

Análisis de propiedades físicas en tres variedades de mango procesadas con secado solar indirecto y eléctrico

Analysis of physical properties in three mango varieties processed with indirect solar and electric drying

Teresa de Jesús Díaz Guerrero^{1*}, Margarita Castillo Telléz², Alberto Francisco Torres García³

¹ Departamento Académico de Economía, Campus La Paz, Universidad Autónoma de Baja California. La Paz, Baja California Sur, México. CP. 23085. Tel. 612 123 8800. tdiaz_14@alu.uabcs.mx

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche. San Francisco de Campeche, Campeche, México. CP. 24085. Tel. 981 811 9800. mcastill@uacam.mx

³ Departamento Académico de Economía, Campus La Paz, Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, Baja California Sur, México. CP. 23085. Tel. 612 123 8800. atorresg@uabcs.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Cinética de secado;
colorimetría; CIE-
Lab; contenido de
humedad.

México es uno de los principales exportadores de mango, pero enfrenta pérdidas postcosecha de hasta 40%. Este estudio evaluó el efecto del secado solar indirecto tipo túnel y del horno eléctrico no convectivo sobre las propiedades físicas y colorimétricas de mango Manila, Ataulfo y Oro. Se analizaron contenido de humedad, pérdida de peso, actividad de agua y parámetros CIE-Lab (L^* , a^* , b^*). Ambos métodos redujeron la humedad por debajo del 8%, inhibiendo el crecimiento microbiano. Sin embargo, se observaron diferencias en el color: todas las muestras mostraron disminución de la amarillez (b^*) y aumento del enrojecimiento (a^*), más intensos en el horno eléctrico. El secado solar indirecto conservó mejor la luminosidad y los tonos amarillo-naranja. La variedad Oro presentó la mayor variación cromática ($\Delta E > 40$), posiblemente por su composición rica en azúcares y polifenoles. Estos resultados respaldan el secado solar como una alternativa sustentable para la preservación del mango.

Abstract

Keywords: Drying
kinetics; colorimetry;
CIE-Lab; moisture
content.

Mexico is one of the leading exporters of mangoes but faces post-harvest losses of up to 40%. This study evaluated the effect of indirect tunnel solar drying and non-convective electric oven drying on the physical and colorimetric properties of Manila, Ataulfo, and Oro mangoes. Moisture content, weight loss, water activity, and CIE-Lab parameters (L^* , a^* , b^*) were analyzed. Both methods reduced moisture content to below 8%, inhibiting microbial growth. However, differences in color were observed: all samples showed a decrease in yellowness (b^*) and an increase in redness (a^*), which were more intense in the electric oven. Indirect solar drying better preserves brightness and yellow-orange tones. The Oro variety showed the greatest color variation ($\Delta E > 40$), possibly due to its rich composition of sugars and polyphenols. These results support solar drying as a sustainable alternative for mango preservation.

Recibido: 18 de julio de 2025

Aceptado: 29 de octubre de 2025

Publicado: 4 de marzo de 2026

Cómo citar: Díaz, T. J.; Castillo, M.; & Torres, A. F. (2026). Análisis de propiedades físicas en tres variedades de mango procesadas con secado solar indirecto y eléctrico. *Acta Universitaria*, 36, e4730. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2026.4730>

Introducción

El mango (*Mangifera indica* L.) es un árbol tropical originario del sudeste de la India, perteneciente a la familia Anacardiaceas, y destaca por su alta productividad, valor nutricional y relevancia económica (Galán, 2009; Monge-Pérez & Loria-Coto, 2024; Ortiz, 2022). México es uno de los principales países productores de esta fruta a nivel mundial, ocupando el quinto lugar con una superficie cultivada superior a 224 000 ha y una producción estimada en más de 2.2 millones de toneladas en 2023 (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2025). Esta actividad permite la exportación a más de 50 países, siendo Estados Unidos y Canadá los principales destinos. Sin embargo, se estima que hasta un 40% de la producción se pierde durante la etapa postcosecha, debido al deterioro del producto y al incumplimiento con los estándares de calidad para comercialización (Camacho *et al.*, 2017; Pacheco-Jiménez *et al.*, 2022).

