

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SECADORES DE QUINUA, SECADOR DE BANDEJAS Y SOLAR TIPO INVERNADERO

***Ing. Angel Patricio Mena Reinoso, Mg**

✉ legnanem@yahoo.es, angel.mena@epoch.edu.ec
 Escuela Politécnica de Chimborazo
 Facultad de Informática y Electrónica
 Escuela de Diseño Gráfico
 Escuela Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales

****Dr. Jorge Vinicio Tuapanta Dacto, Mg**

✉ tuapantajorgevd@hotmail.com, jtuapanta@epoch.edu.ec
 Escuela Politécnica de Chimborazo
 Facultad de Informática y Electrónica
 Escuela Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes
 Escuela Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales

RESUMEN

El objetivo de la investigación científica es evaluar el rendimiento de dos tipos de secadores de quinoa, el secador tipo bandejas y el secador tipo invernadero. Se trabajó en dos fases, en la primera se utilizó el secador de bandejas para secar la quinoa de tres muestras diferentes, una con cascara y dos sin ella, a tres temperaturas de 30 °C, 40 °C y 60 °C, con una humedad inicial diferente en cada muestra. En la segunda fase se utilizó el secador solar tipo invernadero de doble capa, para secar tres tipos de muestras con las especificaciones antes indicadas, a excepción de las temperaturas, a diferente humedad inicial y en tres días diferentes. Los resultados obtenidos en el secado de la quinoa se ajustaron a un modelo de regresiones lineales, obteniéndose un R2 entre 0.95 a 0.99 en los dos tipos de secadores, resultando que el modelo que mejor describe la cinética del secado de la quinoa es el modelo de Page junto con el modelo de Henderson and Pabis. Se efectuó la prueba de hipótesis considerando varianzas iguales, y se determinó que el mejor rendimiento de secado, se obtiene en el secador de bandejas.

PALABRAS CLAVES: Quinoa, comparación, secadores, curvas de secado, cinética del secado.

ABSTRACT

The objective of the research scientific is to evaluate the performance of two kinds of dryers to quinoa, the dryer of trays and the dryer of greenhouse. The project was development in two phases, in the first one the dryer of trays, was use to dry the quinoa of three different samples, one with husk and the other two without it, to three temperatures of 30 °C, 40 °C and 60 °C, with a different humidity in each one. In the second one phase, it was use the dryer solar of greenhouse and double layer, to dry three kinds of samples with the specifications later indicated, except for the temperatures, at different initial humidity and on three different days. The results obtained in the drying of quinoa were adjust to a model of lineal regressions, obtaining an R2 between 0.95 to 0.99 in the two kinds of dryers, resulting in the model that best describes the drying kinetics of quinoa is the Page model, next to the Henderson and Pabis model. Hypothesis testing was done, considering equal variances and it was determine that the best drying performance is obtained in the tray dryer.

Fecha recepción:
 abril 2017
 Fecha aceptación:
 junio 2017

KEYWORDS: Quinoa, comparison, dryers, drying curves, drying kinetics

1. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad el hombre guarda sus cultivos de cereales y granos, ya sea para el consumo propio o para la siembra, por lo que ha ido creando procedimientos que permitan conservar el mayor tiempo.

Los tratamientos pos cosecha están disponibles para asegurar la conservación a corto y largo plazo de los granos, incluye el almacenamiento sellado, el tratamiento químico, el enfriamiento y el secado de los granos (Brooker, Bakker, Arkema y Hall, 1992)

Según Condorhuamán, Armijo, Reyna, & Blas, (2004), las razones por las que se emplea el secado en los procesos industriales son su facilidad de manipulación y conservación de la calidad del producto. En ocasiones no es posible el secado de granos por medios de secadores industriales, especialmente en zonas rurales por lo que en lugares con buena energía solar se aprovecha con un diseño adecuado de secadores solares para secado (Ezekoye & Enebe, 2006).

Varios autores como Araneda Becerra, (2014); Zahed & Epstein, (1992); Pérez, (2000); Lara Aravena, Vega Gálvez, Sanders Maya, Miranda, & Martínez, (2013) entre otros han realizado trabajos sobre el modelado cinético del secado de diferentes granos, los mismos que han permitido tener los parámetros apropiados para el diseño y

construcción de secadores que permitan secar los granos en forma artesanal e industrial aumentando el tiempo de vida de estos.

En los diferentes secadores, el secado ocurrió en el período de velocidad decreciente, siendo el tiempo de secado y la temperatura las variables significativas sobre la humedad del grano; los modelos de Page, ecuación difusiva de “tiempos cortos” y una modificación introducida a éste último resultaron adecuados ($R^2 > 0.99$) para describir los datos (Ordóñez, 2012).

En el proceso de secado de otros productos como la yuca se utiliza las variables temperatura y flujo de aire en el secador de bandejas, en el cual se concluye que el modelo de Page muestra un error relativo inferior a 6% (Castiglioni, da Silva, Caliarí y Júnior, 2013).

