

Modelamiento de la cinética de secado por energía microondas de rodajas de piña (*Ananas comosus* L.) variedad Golden

Gustavo Adolfo Pérez Chile, Ing.¹, Genaro Christian Pesantes Arriola, Dr.², Carlos Enrique Chinchay Barragán, Mg.³, Jacqueline Roxana Reaño Rivera, Mg⁴, Víctor Alexis Higinio Rubio, Mg.⁵, Ruben Darío Mendoza Arenas, Dr⁶., Bertha Milagros Villalobos Meneses, Dra⁷.

^{1,2,3,4,5,6,7}Universidad Nacional del Callao, Perú, gaperezc@unac.edu.pe, gcpesantesa@unac.edu.pe, cechinchayb@unac.edu.pe, jrreanor@unac.edu.pe, vahiginior@unac.edu.pe, rdmendozaa@unac.edu.pe, bmvillalobos@unac.edu.pe

Abstract: *This research describes the influence of the thickness of the slice and the power of the microwave device on the drying time of ripe Golden pineapple from the province of Satipo, department of Junín; the slice thickness and microwave power levels used were 5.7; 10.5 and 15.7 mm and 639; 1035.4; 1353.2 and 1563.2 W; respectively. After validating that the independent variables had a significant influence on the dependent variables (p values < 0.05), 2 mathematical models were generated capable of determining the drying times required to reach a humidity of 12 and 20% (bh), obtaining R2 values of 92.19 and 91.34%; respectively. With respect to the experimental results, the drying times necessary to reach a humidity of 12 and 20% (bh) were minimum for the 15.7 mm - 1353.2 W combination with times of 7.31 and 6.78 min., respectively; and maximums for the combination: 5.7 mm - 639 W with times of 20.24 and 16.55 min, respectively. The Page equation reached a high R2 when modeling the drying curves presenting a minimum k of 0.017803 min⁻¹ for the combination: 15.7 mm and 639 W; and a maximum k of 0.392373 min⁻¹ for the combination: 5.7 mm - 1536.5 W. Using the k coefficients of this model, the following activation energy values were determined: 33.18; 27.72 and 25.78 W/g; concerning slice thicknesses of 5.7; 10.5 and 15.7 mm, respectively. Finally, the calculated values of the minimum and maximum effective diffusivity were 4.12×10^{-6} m²/s and 93.91×10^{-6} m²/s, respectively. The lowest value corresponded to the combination: 5.7 mm - 639 W; and the highest value to the combination: 15.7 mm - 1563.2 W.*

Keywords: *Pineapple, Drying, microwave energy, water activity, sorption isotherm.*

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente las tendencias de consumo de alimentos se orientan hacia la búsqueda de productos naturales, sin aditivos o conservantes añadidos; de tal manera que, una vez ingeridos ayuden al buen funcionamiento de nuestro cuerpo y con ello a mantener un buen estado de salud. Por tal razón, en los últimos años el desarrollo de nuevos productos alimenticios incluye, no sólo la formulación del producto sino también el diseño de sus respectivos procesos productivos, para incrementar su impacto tanto en la salud de la población como en su productividad. Es por ello que, la presente pretende investigación de nuevos procesos de conservación de alimentos y la mejora de procesos ya conocidos son esenciales para esta ingeniería. Como consecuencia del desarrollo de estos procesos y de sus productos finales, se generan diferentes oportunidades para las

empresas que apuestan por mercados nuevos o emergentes, creando así, nuevos puestos de trabajo. Además, el desarrollo de productos saludables ayuda a satisfacer necesidades nutricionales de segmentos de la población que buscan tener una mejor calidad de vida.

En ese sentido, el objetivo de la presente investigación fue describir la influencia del grosor de la rodaja y la potencia del dispositivo microondas en el tiempo de secado de piña de la variedad golden.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

En Junín, departamento de Perú la producción y exportación de piña Golden experimentó un aumento significativo [1]. Este incremento se atribuye en parte a las iniciativas de Sierra Exportadora [2], que promovieron certificaciones orgánicas y brindaron capacitación técnica para mejorar la productividad. Además, se resalta la calidad de la piña Golden peruana en comparación con la de Ecuador y México, lo que posiciona a Perú como un competidor fuerte en el mercado de exportación de esta fruta.

El informe sobre el consumo global de frutas deshidratadas señala una tendencia creciente en la demanda de alimentos naturales y saludables, lo que representa una oportunidad para Perú en la exportación de frutas deshidratadas a mercados internacionales [3]. Esta tendencia refleja el interés del consumidor por opciones de snacks saludables y alimentos con mayor durabilidad. Así mismo, varios estudios se centran en los métodos de secado de frutas. Al respecto, [4] investigó el secado de fresas en un horno de microondas, logrando eliminar el 85% de la humedad de las fresas con un ahorro significativo de energía. También, [5] examinó el efecto de la potencia y la temperatura en el secado de rodajas de mango, identificando condiciones óptimas para el proceso. Por otro lado, [6] comparó métodos de secado, destacando que el secado por microondas reduce significativamente los tiempos de secado y el consumo energético en comparación con el secado por aire caliente. Por consiguiente, [7] investigó el secado de papas en microondas, observando una mayor velocidad de secado con el aumento de la potencia, aunque esto afectó la consistencia y el color de las

