

Thermal performance and drying kinetics of quinoa in a mixed-mode solar dryer with natural and forced convection

Jose Quiñonez-Choquecota¹; Antonio Holguino-Huarza¹; Julio Fredy Chura-Acero¹; Julio Pedro Quispe-Aymachoque¹; Lucio Quea-Gutierrez¹; Víctor Manuel Yanarico-Coaquira¹

¹Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú, josequch@unap.edu.pe, aholguino@unap.edu.pe, jchura@unap.edu.pe, pquispe@unap.edu.pe, lquea@unap.edu.pe, vmyanarico@unap.edu.pe

Abstract– The objective of this research was to analyze the thermal performance of a mixed-mode solar dryer with both natural and forced convection, featuring multiple-arched fins attached to the upper part of the absorber plate, and to determine the drying kinetics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). The mixed-mode solar dryer is low-cost and easy to construct, and it includes an air blower system powered autonomously by a photovoltaic panel. The thermal efficiency and mathematical models describing the drying kinetics of quinoa were evaluated. Experimental tests were conducted at mass flow rates of 0.189 kg/min, 1.197 kg/min, 1.547 kg/min, and 1.893 kg/min. The results showed that the maximum average thermal efficiency of the solar air heater reached 77% at an average solar irradiance of 1055 W/m² and a flow rate of 1.197 kg/min, with an average drying temperature of 56 °C. The maximum average overall efficiency was 23.28%, and the minimum drying time was 2.1 hours at the same flow rate. The mixed-mode solar dryer demonstrated maximum efficiency at a forced flow rate of 1.02 kg/min, reducing the drying time by 68% compared to open sun drying. The Page model best described the drying kinetics of quinoa under forced convection, while the Wang and Singh model better represented quinoa drying by natural convection in the solar dryer and in open sun conditions.

Keywords– mixed-mode solar dryer, natural and forced convection, multiple-arched fins, thermal performance, quinoa drying kinetics.

Rendimiento térmico y cinética de secado de la quinua en un secador solar mixto de convección natural y forzada

Jose Quiñonez-Choquecota¹; Antonio Holguino-Huarza¹; Julio Fredy Chura-Acero¹; Julio Pedro Quispe-Aymachoque¹; Lucio Quea-Gutierrez¹; Víctor Manuel Yanarico-Coaquira¹

¹Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú, josequch@unap.edu.pe, aholguino@unap.edu.pe, jchura@unap.edu.pe, pquispe@unap.edu.pe, lquea@unap.edu.pe, vmyanarico@unap.edu.pe

Resumen– El objetivo de esta investigación fue analizar el rendimiento térmico un secador solar de tipo mixto de convección natural y forzada que tiene de nervaduras en forma de arco múltiple acoplada en la parte superior de la placa absorbente y determinar la cinética de secado para el proceso de secado de la quinua (*Chenopodium quinoa Willd*). El secador solar mixto es de bajo costo y es de fácil construcción, tiene un sistema de sopladores de aire que funciona de forma autónoma con un panel fotovoltaico. Se determinó el rendimiento térmico y los modelos matemáticos que describen la cinética de secado de la quinua. Las pruebas de funcionamiento se realizaron para flujos masicos de 0,189 kg/min, 1,197 kg/min, 1,547 kg/min y 1,893 kg/min. Los resultados revelaron que, la eficiencia térmica promedio máximo del calentador solar de aire fue de 77 % para una irradiancia solar media de 1055 W/m² y para un caudal de 1,197 kg/min donde la temperatura promedio de secado fue 56 °C. La eficiencia general promedio máxima alcanzada fue de 23,28 % y el tiempo de secado mínimo fue de 2,1 horas, para un flujo de 1,197 kg/min. El secador solar mixto tiene una máxima eficiencia para un flujo forzado de 1,02 kg/min y el tiempo de secado se reduce a un 68% en comparación del secado al sol abierto. El modelo Page describe mejor la cinética de secado de la quinua para flujos forzados, y el modelo de Wang and Singh describir mejor el secado de la quinua por convección natural con el secador solar y también para el secado al sol abierto.

Palabras clave– secador solar mixto, convección natural y forzada, nervaduras de arco múltiple, rendimiento térmico, cinética de secado de la quinua.

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar puede cubrir gran parte de las necesidades energéticas del mundo. En la región de Puno en Perú, situada al sur global [1], el recurso solar es abundante y es factible su uso sin afectar el medio ambiente [2]. Los calentadores solares de aire permiten transformar la radiación solar en calor, el aire que circula en el interior se calienta por transferencia de calor por convección y son adecuados para el secado de productos agrícolas a una temperatura comprendido entre 40 °C a 70 °C sin afectar la calidad del producto [3, 4]. Los calentadores solares de forma general tienen baja eficiencia debido a la baja conductividad térmica del aire, sin embargo, la principal forma de aumentar la eficiencia es incorporando una rugosidad artificial en la placa absorbente que eliminar la subcapa laminar generando turbulencia en el aire [5, 6]. Las formas de rugosidad artificial que general mayor eficiencia son, en forma de costillas múltiples en V y las nervaduras en forma de arco múltiple [5-8].

El secado de productos agrícolas consiste en deshidratar el producto mediante la transferencia de calor y masa para evitar el crecimiento bacteriano lo que puede afectar a la calidad del producto y de forma que sirve para almacenar el producto por mayor tiempo [9, 10]. El secado tradicional denominado secado al sol abierto (OSD), consiste en extender el producto agrícola sobre el suelo, en telas o bandejas, al aire libre, el cual tiene desventajas como, contaminación con suciedades o animales y degradación por exposición a la radiación solar directa, en consecuencia, el producto se deteriora afectando negativamente la calidad del producto [10]. Una de las técnicas innovadoras para resolver las desventajas del secado al sol abierto son los secadores solares [4, 11].