En el trabajo realizado por Calle, Aguirre, Ugarte y Gabriel, (2010), la investigación lo efectuaron en dos fases, la primera tres métodos y tres tiempos de secado en dos accesiones de quinua, la segunda fase el efecto de tres tiempos de secado utilizando el M1 (deseccador tipo campana más sílica gel conectada a la bomba de vacío) y efecto de la temperatura de almacenamiento (4 °C y -20 °C) en 10 accesiones de quinua, indicando que las semillas secadas por 40 y 60h, almacenadas a -20 °C presentaron mayores valores de germinación y vigor.

En la Cinética del secado y propiedades físicas de la quinua y amaranto y calidad de semilla de quinua, trabajo presentado por Moscon, (2015), realiza un análisis sobre el modelo matemático que describe de mejor manera el secado tanto de la quinua como del amaranto a diferentes temperaturas como son 40, 50, 60 y 70 °C; realiza un análisis físico de los granos, y seca las semillas de quinua a 40 °C, y determina que la mejor calidad fisiológica (germinación y vigor) de semillas de quinua se producen cuando las panículas están parcial o totalmente secas.

La presente investigación científica es de tipo experimental, exploratoria y se utiliza el método inductivo - deductivo para a partir de las observaciones sistemáticas de la realidad descubrir la generalización de un hecho.

La investigación pretende determinar que tipo de secador posee mejor rendimiento en el secado de la quinua, para lo cual se utiliza el secador de bandejas y el secador solar tipo invernadero de dos capas circulación natural. Además se buscó el modelo matemático que mejor describe la cinética del secado con los datos obtenido.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el equipo de Operaciones Unitarias de la Carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Chimborazo, que consiste en un secador de bandejas, una

balanza analítica Mettler Toledo ME204 de 220 g de capacidad y una precisión de 0.0001 g, una balanza Digital de 0.01 g de precisión y 300 g de capacidad, un digital Thermometer & Hygrometer KT-907.

La etapa de experimentación se lleva a cabo con tres kilogramos de la quinua INIAP TUNKAHUAN (Peralta I. , 2009), un kilogramo con cascarilla producida en el sector Guano (Peralta, y otros, 2014), y dos sin cascarilla, una adquirida a la empresa Sumaklife (ERPE) y otra en CAMARI, las dos últimas libre de impurezas y las tres con 10 a 12% de humedad en base húmeda. Para determinar la humedad de las muestras antes del secado y después del proceso de secado se utilizó una estufa a 135 °C por 2 horas (Según el método ASAE S352.2) registrando la pérdida de peso, para lo cual se usó una balanza analítica Mettler Toledo ME204 (precisión de 0.0001 g). La experimentación se realiza en dos fases la primera en el secador de bandejas y la segunda en el secador solar tipo invernadero.

Fase I. Secado de la quinua en el secador de bandejas

Los tres tipos de quinua considerados para la experimentación se someten a un lavado, enjuague y escurrido por un lapso de 5 minutos, y posteriormente se homogenizó. De cada muestra se obtuvo una sub-muestra de 5 g y se determina su humedad inicial, que tiene la quinua antes de entrar al secador. De la quinua lavada,

se tomó 7 muestras de 20 g con cascara, y 7 muestras de 30 g sin cascara de las dos empresas respectivamente.

Para el secado se utiliza tres temperaturas 30, 40 y 60 °C con una velocidad de flujo de aire de 1.85 + / - 0.2 m/s. Para registrar la pérdida de peso, se hizo a intervalos de 10 minutos, durante una hora, y luego a intervalos variables de 20, 30, 40 minutos y 1 hora.

Fase II. Secado de la quinua en el secador solar tipo invernadero

Para la experimentación de esta fase se construye el secador solar tipo invernadero 40x80x60 cm semi – elíptico con un recubrimiento de plástico de invernadero con agujeros en la parte superior, luego una segunda capa de plástico en la que a un lado sale un tubo para evacuación de la humedad.

Para la experimentación, las cantidades de las muestras toman similares a las consideradas en el secador de bandejas y se realizó las mismas operaciones previas al secado. El secado se efectuó en tres días diferentes, registrando los datos aproximadamente cada 10 minutos durante una hora y luego en forma variable como en el caso anterior.

Modelos matemáticos de la cinética del secado

Se emplea los propuestos por Newton, Page, Henderson and Pabis y Thompson cuyas ecuaciones son presentas en la

Tabla 1.

Humedad en base húmeda (H_{bh})

Es la relación entre el peso del agua y el peso total de la muestra multiplicado por 100, se la calcula con:

$$H_{bh} = \frac{P_a}{P_t} = \frac{P_a}{P_a + P_{ma}}$$

En donde P_a es el peso del agua, P_{ms} el peso de la materia seca, P_t peso total.

Humedad en base seca (H_{bs})

Es la relación entre la cantidad de agua y el peso de la materia seca multiplicado por 100, se la calcula con:

$$H_{bs} = \frac{P_a}{P_{ma}} 100 \quad (2)$$

Nombre del Modelo	Ecuación del Modelo	Referencias
Newton (Lewis o Exponencial)	$MR = e^{-kt}$	(Panchariya, 2002)
Page	$MR = e^{-kt^n}$	(Doymaz, 2005; Panchariya, 2002; Simal, 1997)
Henderson and Pabis	$MR = a e^{-kt}$	(Henderson, 1961)
Thompson	$MR = e^{-a - \frac{\sqrt{a^2 + 4bt}}{2b}}$	Thompson (1968) (Parra-Corronado, et al. 2008)

Tabla 1: Modelos matemáticos para la descripción de curvas de secado
Fuente: Varios Autores
Elaborado: Por los autores

Donde:

MR = Razón de humedad; t = Tiempo de secado en horas; k = Constantes de secado; a, b, n = Coeficientes de ajuste.

