La Granja:
Revista de
Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.07

Artículo científico / Scientific paper

Ciencias Agrícolas

CC BY NC SA

ABYA YALA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Aplicación de un Modelo de superficie de respuesta en el secado al sol y solar indirecto de uvas variedad moscatel de alejandria (*Vitis vinífera*)

Application of a response surface Model for solar and indirect drying of muscat of alexandria grapes (*Vitis vinífera*)

David Vivanco Pezantes*[1], Haydee Rodriguez Navarro[2], Raúl Siche Jara[3] y David Callirgos Romero[4]

[1]*Universidad Nacional del Callao. Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos. Escuela Profesional de Ingeniería de Alimentos. Departamento Académico de Ingeniería de Alimentos.Lima-Perú. [*https://ror.org/01d03q474*]*
[2]*Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle; Escuela Profesional de Industria Alimentaria y Nutrición. Lima-Perú.[*https://ror.org/0431avj27*]*
[3]*Universidad Nacional de Trujillo (UNT) - Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias. La Libertad, Perú.[*https://ror.org/001b4cb05*]*
[4]*Universidade Federal de Pelotas (UFPel) - Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Pelotas, Brasil.[*https://ror.org/05msy9z54*]*

*Autor para correspondencia: dvivancop@unac.edu.pe

Manuscrito recibido el 19 de octubre de 2023. Aceptado, tras revisión el 30 de octubre de 2024. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

Al aplicar la metodología de superficie de respuesta, se optimizó el secado al sol y solar indirecto de uvas *Moscatel de Alejandría*. Se midió la humedad inicial y a continuación se pretrataron las uvas mediante tratamiento termoquímico con bajas concentraciones de hidróxido sódico, temperatura y tiempo de inmersión. Las condiciones se establecieron mediante un diseño experimental de compuesto central rotacional, considerando: temperaturas, concentraciones y tiempos entre 55–95 °C, 0.5–3.0 % y 2–30 segundos, respectivamente. Para cada proceso se determinaron los tiempos de secado, considerando el contenido de humedad final del 20 % en base húmeda, así como la aceptación global del producto. Empleando ecuaciones polinómicas de orden cuadrático, se generaron superficies de respuesta para obtener un menor tiempo de secado y un valor máximo de aceptabilidad del producto, obteniéndose altos valores de coeficiente de determinación ($R^2 > 0.97$) e interacciones significantes de las variables independientes ($p < 0.001$). El secado al sol y solar indirecto optimizó el pretratamiento a 80 °C, 1.75 % y 16 s, para la temperatura y concentración de la solución de hidróxido de sodio y tiempo de inmersión, para obtener tiempos de secado de 75 h y 50 h, respectivamente, con un alto grado de aceptabilidad global del producto y una puntuación superior a 8 puntos en la escala hedónica establecida. Se obtuvieron valores de difusividad efectiva del agua de $8.57 \cdot 10^{-11}$ y $1.90 \cdot 10^{-10}$ m^2/s para el proceso de secado al sol y secado solar indirecto, respectivamente. En condiciones óptimas, el modelo matemático de Midilli y cols. (2002) es el que mejor simula la variación de la humedad frente al tiempo de secado de la uva *Moscatel de Alejandría*.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Palabras clave: Optimización, Secado de uva, Modelación matemática, Difusividad, Metodología de superficie de respuesta.

Abstract

By applying the response surface methodology, we optimized the sun and indirect solar drying of *Muscat of Alexandria* grapes. Initial moisture was measured and then the grapes were pretreated by thermochemical treatment with sodium hydroxide. Employing a centralized planning of rotating compounds, the pretreatment conditions were established, considering: temperatures, concentrations and times between 55–95 °C, 0.5–3.0 % and 2–30 seconds, respectively. For each drying process, drying times were determined, considering the final moisture content of 20 % on a wet basis, as well as the overall acceptance of the product. Using quadratic order polynomial equations, response surfaces were generated to obtain a shorter drying time and a maximum value of product acceptability, obtaining high values of coefficient of determination ($R^2 > 0.97$) and significant interactions of the independent variables ($p < 0.001$). Solar and indirect drying were optimized at 80 °C, 1.75 % and 16 s, for the temperature and concentration of the sodium hydroxide solution and immersion time, to obtain drying times of 75 h and 50 h, respectively, with a high degree of overall product acceptability and a score above 8 points on the established hedonic scale. Effective water diffusivity values of $8.57 \cdot 10^{-11}$ and $1.90 \cdot 10^{-10}$ m^2/s were obtained for the sun-drying and indirect solar drying process, respectively. Under optimal conditions, the mathematical model of Midilli y cols. (2002) best simulates the variation of moisture versus drying time of *Muscat of Alexandria* grapes.

Keywords: Optimization, Grape drying, Mathematical modeling, Diffusivity, Response surface methodology.

Forma sugerida de citar: Vivanco, D., Rodriguez, H., Siche, R. y Callirgos, D. (2026). Aplicación de un Modelo de superficie de respuesta en el secado al sol y solar indirecto de uvas variedad moscatel de alejandria (*Vitis vinífera*). *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):116-138. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.07.

Orcid IDs:

David Vivanco Pezantes: https://orcid.org/0000-0002-9474-0290
Haydee Rodriguez Navarro: https://orcid.org/0000-0001-7346-4496
Raúl Siche Jara: https://orcid.org/0000-0003-3500-4928
David Callirgos Romero: https://orcid.org/0009-0004-7428-4154

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

Las uvas en el estado in-natura e inmediatamente después de la cosecha tienen un alto contenido de humedad (Gopinath y cols., 2022), por lo que su actividad acuosa y su contenido de azúcar las hacen muy sensibles al deterioro microbiano durante el almacenamiento e incluso en condiciones de baja temperatura de refrigeración. Por lo tanto, después de la cosecha, deben consumirse o transformarse en diferentes productos mediante procesos como el secado (Adiletta y cols., 2016).

La uva-pasa es un producto comestible de alto valor nutricional y energético; su elaboración en el Perú es artesanal mediante el secado directo al sol. Esta actividad se realiza en lugares donde la incidencia de la radiación solar es alta y generalmente ocurre entre los meses de enero y abril. En Latinoamérica, Argentina es el país que produce pasas de uva a gran escala, y a nivel mundial son China y Estados Unidos (FAO, 2020).

La industria ha generado métodos de secado artificial y actualmente existen una variedad de secadores industriales para la agroindustria. Se cuenta con la energía solar como fuente de energía renovable predominante, en comparación con la energía eólica y la biomasa, debido a su eterna disponibilidad (Gunasekaran y cols., 2021; Kumar y cols., 2021). El secado al sol es una de las formas más antiguas de conservación y quizás el método más barato y común de conservación de productos agrícolas que se practica en la mayoría de los países tropicales. Sin embargo, esta técnica tiene desventajas: depende del clima, requiere mucho tiempo de secado, provoca la formación de polvo, la reproducción de microorganismos, suciedad, insectos, descomposición, alto coste de mano de obra, calidad variable, entre otros (Djebli y cols., 2020; Naigam y cols., 2021).

Por otro lado, el uso de equipos de secado solar indirecto es una buena alternativa desde el punto de vista económico y medioambiental. El secado solar consiste en transformar la energía solar en energía térmica que luego se utiliza para eliminar la humedad del producto (Shalaby y Bek, 2014); por convección natural, el aire fluye dentro del secador (Gopinath y cols., 2022). Por lo tanto, el uso de energía solar y aire caliente en secadores convectivos es una alternativa potencial para su aplicación en países tropicales y subtropicales (Vigneshkumar y cols., 2021) y también por ser más rápido, económicamente viable, higiénico y más eficiente que el secado al sol, proporcionando a los productos secados un mejor color y textura superficial (Castillo-Téllez y cols., 2017; Singh y cols., 2012).

En la actualidad, existen numerosos estudios de investigación de productos agroindustriales que se procesaron utilizando métodos de secado convencionales (sol y aire) y técnicas de secado modernas, como el secado directo al sol, los secadores solares, los secadores convectivos de aire caliente, los secadores convectivos de aire caliente asistidos con diferentes tipos de energía, microondas, infrarrojos, y una combinación de ellos, el uso del proceso de sublimación de hielo o secado por congelación, el calentamiento y secado al aire o al vacío, y otras técnicas de secado híbridas combinadas (Atak y cols., 2022; Javed y cols., 2023), donde se han intentado aplicar pretratamientos en sus diferentes formas antes del secado y observar varios parámetros, entre ellos, principalmente, la calidad y la aceptación global del producto, los tiempos de secado, los efectos sobre las características de rehidratación y la calidad nutricional en el producto final (Pragati y Preeti, 2012).

Sin embargo, existe interés sobre la optimización de los procesos de secado usando metodologías de superficie de respuesta, técnica en la cual se examinan simultáneamente un conjunto de variables mediante un planeamiento experimental, que permite encontrar las interacciones de variables y las condiciones óptimas de un valor máximo o mínimo o un área específica de la superficie generada (Bitaraf y cols., 2012; Chopra y cols., 2011; Myers y cols., 2016; Ramos y cols., 2015).

Revisando la literatura previa, no se encontró ninguna investigación sobre la optimización del proceso de secado en uvas *Moscatel de Alejandría*. Por lo tanto, los objetivos del presente trabajo son estudiar el efecto del pretratamiento de concentración de hidróxido de sodio, la temperatura y el tiempo de inmersión sobre el tiempo de secado al sol directo y el secado solar utilizando un colector de superficie extendida; evaluar la calidad de las uvas pasas en los términos de aceptación global del producto; estimar las constantes de las ecuaciones

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

de la curva de secado y evaluar la difusividad del agua de las condiciones óptimas de secado.

2 Materiales y Métodos

2.1 Materia prima

Las uvas in-natura recién cosechadas provienen del valle de Ica-Perú y fueron adquiridas en el mercado de frutas de la ciudad de Chincha Alta. Las uvas fueron lavadas, luego secadas y medidas con un vernier. Para la caracterización fisicoquímica de la materia prima se realizaron determinaciones preliminares de potencial de hidrógeno (pH), grados brix (°Brix), índice de refracción (–), contenido de agua (%) y actividad de agua (a_w).

2.2 Pretratamiento de la uva

Antes del secado, las muestras seleccionadas fueron sometidas a un tratamiento químico-térmico, considerando temperatura, concentración y tiempo de inmersión; luego fueron lavadas con abundante agua fría a 20 °C y escurridas, eliminando la humedad superficial con toallas de papel.