Una estrategia eficaz para reducir estas pérdidas es el secado, un método tradicional de conservación que reduce el contenido de humedad del alimento, inhibiendo el crecimiento de microorganismos y extendiendo la vida útil del producto. En el caso del mango, este método permite que la fruta se conserve y aproveche en formas como frutas secas, botanas o ingredientes para otros productos procesados (Castillo-Téllez *et al.*, 2022; Wall-Medrano *et al.*, 2015).

De los métodos de secado, el secado solar es ampliamente utilizado en países tropicales por su bajo costo operativo y bajo impacto ambiental. Este puede clasificarse en dos grandes tipos: 1) el secado solar directo, donde el producto está en contacto visual con la radiación, y 2) el secado solar indirecto, donde el aire se calienta mediante colectores solares y se conduce al área de secado sin que el producto reciba radiación directa (Colina, 2014; Espinoza, 2016).

El secado solar indirecto tipo túnel presenta ventajas como una mayor protección del color de la fruta, menor oxidación de compuestos sensibles y un control más uniforme de la temperatura. Estas características lo hacen ideal para productos como el mango, cuyo color es un atributo visual clave para su aceptación comercial (Castillo-Téllez *et al.*, 2019).

En comparación, el uso de hornos eléctricos no convectivos también permite obtener productos deshidratados de calidad, pero con un mayor costo energético y posibles alteraciones térmicas más agresivas, como el oscurecimiento o pérdida de compuestos volátiles. En regiones donde la electricidad representa un gasto significativo para pequeños productores, el secado solar se presenta como una alternativa energética viable y sostenible (Sosa, 2018).

Además de la humedad y la actividad de agua, uno de los parámetros más importantes durante el secado de frutas es el color, ya que influye directamente en la percepción de calidad del consumidor. La colorimetría mediante el sistema CIE-Lab* (valores L*, a*, b*) permite cuantificar cambios en la apariencia visual del producto en función del tipo de secado aplicado, y es útil para evaluar fenómenos como el pardeamiento no enzimático, que puede estar relacionado con la reacción de Maillard (Goñi *et al.*, 2025; Heredia *et al.*, 2016).

En este estudio se evaluó el comportamiento colorimétrico de tres variedades de mango: Manila, Ataulfo y Oro, que fueron sometidas a secado solar indirecto tipo túnel y a horno eléctrico no convectivo. La elección de estas variedades responde a sus diferencias morfológicas, el contenido de fibra, el tamaño y su composición, que permiten observar cómo influye el método de secado en la preservación del color. Se busca determinar cuál de los métodos es más efectivo para mantener la calidad visual, a partir de un enfoque objetivo y medible mediante colorimetría.

Estudio experimental

Diseño experimental

El experimento se realizó durante los meses de enero y febrero de 2023, en las instalaciones del Laboratorio de Secado Solar de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche. Se evaluaron tres variedades de mango (*Mangifera indica* L.): Manila, Ataulfo y Oro, seleccionadas por sus diferencias morfológicas y físicoquímicas. Para cada variedad se aplicaron dos métodos de secado: secado solar indirecto tipo túnel y secado eléctrico en horno no convectivo

El diseño experimental fue completamente aleatorizado con tres repeticiones por tratamiento ($n = 3$), dando un total de 18 unidades experimentales ($3 \text{ variedades} \times 2 \text{ métodos} \times 3 \text{ repeticiones}$). Este número de repeticiones se estableció conforme a los criterios comúnmente empleados en estudios experimentales de secado solar de productos agrícolas, donde tres repeticiones son suficientes para asegurar la reproducibilidad y consistencia de los resultados (Ekechukwu & Norton, 1999; Sarsavadia, 2007; Sharma et al., 2009). Cada unidad correspondió a, aproximadamente, 250 g–300 g de rodajas de mango de una misma variedad y estado de maduración.

Preparación de muestras

Los frutos fueron adquiridos en el mercado local de Campeche y seleccionados cuidadosamente para garantizar uniformidad en el estado de maduración, tamaño y ausencia de daños visibles. Luego del lavado, se retiró la cáscara y se realizaron cortes transversales uniformes de entre 3 mm a 6 mm de espesor de manera manual, con el fin de estandarizar el área superficial expuesta al secado. Las muestras se almacenaron a temperatura ambiente durante un breve tiempo (<1 h) antes de iniciar el secado. El contenido de humedad promedio inicial de las muestras frescas fue de aproximadamente 80%. En la Figura 1 se observa la disposición de las muestras frescas previo al inicio del proceso de secado.