papas. Sin embargo, su estudio se centró en el secado combinado de papas mediante microondas y convección de aire caliente, logrando un producto estable y de calidad. Por tanto, [8] examinaron el secado de rodajas de ñame, identificando la influencia de la potencia y la masa en el tiempo y la cinética de secado. Por otro lado, [9] investigaron el secado de piña en un secador solar híbrido, reduciendo significativamente el tiempo de secado en comparación con el secado tradicional. De manera similar, [10] estudiaron los efectos de diferentes métodos de secado en la piña, observando diferencias en el contenido fenólico y la capacidad antioxidante entre los métodos. Adicionalmente, [11] evaluaron las condiciones de secado en la calidad de la piña, encontrando diferencias significativas en el color, la textura y el contenido de ácido ascórbico a diferentes temperaturas. También, [12] utilizaron un secador solar mixto para secar piña, logrando reducir las pérdidas en comparación con el secado tradicional al sol y acelerando el proceso.

En conjunto, estos estudios ofrecen una visión integral de los métodos de secado de frutas como la piña, las condiciones óptimas y el impacto en la calidad de los productos. Estos hallazgos son de gran relevancia para la industria alimentaria y la agricultura, [13] ya que proporcionan información valiosa para mejorar la eficiencia energética y la calidad de los productos secados, lo que a su vez puede impulsar las exportaciones y el crecimiento económico en las regiones del Perú [14].

III. MATERIALES Y MÉTODO

Materia prima: las piñas Golden empleadas provenían del fundo Santa Teresa ubicado en la provincia de Satipo departamento de Junín – Perú, estas presentaban un grado de madurez de 4 según se muestra en la figura 1 y sus características físicas y químicas que se muestran en la tabla 1

Figura 1:
Grado de madurez de piña golden MD2

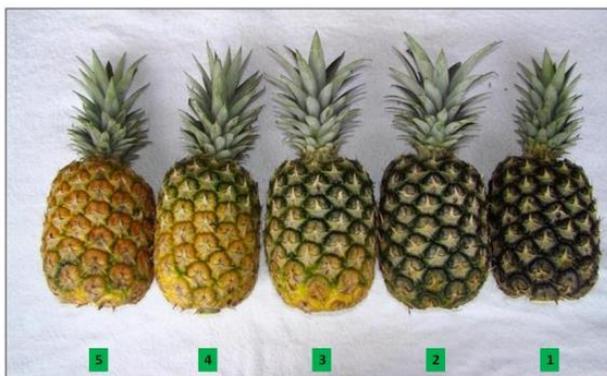
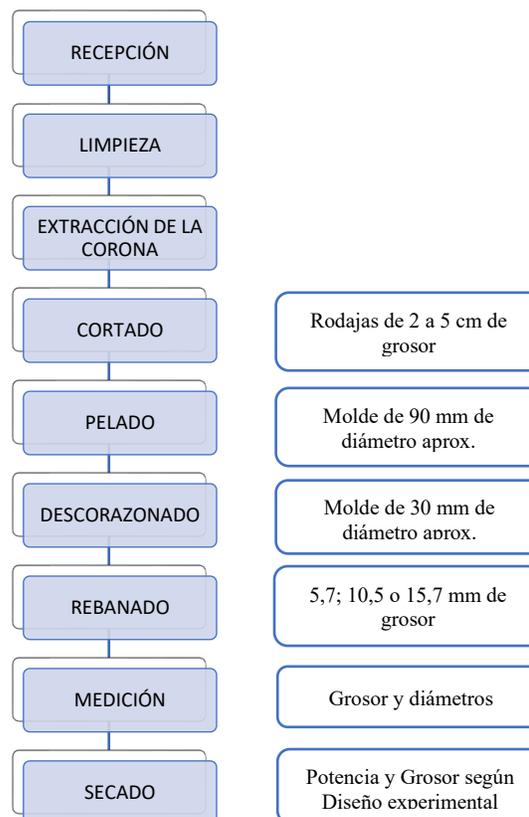


Tabla 1:
Características físicas y químicas de la piña Golden MD2

Características	Unidad de medida	Contenido en 100 g de fruta fresca
Peso	kg	1,97
Pulpa	%	65,97
Corteza	%	34,03
Jugo	%	50,50
Humedad	%	85,71
Sólidos solubles	°Brix	13,34
Acidez	% (expresado como ácido cítrico)	0,55
pH	---	3,30

Tipo y método de investigación: la investigación fue de tipo aplicada con el propósito de resolver un problema práctico relacionado con el secado de rodajas de piña. Así mismo, la investigación fue explicativa ya que buscó modelar la relación entre las variables independientes (Potencia del dispositivo microondas y Grosor de la rodaja) y la variable dependiente (Tiempo de secado). El enfoque fue del tipo cuantitativo, pues se realizó primero la caracterización de la materia prima y luego se determinó la humedad en base seca de las muestras provenientes de los diferentes tratamientos y se emplearon modelos matemáticos para obtener las curvas de secado. Así mismo, la investigación fue primaria con datos recogidos exclusivamente para el estudio. Por otro lado, el enfoque experimental, permitió manipular de forma controlada las variables independientes para observar los efectos en las variables dependientes. El proceso de secado se realizó siguiendo el diagrama de flujo que se presenta en la figura 2.