La Table 1 muestra la codificación de las variables operativas (temperatura, concentración y tiempo de inmersión), investigadas en cinco niveles cada una, y los efectos sobre la variable respuesta, el tiempo de secado y la aceptación global.

Tabla 1. Codificación de las variables de operación para el secado de la uva variedad *Moscatel de Alejandría* (*Vitis vinifera*).

Variables	**Código**	-1.68	-1	0	$+1$	$+1.68$
Temperatura (°C)	x_1	55	63	75	87	95
Concentración (%)	x_2	0.5	1	1.75	2.5	3.0
Tiempo de inmersión (s)	x_3	2	7.7	16	24.3	30

Se utilizó una delineación experimental de compuesto central rotacional (DCCR), que consiste en una planificación factorial completa 2^3, 06 puntos axiales (niveles ± 1.68), y 06 puntos centrales (nivel 0) totalizando 20 ensayos, realizados por duplicado y aleatoriamente, y determinando las condiciones óptimas del proceso. La planificación con los niveles codificados y reales y los resultados se muestran en la Tabla 4.

2.3 Sistema de secado

Se utilizó un secador solar de acero inoxidable (Figura 1) construido especialmente para este proyecto de investigación. El secador es un prototipo a escala comercial. Las dimensiones totales del secador son: $2276 \times 2558 \times 806$ mm (alto $\times$ largo $\times$ ancho), con material de construcción de chapas de acero inoxidable 304 de 1.5 mm de espesor y soportes estructurados de perfiles cuadrados de 2″ (pulgadas). Las dimensiones del colector solar con superficie ampliada fueron: $173 \times 806 \times 2000$ mm, con una cubierta de vidrio transparente de 3 mm de espesor, con un ángulo de inclinación de 15° respecto al plano horizontal y orientado al norte. Las características de una aleta fueron de: $1.5 \times 25 \times 2000$ mm y el número de aletas en la superficie del colector fue de 27. El peso aproximado del equipo era de 350 kg. El equipo de secado se instaló en el patio a cielo abierto de la bodega de vinos Navarro en Chincha Alta, a 13°25.3′ latitud sur y 76°7′57″ longitud oeste. El módulo experimental fue implementado con termómetros para leer las temperaturas a la entrada y salida de aire del colector solar, las temperaturas del aire de secado a lo largo del cuerpo del secador y la velocidad del aire de secado.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

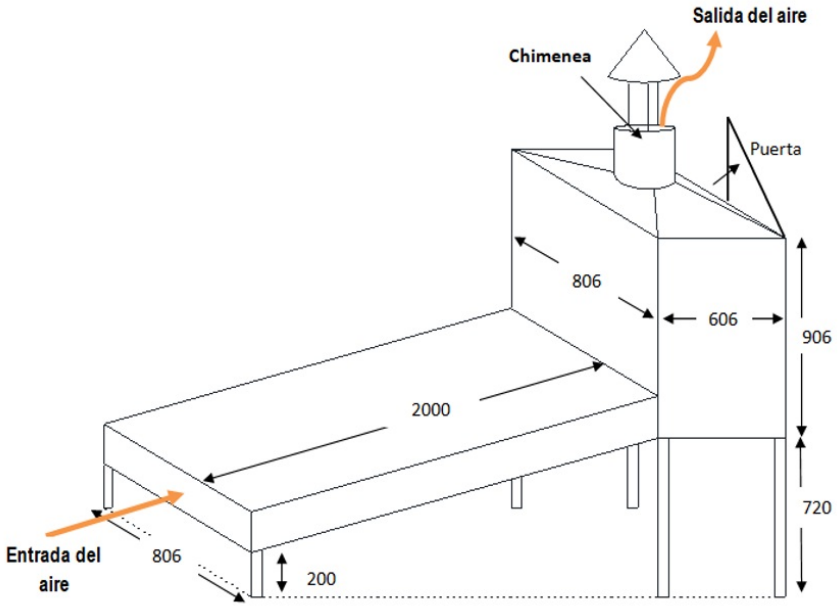


Figura 1. Esquema del secador solar a escala comercial.

Tras los tratamientos químico-térmicos, el proceso de secado de las uvas se llevó a cabo colocando las muestras con un peso medio de 101.27 ± 4.58 g en sus respectivos porta muestras al sol y en el secadero solar indirecto. En este último, el efecto chimenea más el proceso de calentamiento del aire en el colector solar contribuyeron al movimiento del aire de secado y a su desplazamiento a lo largo de la cámara de secado hasta su salida del secadero. Durante el periodo de prueba, la temperatura media del aire ambiente y del aire que entraba en la cámara de secado fue de 27 y 40 °C, respectivamente, con un valor medio de radiación solar de 300 W/m^2.

2.4 Razón de humedad

El módulo adimensional de humedad durante el secado al sol y solar indirecto (Kusuma y cols., 2023), se presenta en la Ecuación 1:

$$MR = \frac{X(t) - X_e}{X_0 - X_e} \tag{1}$$

Donde: MR es la razón de humedad, $X(t)$ es la humedad media en el tiempo t, X_o es la humedad media inicial, y X_e es la humedad media en el equilibrio.

2.5 Difusividad efectiva del agua (D_{eff})

En la forma general de la ecuación de difusión en coordenadas esféricas sin tener en cuenta la generación de masa (Ecuación 2):

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial X}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2 sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(sin\theta\frac{\partial X}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{r^2 sin^2\theta}\frac{\partial^2 X}{\partial \phi^2} = \frac{1}{D}\frac{\partial X}{\partial t} \tag{2}$$

Así mismo, considerando que la difusión solo ocurre a través del eje radial, la ecuación simplificada de difusión de masa de agua a través de la sección de la uva en coordenadas esféricas es (Ecuación 3):

$$\frac{\partial X(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 D\frac{\partial X}{\partial r}\right) \tag{3}$$

Para las condiciones iniciales y de frontera en la superficie ($r = R$) y en el centro de la baya de uva ($r = 0$), son (Ecuaciones 4 y 5):

$$X(t = 0.0 \leq r < R) = X_0 \tag{4}$$

$$X(t = 0.0 \leq r < R) = X_0 \tag{5}$$

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Se supone que la distribución inicial de la humedad es uniforme en el núcleo de la esfera, que la humedad superficial es igual al contenido de humedad de equilibrio y que la difusión radial es simétrica.

Considerando que todo el proceso de secado se produce en un período de disminución de la velocidad de secado y que la difusividad del líquido es el factor dominante de todo el proceso, es decir, que el proceso de secado está totalmente controlado por la resistencia interna a la transferencia de masa, se puede utilizar la segunda ley de Fick de la difusión para describir el proceso de secado (Doymaz, 2007; Saravacos y Maroulis, 2001; Srikiatden y Roberts, 2006).

La ecuación 3 puede resolverse analíticamente suponiendo un valor constante del radio (no se considera la contracción) y el valor del coeficiente de difusividad durante el proceso de secado, lo que genera la ley de Fick para la difusión en geometrías esféricas (Ecuación 6):

$$MR = \frac{X(t) - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[\frac{-n^2\pi^2 \cdot D \cdot t}{R^2}\right] \quad (6)$$

Y para periodos de tiempos largos de secado, la Ecuación 6 puede ser simplificada y expresada (Crank, 1975; Doymaz, 2004; Di Matteo y cols., 2000; Rizvi, 1986) como se presenta en la Ecuación 7:

$$MR = \frac{X(t) - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot D_{\text{eff}} \cdot t}{R^2}\right) \quad (7)$$

Tomando logaritmos a ambos miembros (Ecuación 8):

$$Ln(MR) = Ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}\, t}{R^2}\right) \quad (8)$$

Donde R (m) es el radio medio de la uva y D_{eff} es la difusividad efectiva de humedad (m^2/s) que es determinada desde la pendiente de la gráfica de Ln(MR) versus el tiempo de secado (t).

2.6 Metodología de superficie de respuesta

Esta metodología comprende un conjunto de técnicas matemáticas que se utilizaron para optimizar el proceso de secado, donde las variables de respuesta fueron el tiempo de secado y la aceptación global del producto, que se vieron influenciadas por los factores cuantitativos: temperatura (°C): x_1, concentración (%): x_2 y tiempo de inmersión (s): x_3.

De acuerdo con el diseño experimental propuesto, la técnica de metodología de superficie de respuesta aproxima una relación matemática polinómica de segundo orden, como se muestra en la Ecuación 9.

$$y = \beta_o + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 \sum_{i<1} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (9)$$

2.7 Simulación matemática de la curva de secado

Se utilizaron 6 modelos matemáticos (Tabla 2) con los cuales se simuló la curva de secado de las condiciones óptimas, tales como: Henderson-Pabis, Henderson-Pabis modificada, Page, Page modificada, Newton y Midilli y cols. (2002) (Bombana y cols., 2023; Kusuma y cols., 2023; Subbian y cols., 2021).

Tabla 2. Modelos matemáticos para la simulación de la curva de secado.

Modelo	**Ecuación**	
Henderson-Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k.t)$	(10)
Henderson-Pabis Modificado	$MR = a \cdot \exp(-k.t) + b \cdot \exp(-g.t) + c \cdot \exp(-h.t)$	(11)
Page	$MR = \exp(-k.t^n)$	(12)
Page Modificado	$MR = [\exp(-k.t)]^n$	(13)
Newton	$MR = a \exp(-k.t)$	(14)
Midilli *et al.*	$MR = a \cdot \exp(-k.t^n) + b.t$	(15)

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2.8 Análisis estadístico

Se utilizó el programa Statistica v. 7.0 para analizar los efectos de las variables independientes sobre el tiempo de secado y la aceptación global del producto. También se determinó el coeficiente de determinación R^2, que indicó el grado de ajuste del polinomio cuadrático de la superficie de respuesta. El ajuste de las constantes de los modelos matemáticos no lineales propuestos para simular la curva de secado se determinó mediante el paquete informático SOLVER (Microsoft Corporation MS-Excel®), que emplea el método de resolución de gradiente reducido generalizado con un grado de convergencia de 10^{-5}.