Existen varios tipos de secadores solares, los cuales se puede clasificar, en función de la incidencia de la radiación solar y el tipo de flujo de aire caliente. Según la incidencia de la radiación, el secador puede ser: al sol abierto o dentro de un espacio con parte superior transparente (modo directo), o con un colector calentador de aire sin que incida directamente el sol (modo indirecto) y con un colector calentador de aire y una cámara de secado transparente (modo mixto). Según el tipo de flujo de aire caliente, el secador solar puede ser: de convección natural o convección forzada [4, 11, 12]. Diversos estudios realizados en diferentes tipos de secadores, como los secadores de convección natural y de convección forzada, que han contribuido al desarrollo de modelos matemáticos y análisis termodinámico, donde los resultados encontrados demuestran que los secadores solares reducen el tiempo de secado en comparación con el secado al sol abierto. Los secadores solares con rugosidad artificial de convección forzada tienen mayor eficiencia por lo que son importantes para diversas aplicaciones, sin embargo, requieren un costo adicional que los secadores solares de sin rugosidad artificial o de convección natural [4, 12, 13].

En la literatura se tiene el secado de diversos productos alimenticios como, frutas verduras y cereales [2, 5, 13] con diferentes formas de secado, diferentes secadores solares y diferentes modelos de estimación de sus parámetros termodinámicos de rendimiento. La quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) es un producto que se cultiva mayormente en los andes de Perú y Bolivia, tiene un alto contenido nutricional, por lo que puede ser importante para la seguridad alimentaria

mundial, para consumirlo, es necesario procesarlo, lavándolo y secándolo, que los productores suelen secarlo de forma tradicional [14-17]. La cinética de secado de un producto, permite entender la velocidad de eliminación de la humedad del producto durante el proceso de secado, esto es importante para las industrias de secado y los investigadores pues permite optimizar procesos de secado y reducir costos energéticos [3, 18].

No se encontró ningún estudio sobre el secado de la quinua mediante un secador solar mixto de convección natural y forzada, tampoco existen varios estudios de análisis de la cinética de secado de la quinua. En consecuencia, esta investigación tiene como objetivo evaluar el rendimiento de un secador solar de tipo mixto de un solo flujo con una rugosidad artificial con nervaduras en forma de arco múltiple en condiciones de flujo natural y forzado, asimismo se determinó la cinética de secado la quinua (*Chenopodium quinoa Willd*).

II. METODOLOGÍA

A. Descripción del montaje experimental

El secador solar mixto se compone de un calentador solar de aire, una cámara de secado y un sistema de sopladores de aire que funciona con un panel solar fotovoltaico. El calentador solar de aire está construido con materiales de bajo costo y se montó para suministrar aire caliente a la cámara de secado. La estructura del calentador solar de aire está construida con madera de pino de 3,2 cm x 6 cm. En la entrada del calentador solar se montó un ducto trapezoidal donde se insertaron los dos ventiladores que impulsan el aire, para evitar la disipación térmica del colector se utilizó poliestireno de 2,9 cm que se instaló debajo de la placa absorbente. La placa absorbente fue construida de lámina de hierro galvanizado de 0.8 mm de espesor, mide 129,5 cm de largo y 77.5 cm de ancho, se pintó de color negro mate, y en la parte superior de la placa absorbente se ha acoplado una rugosidad artificial que consiste en nervaduras en forma de arco múltiple de alambre de hierro galvanizado de 3 mm, similares a los investigados por [8], [7] y [19]. La forma deseada de las nervaduras se obtiene mediante un cilindro de madera cuyo diámetro se calcula mediante la ecuación $D = a / \cos(90 - \alpha)$ [19], obteniéndose el diámetro $D = 180$ mm que permite el máximo rendimiento.

El secador solar fue construido con material de bajo costo y con materiales de fácil acceso que tiene un costo aproximado de 100 USD sin considerar el sistema fotovoltaico como se muestra en la figura 1. El colector está protegido por una cubierta de policarbonato alveolar con protección UV de 0,6 cm [20], el diámetro hidráulico del canal por donde fluye el aire es de 5,96 cm, y el aire caliente que sale del calentador solar entra en la cámara de secado. La cámara de secado está fabricada de madera de pino y policarbonato, para disminuir las pérdidas de calor se instaló en los laterales una doble capa de policarbonato de 0,6 cm. La superficie de la bandeja de secado es de 0,271 m².

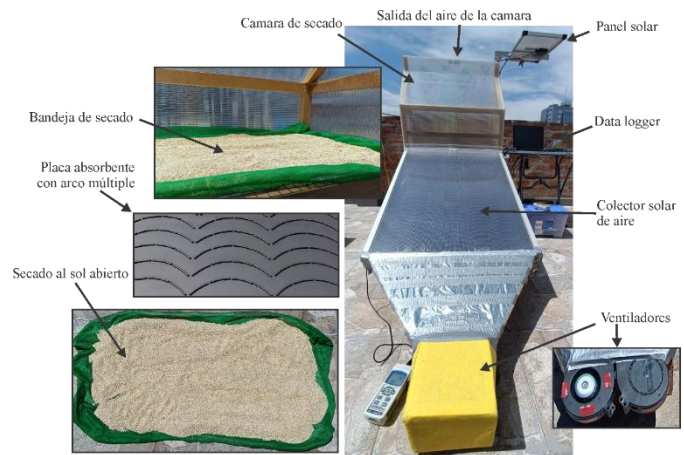


Fig. 1 Configuración experimental del secador solar mixto.