Rendimiento de secado

Para el efecto primero se debe calcular la pérdida de peso producto del secado.

Pérdida de peso del grano por pérdida de humedad [P.P.]

La pérdida de peso del grano depende siempre de la humedad inicial y la humedad final a la que queremos llevar. El valor se da por la siguiente fórmula y es un dato porcentual:

$$P.P. = \frac{(Hi - Hf)}{100 - Hf} 100 \quad (3)$$

Donde:

Hi = humedad inicial y Hf = humedad final

Rendimiento: en kilogramos de agua a evaporar por tonelada de cereal.

$$R_s = \frac{P.P.\% * 1000 \text{ kg / tn}}{100} \quad (4)$$

En kg agua / tn de cereal.

3. RESULTADOS

Fase I. Secado de la quinua en el secador de bandejas

En las figuras 1, 2, y 3 se observa que existe similitud en la pérdida de peso en el proceso de secado entre las muestras y humedad inicial (ver tablas 1, 2 y 3), pero en el caso de la quinua con cascarilla, la eliminación de agua se da más lentamente. El tiempo

de secado depende de la humedad inicial y principalmente de la temperatura de secado.

Muestra 1

Curva de secado de Quinua: Con cáscara
Altura Lecho (altura muestra): 1,0 cm

Temperatura	Humedad Inicial
30 °C	48,8048
40 °C	60,4056
60 °C	61,4571

Tabla 2: Temperatura-Humedad Inicial
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

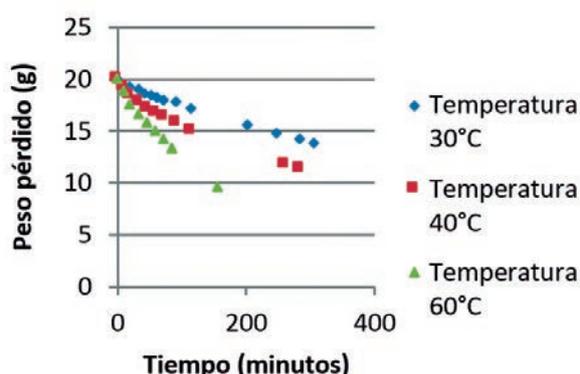


Figura 1: Curva Peso vs Tiempo (Sector Guano)
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Muestra 2

Curva de secado de Quinua:
SUMAKLIFE
Altura Lecho: 0.51 cm

Temperatura	Humedad Inicial
30 °C	33,6617
40 °C	33,5631
60 °C	31,8348

Tabla 3: Temperatura-Humedad Inicial
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

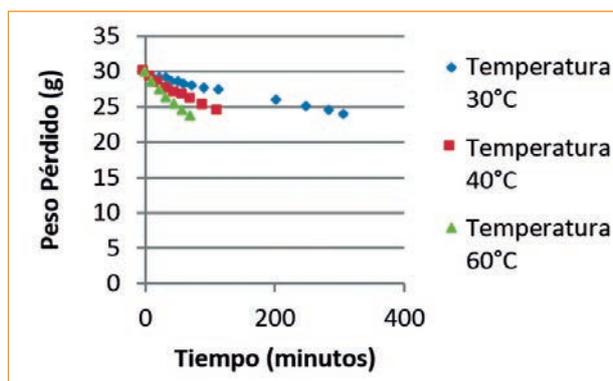


Figura 2: Curva Peso vs Tiempo (SumakLife)
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Muestra 3

Curva de secado de Quinua: CAMARI

Altura Lecho: 0.51 cm

Temperatura	Humedad Inicial
30 °C	34,4149
40 °C	37,9042
60 °C	31,9550

Tabla 4: Temperatura-Humedad Inicial
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

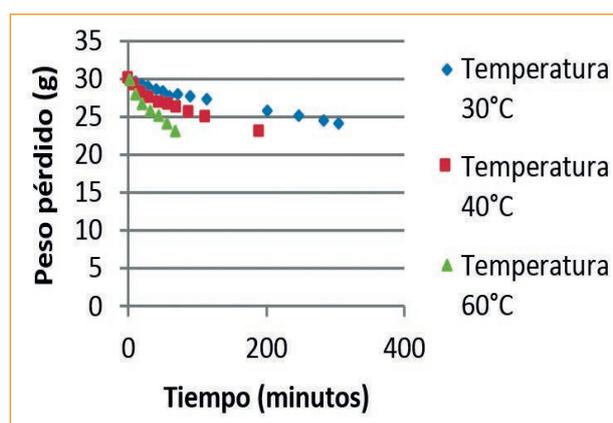


Figura 3: Curva Peso vs Tiempo (Camari)
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Fase II. Secado de la quinua en el secador solar tipo invernadero

En las figuras 4, 5 y 6, se aprecia que la pérdida de peso en el secado de las muestras se mantiene similar entre ellas

durante los tres días, a pesar de tener diferentes porcentajes de humedad inicial cuyos valores se presentan en las tablas 5, 6 y 7.