Para los modelos propuestos se evaluó la calidad de ajuste de la ecuación a los datos experimentales, calculando el coeficiente de determinación (R^2), la suma de los errores cuadrados (*SSE*), la raíz media de los errores cuadrados (*RMSE*), el error porcentual medio relativo (*EMR*) y el chi-cuadrado reducido (χ^2), los cuales se calculan mediante las Ecuaciones 16, 17, 18, 19 y 20, respectivamente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i})^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\overline{MR}_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i}\right)^2} \quad (16)$$

$$SSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i})^2 \quad (17)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i})^2\right]^{1/2} \quad (18)$$

$$EMR(\%) = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|MR_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i}\right|}{MR_{\exp_i}} \quad (19)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N-n}\sum_{i=1}^{N}(MR_{\exp_i} - MR_{\mathrm{mod}_i})^2 \quad (20)$$

3 Resultados y Discusión

3.1 Caracterización Fisicoquímica

Los resultados de las propiedades fisicoquímicas de la uva se muestran en la Tabla 3, y se presentan los valores medios y la desviación estándar correspondiente. El valor del potencial hidrógeno (pH) varía entre 4.00 y 3.26, que lo define como un producto agridulce. En tanto, el contenido de agua varía entre 79.24 y 80.76 %, encontrándose dentro del rango común presentado en todas las variedades de uvas, que va desde 70 al 80 % (Srivastava y cols., 2021) y el valor de la actividad de agua fluctuó entre 0.9627 a 0.9671. En tanto, la concentración de sólidos diluidos en calidad de sacarosa que se encontró en la baya varió de 17.21 a 23.35 °Brix, valor característico de este tipo de producto de uva-pasa en su estado maduro. En variedades de uvas moscatel de Alejandría se reportan valores similares de 22.4; 22; 21.4 °Brix y de 3.63; 3.20; 3.44 para pH, en frutos considerados maduros y aptos para obtener pasas o vinos (Corona y cols., 2020; Harutyunyan y cols., 2022; Pedrosa-López y cols., 2022).

Tabla 3. Variables fisicoquímicas de la uva variedad moscatel de Alejandría (*Vitis vinifera*)

Variable fisicoquímica	Valor medio ± desviación estándar
Potencial de hidrógeno (pH)	3.63 ± 0.37
Grados Brix (°Bx)	20.28 ± 0.36
Índice de refracción (–)	1.364 ± 0.005
Contenido de agua (%)	80.00 ± 0.76
Actividad de agua (a_w)	0.9649 ± 0.0022

3.2 Influencia de las variables independientes en el tiempo de secado al sol y solar indirecto

La Figura 2 (a y b) muestra el diagrama de Pareto para el análisis del efecto de las variables independientes: T (°C), C (%) y t (s), combinadas sobre la variable respuesta del tiempo de secado, utilizando el secado al sol y el secador solar indirecto para la obtención de uva-pasa Moscatel de Alejandría (Tabla 4). Se observa la fuerte influen-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

cia de la temperatura de la solución (°C), el tiempo de inmersión (s) y la concentración (%). La interacción lineal de la concentración con el tiempo de inmersión no es influyente en ambos procesos; la concentración no es influyente para el secado al sol. No obstante, en el secado solar indirecto, las interacciones entre temperatura-concentración y temperatura-tiempo de inmersión se incluyeron en el modelo de regresión. Aunque no mostraron una influencia significativa sobre la variable respuesta, su integración permite mantener una mayor precisión en la modelización de la superficie.

3.3 Influencia de las variables independientes en la aceptación global de la uva-pasa: secado al sol y solar indirecto

La Tabla 4 presenta los valores de aceptación global. Por otro lado, los efectos estimados de las variables independientes sobre la aceptación global de la uva de la variedad Moscatel de Alejandría se presentan en las Figuras 2 (a, b) y 3 (a, b).

Se observa que las tres variables: temperatura, concentración y tiempo de inmersión en sus formas lineales y cuadráticas tienen efectos en las variables dependientes del tiempo de secado y aceptación global, a excepción de la concentración en su función cuadrática (Q) en el secado al sol; asimismo, la interacción lineal de la temperatura y concentración (1L × 2L) y temperatura y tiempo de inmersión (1L × 3L), en la evaluación de tiempo de secado y la aceptación global se considera menos importante en el secado indirecto solar. Sin embargo, para que el modelo matemático no perdiera precisión en el coeficiente de determinación (R^2), se tuvieron en cuenta todas las interacciones para la obtención de los coeficientes de regresión de la superficie de respuesta.

Tabla 4. Diseño compuesto central rotacional con los valores codificados y reales y las variables de respuesta.

Tratamiento	Variables codificadas			Variables reales			Secado al sol		Secado solar indirecto	
	x_1	x_2	x_3	T (°C)	C (%)	t (s)	Tiempo de secado (h)	Aceptación global	Tiempo de secado (h)	Aceptación global
1	-1	-1	-1	63	1	7.7	112	6	110	3
2	1	-1	-1	87	1	7.7	90	7	64	6
3	-1	1	-1	63	2.5	7.7	122,5	6.5	72	8
4	1	1	-1	87	2.5	7.7	63	7	60	9
5	-1	-1	1	63	1	24.3	66.5	7	64	3
6	1	-1	1	87	1	24.3	72	8	51	6
7	-1	1	1	63	2.5	24.3	149	6	92	5
8	1	1	1	87	2.5	24.3	82.5	7	60	8
9	-1.68	0	0	55	1.75	16	142.5	6	112	6
10	1.68	0	0	95	1.75	16	79.5	7	45	7
11	0	-1.68	0	75	0.5	16	84.5	8	80	4
12	0	1.68	0	75	3	16	81.5	6	75	7
13	0	0	-1.68	75	1.75	2	171	6.5	107	4
14	0	0	1.68	75	1.75	30	82.5	9	60	8
15	0	0	0	75	1.75	16	77.5	8.5	68	9
16	0	0	0	75	1.75	16	73	8	65	8
17	0	0	0	75	1.75	16	75	8.5	58	9
18	0	0	0	75	1.75	16	79.5	8	64	9
19	0	0	0	75	1.75	16	74	8.5	68	8
20	0	0	0	75	1.75	16	76	8	63	8

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

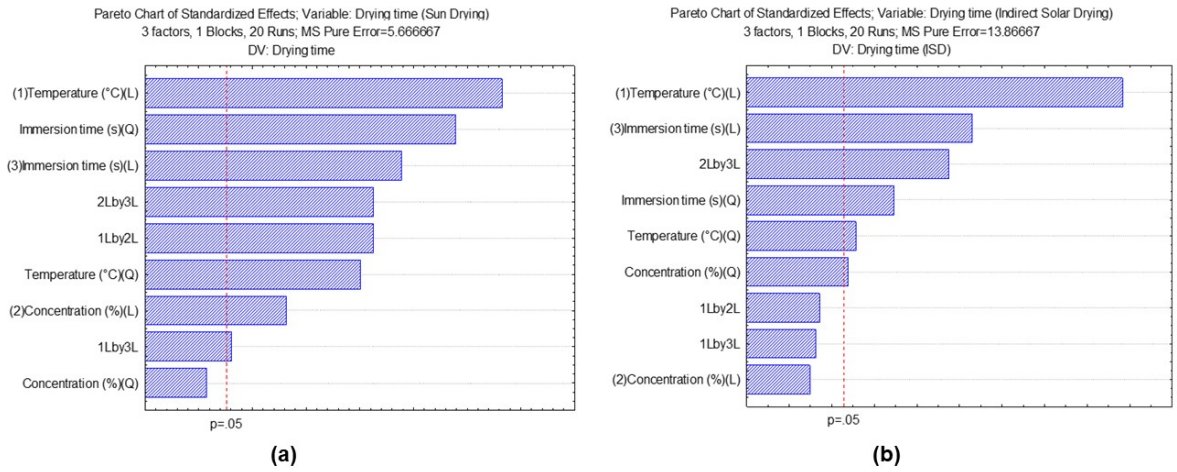


Figura 2. Efecto de las variables independientes sobre el tiempo de secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría (a) secado al sol (b) secado solar indirecto.

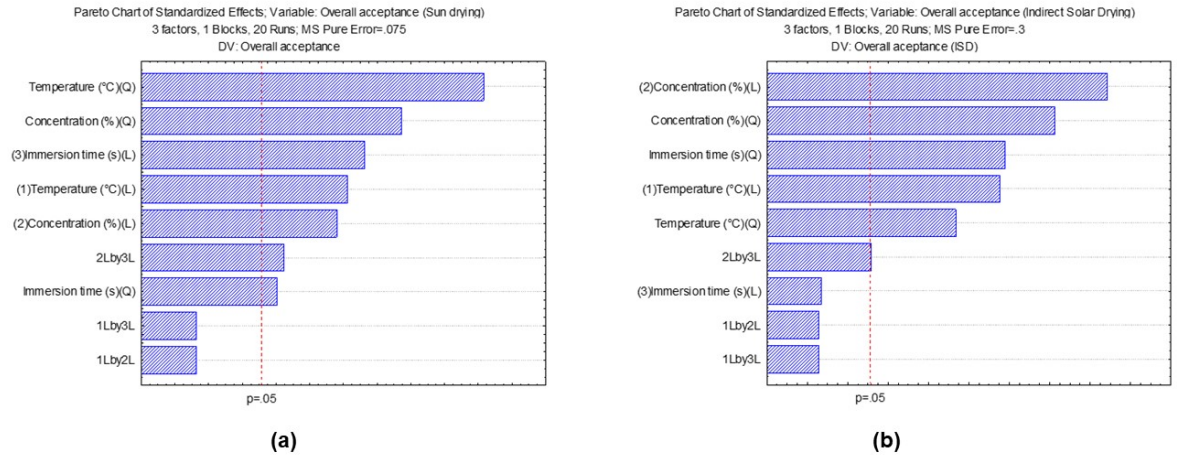


Figura 3. Efecto de las variables independientes sobre la aceptación global de la uva-pasa variedad Moscatel de Alejandría (a) secado al sol (b) secado solar indirecto.

3.4 Análisis de varianza en la estimación del tiempo de secado y aceptación global del producto en el secado al sol y solar indirecto

Al analizar la significancia de las constantes en las ecuaciones de regresión (Tabla 5), se observó que el valor F calculado (F_c) superó al valor crítico de la tabla $F_{0.95;9;10} = 3.02$ para un nivel de confianza del 95%. Dado que en todos los casos $F_c > F_t$, tanto para la predicción del tiempo de secado como para la aceptación global de la uva-pasa, se concluye que los modelos de regresión son estadísticamente significativos. Las constantes de regresión para estimar el tiempo de secado y la aceptación global de la uva-pasa se presentan en las Tablas 6 y 7, respectivamente, tanto para el secado al sol como para el indirecto.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 5. Análisis de varianza principal para el tiempo de secado y aceptación global de la uva variedad Moscatel de Alejandría en el secado al sol y secado solar indirecto.