El sistema de sopladores de corriente continua consta de dos sopladores centrífugos y un controlador de velocidad, este sistema funciona con un panel solar de 35 W, una batería de 18 Ah junto a un controlador de carga. La humedad generada por el producto a secar durante todo el proceso de secado, sale de la cámara de secado por un canal rectangular de 70 cm x 1,5 cm. El calentador solar de aire se instaló con un ángulo de 15° respecto a la horizontal.

B. Instrumentación y procedimiento experimental

El secador solar fue diseñado, construido y evaluado en el clima de la región de Puno (Perú), en un lugar situado a latitud 15°49'21.4"S y longitud 70°00'45.4"W. La altura relativa al nivel del mar fue de 3825 m. El secador solar fue diseñado para una capacidad de 5 kg de granos de quinua. La quinua utilizada para el experimento fue la variedad denominada, blanca de Juli, que fue escarificada y lavada antes de secar. Se utilizó muestras de 154 g de quinua recién lavada para ponerlo en la bandeja de secado del secador solar y de la misma forma en el piso para el secado al sol abierto, se extendió una capa de quinua con un espesor de aproximadamente 1,5 cm. Las pruebas se realizaron en el mes de octubre de 2024, el periodo de prueba fue de 9:00 a.m. a 3:00 p.m. cada día. Dicho periodo se eligió tras realizar pruebas previas al secar al sol abierto de modo que la masa de la muestra de secado alcanzó un estado de equilibrio en 6 horas. Durante la prueba se registraron los datos cada 10 minutos, los parámetros registrados fueron: temperatura del aire a la entrada del colector (T1-aire), temperatura del aire a la salida del colector (T2-aire), temperatura de la placa absorbente (T3-placa), temperatura ambiente (T4-ambiente), temperatura de la cámara de secado (T5-cámara), temperatura de salida de la cámara de secado (T6-cámara), radiación solar, humedad relativa del aire en la entrada al colector, rapidez del aire. El peso de las muestras de quinua se midió con un intervalo de tiempo de 30 minutos.

Los instrumentos utilizados se muestran en la tabla 1. Las pruebas experimentales se realizaron para tres flujos forzados de 1,197 kg/min, 1,547 kg/min 1,893 kg/min y para el flujo

natural se retiró el conducto trapezoidal, donde el flujo masico de fue de 0,189 kg/min.

TABLA I
ESPECIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS

Instrumentos	Marca/Modelo	Rango	Precisión
Anemómetro de hilo caliente	Lutron 4224SD	0-25 m/s	±5%
Piranómetro	Apogee SP-420	0-1750 W/m ²	±10 W/m ²
Medidor de Humedad	Lutron 4247SD	5-95%	±3%
Registrador de datos	Pico TC-8	-270-1820 °C	-
Termocupla	Tipe K	-200-1372 °C	±0,5 °C
Amperímetro	UNI-T UT61E+	0-220 A	±0,5%
Balanza analítica	Baoshishan	0-200 g	±0,1 g

C. Parámetros de rendimiento

La eficiencia térmica del secador solar mixto, depende de la eficiencia del calentador solar de aire y las pérdidas en la cámara de secado [24-25]. La eficiencia térmica del calentador solar es la relación entre el calor útil cedido al aire y la energía solar total que incide sobre el calentador solar de aire. El calor útil depende de $\dot{m}_a = \rho_a A_{st} V_{prom}$ que es el flujo masico total del aire (en kg/s) (con ρ_a como densidad del aire, A_{st} área de sección transversal y V_{prom} de rapidez promedio del aire), depende del calor específico del aire a presión constante (en J/kg°C), la temperatura del aire que sale del colector, la temperatura del aire que entra al colector (en °C). La radiación solar o irradiancia que incide sobre la cubierta del colector solar, está representada por I (en W/m²), y A_c es el área del colector solar (en m²).

En el secador solar de modo mixto, la cámara de secado recibe la ganancia de calor útil del aire del colector y de la radiación solar directa que incide sobre él y es una de las ventajas. La eficiencia térmica general del secador se define como la relación entre la energía necesaria para eliminar el agua del alimento y el calor suministrado al secador [12, 22]. La eficiencia térmica general del secador de tipo mixto se puede obtener considerando el consumo de energía del ventilador mediante la siguiente ecuación [12, 23, 24]:

$$\eta_d = \frac{m_w h_{fg}}{[(A_c I + A_{dc} I)(\tau\alpha)_\theta + P_{fan}] t_d} \quad (1)$$

Donde: m_w es la cantidad de agua perdida o evaporada del producto que se obtiene restando la masa la masa inicial del producto (m_i) menos la masa final del producto (m_f) al final del periodo de secado total [18, 25]. h_{fg} es el calor latente de vaporización del agua (en J/kg), que se puede determinar mediante la ecuación, $h_{fg} = 4186(597 - 0.56T_{pr})$ en donde T_{pr} es la temperatura del producto superficial del alimento en °C [26, 27]. A_{dc} es el área de la bandeja donde se seca la quinua. El producto de la transmitancia y absortancia para un ángulo de incidencia θ $(\tau\alpha)_\theta = k_{\tau\alpha} (\tau\alpha)_n$ donde $k_{\tau\alpha} = 1 -$

$0.136[(1/\cos\theta) - 1]$ es válido para $\theta < 60^\circ$ [21]. P_{fan} es la potencia utilizada por los sopladores para bombear el aire dentro del sistema, y t_d es el tiempo que duró el secado (en s).

El estudio de la cinética de secado se representa mediante modelos matemáticos que permiten conocer su comportamiento durante el proceso de secado, lo que permite caracterizar la curva de secado de cada alimento. El contenido de humedad (MC_t) de las muestras en base seca (db) durante el período de secado, se puede estimar utilizando la siguiente ecuación [18, 28]:

$$MC_{t(db)} = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (2)$$

Donde, m_t son las masas de las muestras en el tiempo t y m_d es la masa seca de la muestra que se determina manteniéndola en un horno caliente hasta que alcance un peso constante [24].