Figura 2:
Grado de madurez de piña golden MD2



Las variables independientes identificadas se ajustaron a un diseño de 2 factores con tres niveles para la variable grosor de la rodaja (5,7; 10,5 y 15,7 mm) y cuatro para la potencia del dispositivo microondas (639; 1035,4; 1353,2 y 1563,2 W). Los tratamientos realizados conjugando las variables independientes fueron los propuestos en la tabla 2, estos valores fueron los promedios de las medidas y potencias usadas a lo largo de las corridas experimentales según el diseño factorial anteriormente especificado; además las pruebas se realizaron por triplicado y de forma aleatoria (tabla 3); sin embargo, no fue viable realizar los experimentos (A1B4)3, (A2B4)1 y (A3B4)3, siendo el total de corridas experimentales realizadas 33.

Tabla 2:
Diseño factorial

Factores	Niveles	Potencia del dispositivo Microondas			
		639,0 W	1035,4 W	1353,2 W	1563,2 W
Grosor de la rodaja	5,7 mm	(5,7 mm - 639,0 W) ₁	(5,7 mm - 1035,4 W) ₁	(5,7 mm - 1353,2 W) ₁	(5,7 mm - 1563,2 W) ₁
		(5,7 mm - 639,0 W) ₂	(5,7 mm - 1035,4 W) ₂	(5,7 mm - 1353,2 W) ₂	(5,7 mm - 1563,2 W) ₂
		(5,7 mm - 639,0 W) ₃	(5,7 mm - 1035,4 W) ₃	(5,7 mm - 1353,2 W) ₃	(5,7 mm - 1563,2 W) ₃
	10,5 mm	(10,5 mm - 639,0 W) ₁	(10,5 mm - 1035,4 W) ₁	(10,5 mm - 1353,2 W) ₁	(10,5 mm - 1563,2 W) ₁
		(10,5 mm - 639,0 W) ₂	(10,5 mm - 1035,4 W) ₂	(10,5 mm - 1353,2 W) ₂	(10,5 mm - 1563,2 W) ₂
		(10,5 mm - 639,0 W) ₃	(10,5 mm - 1035,4 W) ₃	(10,5 mm - 1353,2 W) ₃	(10,5 mm - 1563,2 W) ₃
	15,7 mm	(15,7 mm - 639,0 W) ₁	(15,7 mm - 1035,4 W) ₁	(15,7 mm - 1353,2 W) ₁	(15,7 mm - 1563,2 W) ₁
		(15,7 mm - 639,0 W) ₂	(15,7 mm - 1035,4 W) ₂	(15,7 mm - 1353,2 W) ₂	(15,7 mm - 1563,2 W) ₂
		(15,7 mm - 639,0 W) ₃	(15,7 mm - 1035,4 W) ₃	(15,7 mm - 1353,2 W) ₃	(15,7 mm - 1563,2 W) ₃

Usando los tiempos de secado obtenidos de las corridas experimentales y teniendo en cuenta las combinaciones posibles de las variables independientes del diseño factorial explicado, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) que permitiera validar el impacto significativo de cada variable independiente en la variable dependiente.

Usando los datos obtenidos de las corridas experimentales, considerando cada medida característica de grosor y potencia para cada experimento como puntos individuales, se emplearon diferentes modelos matemáticos (tabla 4) para determinar cuál de ellos explica mejor el comportamiento de la humedad a lo largo del tiempo de secado hasta que alcance los 12 y 20 % de humedad, dentro del rango de operación seleccionado (Potencia: 639,0 a 1563,2 W; Grosor: 5,7 a 15,7 mm).

Tabla 3
Diseño experimental aleatorio

Orden de Corrida Experimental	Experimento
1	(A ₁ B ₃) ₂
2	(A ₂ B ₄) ₃
3	(A ₂ B ₄) ₂
4	(A ₃ B ₁) ₃
5	(A ₁ B ₄) ₁
6	(A ₁ B ₁) ₁
7	(A ₁ B ₁) ₂
8	(A ₃ B ₄) ₁
9	(A ₂ B ₃) ₃
10	(A ₂ B ₃) ₂
11	(A ₂ B ₁) ₂
12	(A ₃ B ₂) ₁
13	(A ₂ B ₂) ₃
14	(A ₁ B ₁) ₃
15	(A ₃ B ₂) ₃
16	(A ₃ B ₄) ₂
17	(A ₃ B ₃) ₂
18	(A ₁ B ₂) ₂
19	(A ₁ B ₄) ₂
20	(A ₁ B ₂) ₁
21	(A ₂ B ₁) ₁
22	(A ₁ B ₃) ₃
23	(A ₃ B ₁) ₂
24	(A ₂ B ₂) ₁
25	(A ₂ B ₃) ₁
26	(A ₁ B ₂) ₃
27	(A ₃ B ₂) ₂
28	(A ₃ B ₃) ₃
29	(A ₃ B ₁) ₁
30	(A ₃ B ₃) ₁
31	(A ₁ B ₃) ₁
32	(A ₂ B ₂) ₂
33	(A ₂ B ₁) ₃

Tabla 4:
Modelos matemáticos empleado en el ajuste de las curvas de secado

Modelo	Ecuación
Henderson-Pabis	$MR = ae^{-kt}$
Newton	$MR = e^{-kt}$
Page	$MR = e^{-kt^n}$
Logarítmica	$MR = ae^{-kt} + b$
Dos términos	$MR = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t}$
Dos términos exponencial	$MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-kat}$
Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Aproximación por Difusión	$MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-kbt}$
Midilli et al.	$MR = ae^{-kt^n} + bt$