		Tiempo de secado					Aceptación global				
Proceso		SS	GL	MQ	F_c	F_t	SS	GL	MQ	F_c	F_t
Secado al sol	Regresión	14 250.11	9	1 583.34	5.10	3.02	15.99	9	1.776	8.27	3.20
	Error residual	3 105.59	10	310.56			2.15	10	0.215		
	Falta de ajuste	3 077.26	5	615.45	108.62		1.77	5	0.335	4.73	
	Error puro	28.33	5	5.67			0.38	5	0.075		
Secado solar indirecto	Regresión	5 755.14	9	639.46	5.62	3.02	62.06	9	6.896	4.40	3.02
	Error residual	1 138.66	10	113.87			15.69	10	1.569		
	Falta de ajuste	1 069.32	5	213.87	15.42		14.19	5	2.838	9.46	
	Error puro	69.33	5	13.87			1.50	5	0.30		

Nota: SS: suma cuadrática; GL: grados de libertad; MQ: media cuadrática; F_c y F_t: valor F calculado y de tabla respectivamente.

Tabla 6. Efectos estimados y coeficientes de regresión de las variables independientes sobre la variable de respuesta del tiempo de secado al sol y aceptación global de la uva-pasa de la variedad Moscatel de Alejandría.

	Tiempo de secado (h) ($R^2 = 0.82062$)				**Aceptación global** ($R^2 = 0.88033$)			
Parámetro codificado	Efecto estimado	Valor P	Coeficiente de regresión	Valor P	Efecto estimado	Valor P	Coeficiente de regresión	Valor P
k_0	76.3072	0.000000	76.3072	0.000000	8.256595	0.000000	8.256595	0.000000
x_1	-36.4007	0.000001	-18.2003	0.000001	0.75926	0.003705	0.379632	0.003705
x_2	18.9122	0.000023	9.4561	0.000023	-1.32369	0.000260	-0.661845	0.000260
x_3	10.4743	0.000458	5.2372	0.000458	-0.71236	0.004866	-0.356180	0.004866
x_1^2	-0.9291	0.492746	-0.4646	0.492746	-0.96938	0.001115	-0.484690	0.001115
x_2^2	-24.3580	0.000008	-12.1790	0.000008	0.83548	0.002441	0.417742	0.002441
x_3^2	30.0729	0.000002	15.0346	0.000002	-0.43729	0.029070	-0.218959	0.029070
$x_1 \cdot x_2$	-27.3750	0.000016	-13.6875	0.000016	-0.12500	0.547054	-0.0625000	0.547054
$x_1 \cdot x_3$	5.1250	0.028597	2.5625	0.028597	0.12500	0.547054	0.0625000	0.547054
$x_2 \cdot x_3$	27.3750	0.000016	13.6875	0.000016	-0.62500	0.023271	-0.3125000	0.023271

Nota: $x_1 = \frac{T-75}{12}$; $x_2 = \frac{C-1.75}{0.75}$ y $x_3 = \frac{t-16}{8.30}$, donde: T: temperatura, C: concentración y t: tiempo de inmersión.

3.5 Superficie de respuesta en la estimación del tiempo de secado y aceptación global del producto en el secado al sol

En el proceso de secado, la capa cerosa de la piel de la uva dificulta la eliminación del agua *in situ* y alarga el tiempo de secado. Por este motivo, se han propuesto pretratamientos químicos que provocan la disolución de esta capa, junto con la formación de microfisuras en su superficie, controlando así la tasa de pérdida de agua y reduciendo el tiempo necesario para obtener el nivel correcto de deshidratación (Corona y cols., 2020; Patidar y cols., 2021).

En la Figura 4 se presenta la superficie de respuesta del tiempo de secado (h) (a) y de contorno (b) versus la temperatura (°C) y el tiempo de inmersión. Para tiempos de inmersión en el rango de 16 a 20 segundos, temperaturas de la solución en el rango de 80 a 90 °C y concentraciones de la solución de 1 a 1.5%, se alcanzan tiempos de secado menores a

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

80 h, que equivalen a menos de 11 días de secado directamente al sol; esto reduce el tiempo de proceso en comparación con lo realizado por Corona y cols. (2020), quienes aplicaron un pretratamiento químico a las bayas de uva Moscatel de Alejandría, sumergiéndolas en una solución de hidróxido de sodio (45 g/L) por 185 s y a una temperatura de 25 °C, alcanzando un tiempo de secado de 13 días bajo estas condiciones. Esto se debe al fenómeno de la deshidratación, que se explica por la transferencia de masa, influida por el contenido de agua y azúcar, así como por la homogeneidad de las bayas que se van a secar en términos de tamaño, peso y densidad.

La velocidad de secado de las uvas-pasa es directamente proporcional a la temperatura de deshidratación: a mayor temperatura, aumenta la tasa de transferencia de la masa y se reduce el tiempo de proceso. Por ejemplo, en el cultivar 'Zicui', la deshidratación más eficiente ocurrió a 50 °C; en contraste, el tiempo necesario para completar el proceso se extendió a 11 días a 40 °C y hasta 20 días cuando se trabajó a 30 °C (Chen y cols., 2022).

La Figura 5 muestra la superficie de respuesta (a) y el contorno (b) de la aceptación global frente a la temperatura (°C) y la concentración de la solución (%), manteniendo constante el valor de 16 segundos del tiempo de inmersión.

Tabla 7. Efectos estimados y coeficientes de regresión de las variables independientes sobre la variable de respuesta del tiempo de secado solar indirecto y aceptación global de la uva-pasa variedad Moscatel de Alejandría.

	Tiempo de secado (h) ($R^2 = 0.82062$)				**Aceptación global** ($R^2 = 0.88033$)			
Parámetro codificado	Efecto estimado	Valor P	Coeficiente de regresión	Valor P	Efecto estimado	Valor P	Coeficiente de regresión	Valor P
k_0	64.6401	0.000000	64.6401	0.000000	8.49475	0.000000	8.49475	0.000000
x_1	-31.5959	0.000019	-15.7980	0.000019	1.71201	0.002192	0.85600	0.002192
x_2	6.1494	0.025972	3.0747	0.025972	-1.35061	0.005468	-0.67530	0.005468
x_3	-1.9641	0.374713	-0.9821	0.374713	2.49765	0.000387	1.24883	0.000387
x_1^2	5.4407	0.039418	2.7204	0.039418	-2.05923	0.000845	-1.02961	0.000845
x_2^2	-17.2901	0.000355	-8.6451	0.000355	0.39869	0.236591	0.19934	0.236591
x_3^2	9.6924	0.004350	4.8462	0.004350	-1.70492	0.001992	-0.85246	0.001992
$x_1 \cdot x_2$	3.7500	0.213701	1.8750	0.213701	-0.50000	0.253170	-0.25000	0.253170
$x_1 \cdot x_3$	3.2500	0.271944	1.6250	0.271944	0.50000	0.253170	0.25000	0.253170
$x_2 \cdot x_3$	19.7500	0.000666	9.8750	0.000666	-1.00000	0.049313	-0.50000	0.049313

Nota: $x_1 = \frac{T-75}{12}$; $x_2 = \frac{C-1.75}{0.75}$ y $x_3 = \frac{t-16}{8.30}$, donde: T: temperatura, C: concentración y t: tiempo de inmersión.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

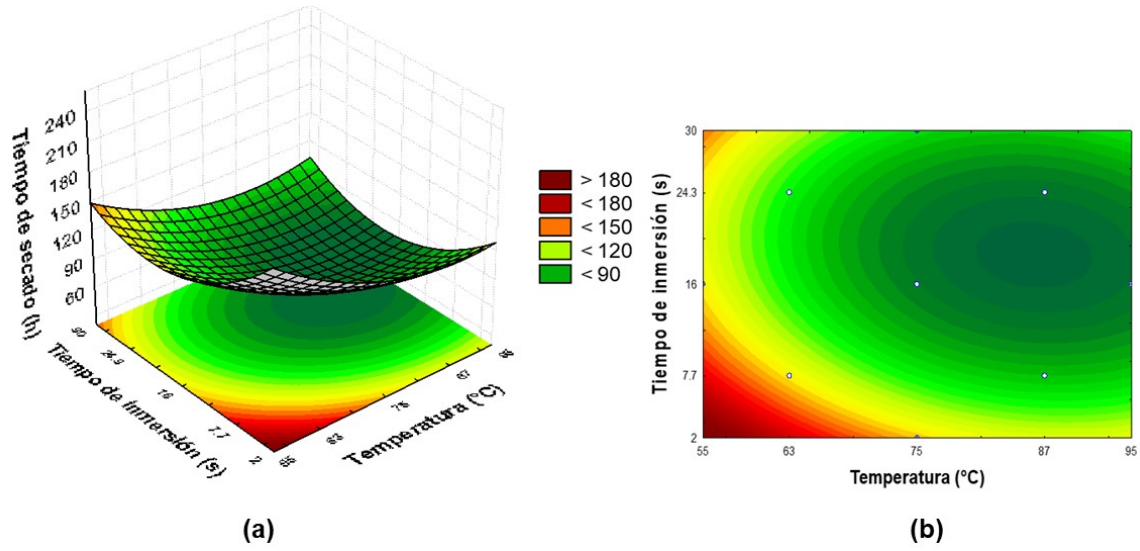


Figura 4. Superficie de respuesta del tiempo de secado (h) (a) y de contorno (b) de la uva variedad Moscatel de Alejandría versus temperatura (°C) y tiempo de inmersión (s).

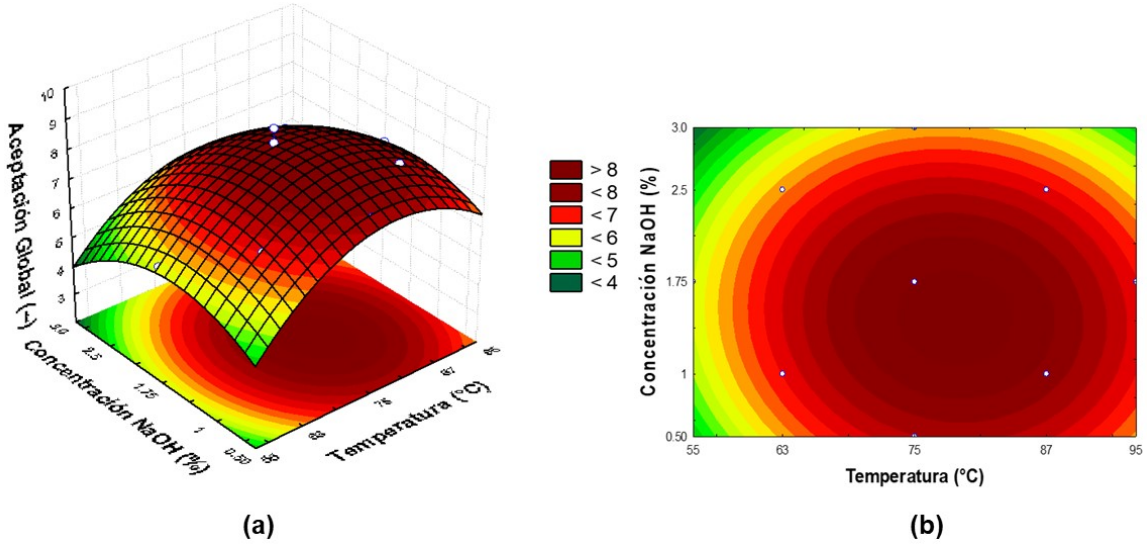


Figura 5. Superficie de respuesta (a) y de contorno (b) de la aceptación global de uva-pasa variedad Moscatel de Alejandría versus temperatura (°C) y concentración de la solución (%).