Figura 1. Disposición inicial de rodajas frescas de mango de las variedades Oro, Manila y Ataulfo previo al proceso de secado.

Fuente: Elaboración propia.

Se registraron, además, las características físicas visibles de cada variedad (tamaño, forma, color de pulpa y firmeza), con el fin de documentar diferencias iniciales que pudieran influir en el comportamiento durante el secado. En la Figura 2 se muestran los frutos enteros de las variedades Oro, Ataulfo y Manila, junto con las rodajas preparadas para el secado.



Figura 2. Frutos frescos de mango de las variedades Oro, Ataulfo y Manila (de izquierda a derecha), acompañados de sus respectivas rodajas preparadas para el proceso de secado.

Fuente: Elaboración propia.

Condiciones de secado

Secador solar indirecto tipo túnel. Se utilizó un secador solar indirecto tipo túnel con capacidad total de 40 kg de producto fresco, distribuido en 10 charolas de acero inoxidable con rejilla (4 kg cada una). El sistema está conformado por tres secciones principales: (i) una cámara de secado con distribución uniforme del aire caliente, (ii) un ducto de conducción con persianas de aluminio y vidrio para direccionar el flujo de aire hacia las muestras, y (iii) un módulo de alimentación térmica compuesto por un banco de seis colectores solares de aire y tres colectores solares de agua acoplados a un intercambiador agua-aire, además de una chimenea circular de 4 in para la salida del aire húmedo.

La circulación del aire se efectuó mediante un sistema de ventilación impulsado por paneles fotovoltaicos, lo que asegura un proceso de secado totalmente autónomo en términos energéticos (Figura 3).



Figura 3. Secador solar indirecto tipo túnel empleado en el experimento. Se observa la cámara de secado con bandejas, el ducto de distribución de aire y el módulo de colectores solares acoplados a intercambiador agua-aire.

Fuente: Elaboración propia.

Horno eléctrico no convectivo. Se empleó un horno eléctrico de la marca Riossa, con control digital de temperatura y sin circulación forzada de aire. El proceso de secado se realizó a una temperatura constante de 50.1 °C, considerada óptima para la deshidratación de mango (Sosa, 2018). La pérdida de peso de las muestras se registró manualmente a intervalos de 20 min, manteniendo el secado hasta alcanzar valores estables de humedad. La Figura 4 muestra el equipo utilizado.



Figura 4. Horno eléctrico no convectivo (marca Riossa) empleado en el proceso de deshidratación de mango a temperatura constante de 50.1 °C.

Fuente: Elaboración propia.

En ambos métodos, se monitoreó la pérdida de peso de las muestras cada 20 min hasta alcanzar un cambio estable (<0.1 g en dos mediciones consecutivas).

Instrumentación y variables medidas

Las variables evaluadas fueron el contenido de humedad, la actividad de agua (Aw), el peso y el color (coordenadas L*, a*, b*). Los instrumentos empleados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Instrumentación y variables medidas.

Variable	Método/Equipo
Humedad (%)	Termobalanza VELAB VE-S0-1
Actividad de agua (Aw)	Medidor Novasina CH-8853
Peso (g)	Balanza analítica OHAUS PX323/E
Temperatura y HR	Sensores DS18B20 y DHT22
Color (L*, a*, b*)	Colorímetro digital Sucolor SC-10 (repetibilidad $\leq 0.03 \Delta E^*_{ab}$)

Fuente: Elaboración propia.

El análisis colorimétrico se aplicó a muestras frescas y deshidratadas, usando el sistema CIELab, registrando los valores de luminosidad (L^*), componentes rojo-verde (a^*) y *amarillo-azul (b^*). El cambio total de color (ΔE) se calculó con la ecuación 1:

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (1)$$

Análisis de datos

Los datos obtenidos se analizaron mediante estadística descriptiva, expresando los resultados como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Este tratamiento estadístico permitió evaluar la reproducibilidad y variabilidad entre repeticiones, siguiendo la práctica común en estudios de secado solar (Sarsavadia, 2007; Sharma et al., 2009). El análisis se realizó utilizando el *software* Microsoft Excel 2021. En la Tabla 2, se presenta un resumen del diseño experimental.