Nota. Adaptado de "Modelos seleccionados de secado de capas finas utilizados para modelar matemáticamente la cinética de secado de la piña"

Las corridas experimentales, estas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos y Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos de la Universidad Nacional del Callao.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

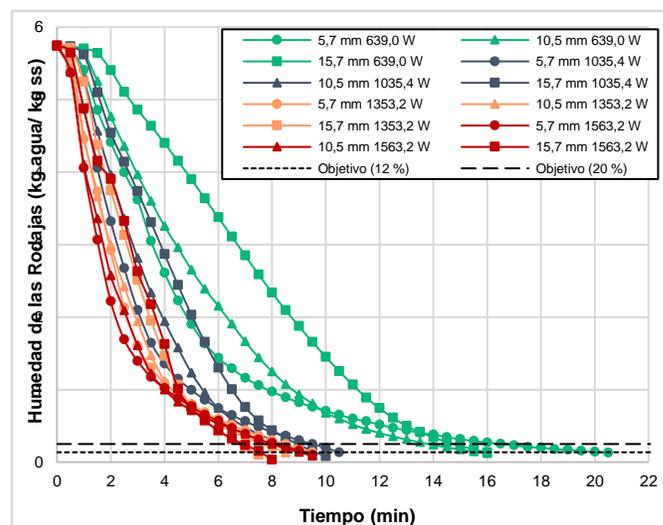
Con el promedio simple de los datos obtenidos en las réplicas de los experimentos realizados según el diseño experimental se muestran en la figura 3, la cual permite evaluar diferentes aspectos del proceso de secado. La figura 3 presenta comparaciones globales donde se encuentran todas las corridas realizadas según el diseño experimental para observar el comportamiento de la humedad de la rodaja de piña en el tiempo, la cinética de pérdida de humedad de la rodaja de piña en el tiempo y la cinética de pérdida de humedad de la rodaja de piña para una humedad.

Los puntos experimentales graficados son los necesarios para alcanzar a la humedad objetivo mínima de 12 % (bh). Además, las gráficas se presentan agrupadas en función de un mismo grosor y a una misma potencia; mostrando así los efectos que tiene cada parámetro en el tiempo de secado, tanto para una humedad final de 12 % como para una humedad final de 20 %. Los datos graficados usan un patrón de color según la variable potencia del dispositivo microondas para una mejor identificación y comparación de las distintas curvas o patrones de comportamientos expuestas en cada una de las gráficas.

En la figura 3 se muestran las gráficas que ilustran la cinética de secado en varios procesos experimentales que involucraron la variación de humedad en función del tiempo, para un periodo específico. Aunque los ejes de las gráficas no mostraron directamente la humedad de las rodajas, permitiendo observar cómo se comportó el proceso con el tiempo. A pesar

de no representar de manera explícita los valores objetivos de humedad del 12 % y el 20 %, se consideró, se consideró que el proceso de secado concluyó cuando la cinética de secado alcanzó valores muy bajos. Los puntos experimentales mostrados en las gráficas fueron los necesarios para lograr la humedad mínima deseada del 12 % (bh). De esta manera, fue posible apreciar las velocidades de secado alcanzadas al finalizar el proceso.

Figura 3
Curvas de secado para los diferentes tratamientos ensayados



Tiempos de secado

Tabla 5:
Tiempos de secado para una humedad final de 12% y 20% en base húmeda

Humedad final	Grosor	Tiempos de secado (min)			
		Potencia			
		639,0 W	1035,4 W	1353,2 W	1563,2 W
12%	5,7 mm	20,24	10,49	9,47	9,16
	10,5 mm	15,71	9,23	8,46	9,02
	15,7 mm	15,97	9,61	7,31	7,56
20%	5,7 mm	16,545	9,49	8,46	8,12
	10,5 mm	13,82	8,37	7,65	7,99
	15,7 mm	14,77	8,94	6,78	6,92

En la tabla 5 se presentan los tiempos de secado correspondientes a las distintas combinaciones de variables independientes según diseño factorial para alcanzar una humedad final de 12 y 20 % de humedad en base húmeda. Además, se resaltan el mínimo y máximo tiempo tomado para

cada objetivo. Para ello se consideró el tiempo de secado promedio de las réplicas realizadas y se hizo una interpolación simple en el intervalo de humedad y tiempo.

Tabla 6
Base de datos para el análisis de varianza para determinar el efecto de las variables grosor y potencia del dispositivo microondas en el tiempo de secado