A medida que aumentan los valores de las variables independientes, generan una curva con un punto de inflexión máximo para la aceptación global (> 8) de la pasa a una humedad del 20% en base húmeda. Se observa que los valores más altos de la aceptación global se encuentran en el rango de temperatura de 80–85 °C de la solución de NaOH en concentraciones entre 1 y 1.5%. Se recomienda utilizar valores bajos de concentración de la solución, para que pueda ser fácilmente eliminada con abundante agua fría después del tratamiento químico-térmico. Según Patidar y cols. (2021), a lo largo de la deshidratación se producen muchos cambios deseables en las propiedades físicas, químicas y bioquímicas debido a las condiciones de pretratamiento y secado. Así, los carbohidratos y compuestos orgánicos de las uvas frescas se retienen en forma concentrada en las pasas, mejorando

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

su aceptabilidad para los consumidores. Por otra parte, el NaOH no solo mejora las características de secado, sino que también mejora los atributos de color de las pasas (Vázquez y cols., 2000).

Además de producir pasas de buena calidad, desafortunadamente existen algunas preocupaciones ambientales y de salud relacionadas con el uso de productos químicos para el pretratamiento de las uvas. En el tema ambiental se generan aguas residuales que contienen sólidos orgánicos, salinos y altamente corrosivos, y en el caso alimentario, estos químicos quedan en el producto seco, lo que puede causar problemas de seguridad alimentaria (Adiletta y cols., 2016; Deng y cols., 2019; Wang y cols., 2017).

La baja concentración de NaOH (1–1.5%) utilizada en esta investigación permite acelerar el proceso de secado y, al mismo tiempo, reduce la probabilidad de producir pasas con un impacto medioambiental negativo y alimentos inseguros, ya que estos dos factores se intensifican a mayores concentraciones de NaOH.

Sobre lo analizado, se presentan en la Tabla 8 las variables independientes o parámetros de procesamiento del secado directo al sol para minimizar y maximizar el tiempo de secado y la aceptación global del producto, respectivamente.

Tabla 8. Parámetros de procesamiento de secado directamente al sol de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

Variable independiente	Parámetros de proceso	Tiempo de secado (h)	Aceptación global (–)
Temperatura (°C)	80–85	Aproximadamente ≤ 80 h	Aproximadamente > 8
Concentración (%)	1–1.5		
Tiempo de inmersión (s)	16–20		

3.6 Superficie de respuesta en la estimación del tiempo de secado y aceptación global del producto en el secado solar indirecto

La Figura 6 muestra la superficie de respuesta (a) y de contorno (b) del tiempo de secado de la uva Moscatel de Alejandría frente a la temperatura (°C) y el tiempo de inmersión (s). Se afirma que, para tiempos de inmersión de 16 a 20 segundos, una temperatura de la solución de 80 a 90 °C, y una concentración de la solución de 1 a 2%, utilizando el secador solar indirecto, se consiguen tiempos de secado inferiores a 60 h, equivalentes a menos de 6 a 7 días de secado.

El menor tiempo de secado se obtuvo con el secado solar indirecto en comparación con el secado al sol; esto se debe a que el primero dispone de un colector solar formado por una superficie de vidrio transparente y un absorbedor negro, donde se recoge la energía solar que calienta el aire fresco que entra en la cámara de secado, donde las uvas se calientan por absorción indirecta de calor. Además, debido a la diferencia de presión generada por la chimenea, se consigue una circulación natural del aire, lo que acelera el proceso de evaporación de la humedad presente en las uvas (EL-Mesery y cols., 2022).

Otro factor para considerar es que el secado solar indirecto fue realizado con una radiación solar media de 300 W/m^2. Leon Dharmadurai y cols. (2022), usando reflectores, alcanzaron una radiación solar máxima de 1079.8 W/m^2 y un tiempo de secado de 5 días para uvas verdes sin semilla y concluyeron que la reducción del tiempo de secado está influenciada positivamente por el método de secado solar indirecto y la convección natural del aire caliente dentro de la cámara de secado.

En la Figura 7 se presenta la superficie de respuesta (a) y de contorno (b) del grado de aceptación global de uva-pasa variedad Moscatel de Alejandría versus temperatura (°C) y tiempo de inmersión (s).

Se logra obtener valores de aceptabilidad global del producto mayores a 8, siempre que se mantenga la concentración de solución al 1% y se trabaje con temperaturas entre 75–90 °C y tiempos de inmersión de 16–25 segundos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

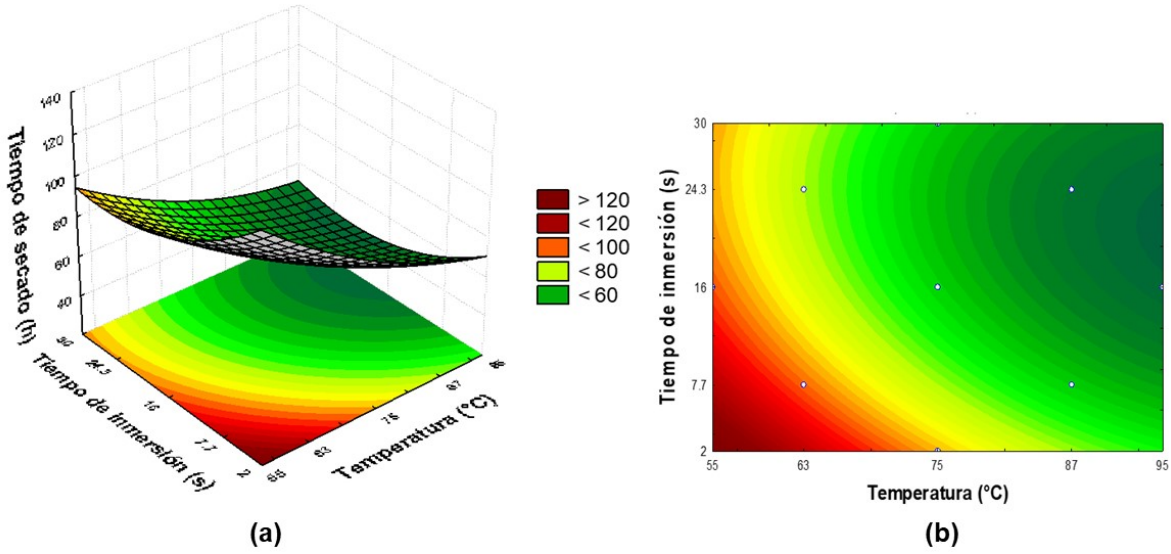


Figura 6. Superficie de respuesta del tiempo de secado (h) (a) y de contorno (b) versus temperatura (°C) y tiempo de inmersión (s) usando secador solar indirecto para el secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

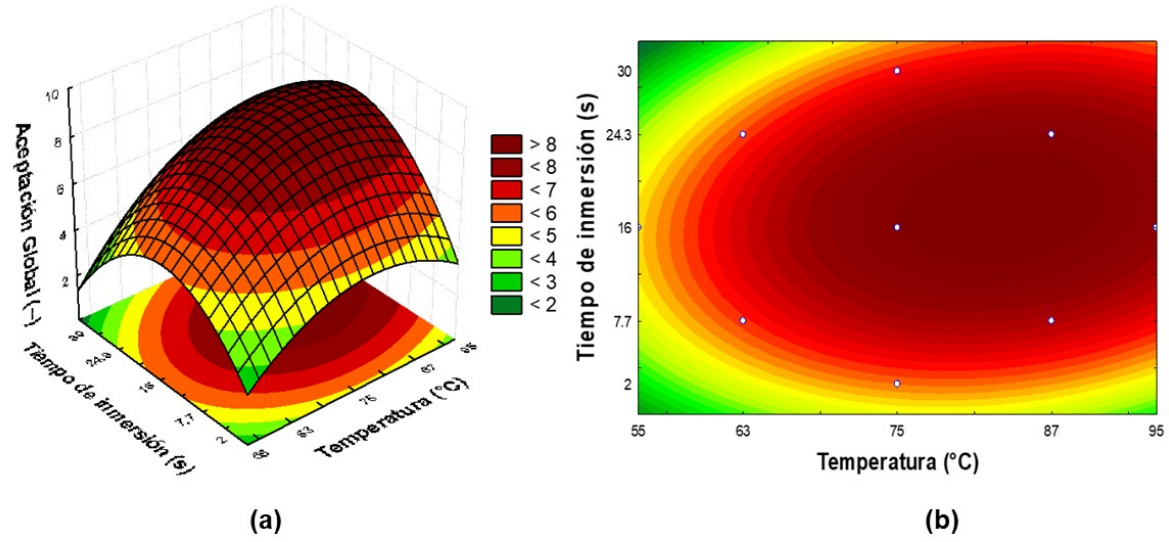


Figura 7. Superficie de respuesta de la aceptación global (a) y de contorno (b) de la uva-pasa variedad Moscatel de Alejandría versus temperatura (°C) y tiempo de inmersión (s) para el secado usando secador solar indirecto.

Las curvas muestran una inflexión, dando un valor máximo del grado de aceptación de la uva-pasa para concentraciones del 1 y 1.5%, respectivamente, correspondiendo los valores más altos del grado de aceptación a aproximadamente 16 segundos. Los parámetros del proceso de secado solar indirecto se presentan en la Tabla 9.