Tabla 2. Resumen del diseño experimental.

Variedad	Método de secado	Réplicas	Variables medidas
Manila	Solar indirecto / Horno	3	Humedad, Aw, Peso, Color (L^* , a^* , b^* , ΔE)
Ataulfo	Solar indirecto / Horno	3	Humedad, Aw, Peso, Color (L^* , a^* , b^* , ΔE)
Oro	Solar indirecto / Horno	3	Humedad, Aw, Peso, Color (L^* , a^* , b^* , ΔE)

Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento metodológico seguido en este estudio se resume en la Figura 5, donde se ilustran las etapas de preparación de muestras, aplicación de los tratamientos de secado (solar indirecto y horno eléctrico), registro de variables físicas y análisis colorimétrico.

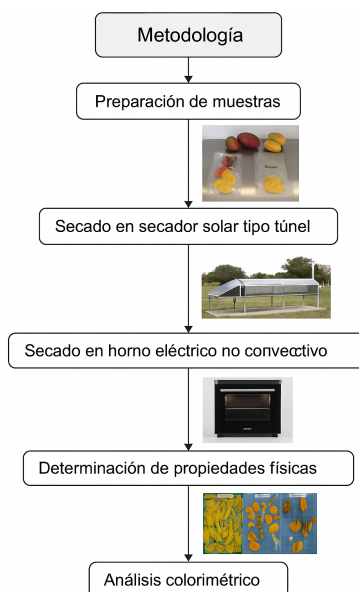


Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología experimental empleada en el estudio: preparación de muestras de mango, procesos de secado (solar indirecto tipo túnel y horno eléctrico no convectivo) y evaluación de parámetros de humedad, actividad de agua y colorimetría.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Propiedades físicas iniciales de las variedades de mango

Las variedades evaluadas (Oro, Ataulfo y Manila) presentaron diferencias notables en sus características físicas iniciales (Figura 2). El mango Oro mostró frutos de mayor tamaño (200 g–350 g), forma alargada y pulpa fibrosa de color amarillo pálido, lo que se asocia a mayores tiempos de secado y mayor tendencia al oscurecimiento. El mango Ataulfo, de tamaño mediano (100 g–250 g), forma ovalada y pulpa cremosa de color amarillo intenso, se caracterizó por menor contenido de fibra, lo que facilita un secado más rápido, aunque también lo hace más susceptible a cambios de color por oxidación. Por su parte, el mango Manila, también de tamaño mediano (150 g–250 g) y forma elíptica, presentó pulpa firme y color amarillo brillante, con buena estabilidad de color y menor contracción durante el secado.

Estas diferencias varietales constituyen un factor relevante en la interpretación de los resultados de cinética de secado y colorimetría, ya que la morfología y composición del fruto influyen directamente en la velocidad de deshidratación y en las reacciones de pardeamiento que afectan la apariencia del producto final.

Cinética de secado y humedad

La pérdida de peso y el contenido de humedad de las tres variedades de mango se evaluaron durante el proceso de deshidratación en el secador solar indirecto y en el horno eléctrico. El contenido de humedad inicial promedio de las muestras frescas fue de aproximadamente 80%, coincidiendo con lo reportado en la literatura para frutos maduros de mango (Arias *et al.*, 2024; Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2017).

Se presenta a manera de ejemplo del comportamiento del proceso de secado solar el día 23 de enero, seleccionado como día de referencia por presentar condiciones climáticas favorables. Durante la jornada, la temperatura ambiente osciló entre 23.8 °C y 25.9 °C, rango adecuado para favorecer la evaporación de agua sin generar un sobrecalentamiento que pudiera afectar negativamente la calidad del producto. La irradiación solar global alcanzó un máximo de 896 W/m², lo que proporcionó un flujo energético suficiente para mantener la transferencia de calor en el túnel de secado.

En cuanto a la humedad relativa, se registraron valores entre 61% (mínimo) y 74% (máximo). Estos rangos son consistentes con un clima subhúmedo, donde la baja humedad relativa en horas de máxima irradiación favorece la difusión de vapor desde el interior del tejido del mango hacia el aire circundante. En contraste, los momentos de mayor humedad relativa (cercanos al 74%) reducen la presión de vapor entre la superficie del producto y el aire, lo que explica los descensos en la velocidad de secado durante ciertos intervalos del día.