Muestra 1

Curva de secado de Quinua: Con cáscara

Temperatura	Humedad Inicial
Día 1	48,2000
Día 2	60,4056
Día 3	61,4571

Tabla 5: Temperatura-Humedad Inicial
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

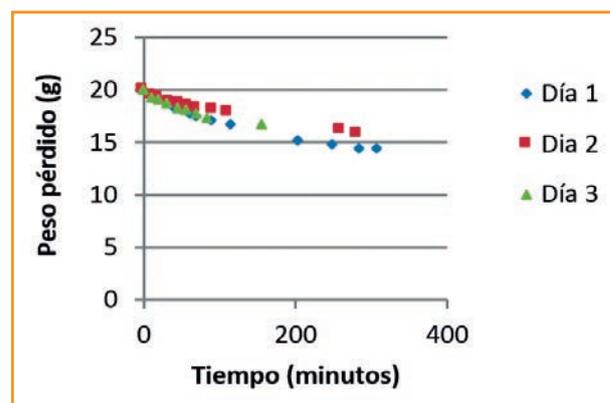


Figura 3: Curva Peso vs Tiempo (Camari)
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Muestra 2

Curva de secado de Quinua: SUMAKLIFE

Temperatura	Humedad Inicial
Día 1	33,6617
Día 2	33,5631
Día 3	31,8348

Tabla 6: Temperatura-Humedad Inicial
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

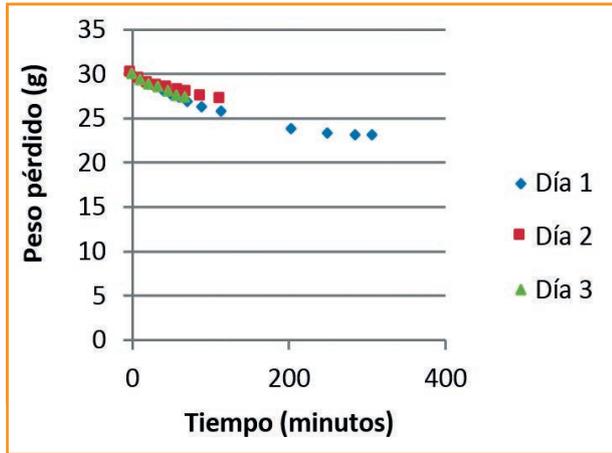


Figura 5: Curva Peso vs Tiempo (SumakLife)
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Muestra 3

Curva de secado de Quinua: CAMARI

Temperatura	Humedad Inicial
Día 1	34,4149
Día 2	37,9042
Día 3	31,9550

Tabla 7: Temperatura-Humedad Inicial
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

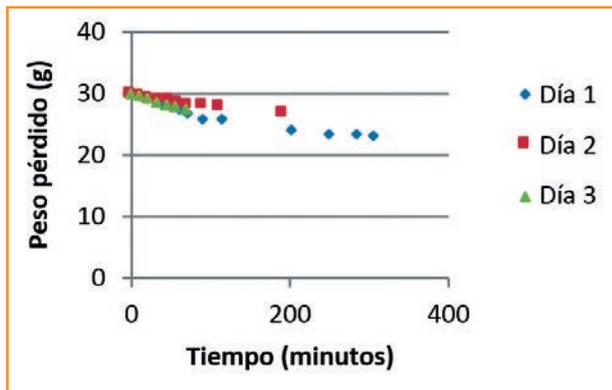


Figura 6: Curva Peso vs Tiempo (Camari)
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Curva de secado

La humedad va disminuyendo conforme la temperatura del lecho aumenta y entre las muestras se aprecia que a la misma temperatura describen curvas similares

a pesar de tener humedades iniciales diferentes, esto en el secador de bandejas (ver figura 7).

En el secador solar se aprecia que la pérdida de humedad en cada muestra y día es menor comparado con el secador de bandejas, en los días 1, 2 y 3 con las temperaturas de 30, 40 y 60 °C respectivamente (ver figura 8).

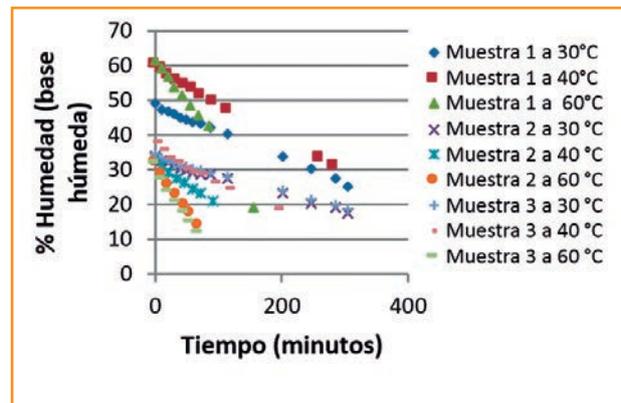


Figura 7: Curva Humedad vs Tiempo (Secador Bandejas)
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