A diferencia del secado al sol, el proceso de secado solar indirecto permite reducir en 20 horas el tiempo de secado, obteniéndose pasas con una elevada aceptación global. Asimismo, las condiciones óptimas se encuentran cerca de los puntos centrales de la planificación experimental, donde los valores de aceptación global fueron los más elevados. Por tanto, para el análisis de la curva y cinética de secado, los datos experimentales encontrados fueron: $T = 80$ °C, $C = 1.5\%$ y $t = 16$ s.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 9. Parámetros de procesamiento de secado solar indirecto de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

Variable independiente	Parámetros de proceso	Tiempo de secado (h)	Aceptación global (–)
Temperatura (°C)	80–85	Aproximadamente ≤ 60 h	Aproximadamente > 8
Concentración (%)	1–2.5		
Tiempo de inmersión (s)	16–20		

En las Figuras 8 (a y b) se presentan las simulaciones, usando las ecuaciones de regresión para el tiempo de secado de las uvas al sol (Tabla 6) y la aceptación global del producto en el proceso de secado solar indirecto (Tabla 7), mostrando las curvaturas de los valores mínimo y máximo, respectivamente.

3.7 Curva y cinética de secado

3.7.1 Curva de secado

La Figura 9 muestra el comportamiento de la evolución del contenido de humedad en base seca en función del tiempo de secado, tanto para el secado de la variedad de uva Moscatel de Alejandría al sol como utilizando el secador solar indirecto. En la curva de secado directo al sol, el contenido de humedad de la uva disminuye gradualmente hasta alcanzar el contenido de humedad final del 20% en base húmeda, lo que supone aproximadamente 0.25 kg/kg en base seca, con un tiempo medio de secado de 75 horas. Mientras que las uvas secadas en el secador solar indirecto mostraron dos fases de secado: la primera fase pronunciada después de 24 h de secado, para luego descender gradualmente hasta el contenido de humedad final indicado, con un tiempo medio de 50 h.

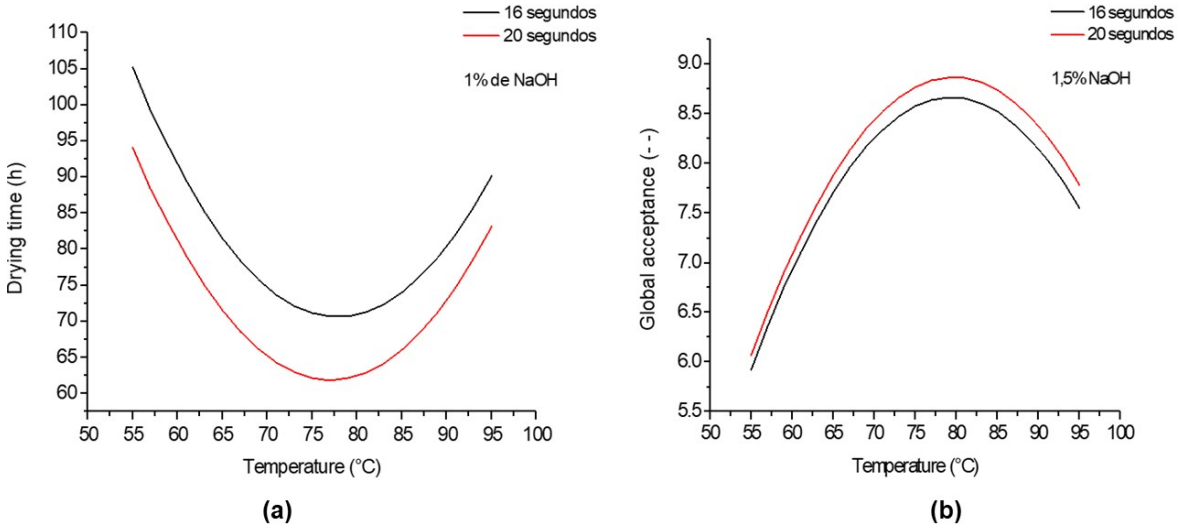


Figura 8. (a) Simulación del tiempo de secado de la uva versus la temperatura en el secado al sol (b) Simulación de la aceptación global de la uva-pasa versus la temperatura en el secado solar indirecto.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

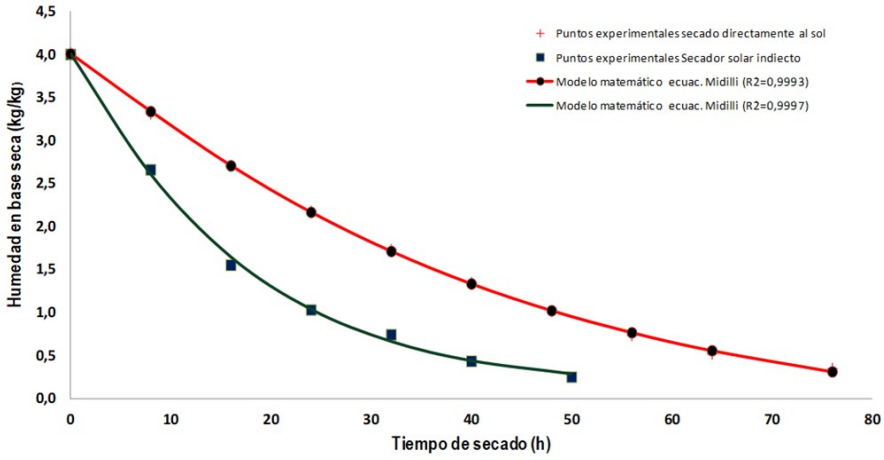


Figura 9. Evolución del contenido de humedad versus el tiempo de secado y modelamiento matemático de la curva de secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

Generalmente, durante el proceso de secado hay tres fases consecutivas: la fase inicial, donde la tasa de secado aumenta debido a la temperatura ganada por el producto y el consecuente aumento de la presión de vapor; una segunda fase, donde la tasa de secado es constante; y una fase final, que presenta una tasa de secado muy disminuida (Barbosa de Lima y cols., 2016). Estas fases se evidenciaron en el secado de uvas Moscatel de Alejandría pretratadas con solución de NaOH (80 g/L) a una temperatura de 25 °C, durante un tiempo de inmersión de 360 s; donde el secado convectivo se realizó a una temperatura de 30 °C durante 13 días (Corona y cols., 2016).

La primera fase de la curva, presentada por el secado solar indirecto, responde a cambios microestructurales en la capa de cera epicuticular que recubre la cutícula de la uva, provocados por el pretratamiento con NaOH; dentro de estos cambios se destaca la formación de grietas en la piel y el ablandamiento general del tejido, mejorando la permeabilidad de la piel y la difusión de la humedad (Lara y cols., 2014). En la fase dos se experimenta por el cierre progresivo de las grietas a medida que la uva se encoge y el azúcar de la pulpa migra hacia la piel, donde actúa como barrera a la difusión del agua, pudiendo superar este efecto retardante con el aumento de la temperatura de secado por encima de 40 °C (Azzouz y cols., 2002; Giordano y cols., 2009; Toğrul, 2010). En tanto, la curva mostrada para secado al sol presenta un comportamiento casi lineal, influenciado solo por el tipo de proceso. Por lo que, el secador solar y el tratamiento químico-térmico del proyecto de investigación permitió reducir el tiempo de secado tradicional en un 33 %, en cambio Serratosa y cols. (2008) lograron una reducción del 25 %, durante el secado en cámara a 50 °C de uvas Pedro Ximénez pretratadas en medio alcalino.

En la misma figura se presenta el ajuste de los datos experimentales de la humedad versus el tiempo de secado, usando la ecuación de Midilli y cols. (2002) para la modelación de la curva de secado. Para la elección del modelo se consideraron los valores de los coeficientes de determinación (R^2) y el valor de los errores: suma de los errores cuadráticos (SSE) que fue usada como celda para el uso del Solver, la raíz media de los errores cuadráticos (RMSE), el error porcentual medio relativo (EMR) y el valor de Chi-cuadrado reducido (χ^2) (Mehta, 2023).

Podemos afirmar que el modelo de Midilli y cols. (2002) es el que mejor simula la distribución de los datos experimentales de la curva de secado de la variedad de uva Moscatel de Alejandría, porque presentaron los valores más altos del coeficiente de determinación y los valores más bajos de los errores relativos calculados. Los resultados se presentan en las Tablas 10 y 11.

Martín-Gómez y cols. (2019) modelizaron el secado de uvas enteras de la variedad Tempranillo en cámara a 50 °C con una humedad relativa del

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

20 %. Para ello, evaluaron los modelos de Newton, Henderson-Pabis, logarítmico, Wang y Singh, aproximación por difusión y Midilli y cols. (2002) siendo este último el modelo seleccionado con base en los valores de R^2, SSE, RMSE, EMR (%) y χ^2.

El modelo matemático propuesto por Midilli y cols. (2002) es un modelo adecuado para representar el comportamiento de secado de uvas y tomates (Doymaz, 2004; Midilli y cols., 2002; Yaldiz y cols., 2001).

Tabla 10. Parámetros de ajuste de los modelos matemáticos para la curva de secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría – secado al sol.

Modelos	**Parámetros**		R^2	**SSE**	**RMSE**	**EMR (%)**	χ^2
Henderson y Pabis	*a*	1.0291	0.99366	0.0091	0.0952	4.168	0.0113
	k	0.0290					
Henderson-Pabis Modificado	*a*	0.3716	0.99367	0.0091	0.0952	4.803	0.0226
	k	0.0290					
	b	0.2859					
	g	0.0290					
	c	0.3716					
	h	0.0290					
Page	*k*	0.0154	0.99890	0.0016	0.0398	1.212	0.00198
	n	1.1671					
Page Modificado	*k*	0.0218	0.99190	0.0112	0.1060	6.503	0.01404
	n	1.2897					
Newton	*k*	0.0281	0.99190	0.0112	0.1060	7.219	0.01248
	a	0.9972					
Midilli *et al.*	*k*	0.0182	0.99928	0.0006	0.0242	0.096	0.00098
	n	1.0938					
	b	-0.00068					

3.7.2 Cinética de secado

Al graficar la velocidad de secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría versus la humedad absoluta media y el tiempo de secado, tal como se presenta en la Figura 10 (a y b), respectivamente, se observa que los valores más altos de la cinética de secado corresponden a las primeras 10 h de secado de 0.18 y 0.08 kg/(kg · h), que corresponden a las pendientes de dR/dt de 0.250 y 0.253 para el secado al sol y el secado solar indirecto, respectivamente. Observándose solo el periodo de velocidad de secado decreciente con ajuste lineal en ambos procesos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 11. Parámetros de ajuste de los modelos matemáticos para la curva de secado de la uva variedad Moscatel de Alejandría usando secador solar indirecto.