Experimento	Grosor (mm)	Potencia (W)	Tiempo para alcanzar 12 % (min)	Tiempo para alcanzar 20 % (min)
(A ₁ B ₃) ₂	5,708	1353,2	10,458	8,724
(A ₂ B ₄) ₃	10,457	1563,2	9,271	8,130
(A ₂ B ₄) ₂	10,457	1563,2	8,789	7,857
(A ₃ B ₁) ₃	15,731	638,98	14,798	13,748
(A ₁ B ₄) ₁	5,708	1563,2	9,435	8,210
(A ₁ B ₁) ₁	5,708	638,98	19,853	16,040
(A ₁ B ₁) ₂	5,708	638,98	21,319	15,676
(A ₃ B ₄) ₁	15,731	1563,2	7,722	7,055
(A ₂ B ₃) ₃	10,457	1353,2	9,384	8,497
(A ₂ B ₃) ₂	10,457	1353,2	8,928	8,075
(A ₂ B ₁) ₂	10,457	638,98	16,331	14,240
(A ₃ B ₂) ₁	15,731	1035,37	10,592	9,768
(A ₂ B ₂) ₃	10,457	1035,37	11,370	10,211
(A ₁ B ₁) ₃	5,708	638,98	20,176	17,353
(A ₃ B ₂) ₃	15,731	1035,37	8,954	8,254
(A ₃ B ₄) ₂	15,731	1563,2	7,386	6,800
(A ₃ B ₃) ₂	15,731	1353,2	7,209	6,671
(A ₁ B ₂) ₂	5,708	1035,37	11,386	10,216
(A ₁ B ₄) ₂	5,708	1563,2	8,903	8,036
(A ₁ B ₂) ₁	5,708	1035,37	11,568	10,238
(A ₂ B ₁) ₁	10,457	638,98	16,948	14,636
(A ₁ B ₃) ₃	5,708	1353,2	9,303	8,284
(A ₃ B ₁) ₂	15,731	638,98	17,069	15,494
(A ₂ B ₂) ₁	10,457	1035,37	8,157	7,507
(A ₂ B ₃) ₁	10,457	1353,2	7,276	6,591
(A ₁ B ₂) ₃	5,708	1035,37	8,799	7,680
(A ₃ B ₂) ₂	15,731	1035,37	9,412	8,840
(A ₃ B ₃) ₃	15,731	1353,2	7,255	6,742
(A ₃ B ₁) ₁	15,731	638,98	16,108	15,110
(A ₃ B ₃) ₁	15,731	1353,2	7,461	6,887
(A ₁ B ₃) ₁	5,708	1353,2	9,225	8,493
(A ₂ B ₂) ₂	10,457	1035,37	8,809	8,010
(A ₂ B ₁) ₃	10,457	638,98	14,230	12,673

Los tiempos mínimos para alcanzar las humedades finales objetivo de 12 y 20 % en base húmeda fueron de 7,31 min y 6,78 min, respectivamente; ambos casos resultaron de la

combinación de variables independientes de 15,7 mm grosor de la rodaja y 1353,2 W de potencia del dispositivo microondas. Así mismo, se determinó que los tiempos máximos para alcanzar las humedades finales objetivo de 12 y 20 % en base húmeda fueron de 20,24 min y 16,55 min, respectivamente; ambos casos resultaron de la combinación de variables independientes de 5,7 mm grosor de la rodaja y 639,0 W de potencia del dispositivo microondas.

Como se puede observar en las tablas 7 (figura 4) y 8 (figura 5), la potencia del dispositivo microondas influyó significativamente en el tiempo de secado de la piña Golden para distintos grosores de rodajas ($p < 0,05$) para la variable potencia del dispositivo microondas tanto en el modelamiento por diseño factorial como en el de regresión múltiple; este resultado fue coherente con las gráficas de contorno y también con las gráficas de curva de secado, las cuales compararon el comportamiento de la pérdida de agua correspondiente a cada potencia del dispositivo microondas para cada grosor de rodajas. De manera similar, el grosor de las rodajas influyó significativamente en el tiempo de secado de la piña golden para distintas potencias del dispositivo microondas ($p < 0,05$) para la variable grosor de la rodaja tanto en el modelamiento por diseño factorial como en el de regresión múltiple; este resultado fue coherente con las gráficas de contorno y también con las gráficas de curva de secado, las cuales compararon el comportamiento de la pérdida de agua correspondiente a cada grosor de la rodaja para cada potencia del dispositivo microondas.

Tabla 7
ANOVA de un factor para el tiempo necesario para alcanzar una humedad del 12% en base húmeda

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor p
Modelo	21	539,645	25,697	0,0000
Bloques	10	14,444	1,444	0,1899
Lineal	5	371,073	74,215	0,0000
Grosor	2	15,490	7,745	0,0043
Potencia	3	333,900	111,300	0,0000
Interacciones	6	15,518	2,586	0,0495
Grosor*Potencia	6	15,518	2,586	0,0495
Error	11	9,162	0,833	-
Falta de ajuste	8	7,867	0,983	0,2686
Error puro	3	1,295	0,432	-
Total	32	548,806	-	-

Ecuación de regresión:

$$\text{Tiempo} = 48,42 - 1,433 \text{ Grosor} - 0,04595 \text{ Potencia} + 0,0380 \text{ Grosor}^2 + 0,000015 \text{ Potencia}^2 + 0,000322 \text{ Grosor*Potencia}$$

Figura 4
Gráfica de contorno tiempo vs potencia-grosor para una humedad final del 12%

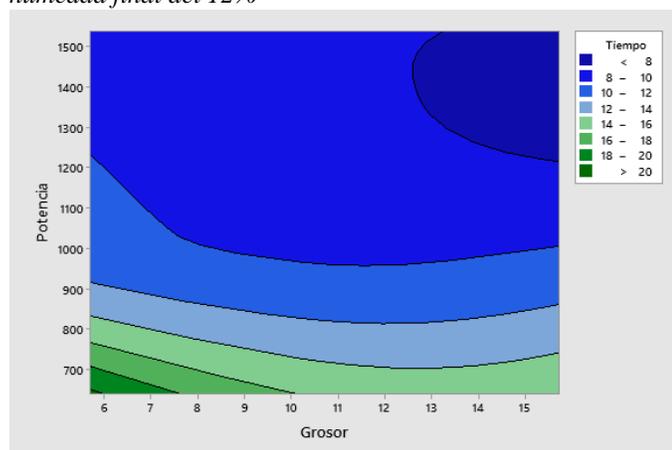


Tabla 8
ANOVA de un factor para el tiempo necesario para alcanzar una humedad del 20% en base húmeda