La relación de humedad (MR) se define como el contenido de humedad en un momento dividido entre el contenido de humedad inicial del producto, se representa gráficamente como la relación de humedad frente al tiempo. Como el caudal y las temperaturas de aire fluctúan dentro de la cámara de secado durante todo el periodo de secado debido a las variaciones de la temperatura, la relación de humedad se estima mediante la versión simplificada dado por la ecuación [18, 23]:

$$MR = \frac{MC_t}{MC_i} \quad (3)$$

Donde, MC_t es el contenido de humedad en el tiempo t , $MC_i = (m_i - m_d)/m_d$ es el contenido de humedad inicial, todos los datos de humedad se expresan en base seca (kg de agua/kg de materia seca).

Las magnitudes de la relación de humedad experimental frente al tiempo de secado se ajustan mediante cuatro modelos ampliamente utilizados para modelar la cinética de secado de la mayoría de los alimentos [3, 18, 28-31]. Estos modelos son: Henderson and Pabis, Page model, Wang and Singh, y Logarithmic.

Los criterios considerados para evaluar la bondad de ajuste entre los valores experimentales y los valores predichos por los modelos matemáticos son, el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE). Un valor de R^2 cercano a 1 indica un ajuste significativo de los datos. Los valores de RMSE proporcionan información sobre la desviación de los valores experimentales frente a los predichos, que debería ser cercana a 0. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes [32]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i})^2} \quad (5)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Rendimiento del secador

Las pruebas experimentales de secado de la quinua se realizaron durante los días soleados, cuando los parámetros climáticos fueron similares. La quinua antes de secarla, fue escarificada y lavada quitando la saponina de forma que sea apta para el consumo humano. La humedad relativa del aire varió del 8% al 21% siendo mayor en horas de la mañana y disminuyendo al mediodía. El efecto del viento se hizo presente mayormente en las horas de la tarde con una velocidad media de 2 m/s. La quinua se secó en la bandeja dentro de la cámara de secado, en condiciones de convección forzada para tres flujos máxicos del aire de 1,197 kg/min, 1,547 kg/min, 1,893 kg/min, y para flujo de convección natural, donde el flujo masico fue de 0,189 kg/min. Por otro lado, la quinua se secó al sol abierto simultáneamente en las cuatro pruebas realizadas para después compararlos.

En la figura 2, se muestra la temperatura del aire a la entrada del colector (T1-aire), temperatura del aire a la salida del colector (T2-aire), temperatura de la placa absorbente (T3-placa), temperatura ambiente (T4-ambiente), temperatura de la cámara de secado (T5-cámara), temperatura de salida de la cámara de secado (T6-cámara) y la irradiancia con respecto a la hora del día, durante los cuatro días de prueba. La radiación solar varió de 763,9 W/m² a 1181,7 W/m² con una intensidad promedio de la radiación solar que varió entre 1042,78 W/m² y 1055,94 W/m², alcanzando el máximo valor al mediodía, durante los días que duró el experimento. La temperatura ambiente estuvo comprendida entre 14,94 °C y 21,99 °C teniendo temperaturas bajas en las primeras horas del día, el promedio de la temperatura ambiente fue comprendida entre 18,31 °C y 20,92°C. La temperatura promedio de la placa absorbente para los flujos masicos de: 0,189 kg/min, 1,197 kg/min, 1,547 kg/min y 1,893 kg/min, fueron de: 80,90 °C, 62,30 °C, 53,45 °C y 42,69 °C respectivamente, alcanzando la máxima temperatura de 91,40 °C para un flujo de 0,189 kg/min al mediodía. La temperatura promedio en la bandeja de secado para los flujos masico de: 0,189 kg/min, 1,197 kg/min, 1,547 kg/min y 1,893 kg/min, fueron: 54,95 °C, 56,42 °C, 49,66 °C y 43,91 °C respectivamente, oscilando entre 34,73 °C y 91,39 °C.

De los resultados mostrados en la figura 2 se desprende que, a menores flujos de aire se alcanzan mayores temperaturas en la cámara de secado, por lo que a un mayor caudal masico tendremos una menor temperatura en la cámara de secado, como ocurre con el caudal de 1,893 kg/min teniendo la menor temperatura en la cámara de secado de 43,91 °C. También cabe destacar que, cuando el colector solar alcanza mayores temperaturas, se producen mayores pérdidas de calor esto se puede observar para convección natural con flujo masico 0,189 kg/min. Además, el aire que ingresa al calentador solar, se calienta progresivamente hasta entrar a la cámara de secado donde continúa incrementándose la temperatura (T5-cámara), aunque en menor magnitud.