Modelos	Parámetros		R^2	SSE	RMSE	EMR (%)	χ^2
Henderson y Pabis	a	1.0060	0.99797	0.0032	0.0567	0.048	0.00451
	k	0.0564					
Henderson-Pabis Modificado	a	0.0765	0.99796	0.0032	0.0568	0.352	0.02259
	k	0.0646					
	b	0.8537					
	g	0.0552					
	c	0.0765					
	h	0.0646					
Page	k	0.0519	0.99806	0.0031	0.0556	1.193	0.00433
	n	1.0256					
Page Modificado	k	0.2369	0.99792	0.0033	0.0576	0.265	0.00464
	n	0.2369					
Newton	k	0.0561	0.99792	0.0033	0.0576	0.455	0.00387
	a	1.0023					
Midilli *et al.*	k	0.0841	0.99973	0.0028	0.0529	0.393	0.00652
	n	1.0626					
	b	0.00038					

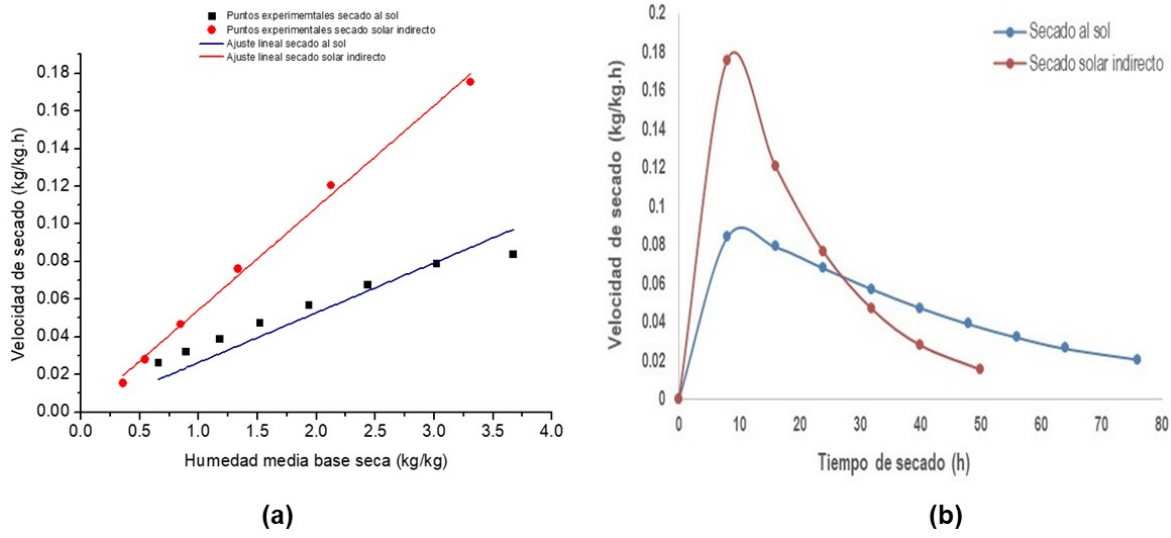


Figura 10. (a) Velocidad de secado versus la humedad media en el secado al sol y solar indirecto; (b) Velocidad de secado versus el tiempo de secado en el secado al sol y el secado solar indirecto de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

3.7.3 Valor de la difusividad efectiva del agua

Haciendo uso de la Ecuación 8 se determinaron las pendientes del ln(MR) versus el tiempo, para la determinación de la difusividad efectiva del agua (m^2/s). Para el cálculo de la difusividad se utilizó el valor medio del radio de la uva de 0.009693 m. Sien-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

do los valores de la difusividad efectiva del agua de la uva de la variedad Moscatel de Alejandría de 8.57×10^{-11} y 1.90×10^{-10} m^2/s para el secado al sol y el secado solar indirecto, respectivamente. Los valores calculados de difusividad efectiva se encuentran en el rango deseado para el secado de materiales alimentarios de 10^{-12} a 10^{-8} m^2/s (Zhao y cols., 2019). Se observó que la difusividad del agua de la uva era 2.2 veces mayor en el secador solar indirecto que en el secado directo al sol. En general, las uvas pretratadas presentan una mayor difusividad del agua; en el caso de uvas enteras punzonadas y secadas a 50 °C se presentó un valor de difusividad efectiva de 7.31×10^{-11} m^2/s, y en uvas enteras sin pretratar y secadas a la misma temperatura, su difusividad alcanzó 3.22×10^{-11} m^2/s (Martín-Gómez y cols., 2019).

Sin embargo, los valores del coeficiente de determinación calculados fueron de 0.6933 y 0.7647 para el modelo difusional del secado al sol y solar indirecto, tal como se observa en la Figura 11 a y b, evidenciándose una desventaja en el ajuste a los datos experimentales, típico en los productos agroindustriales por efecto del encogimiento y los planos de humedades transitorias que ocurren en el interior del producto durante el secado (Doymaz, 2007).

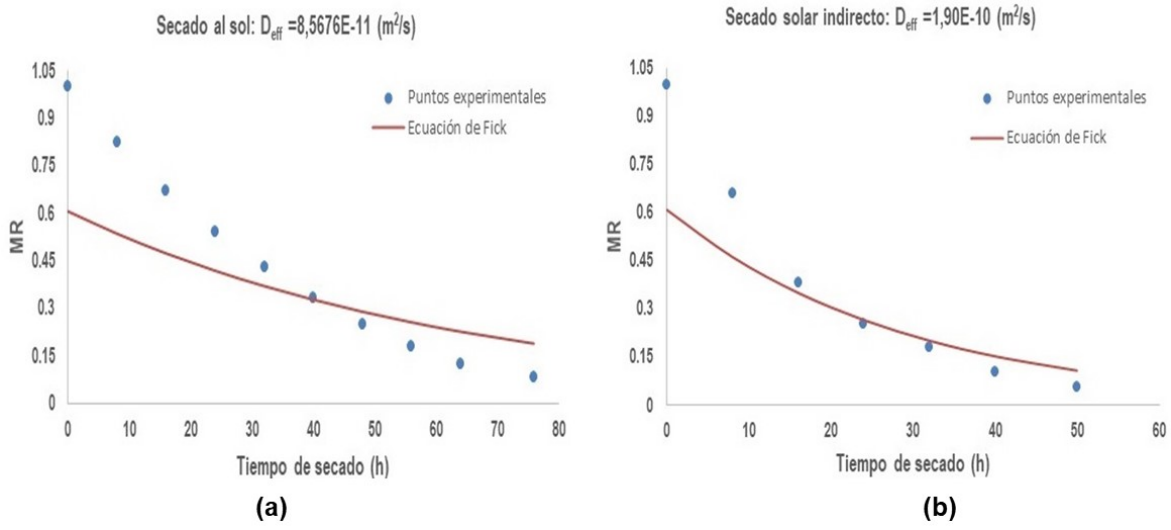


Figura 11. (a) Modelamiento matemático difusional de la curva de secado al sol y (b) solar indirecto de la uva variedad Moscatel de Alejandría.

4 Conclusiones

Se estudió el secado de la variedad de uva Moscatel de Alejandría (*Vitis vinifera*) mediante dos procesos: secado al sol y secado solar indirecto utilizando un secadero con colector solar de superficie extendida. Previo al secado, se realizó un pretratamiento alcalino en el rango de temperaturas de 55–95 °C, concentración de NaOH de 0.50–3.0 % y tiempos de inmersión de 2–30 s.

Se optimizaron el secado al sol y el secado solar indirecto, considerando condiciones de pretratamiento de 80 °C, 1.75 % y 16 s para obtener tiempos aproximados de secado de 75 h y 50 h, respectivamente, con un alto grado de aceptación global del producto y una puntuación superior a 8 puntos para la escala hedónica establecida para ambos procesos. En condiciones óptimas de secado, el modelo matemático de Midilli y cols. (2002) resultó ser el modelo matemático que mejor simuló la curva de secado de la uva, ya que presenta los valores más altos del coeficiente de determinación y los valores más bajos de los errores relativos calculados. Se determinaron valores de difusividad efectiva del agua de la uva de 8.57×10^{-11} y 1.90×10^{-10} m^2/s para el secado directamente al sol y utilizando un secador solar indirecto, respectivamente.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Agradecimientos

La investigación fue realizada gracias al apoyo del Laboratorio de Ingeniería de Procesos y Operaciones Unitarias (LIPOU-FIPA) perteneciente a la Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos de la Universidad Nacional del Callao, Lima, Perú.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Aplicación de un Modelo de superficie de respuesta en el secado al sol y solar indirecto de uvas variedad moscatel de alejandria (*Vitis vinífera*)», no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni sistemas automatizados de asistencia para la redacción, análisis, interpretación de datos, generación de contenido, traducción o edición del manuscrito.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

D.V.P.: Conceptualización, Procesamiento de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión. **H.R.N.:** Conceptualización, Procesamiento de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología. **R.S.J.:** Conceptualización, Procesamiento de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología. **D.C.R.:** Conceptualización, Procesamiento de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología.

Referencias

Adiletta, G., Russo, P., Senadeera, W., y Di Matteo, M. (2016). Drying characteristics and quality of grape under physical pretreatment. *Journal of Food Engineering*, *172*, 9–18. Online: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.031

Atak, A., Göksel, Z., Tunçkal, C., y Yılmaz, Y. (2022). Comparison of important quality characteristics of some fungal disease resistance/tolerance grapes dried with energy-saving heat pump dryer. *Agronomy*, *12*(4), 909. Online: https://doi.org/10.3390/agronomy12040909

Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W., y Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, *55*(4), 323–330. Online: https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00109-7

Barbosa de Lima, A. G., Delgado, J. M. P. Q., Neto, S. R. F., y Franco, C. M. R. (2016). Intermittent drying: Fundamentals, modeling and applications. En J. M. P. Q. Delgado y A. G. Barbosa de Lima (Eds.), *Drying and energy technologies* (pp. 19–41). Cham: Springer International Publishing. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_2

Bitaraf, M. S., Khodaiyan, F., Mohammadifar, M. A., y Mousavi, S. M. (2012). Application of response surface methodology to improve fermentation time and rheological properties of probiotic yogurt containing *Lactobacillus reuteri*. *Food and Bioprocess Technology*, *5*(4), 1394–1401. Online: https://doi.org/10.1007/s11947-010-0433-2

Bombana, V. B., Fischer, B., Oro, C. E. D., Rigo, D., Polina, C. C., Franco Denti, A., … others (2023). Drying kinetics of guabiju pulp (*Myrcianthes pungens*): Mass transfer parameters, mathematical modeling and evaluation of bioactive compounds. *Journal of Food Process Engineering*, *46*(1), e14205. Online: https://doi.org/10.1111/JFPE.14205