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor p
Modelo	15	336,563	22,4375	0,0000
Bloques	10	10,518	1,0518	0,2788
Lineal	5	274,469	54,8938	0,0000
Grosor	2	9,013	4,5063	0,0119
Potencia	3	267,525	89,1750	0,0000
Error	17	13,179	0,7752	
Falta de ajuste	14	12,986	0,9276	0,0246
Error puro	3	0,193	0,0642	-
Total	32	349,741	-	-

Figura 5
Gráfica de contorno tiempo vs potencia-grosor para una humedad final del 20%



Ecuación de regresión:

$$\text{Tiempo} = 33,41 - 0,1269 \text{ Grosor} - 0,03466 \text{ Potencia} + 0,000012 \text{ Potencia}^2$$

Modelamiento de las curvas de secado y cinética de secado

Tabla 9

Coefficiente de determinación de las ecuaciones usadas para modelar matemáticamente las curvas de secado para cada nivel de grosor de la rodaja de piña y potencia del dispositivo microondas

	5,7 mm			
	639	1035,4	1353,2	1563,2
Modelo de Page	98,96%	99,11%	99,11%	98,55%
Modelo de Dos Términos	99,08%	98,82%	98,89%	98,71%
Aproximación por Difusión	98,97%	99,18%	99,11%	98,42%
Modelo de Logarítmico	99,05%	98,77%	98,86%	98,84%
Modelo de Henderson-Pabis	99,01%	98,74%	98,86%	98,71%
Modelo de Midilli et al	92,70%	97,00%	97,23%	98,79%
Modelo de Won y Singh	89,54%	97,95%	96,53%	94,45%
Modelo de Newton	98,20%	97,73%	98,20%	98,42%
Modelo de Dos Términos Exponencial	98,11%	97,70%	98,17%	98,40%
	10,5 mm			
	639	639	639	639
Modelo de Page	99,86%	99,86%	99,86%	99,86%
Modelo de Dos Términos	99,94%	99,94%	99,94%	99,94%
Aproximación por Difusión	99,93%	99,93%	99,93%	99,93%
Modelo de Logarítmico	99,03%	99,03%	99,03%	99,03%
Modelo de Henderson-Pabis	98,21%	98,21%	98,21%	98,21%
Modelo de Midilli et al	95,37%	95,37%	95,37%	95,37%
Modelo de Won y Singh	98,95%	98,95%	98,95%	98,95%
Modelo de Newton	96,16%	96,16%	96,16%	96,16%
Modelo de Dos Términos Exponencial	96,14%	96,14%	96,14%	96,14%
	15,7 mm			
	639	639	639	639
Modelo de Page	99,91%	99,91%	99,91%	99,91%
Modelo de Dos Términos	99,31%	99,31%	99,31%	99,31%
Aproximación por Difusión	99,25%	99,25%	99,25%	99,25%
Modelo de Logarítmico	98,64%	98,64%	98,64%	98,64%
Modelo de Henderson-Pabis	94,39%	94,39%	94,39%	94,39%
Modelo de Midilli et al	97,37%	97,37%	97,37%	97,37%
Modelo de Won y Singh	97,61%	97,61%	97,61%	97,61%
Modelo de Newton	90,36%	90,36%	90,36%	90,36%
Modelo de Dos Términos Exponencial	90,33%	90,33%	90,33%	90,33%

En la tabla 9 se puede observar que los modelos que permiten un mayor ajuste de las curvas de secado de las rodajas de piña golden son los modelos como el simple-exponencial de tres términos, el de Page, el de Hasibuan y Daud, el Dos Términos, el Logarítmico y el Parabólico, que muestran un alto coeficiente de determinación (R^2), lo que sugirió una buena capacidad de ajuste a los datos experimentales [15]. Los resultados del modelamiento coinciden con los reportados por [16], [17] y [18] en el proceso de secado convectivo de piña en rodajas.

Influencia de la potencia en la cinética de Secado

Con el fin de determinar la influencia de la potencia del dispositivo microondas en la cinética de secado de rodajas de un mismo grosor (figura 6), se empleó el coeficiente cinético k del modelo de Page y la ecuación de Arrhenius modificada [19] para determinar los valores de energía de activación y coeficiente de determinación que se muestran en la tabla 10.