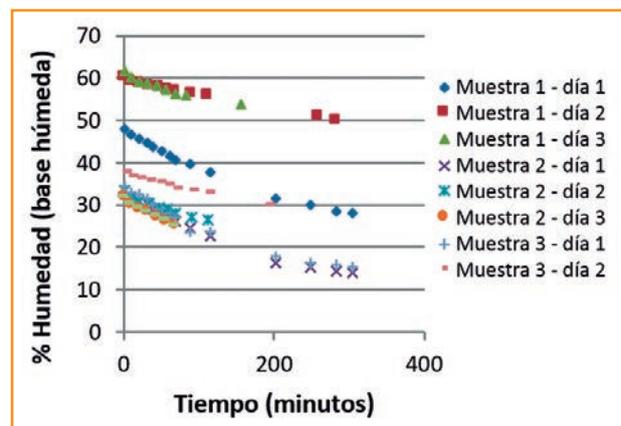


Figura 8: Curva Humedad vs Tiempo (Secador Solar)
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

DETERMINACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Del experimento en los dos tipos de secadores y de las tres muestras, de acuerdo a los gráficos anteriores y aplicando en los modelos directamente sin pasar a la relación de humedad, el modelo matemático que más se ajusta es el de Henderson y Pabis, luego el de Thompson.

Los modelos fueron evaluados en base al coeficiente de determinación (R^2), la reducción de Chi-cuadrado (χ^2), la suma de los errores cuadrados de las desviaciones entre los datos experimentales y los valores de los modelos analizados (SSE); y la raíz media de los errores cuadrados (RMSE).

Se seleccionó el modelo adecuado con base a los datos experimentados en los rangos de: 0.928721 a 0.99967 para R^2 , 5.3E-5 a 5.05E-4 para χ^2 , 3.8E-5 a 4.33E-4 para SSE y 6.17E-3 a 2.081E-2 para RMSE; se observa que para todos los casos, muestras y secadores, el modelo que mejor se ajusta es el de Henderson y Pabis junto con el de Thompson y Page.

SECADOR DE BANDEJAS

Los resultados en el secador de bandejas muestran que R^2 está entre 96.8278 y 99.9704, Chi-cuadrado de 0.000494 a 0.000462, desviación estándar (SSE) de 0.00042329 a 0.00035904, mientras que la raíz media de los errores cuadrados (RMSE) de 0.02057 a 0.02549.

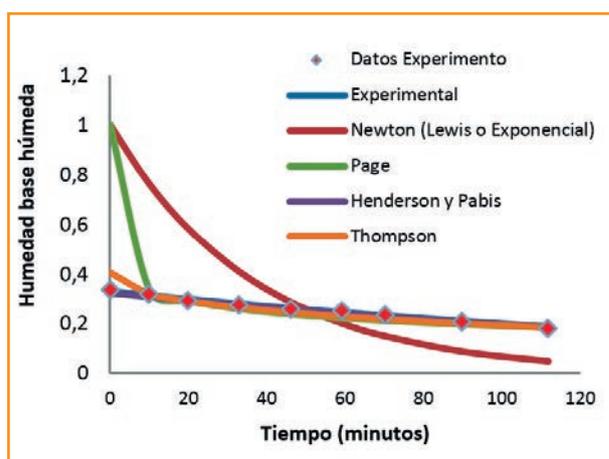


Figura 9: Comparación de curvas de secado experimental con algunos modelos matemáticos en el secador de bandejas a 40°C (Muestra 2)
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

SECADOR SOLAR

Siguiendo la nomenclatura normal de las investigaciones sobre la cinética del secado de granos y cereales se tiene que calcular la relación de humedad en base seca de las muestras y luego realizar el ajuste de curva para ver a cuál modelo matemático los datos experimentales se aproxima.

Los resultados en el secador solar muestran que R^2 está entre 96.5975 y 99.9988, Chi-cuadrado de 0.001544 a 1.32E-05, desviación estándar (SSE) de 0.0013238 a 1.029E-05, mientras que la raíz media de los errores cuadrados (RMSE) de 0.03638 a 0.00321.

Los modelos que mejor describen la cinética del secado de la quinua, son Page, Henderson and Pabis y Thompson para las tres muestras, los dos tipos de secadores y diversas temperaturas (30, 40 y 60 °C).

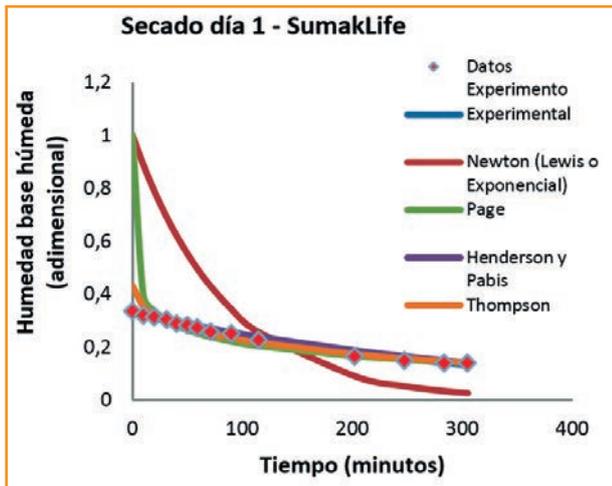


Figura 10: Comparación curvas de secado experimental con algunos modelos matemáticos en el secador solar día 1 (Muestra 2)
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

El mejor modelo que describe la cinética de secado de la quinua es el modelo de Page con un R^2 de 0,999704 para el secador de bandejas, y 0,999988 para el secador solar dada su simplicidad y facilidad de uso.