Castillo-Téllez, M., Pilatowsky-Figueroa, I., López-Vidaña, E. C., Sarracino-Martínez, O., y Hernández-Galvez, G. (2017). Dehydration of the red chilli (*Capsicum annuum L.*, costeño) using an indirect-type forced convection solar dryer. *Applied Thermal Engineering*, *114*, 1137–1144. Online: https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.08.114

Chen, K., Hu, Y., Chen, L., Zhang, J., Qiao, H., Li, W., … others (2022). Role of dehydration temperature on flavonoids composition and free-form volatile profile of raisins during the drying process. *Food Chemistry*, *374*, 131747. Online: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131747

Chopra, R., Rastogi, N. K., y Sambaiah, K. (2011). Enrichment of rice bran oil with α-linolenic acid

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

by enzymatic acidolysis: Optimization of parameters by response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, *4*(7), 1153–1163. Online: https://doi.org/10.1007/s11947-009-0191-1

Corona, O., Planeta, D., Bambina, P., Giacosa, S., Paissoni, M. A., Squadrito, M., … others (2020). Influence of different dehydration levels on volatile profiles, phenolic contents and skin hardness of alkaline pre-treated grapes cv muscat of alexandria (*Vitis vinifera L.*). *Foods*, *9*(5), 666. Online: https://doi.org/10.3390/foods9050666

Corona, O., Torchio, F., Giacosa, S., Río Segade, S., Planeta, D., Gerbi, V., … others (2016). Assessment of postharvest dehydration kinetics and skin mechanical properties of 'muscat of alexandria' grapes by response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, *9*(6), 1060–1069. Online: https://doi.org/10.1007/s11947-016-1697-y

Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). London, UK: Oxford University Press.

Deng, L.-Z., Mujumdar, A. S., Zhang, Q., Yang, X.-H., Wang, J., Zheng, Z.-A., … Xiao, H.-W. (2019). Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *59*(9), 1408–1432. Online: https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1409192

Di Matteo, M., Cinquanta, L., Galiero, G., y Crescitelli, S. (2000). Effect of a novel physical pretreatment process on the drying kinetics of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, *46*(2), 83–89. Online: https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00071-6

Djebli, A., Hanini, S., Badaoui, O., Haddad, B., y Benhamou, A. (2020). Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes. *Renewable Energy*, *145*, 1494–1506. Online: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.083

Doymaz, İ. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, *61*(3), 359–364. Online: https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00142-0

Doymaz, İ. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, *78*(4), 1291–1297. Online: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.047

EL-Mesery, H. S., EL-Seesy, A. I., Hu, Z., y Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *157*, 112070. Online: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070

FAO. (2020). *FaoStat database.* Online: http://www.fao.org/faostat/

Giordano, M., Rolle, L., Zeppa, G., y Gerbi, V. (2009). Chemical and volatile composition of three Italian sweet white Passito wines. *OENO One*, *43*(3), 159–170. Online: https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2009.43.3.796

Gopinath, G. R., Muthuvel, S., Muthukannan, M., Sudhakarapandian, R., Praveen Kumar, B., Santhan Kumar, C., y Thanikanti, S. B. (2022). Design, development, and performance testing of thermal energy storage based solar dryer system for seeded grapes. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *51*, 101923. Online: https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101923

Gunasekaran, N., Manoj Kumar, P., Raja, S., Sharavanan, S., Avinas, K., Aakash Kannan, P., y Gokul, S. (2021). Investigation on ETC solar water heater using twisted tape inserts. *Materials Today: Proceedings*, *47*, 5011–5016. Online: https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.04.586

Harutyunyan, M., Viana, R., Granja-Soares, J., Martins, M., Ribeiro, H., y Malfeito-Ferreira, M. (2022). Adaptation of ancient techniques to recreate 'wines' and 'beverages' using withered grapes of Muscat of Alexandria. *Fermentation*, *8*(2), 85. Online: https://doi.org/10.3390/fermentation8020085

Javed, H. U., Wang, D., Abdullah, Hasan, M., Zeng, L. Y., Lan, Y., … others (2023). Interrogating raisin associated unsaturated fatty acid derived volatile compounds using HS–SPME with GC–MS. *Foods*, *12*(3), 428. Online: https://doi.org/10.3390/foods12030428

Kumar, P. M., Arunthathi, S., Jeevan Prasanth, S., Aswin, T., Anish Antony, A., Daniel, D., … others (2021). Investigation on a desiccant based solar water recuperator for generating water from

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

atmospheric air. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 7881–7884. Online: https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.506

Kusuma, H. S., Nasution, R. A., y Permatasari, D. (2023). Drying process on kaffir lime leaves using microwave: Evaluation of the drying performance and energy analysis of different microwave powers and sizes of leaves. *Applied Food Research*, 100317. Online: https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100317

Lara, I., Belge, B., y Goulao, L. F. (2014). The fruit cuticle as a modulator of postharvest quality. *Postharvest Biology and Technology*, *87*, 103–112. Online: https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.012

Leon Dharmadurai, P., Vasanthaseelan, S., Bharathwaaj, R., Dharmaraj, V., Gnanasekaran, K., Balaji, D., y Sathyamurthy, R. (2022). A comparative study on solar dryer using external reflector for drying grapes. *Materials Today: Proceedings*, *50*, 552–559. Online: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.197

Martín-Gómez, J., Ángeles Varo, M., Mérida, J., y Serratosa, M. P. (2019). The influence of berry perforation on grape drying kinetics and total phenolic compounds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *99*(9), 4260–4266. Online: https://doi.org/10.1002/jsfa.9657

Mehta, P. (2023). Drying kinetics with proposed model study for grapes drying in solar dryer—a case study. En S. Bhattacharyya y H. Chattopadhyay (Eds.), *Fluid mechanics and fluid power (vol. 1)* (pp. 13–18). Singapore: Springer Nature Singapore.

Midilli, A., Kucuk, H., y Yapar, Z. (2002). A NEW MODEL FOR SINGLE-LAYER DRYING. *Drying Technology*, *20*(7), 1503–1513. Online: https://doi.org/10.1081/DRT-120005864

Myers, R. H., Montgomery, D. C., y Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons.

Naigam, A. P. V., Ridzuan, I. M. B., Tan, A. S. T., Abdullah, A., Wan Ismail, W. A. A. Z., y Janaun, J. (2021). Design, development and performance evaluation of a large-scale hybrid solar dryer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1070*(1), 012016. Online: https://doi.org/10.1088/1757-899X/1070/1/012016

Patidar, A., Vishwakarma, S., y Meena, D. (2021). Traditional and recent development of pretreatment and drying process of grapes during raisin production: A review of novel pretreatment and drying methods of grapes. *Food Frontiers*, *2*(1), 46–61. Online: https://doi.org/10.1002/fft2.64

Pedrosa-López, M. d. C., Aragón-García, F., Ruíz-Rodríguez, A., Piñeiro, Z., Durán-Guerrero, E., y Palma, M. (2022). Effects from the freezing of either whole or crushed grapes on the volatile compounds contents in Muscat wines. *Foods*, *11*(12), 1782. Online: https://doi.org/10.3390/foods11121782

Pragati, S., y Preeti, B. (2012). Technological revolution in drying of fruit and vegetables. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, *3*.

Ramos, I. N., Brandão, T. R. S., y Silva, C. L. M. (2015). Simulation of solar drying of grapes using an integrated heat and mass transfer model. *Renewable Energy*, *81*, 896–902. Online: https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.011

Rizvi, S. S. H. (1986). *Engineering properties of foods*. New York, NY: Marcel Dekker.

Saravacos, G. D., y Maroulis, Z. B. (2001). *Transport properties of foods*. New York: Marcel Dekker Inc.

Serratosa, M. P., Lopez-Toledano, A., Medina, M., y Merida, J. (2008). Drying of Pedro Ximenez grapes in chamber at controlled temperature and with dipping pretreatments. changes in the color fraction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*(22), 10739–10746. Online: https://doi.org/10.1021/jf8021767

Shalaby, S. M., y Bek, M. A. (2014). Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. *Energy Conversion and Management*, *83*, 1–8. Online: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.043

Singh, S. P., Jairaj, K. S., y Srikant, K. (2012). Universal drying rate constant of seedless grapes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(8), 6295–6302. Online: https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.011

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Srikiatden, J., y Roberts, J. S. (2006). Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering*, *74*(1), 143–152. Online: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.02.026

Srivastava, A., Anand, A., Shukla, A., Kumar, A., Buddhi, D., y Sharma, A. (2021). A comprehensive overview on solar grapes drying: Modeling, energy, environmental and economic analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *47*, 101513. Online: https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101513

Subbian, V., Murugavel, K. K., Raja, R. S., y Shanawaz, A. M. (2021). Experimental investigation and the performance evaluation of a mixed mode solar dryer for coconut. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 3662–3665. Online: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.157

Toğrul, İ. T. (2010). Modelling of heat and moisture transport during drying black grapes. *International Journal of Food Science & Technology*, *45*(6), 1146–1152. Online: https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2010.02246.X

Vázquez, G., Chenlo, F., Costoyas, R. M., y Costoyas, A. (2000). EFFECTS OF VARIOUS TREATMENTS ON THE DRYING KINETICS OF Muscatel GRAPES. *Drying Technology*, *18*(9), 2131–2144. Online: https://doi.org/10.1080/07373930008917830

Vigneshkumar, N., Venkatasudhahar, M., Manoj Kumar, P., Ramesh, A., Subbiah, R., Michael Joseph Stalin, P., … others (2021). Investigation on indirect solar dryer for drying sliced potatoes using phase change materials (PCM). *Materials Today: Proceedings*, *47*, 5233–5238. Online: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.562

Wang, J., Mu, W.-S., Fang, X.-M., Mujumdar, A. S., Yang, X.-H., Xue, L.-Y., … others (2017). Pulsed vacuum drying of Thompson seedless grape: Effects of berry ripeness on physicochemical properties and drying characteristic. *Food and Bioproducts Processing*, *106*, 117–126. Online: https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.09.003

Yaldiz, O., Ertekin, C., y Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, *26*(5), 457–465. Online: https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00018-4

Zhao, D., Wei, J., Hao, J., Han, X., Ding, S., Yang, L., y Zhang, Z. (2019). Effect of sodium carbonate solution pretreatment on drying kinetics, antioxidant capacity changes, and final quality of wolfberry (*Lycium barbarum*) during drying. *LWT*, *99*, 254–261. Online: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.066

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.