$$\ln(k) = \ln(k_0) + \left(-\frac{E_a m}{P}\right)$$

Figura 6
Gráfica de Arrhenius modificada

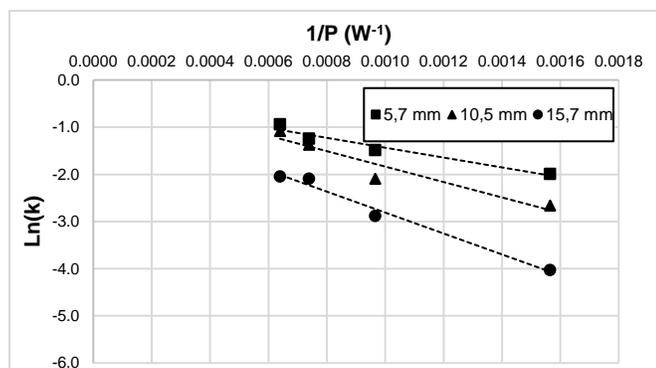


Tabla 10
Componentes de la ecuación modificada de Arrhenius linealizada y R^2

Grosor (mm)	Potencia (W)	k (min ⁻¹)	Constante	Ea (W/g)	K ₀ (min ⁻¹)	R ² (%)
5,7	638,98	0,1369				
	1035,37	0,2270	-0,3902	33,1816	0,6769	95,02
	1353,24	0,2893				
	1563,20	0,3924				
638,98	0,0703					
10,5	1035,37	0,1234	-0,2003	27,7199	0,8185	90,96
	1353,24	0,2549				
	1563,20	0,3388				
	638,98	0,0178				
15,7	1035,37	0,0561	-0,5915	25,7791	0,5535	98,29
	1353,24	0,1239				
	1563,20	0,1295				

Difusividad

Se determinó la difusividad efectiva de la humedad en las rodajas de piña para las diferentes combinaciones de las variables independientes a través de la pendiente del Ln (MR) versus el tiempo, considerando la ecuación que se presenta a continuación se obtuvieron los valores de difusividad para cada combinación de tratamientos y el coeficiente de determinación R^2 :

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) + \left(-\frac{\pi^2 D_{ff}}{4L^2}\right)t$$

Los valores de difusividad obtenidos estuvieron por debajo de los $6,4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ y los $10,23 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ reportados por Malaikritsanachalee, P., Choosri, W. y Choosri, T. (2018) para el secado convectivo de piña con aire forzado normal y aire forzado en remolino y el $5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para el secado de dados de piña por energía microondas a 700 W (tabla 11).

Tabla 11
Difusividad de cada tratamiento y coeficiente de determinación R^2

Grosor (mm)	Potencia (W)	Constante	Pendiente	Dff (x10 ⁶ m ² /s)	R ²
5,7	639,0	-0,0889404	-0,0031225	4,12	98,72%
	1035,4	0,07346727	-0,0057796	7,63	99,37%
	1353,2	0,02205792	-0,00639963	8,45	99,21%
	1563,2	-0,0559236	-0,0065676	8,67	98,87%
10,5	639,0	0,36400229	-0,0041841	18,54	99,01%
	1035,4	0,41816203	-0,00703941	31,20	97,95%
	1353,2	0,17795315	-0,00732505	32,46	99,50%
	1563,2	0,03427884	-0,00687454	30,47	99,10%
15,7	639,4	0,58941341	-0,0038207	38,32	92,68%
	1035,4	0,61127367	-0,00673302	67,53	93,11%
	1353,2	0,5053755	-0,00880627	88,32	95,78%
	1563,2	0,60362531	-0,00936422	93,92	92,20%

V. CONCLUSIONES

Los tiempos mínimos para alcanzar las humedades finales objetivo de 12 y 20 % en base húmeda fueron de 7,31 min y 6,78 min, respetivamente; ambos casos resultaron de la combinación de variables independientes de 15,7 mm grosor de la rodaja y 1353,2 W de potencia del dispositivo microondas. Así mismo, se determinó que los tiempos máximos para alcanzar las humedades finales objetivo de 12 y 20 % en base húmeda fueron de 20,24 min y 16,55 min, respetivamente; ambos casos resultaron de la combinación de variables independientes de 5,7 mm grosor de la rodaja y 639,0 W de potencia del dispositivo microondas.

La potencia del dispositivo microondas influyó significativamente en el tiempo de secado de la piña para distintos grosores de rodajas como se evidenció en el valor p

(mucho menor de 0,05) para la variable potencia del dispositivo microondas tanto en el modelamiento por diseño factorial como en el de regresión múltiple; este resultado fue coherente con las gráficas de contorno y también con las gráficas de curva de secado, las cuales compararon el comportamiento de la pérdida de agua correspondiente a cada potencia del dispositivo microondas para cada grosor de rodajas.

El grosor de las rodajas influyó significativamente en el tiempo de secado de la piña para distintas potencias del dispositivo microondas como se evidenció ($p < 0,05$) para la variable grosor de la rodaja tanto en el modelamiento por diseño factorial como en el de regresión múltiple; este resultado fue coherente con las gráficas de contorno, las cuales compararon el comportamiento de la pérdida de agua correspondiente a cada grosor de la rodaja para cada potencia del dispositivo microondas.

Los modelos Page, Dos Términos y Aproximación por Difusión fueron los mejores modelos matemáticos (mayor R^2) que describieron el proceso de secado en cuanto a la pérdida de humedad con respecto al tiempo.

Las energías de activación disminuyeron al aumentar el grosor de la rodaja de piña, estas fueron de 33,18; 27,72 y 25,78 W/g para los grosores de 5,7; 10,5 y 15, 7 mm, respectivamente.

Los coeficientes de cinética de secado provenientes del modelo matemático de Page mínimos y máximos fueron de 0,017803 y 0,392373 min^{-1} , respectivamente. El menor coeficiente correspondió al experimento con 15,7 mm de grosor y 639 W de potencia; el mayor coeficiente correspondió al experimento con 5,7 mm de grosor y 1536,5 W de potencia.

Finalmente, las difusividades efectivas mínimas y máximas fueron de $4,12 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $93,91 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. La menor difusividad efectiva correspondió al experimento con 5,7 mm de grosor y 639 W de potencia; la mayor difusividad efectiva correspondió al experimento con 15,7 mm de grosor y 1563,2 W de potencia.