El modelo de Page ha sido utilizado para describir el secado de masa fibrosa de mandioca, Castiglioni, da Silva, Caliar, & Júnior, (2013); de tomate (Sanjinez-Argandona, Branco, Bittencourt, & Munhoz, (2011), granos de frijoles Corrêa, Resende, Martinazzo, Goneli, & Botelho, (2007) entre otros.

4. DISCUSIÓN

En las figuras 11, 12 y 13 se aprecia que la pérdida de peso (contenido de agua) es mayor en el secador de bandejas que en el solar, sin embargo no se da una apreciación muy notoria entre el secado en bandejas a una temperatura de 30°C. Podemos apreciar que entre mayor es la temperatura

el secado de la quinua se realiza en menor tiempo.

Comparación Muestra 1

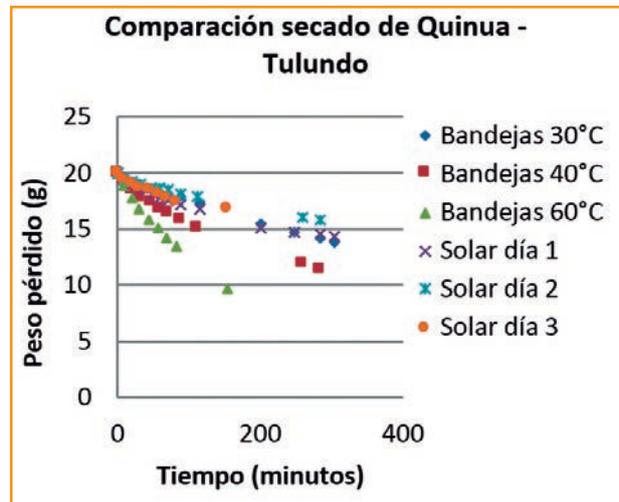


Figura 11: Comparación del secado muestra 1 en los dos secadores
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Comparación Muestra 2

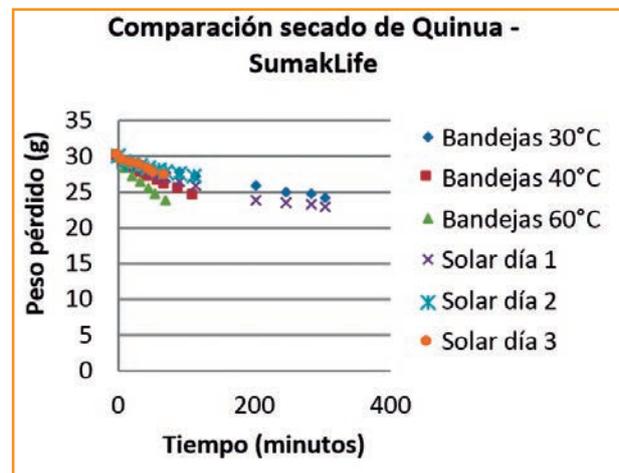


Figura 12: Comparación del secado muestra 2 en los dos secadores
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Comparación Muestra 3

En la Figura 13 la pérdida de peso en el secado de bandejas es mayor que en el secador solar sobre todo cuando la temperatura es de 60 °C, esto es notorio

en un tiempo de 68 minutos, se tiene un peso de la muestra de 23.2886 g en el secador de bandeja y en el secador solar es de 27.36 g

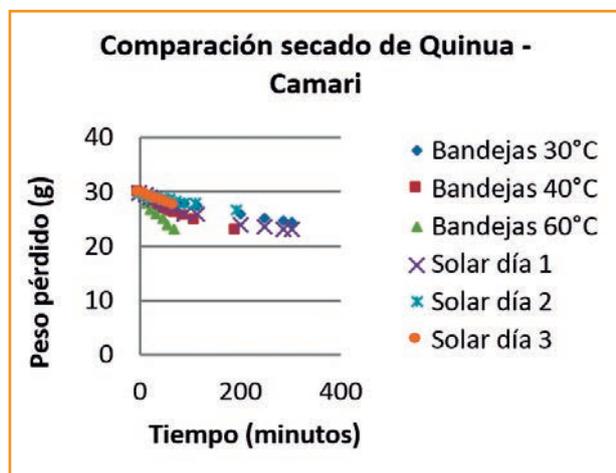


Figura 13: Comparación del secado muestra 3 en los dos secadores
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

En la Figura 14 se presenta en forma agrupada y con las medias de los pesos de cada una de las muestras en los dos secadores, se aprecia que no existe mucha diferencia entre el secado a 30°C en el secador de Bandejas con el secador solar, pero al aumentar la temperatura a 40 y 60 °C es notoria la diferencia de pesos entre los dos secadores.