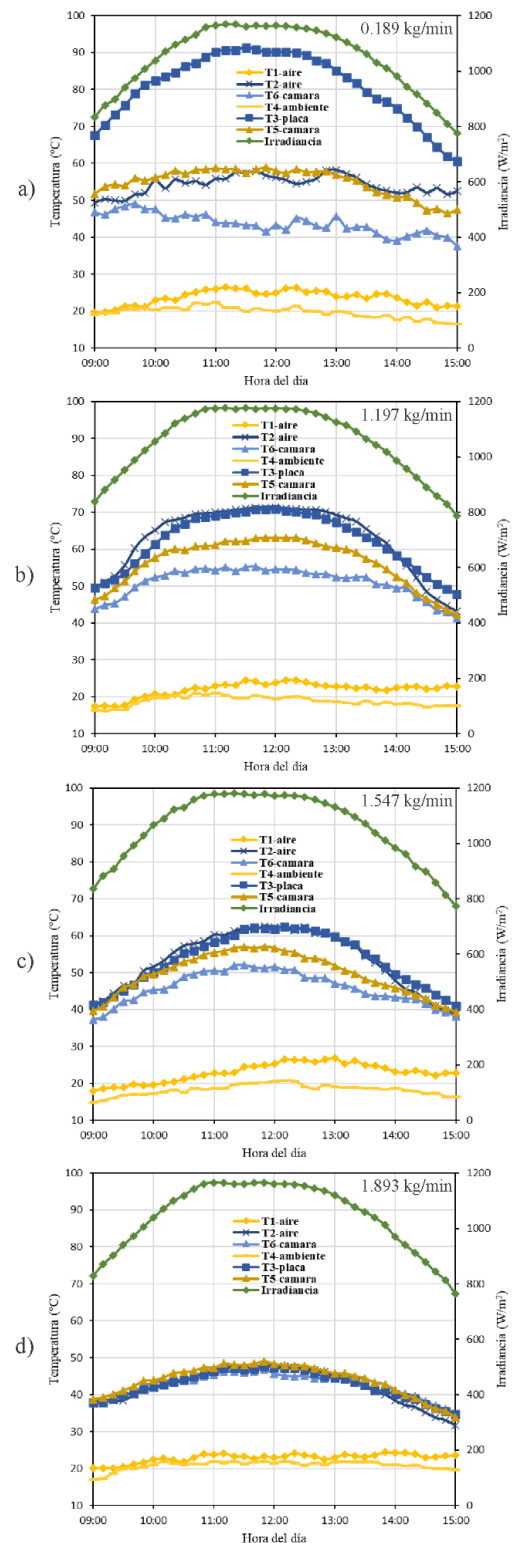


Fig. 2 Variación de las temperaturas y radiación solar con el tiempo para los cuatro flujos de aire.

La eficiencia térmica promedio del colector solar calentador de aire para los flujos masicos de: 0,189 kg/min,

1,197 kg/min, 1,547 kg/min y 1,893 kg/min fueron: 9,42 %, 77,38 %, 74,00 % y 58,20 % respectivamente. La eficiencia térmica promedio más baja se alcanzó cuando el flujo fue por convección natural, mientras que la más alta se alcanza para el flujo forzado de 1,197 kg/min. La baja eficiencia en el caso de convección natural fue afectada principalmente por el ángulo de inclinación del colector solar que fue de 15° que no favoreció al flujo. Por otro lado, a mayor flujo masico, menor es la eficiencia térmica del colector entre los casos de flujo forzado.

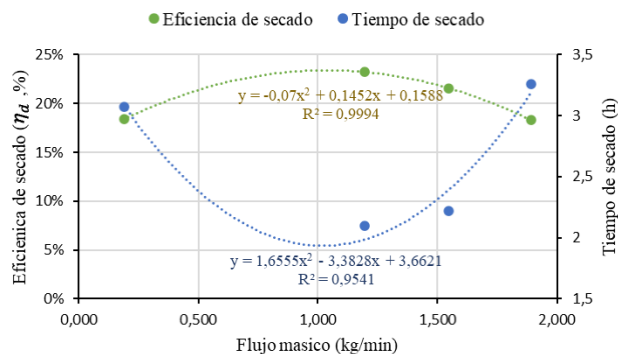


Fig. 3 Correlación de la eficiencia general de secado y el tiempo de secado respecto al flujo masico del aire.

En la figura 3, se muestra la eficiencia general promedio de secado respecto al flujo masico obtenida mediante (1), y el tiempo de secado con respecto al flujo masico del aire con sus respectivas curvas de ajuste, donde se observa que existe un ajuste muy significativo de las curvas. Con los datos experimentales la eficiencia general promedio máxima alcanzada fue del 23,28 % y el tiempo de secado mínimo fue de 2,1 horas, logrados para un flujo de 1,197 kg/min, con una temperatura promedio de secado de 56,42 °C. Considerando las curvas de ajuste se observa que, la eficiencia general de secado no sería significativamente mayor que el 23,28 %, y observando la curva de ajuste del tiempo de secado nos revela que este será muy próximo a 2,1 horas. Además, según las curvas de ajuste de la figura 3 la eficiencia general máxima y el tiempo de secado mínimo se logran cuando el flujo masico es de 1,02 kg/min. En el caso del secado al sol abierto, el tiempo de secado fue de 5,82 horas. Al comparar el tiempo de secado al sol abierto con el tiempo de secado mínimo para el caso forzado (flujo de 1,197 kg/min), se observa una reducción del tiempo de secado de hasta un 68% para el secado de la quinua.

B. Cinética de secado

Para determinar el contenido de humedad en base seca, se secaron cuatro muestras de 154 g en un horno de aire caliente hasta que su masa se mantuvo constante, que fue de 91,2 g. El contenido de humedad inicial era de 0,69 kg/kg en base seca, obtenido mediante (2). El contenido de humedad (MC) para considerar como seco fue de 0,12 kg/kg en base seca, lo que equivale a una humedad promedio del producto del 10,6 %, que se ha considerado para el tiempo de secado. La figura 4 muestra

la gráfica de la relación de humedad (MR) (obtenida con (3)) versus el tiempo de secado para los diferentes flujos masicos considerados en el estudio. Se observa que, para las cuatro pruebas de secado al sol abierto, las curvas son similares siendo la disminución de la humedad menos rápida que los otros casos, y alcanzando el secado en un tiempo promedio de 5,82 horas. Para el secado en la cámara de secado mediante el secador solar mixto por convección forzada (flujo de 1,893 kg/min) y natural (0,189 kg/min), la razón de humedad presenta un comportamiento similar, con tiempos de secado de 3,28 horas y 3,07 horas respectivamente. Esto significa que el caudal cumple un rol muy importante en el secado, por lo que el flujo masico no debe ser excesivo ni muy bajo. Para el secado por convección forzada con flujos masico de 1,197 kg/min, 1,547 kg/min, el tiempo de secado fue de 2,10 horas y 2,22 horas respectivamente. Al contrastar los hallazgos mostrados en las figuras 3 y 4 observamos que el secador solar mixto diseñado es eficiente para un flujo forzado de aproximadamente 1,02 kg/min, y puede reducir el tiempo de secado para la quinua en un 68%.