REFERENCIAS

[1] AGRARIA.PE REDACCIÓN (2019). Sierra Exportadora capacita a productores para incrementar rendimiento del cultivo Junín: promueven e impulsan producción y exportación de piña Golden. *Agencia Agraria de Noticias*. https://agraria.pe/noticias/junin-promueven-e-impulsan-produccion-y-11087?fb_comment_id=1339845722698681_134048719_2634534

[2] Munive, L. (2015). Producción del cultivo de Piña cv. Golden en la Selva Central Mazamari - Satipo (Junín). (Tesis de Pregrado inédita). Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú.

<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2078>

[3] AGRARIA.PE REDACCIÓN (2017). Señaló el presidente de Sierra y Selva Exportadora, Alfonso Velásquez. Consumo de fruta deshidratada alcanzaría los 4 millones de toneladas en el 2020. *Agencia Agraria de Noticias*. <https://agraria.pe/noticias/consumo-de-fruta-deshidratada-alcanzaria-las-4-millones-de-t-15167>.

[4] Alvarado, M. B. (2017). Estudio del proceso de secado de fresa usando horno microondas. *Prospectiva*. 15(1), 29-34. DOI: <http://dx.doi.org/10.15665/rp.v15i1.658>.

[5] Barranzuela, A.W. (2014). Optimización del secado de rodajas de mango variedad haden (*mangífera indica l.*) por combinación de microondas y aire caliente. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Trujillo. Perú. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/7492>

[6] Berenguela, B. (2018). Secado asistido por microondas aplicado en frutas: comparativa frente al secado convencional por aire caliente (Tesis de Grado). Universidad Pública de Navarra (España). https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/29030/TFG_Sagastibelza_Blanca.pdf;jsessionid=D13867DC6A1025962FF5A457CC709159?sequence=1

[7] Della, P. (2010). Secado de alimentos por métodos combinados: Deshidratación osmótica y secado por microondas y aire caliente (Tesis de Maestría). Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. https://nanopdf.com/download/secado-de-alimentos-por-metodos-combinados-deshidratacion_pdf

[8] García, C., Sierra, M. y Miranda, L. (2016). Modelado de la Cinética de Secado en Microondas de Ñame. *Información Tecnológica*. 27(1), 61-68. DOI: [10.4067/S0718-07642016000100008](https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v27n1/art08.pdf). <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v27n1/art08.pdf>

[9] Gudiño, D. y Calderón, Á. (2014). Pineapple Drying Using a New Solar Hybrid Dryer. *Energy Procedia*. 57(1), 1642 - 1650. DOI: [10.1016/j.egypro.2014.10.155](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.155).

[10] Ramallo, L.A. y Mascheroni, R.H. (2012). Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and Bioproducts Processing*, 90(2), 275 - 283. DOI: [10.1016/j.fbp.2011.06.001](https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.06.001).

[11] Srisittipokakun, N. y Kirdsiri, K. (2014). Drying Pineapple Using a Mix Mode Solar Dryer. *Advanced Materials Research*. 979, 11-15. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.979.11](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.979.11).

[12] Sánchez, J. (2012). MANUAL PARA LA PRODUCCIÓN DE UNA PIÑA DE CALIDAD. <https://es.scribd.com/document/415523181/Manual-Produccion-Pina>

[13] EL PRODUCTOR. (2016). Perú: Sierra exportadora busca promover la producción de Piñas Golden Imagen de Piña. El Productor El Periódico del Campo. <https://elproductor.com/noticias/peru-sierra-exportadora-busca-promover-la-produccion-de-pinas-golden/>.

- [14] Foust, A., Wenzel, L., Clump, C., Maus, L. y Andersen, L. (1997). Principios de Operaciones Unitarias. (Torres, F.). Editorial Compañía Editorial Continental S.A. de CV. <https://es.slideshare.net/LuisFernandoUriona/principios-de-operaciones-unitarias-foust-wenzel-clump-maus-andersenpdf>
- [15] Berbert, P., Oliveira, M., y Martinazzo, A. (2016) DRYING OF PINEAPPLE SLICES IN NATURA AND PRE-OSMODEHYDRATED IN INVERTED SUGAR, *Uberlândia*, 32(3), 597-610. <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/26201>
- [16] Brennan, J., Butters, J., Cowel N.D. y Lilley A. (1998). Las Operaciones de la ingeniería de los alimentos. Editorial ACRIBA S.A. <https://pdfcoffee.com/las-operaciones-de-la-ingenieria-de-los-alimentos-j-g-brennan-9-pdf-free.html>
- [17] Izli, N. Izli, G Y Taskin, O. (2017) Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. *Food Sci. Technol, Campinas*. 37(4), 604-612. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.28316>
- [18] Olanipekun, B., Tunde-Akintunde, T., Oyelade, O., Adebisi M. y Adenaya, T. (2015). MATHEMATICAL MODELING OF THIN-LAYER PINEAPPLE DRYING. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39(6), 1431-1441. DOI:10.1111/jfpp.12362.
- [19] Dadalı, G., Kılıç Apar, D. y Özbek, Ö. (2007). Microwave Drying Kinetics of Okra. *Drying Technology: An International Journal*, 25(5), 917-924. DOI: [10.1080/07373930701372254](https://doi.org/10.1080/07373930701372254).