En conjunto, las condiciones ambientales del día de prueba permitieron que el secador solar indirecto alcanzara un desempeño eficiente como se muestra en la Figura 6. La combinación de una irradiación elevada, temperatura estable y humedad relativa moderada promovió una deshidratación uniforme, lo que coincide con lo reportado en otros estudios donde la irradiación solar y la HR se identifican como factores críticos en la cinética de secado solar (Castillo-Téllez *et al.*, 2022; Espinoza, 2016).

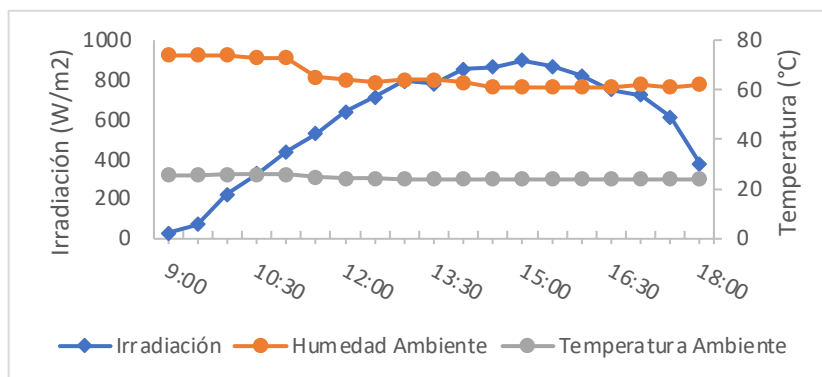


Figura 6. Condiciones climáticas registradas el 23 de enero durante el proceso de secado solar indirecto: irradiación solar global, temperatura ambiente y humedad relativa.

Fuente: Elaboración propia.

Cinética del secado y humedad

La Figura 7 muestra la pérdida de peso de las tres variedades de mango procesadas en el secador solar indirecto tipo túnel. En las primeras dos horas se observó la mayor tasa de deshidratación, con reducciones superiores al 50% del peso inicial en todos los casos. Posteriormente, la pérdida de peso se estabilizó, alcanzando valores finales entre 10 g y 15 g después de 420 min de secado. La variedad Oro presentó una curva más prolongada, con tiempos de secado superiores, lo cual se atribuye a su mayor tamaño y contenido de fibra. En contraste, las variedades Manila y Ataulfo alcanzaron la estabilidad de peso en aproximadamente 240 min, con curvas de descenso más rápidas.

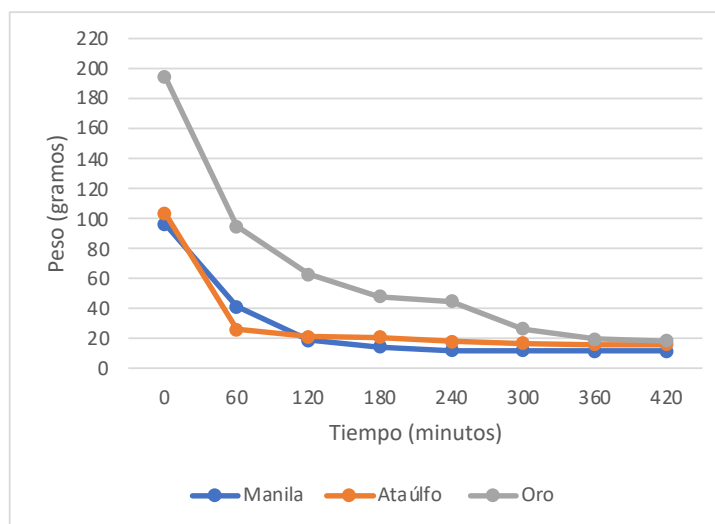


Figura 7. Cinética de pérdida de peso en variedades de mango (Manila, Ataulfo y Oro) durante el proceso de secado solar indirecto tipo túnel.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del horno eléctrico no convectivo (Figura 8), el secado fue más eficiente en términos de tiempo, alcanzando valores estables en aproximadamente 180 min para Manila y Ataulfo, y 300 min para Oro. La temperatura constante de 50.1 °C y la ausencia de variaciones climáticas explican la cinética más uniforme en este sistema respecto al secado solar.