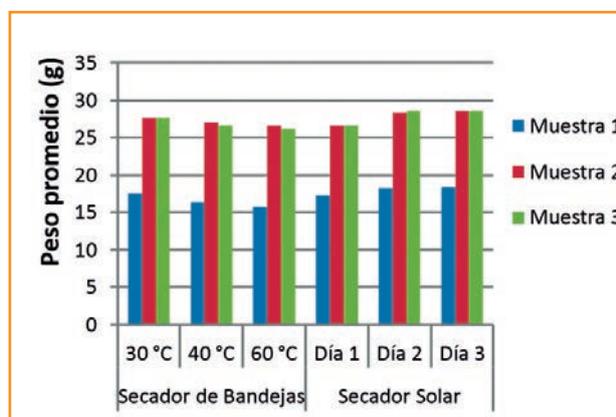


Figura 14: Peso promedio de la quinua en los dos tipos de secadores
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Rendimiento de secado

Para el efecto se utilizó la fórmula siguiente:

$$R_s = \frac{P.P.\% * 1000 \text{ kg} / \text{tn}}{100} \quad (5)$$

Secador de Bandejas

En base a la tabla 8, la muestra 1, a 30 °C evapora 314.323 kg de agua por cada tonelada de cereal, a 40 °C evapora 428.56 kg de agua por cada tonelada de cereal y a 60 °C es de 521.128 kg de agua por cada tonelada de cereal.

En el caso de la muestra 3, a 30 °C evapora 194.725 kg de agua por cada tonelada de cereal, a 40 °C evapora 237.4 kg de agua por cada tonelada de cereal y 60 °C es de 223.94 kg de agua por cada tonelada de cereal.

Muestra	° T (°C)	% Humedad Inicial Base húmeda	% Humedad Final Base húmeda	P.P.	Rs
1	30	48.8048	25.3363	31.432	314.322
	40	60.4056	30.7109	42.856	428.562
	60	61.4571	19.5132	52.112	521.127
2	30	33.6617	17.6203	19.472	194.725
	40	33.5631	18.4486	18.533	185.337
	60	31.8348	14.0194	20.720	207.202
3	30	34.4149	18.5556	19.472	194.725
	40	37.9042	18.5736	23.740	237.399
	60	31.9550	12.3197	22.394	223.942

Tabla 8: Resultados estadísticos de rendimiento de secado – Secador de bandejas
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Secador Solar

En base a la tabla 9, la muestra 1, el primer día, evaporó 280.15 kg de agua por cada tonelada de cereal; el segundo día evaporó 206.67 kg de agua por cada tonelada de cereal y el tercer día fue 160.64 kg de agua

por cada tonelada de cereal. En la muestra 3, en el primer día, evaporó 225.86 kg de agua por cada tonelada de cereal, el segundo día evaporó 110.03 kg de agua por cada tonelada de cereal y el tercer día fue de 88.3208 kg de agua por cada tonelada de cereal.

Muestra	°T	%	%	P.P.	Rs
	Variable	Humedad Inicial	Humedad Final		
		Base húmeda	Base húmeda		
1	Día 1	48.2000	28.0405	28.015	280.150
	Día 2	60.4056	50.0909	20.667	206.669
	Día 3	61.4571	54.0808	16.063	160.636
2	Día 1	33.6617	13.9513	22.906	229.061
	Día 2	33.5631	26.5076	9.600	96.003
	Día 3	31.8348	24.9829	9.133	91.337
3	Día 1	34.4189	15.2851	22.586	225.861
	Día 2	37.9041	30.2272	11.002	110.027
	Día 3	31.9550	25.3630	8.832	88.320

Tabla 9: Resultados estadísticos de rendimiento de secado – Secador Solar
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Con la Pérdida de peso del grano por la eliminación de humedad obtenida anteriormente se calculó los estadísticos para proceder con la prueba de hipótesis.

Estadísticos	P.P. Secador de bandejas	P.P. Secador solar
Media	27,859386	16,5340871
Mediana	22,394198	16,0636509
Varianza	143,918697	52,3878901
Desviación Estándar	11,9966119	7,23794792
Covarianza		21,220641
Coefficiente de correlación		0,24439057

Tabla 10: Resultados estadísticos de los dos secadores
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Formulación de la Hipótesis de investigación:

Se quiere probar que el método para el secado de quinua de tipo forzado es igual o más eficiente que el método de secado de forma natural.

Para realizar la prueba de hipótesis se utilizó el estadístico t-student. Antes de la misma se efectuó un test de normalidad de los datos; se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, ésta se la realizó sacando el logaritmo natural de los datos presentados en las tablas 8 y 9, de pérdida de peso del grano por pérdida de humedad. En base a la Tabla 11, los valores de las probabilidades 0.075 y 0.2 son mayores al nivel de significancia, concluyéndose que los datos tienen una distribución normal.

	Secador	Kolmogorov-Smirnov ^a		
		Estadístico	gl	Sig.
Ln_P.P	Bandejas	0,262	9	0,075
	Solar	0,201	9	0,200*

a. Corrección de la significación de Lilliefors
*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Tabla 11: Resultados estadísticos de los dos secadores
Fuente: Datos de la investigación
Elaborado: Por los autores

Para la prueba de hipótesis se utilizó un nivel de significancia del 5%, obteniéndose un valor de t-student de 2.429 mayor al valor crítico de 1.746. Por lo tanto se concluye que el secado de quinua con aire forzado es más eficiente que el secado con aire natural.