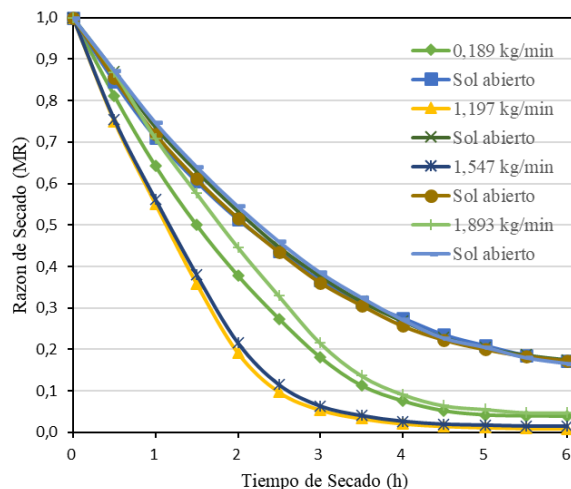


Fig. 4 relación de humedad con el tiempo de secado a tasas de flujo de masa de aire variadas y al sol abierto.

La cinética de secado se analiza ajustando la curva de secado de la relación de humedad (MR) en función del tiempo de secado a un modelo matemático. En la tabla 2 se muestran las curvas de ajuste a los diferentes modelos utilizados para el secado de los alimentos, junto con los valores de las constantes de secado, R^2 y el error medio cuadrático (RMSE). Se eligió el mejor modelo de cinética de secado mediante un análisis de regresión estadístico, utilizando como indicadores los valores de R^2 de mayor valor y RMSE de menor valor calculados mediante las ecuaciones (4) y (5). El modelo Page es el que mejor se ajusta para describir la cinética de secado de la quinua en condiciones de flujo forzado para flujos de 1,197 kg/min, 1,547 kg/min y 1,893 kg/min. Por otro lado, el modelo de Wang and Singh se ajusta mejor para el secado por convección natural con un flujo de 0,189 kg/min y el secado al sol abierto de la quinua.

TABLA II

MODELOS MATEMÁTICOS, CONSTANTES Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS				
Modelo	Secado	Constantes	R ²	RMSE
Henderson and Pabis $MR = aexp(-kt)$	0,189 kg/min	a = 1,0439 k = 0,5465	0,9908	0,0334
	1,197 kg/min	a = 1,0476 k = 0,7776	0,9862	0,0406
	1,547 kg/min	a = 1,0454 k = 0,7447	0,9873	0,0387
	1,893 kg/min	a = 1,0740 k = 0,4937	0,9801	0,0500
	Sol abierto	a = 1,0146 k = 0,3175	0,9994	0,0107
Page model $MR = exp(-kt^n)$	0,189 kg/min	k = 0,4343 n = 1,2300	0,9988	0,0141
	1,197 kg/min	k = 0,6305 n = 1,3419	0,9988	0,0148
	1,547 kg/min	k = 0,6062 n = 1,3119	0,9987	0,0157
	1,893 kg/min	k = 0,3253 n = 1,3841	0,9986	0,0165
	Sol abierto	k = 0,2958 n = 1,0469	0,9993	0,0086
Wang and Singh $MR = 1 + at + bt^2$	0,189 kg/min	a = -0,3856 b = 0,0382	0,9990	0,0108
	1,197 kg/min	a = -0,4781 b = 0,0544	0,9783	0,0509
	1,547 kg/min	a = -0,4685 b = 0,0528	0,9836	0,0454
	1,893 kg/min	a = -0,3480 b = 0,0314	0,9968	0,0214
	Sol abierto	a = -0,2708 b = 0,0221	1,0000	0,0033
Logarithmic $MR = aexp(-kt) + c$	0,189 kg/min	a = 1,0912 k = 0,4650 c = -0,0658	0,9956	0,0260
	1,197 kg/min	a = 1,0733 k = 0,7044 c = -0,0364	0,9905	0,0370
	1,547 kg/min	a = 1,0697 k = 0,6774 c = -0,0349	0,9903	0,0357
	1,893 kg/min	a = 1,1686 k = 0,3798 c = -0,1228	0,9894	0,0388
	Sol abierto	a = 1,0193 k = -0,3137 c = -0,0057	0,9990	0,0112

El secador solar de tipo mixto aprovecha la radiación solar de forma directa e indirecta, de modo que la cámara de secado se calienta de ambas formas. En esta investigación se observó que la eficiencia térmica del colector solar depende principalmente de la radiación solar, el flujo masico y la temperatura de secado. Para una irradiancia solar media de 1055 W/m², la eficiencia térmica promedio del colector solar fue de del 77 % y la eficiencia global de secado del 23 %, para un flujo masico de 1,197 kg/min y una temperatura promedio de la cámara de secado de 56 °C. Las eficiencias obtenidas para el secador solar se encuentran dentro del rango aceptable, y en algunos casos la eficiencia obtenida supera a otros trabajos similares realizados [33], [3], [25], [34], [28] y [23]. La alta eficiencia del secador solar se debe a la rugosidad artificial instalada en la placa absorbente [8]. Otro de los hallazgos más importantes del presente estudio son los modelos de cinética de secado que describe el proceso de secado de la quinua que son: Page para flujo forzado y Wang and Singh para flujo natural y secado al sol abierto, los hallazgos se pueden comparar con

otros resultados obtenidos para el mismo producto por [35] y para otros productos, como los granos de maíz estudiados por [36] o los hallazgos obtenidos para el trigo estudiado por [37]. Finalmente, secar al sol abierto tiene múltiples desventajas que afectan al producto final, mientras que el secado de los alimentos de forma indirecta mediante un secador solar tiene ventajas significativas que mejoran notablemente el tiempo de secado y protegen el producto final seco. Un aspecto importante es que, al usar la cubierta de policarbonato con filtro UV en el proceso de secado, se conserva el valor nutricional del producto seco [20, 38].

