.6$	a_w de la monocapa
	X_m	C	K		
Orégano	6.03	21.78	0.82	11.27	0.24
perejil	6.45	9.83	0.89	12.78	0.26
chili	0.092	24.2530	0.8740 b		

Fuente: García *et al.* (2007)

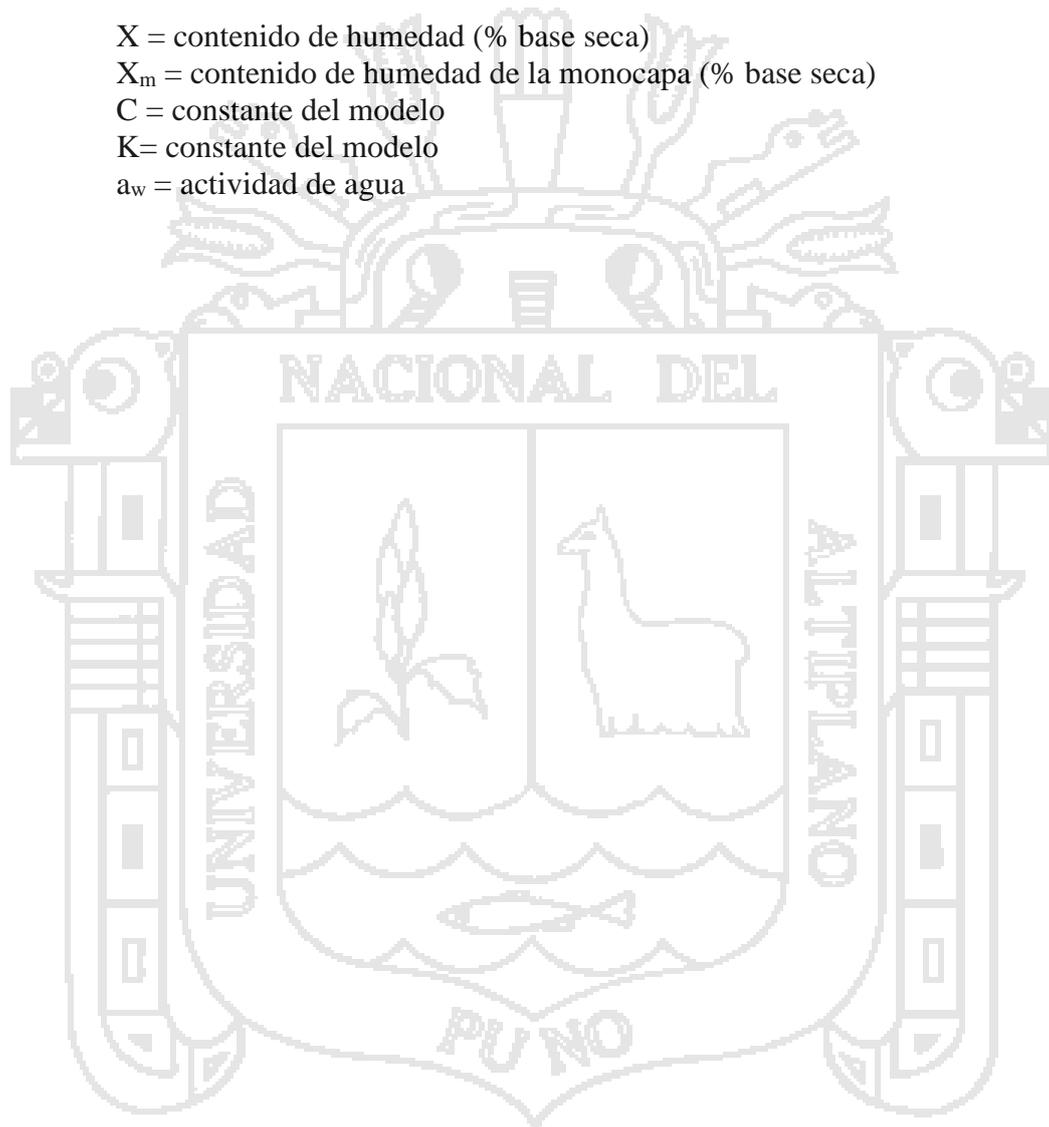
Donde:

X = contenido de humedad (% base seca)

 X_m = contenido de humedad de la monocapa (% base seca)

C = constante del modelo

K = constante del modelo

 a_w = actividad de agua

Anexo 7 : Imágenes de hojas de quinua

Imagen 1 . Inicio de panojamiento de quinua



Imagen 3 . Preparación de muestras



Imagen 2 . Desinfección de muestras



Imagen 4 . Espesor de hojas de quinua



Imagen 5 . Secador lecho fijo



Imagen 7 . Puerto RS-232 de la balanza control de peso.



Imagen 8 . Rehidratación de muestras secas



Imagen 6 . Cámara de secado con bandejas cargadas



Imagen 9 . Muestras secas



Anexo 8 : Certificado de análisis químico proximal

Véase la siguiente Página.



Universidad Nacional del Altiplano - Puno

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Av. Floral 1153, C.U. Telf. (051) 366080 IP. 20102 Casilla 291 e-mail: fca-una@eudoramail.com



LABORATORIO DE EVALUACIÓN NUTRICIONAL DE ALIMENTOS

INFORME DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS Nro. 001-2015

SOLICITANTE : Richard Paquita Ninarauqui
 PROCEDENCIA : ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL
 FACULTAD DE CIENCIAS DE AGRARIAS
 TESIS : "EFECTO DEL ESCALDADO Y LA TEMPERATURA EN LA CINÉTICA DE SECADO DE LAS HOJAS DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Will), VARIEDAD SALCEDO-INIA"
 PRODUCTOS : HOJAS DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Will)
 ENSAYO SOLICITADO : FISICO QUIMICO
 FECHA DE RECEPCION : 05-01-2015
 FECHA DE ENSAYO : 05-01-2015
 FECHA DE EMISION : 12-01-2015

RESULTADOS:

De acuerdo al Informe de los Análisis de Laboratorio que obra en los archivos los resultados son:

RESULTADOS FISICO QUIMICOS

MUESTRA	% Humedad	% Ceniza	% Proteína	% Grasa	% Fibra	% Carbohidratos	pH
M0	82.89	3.48	5.26	1.44	2.26	4.67	6.0
M0	82.63	3.45	5.25	1.50	2.24	4.93	6.1
M0	82.56	3.47	5.31	1.47	2.25	4.94	6.1
M1	86.58	2.36	3.84	1.05	1.35	4.82	-----
M1	86.62	2.24	3.73	1.13	1.35	4.93	-----
M1	86.68	2.29	3.81	1.08	1.34	4.80	-----
M2	78.25	4.52	6.48	1.78	2.85	6.12	-----
M2	78.08	4.68	6.54	1.86	2.80	6.04	-----
M2	78.08	4.55	5.59	1.92	2.78	6.12	-----

CONCLUSIÓN : Los resultado de los análisis están conformes.

Puno, C. U. 12 de Enero del 2015



Ing. OSWALDO APPELI ALCA
 Control de Calidad de Alimentos
 LABORATORIO
 C.I.P. 160625



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
 FAC. CS. AGRARIAS
 Ing. M.Sc. M. Alfredo Castellanos P.
 DECANO