5. CONCLUSIONES

- La temperatura del aire tiene alta

influencia, al igual que su velocidad en el secado de la quinua, teniendo en cuenta que a mayor temperatura se tiene mayor velocidad de secado.

- El modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales, solo tomando en cuenta la humedad en base húmeda vs el tiempo es el modelo de Henderson and Pabis (R^2 de 0.998 aproximadamente), pero al considerar la teoría del secado, a las pruebas estándar y de otros autores se da entre la humedad en base seca (adimensional) vs el tiempo es el modelo de Page (R^2 de 0.9995 aproximadamente).

- El secado de la quinua a temperatura menor a $40\text{ }^\circ\text{C}$ en el secador de bandejas no es muy diferente en su eficiencia al secador solar en un día con buen sol durante 5 horas, esto se desprende del experimento a temperatura de $30\text{ }^\circ\text{C}$ en el secador de bandejas y el primer día de secado en el secador solar.

- Se determina estadísticamente que el secador con mejor rendimiento y eficiencia para el secado de la quinua es el de bandejas, principalmente cuando la cantidad de producto es elevado.

- Si se mejora el diseño de los invernaderos de doble capa junto con un sistema de colector solar se puede aumentar la eficiencia del secado por lo cual se recomienda realizar simulaciones computarizadas y corroborarlas con una

experimentación de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araneda Becerra, A. (2014). Evaluación técnica de dos sistemas de secado de granos de maíz (*Zea mays* L.), mediante modelación a escala industrial. 20. Chillán, Chile: Universidad de Concepción.

Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. Springer Science & Business Media.

Calle, M., Aguirre, G., Ugarte, M., & Gabriel, J. (2010). Efecto del método de secado y nivel de humedad en la germinación y vigor de semillas de quinua. *Revista de Agricultura*, año 62(49), año 62(49), 10-14.

Castiglioni, G. L., da Silva, F. A., Caliari, M., & Júnior, M. S. (2013). Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(9), 17, 987-994.

Condorhuamán, C., Armijo, J., Reyna, L., & Blas, F. (2004). SECADO DE GRANOS CERALES EN LECHO SURTIDOR CONVENCIONAL. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 7(1), 7(1), 7-13.

Corrêa, P. C., Resende, O., Martinazzo, A. P., Goneli, A. L., & Botelho, F. M. (2007). Modelagem matemática para a

descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, 27(2), 27(2), 501-510.

Ezekoye, B. A., & Enebe, O. M. (2006). Development and performance evaluation of modified integrated passive solar grain dryer. *The pacific journal of science and technology*, 7(2): 185-190.

Lara Aravena, E., Vega Gálvez, A., Sanders Maya, M., Miranda, M., & Martínez, E. (2013). ESTUDIO DE SECADO INDUSTRIAL DE LA QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd) CULTIVADA EN CHILE. Recuperado el 14 de Junio de 2015, de <http://myslide.es/documents/ilara-aravena-elena-estudo-del-secado-industrialind.html>

Mendenhall, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística* (Décima tercera ed.). Mexico: Cengage Learning Editores S.A. de C.V.

Moscon, E. S. (2015). *Cinética de secagem e propriedades físicas de quinoa e amaranto e qualidade de sementes de quinoa*. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Dissertação de Mestrado. 2015, 87p: Dissertação de Mestrado.

Mujumdar, A. S. (2000). *Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying: Principles, Equipment and New Developments*, Devahastin, S. Thailand, 37: Thananuch Business Ltd.

Ordóñez, M. R. (2012). Estudio de las

propiedades físicas y de la cinética de secado de granos de maíz colorado duro. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3(3), 153-171.

Peralta, E., Mazón, N., Murillo, A., Rivera, M., Rodríguez, D., Lomas, L., & Monar, C. (2014). *Manual Agrícola de Granos Andinos: Chocho, Quinoa, Amaranto y Ataco*. Cultivos, variedades y costos de producción. Quito-Ecuador 72p: Tercera edición, Publicación Miscelánea No. 69. Programa Nacional de Leguminosas y Granos Andinos. Estación Experimental Santa Catalina INIAP.

Peralta, I. (2009). *La Quínoa en Ecuador "Estado del Arte"*. Recuperado el 15 de 1 de 2015, de <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/805/1/iniapsclgaq1.pdf>

Peréz, C. (2000). *Estudio del proceso de Secado de trigo en un sistema de lecho vibrofluidizado*. Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana.

Sanjinez-Argandona, E., Branco, I., Bittencourt, T., & Munhoz, C. (2011). Influência da geometria e da temperatura na cinética de secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum*). *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*, 31(2), 31, 308-312.

Zahed, A. H., & Epstein, N. (1992). Batch and Continuous Spouted Bed Drying of Cereal Grains: The Thermal Equilibrium Model. *Can. J. Chem. Eng.* 70(10), 945-953.