IV. CONCLUSIONES

El secador solar mixto que incorpora un colector solar de placa plana de flujo único con una rugosidad artificial de nervaduras en forma de arco múltiple acoplado en la parte superior de la placa absorbente, es una nueva configuración con rendimiento aceptable y de bajo costo. Las pruebas experimentales fueron realizadas para una irradiancia solar media de 1055 W/m². La eficiencia térmica promedio máxima del colector solar fue de 77 %, la eficiencia general promedio máxima alcanzada fue de 23,28 % y el tiempo de secado mínimo fue de 2,1 horas, que se logró para un flujo de 1,197 kg/min y una temperatura promedio de la cámara de secado de 56 °C. El secador solar mixto diseñado tendría máxima eficiencia para un flujo forzado de 1,02 kg/min, y el tiempo de secado para la quinua, se reducirá en un 68% en comparación con el secado al sol abierto. El modelo matemático Page es el modelo que mejor se ajusta para describir la cinética de secado de la quinua en condiciones de flujo forzado de 1,197 kg/min, 1,547 kg/min y 1,893 kg/min. Por otro lado, el modelo de Wang and Singh se ajusta mejor para el secado por convección natural con un flujo de 0,189 kg/min y también para el secado al sol abierto de la quinua. El secado en el secador solar mixto tiene ventajas significativas, dado que reduce a más de la mitad el tiempo de secado y protege el producto final aumentando la calidad del producto. Además, al usar la cubierta de policarbonato con filtro UV, se conserva el valor nutricional de la quinua.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano - Puno.

REFERENCIAS

- [1] K. Ukoba, K. O. Yoro, O. Eterigho-Ikelegbe, C. Ibegbulam, and T. C. Jen, "Adaptation of solar energy in the Global South: Prospects, challenges and opportunities," *Heliyon*, vol. 10, no. 7, p. e28009, Apr 15 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28009.
- [2] L. Fernandes and P. B. Tavares, "A Review on Solar Drying Devices: Heat Transfer, Air Movement and Type of Chambers," *Solar Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 15--42, 2024, doi: 10.3390/solar4010002.
- [3] J. P. Ekka, P. Muthukumar, K. Bala, D. K. Kanaujiya, and K. Pakshirajan, "Performance studies on mixed-mode forced convection solar cabinet dryer under different air mass flow rates for drying of cluster fig," *Solar Energy*, vol. 229, pp. 39-51, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.06.086.

- [4] A. Kamarulzaman, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, "Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review," *Solar Energy*, vol. 221, pp. 559-582, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.056.
- [5] B. K. Ahirwar and A. kumar, "Review on different techniques used to enhance the thermal performance of solar air heater," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 220, 2024, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124979.
- [6] V. Goel et al., "A comprehensive study on the progressive development and applications of solar air heaters," *Solar Energy*, vol. 229, pp. 112-147, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.07.040.
- [7] N. K. Pandey, V. K. Bajpai, and Varun, "Experimental investigation of heat transfer augmentation using multiple arcs with gap on absorber plate of solar air heater," *Solar Energy*, vol. 134, pp. 314-326, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.05.007.
- [8] R. Kumar, V. Goel, P. Singh, A. Saxena, A. S. Kashyap, and A. Rai, "Performance evaluation and optimization of solar assisted air heater with discrete multiple arc shaped ribs," *Journal of Energy Storage*, vol. 26, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.100978.
- [9] C. K. Saha, N. K. Roy, J. Khatun, N. Tasnim, and M. S. Alam, "Solar hybrid dryers for fruits, vegetables, and fish: A comprehensive review on constructional features and techno-economic-environmental analysis," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 68, 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.103878.
- [10] D. Kong, Y. Wang, M. Li, and J. Liang, "A comprehensive review of hybrid solar dryers integrated with auxiliary energy and units for agricultural products," *Energy*, vol. 293, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.130640.
- [11] M. A. Kherrafi et al., "Advancements in solar drying technologies: Design variations, hybrid systems, storage materials and numerical analysis: A review," *Solar Energy*, vol. 270, 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112383.
- [12] A. B. Lingayat, V. P. Chandramohan, V. R. K. Raju, and V. Meda, "A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights," *Applied Energy*, vol. 258, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114005.
- [13] R. K. Saini et al., "Technological development in solar dryers from 2016 to 2021-A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113855.
- [14] V. Nowak, J. Du, and U. R. Charrondiere, "Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)," *Food Chem.*, vol. 193, pp. 47-54, Feb 15 2016, doi: 10.1016/j.foodchem.2015.02.111.
- [15] E. Pereira, C. Encina-Zelada, L. Barros, U. Gonzales-Barron, V. Cadavez, and C. F. R. F. I., "Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium quinoa* Willd (quinoa) grains: A good alternative to nutritious food," *Food Chem.*, vol. 280, pp. 110-114, May 15 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2018.12.068.
- [16] V. Angeli et al., "Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): An Overview of the Potentials of the "Golden Grain" and Socio-Economic and Environmental Aspects of Its Cultivation and Marketization," *Foods*, vol. 9, no. 2, Feb 19 2020, doi: 10.3390/foods9020216.
- [17] A. Vega-Galvez, M. Miranda, J. Vergara, E. Uribe, L. Puente, and E. A. Martinez, "Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.), an ancient Andean grain: a review," *J Sci Food Agric*, vol. 90, no. 15, pp. 2541-7, Dec 2010, doi: 10.1002/jsfa.4158.
- [18] V. R. Mugi and C. V.P., "Comparison of drying kinetics, thermal and performance parameters during drying guava slices in natural and forced convection indirect solar dryers," *Solar Energy*, vol. 234, pp. 319-329, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.02.012.
- [19] A. P. Singh, Varun, and Siddhartha, "Effect of artificial roughness on heat transfer and friction characteristics having multiple arc shaped roughness element on the absorber plate," *Solar Energy*, vol. 105, pp. 479-493, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.04.007.
- [20] J. Rodríguez-Ramírez, L. L. Méndez-Lagunas, A. López-Ortiz, S. Muñiz-Becerra, and K. Nair, "Solar drying of strawberry using polycarbonate with UV protection and polyethylene covers: Influence on anthocyanin and total phenolic content," *Solar Energy*, vol. 221, pp. 120-130, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.025.
- [21] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
- [22] H. Essalhi, R. Tadili, and M. N. Bargach, "Conception of a Solar Air Collector for an Indirect Solar Dryer. Pear Drying Test.," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 29-33, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.114>.
- [23] S. Kumar, H. Kumar Ghritlahre, S. Agrawal, and S. Shekhar, "Investigation of a novel mixed-mode solar dryer using north wall reflector: An experimental study," *Solar Energy*, vol. 282, 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112909.
- [24] P. Rani and P. P. Tripathy, "Drying characteristics, energetic and exergetic investigation during mixed-mode solar drying of pineapple slices at varied air mass flow rates," *Renewable Energy*, vol. 167, pp. 508-519, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.11.107.
- [25] V. Reddy Mugi and V. P. Chandramohan, "Energy, exergy and economic analysis of an indirect type solar dryer using green chilli: A comparative assessment of forced and natural convection," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 24, 2021, doi: 10.1016/j.tsep.2021.100950.
- [26] S. Youcef-Ali, H. Messaoudi, J. Y. Desmons, A. Abene, and M. L. Ray, "Determination of the average coefficient of internal moisture transfer during the drying of a thin bed of potato slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 48, pp. 95-101, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00123-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00123-0).
- [27] A. H. Nikpey, A. Hajizadeh Aghdam, and S. Hamoud Shaltouki, "Dynamic simulation and thermoeconomic analysis of a novel indirect hybrid solar dryer," *Renewable Energy*, vol. 227, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120596.
- [28] A. Lingayat, V. P. Chandramohan, V. R. K. Raju, and A. Kumar, "Development of indirect type solar dryer and experiments for estimation of drying parameters of apple and watermelon," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 16, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100477.
- [29] L.-V. Erick César, C.-M. Ana Lilia, G.-V. Octavio, P. F. Isaac, and B. O. Rogelio, "Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*)," *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 845-855, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.018.
- [30] S. Vijayan, T. V. Arjunan, and A. Kumar, "Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter melon in sensible storage based indirect solar dryer," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 36, pp. 59-67, 2016, doi: 10.1016/j.ifset.2016.05.014.
- [31] Y. Mohana, R. Mohanapriya, T. Anukiruthika, K. S. Yoha, J. A. Moses, and C. Anandharamakrishnan, "Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances," *Solar Energy*, vol. 208, pp. 321-344, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.07.098.
- [32] M. Rezaei et al., "Investigating performance of a new design of forced convection solar dryer," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101863.
- [33] A. N. Mbakouop, H. Tchakounté, A. I. Ankungha, and C. B. Nzoundja Fapi, "Experimental performance analysis of a mixed forced convection solar dryer: Application to cocoa bean drying," *Solar Energy*, vol. 257, pp. 110-124, 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.04.010.
- [34] A. Gupta, P. P. Borah, B. Das, and J. D. Mondal, "Energy and exergy based performance evaluation of an innovative PV-assisted solar dryer with and without modified absorber," *Solar Energy*, vol. 272, 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112464.
- [35] A. M. Reinoso and J. T. Dacto, "Comparative analysis of quinoa dryers, tray dryer and solar greenhouse type," *mktDESCUBRE*, vol. 1, no. 09, pp. 62-74, 2017. [Online]. Available: <http://revistas.esPOCH.edu.ec/index.php/mktDESCUBRE/article/view/130>.
- [36] G. M. d. Silva, A. G. Ferreira, R. M. Coutinho, and C. B. Maia, "Energy and exergy analysis of the drying of corn grains," *Renewable Energy*, vol. 163, pp. 1942-1950, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.10.116.
- [37] M. A. Al-Mahasneh, T. M. Rababah, M. M. Bani-Amer, N. M. Al-Omari, and M. K. Mahasneh, "Fuzzy and Conventional Modeling of Open Sun Drying Kinetics for Roasted Green Wheat," *International Journal of Food Properties*, vol. 16, pp. 70-80, 2013, doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2010.528108>.
- [38] P. K. Nair, A. L. Espinosa-Santana, L. Guerrero-Martínez, A. López-Ortiz, and M. T. S. Nair, "Prospects toward UV-blue filtered solar drying of agricultural farm produce using chemically deposited copper chalcogenide thin films on cellular polycarbonate," *Solar Energy*, vol. 203, pp. 123-135, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.04.012.