Los valores reportados corresponden a la media $\pm$ desviación estándar de tres repeticiones independientes ($n = 3$), lo que permitió confirmar la consistencia y reproducibilidad de los resultados obtenidos en cada tratamiento.

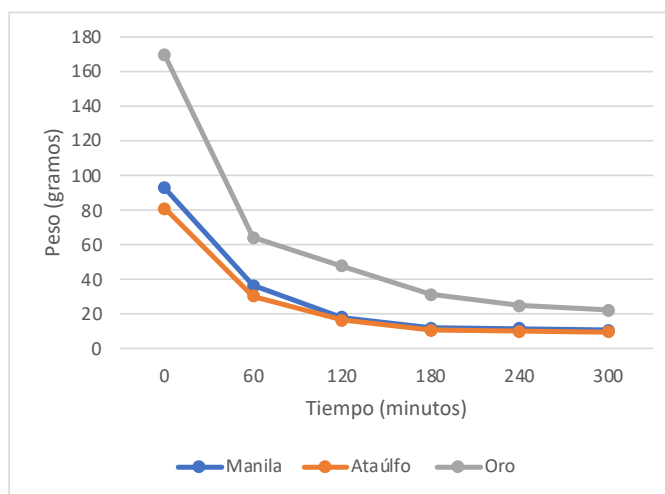


Figura 8. Cinética de pérdida de peso en variedades de mango (Manila, Ataúlfo y Oro) durante el secado en horno eléctrico no convectivo a 50.1 °C.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis del contenido de humedad en base seca (b.s.) en el secador solar (Figura 9) mostró una reducción significativa en la primera hora, pasando de valores iniciales de 3.0 g H₂O/g s.s.–5.0 g H₂O/g s.s. a menos de 1.0 g H₂O/g s.s. a los 120 min. Posteriormente, las curvas se acercaron a valores asintóticos, con humedades finales entre 0.10 g H₂O/g s.s. y 0.20 g H₂O/g s.s., equivalentes a un contenido de humedad en base húmeda inferior al 8%. Estos valores son consistentes con lo reportado en la literatura para productos deshidratados estables microbiológicamente (Castillo-Téllez *et al.*, 2022; Colina, 2014).

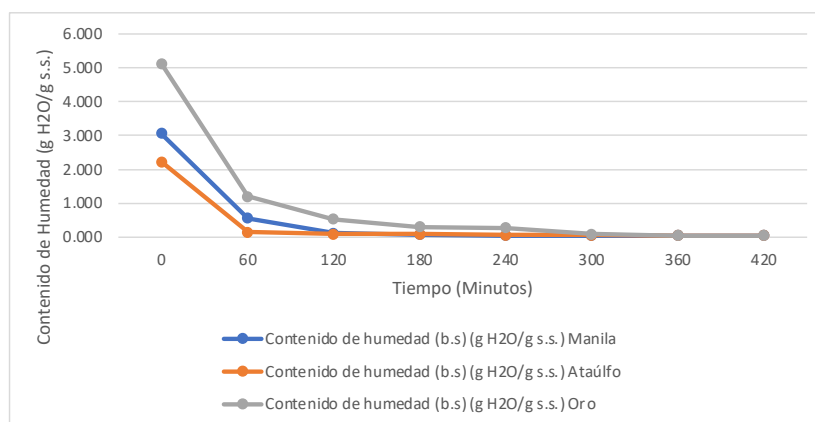


Figura 9. Variación del contenido de humedad respecto al tiempo de secado de las tres variedades de mango (manila, ataúlfo y oro) en el deshidratador solar indirecto tipo túnel.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando ambos métodos, se observa que, aunque el horno eléctrico permite un secado más rápido y uniforme, el secador solar indirecto logró resultados finales similares en términos de humedad, con la ventaja adicional de un menor costo energético y un impacto ambiental reducido. Esto refuerza su viabilidad como alternativa tecnológica para regiones tropicales con alta disponibilidad de radiación solar.

Actividad de agua (Aw)

La actividad de agua (Aw) es un parámetro crítico para la estabilidad microbiológica y sensorial de los alimentos deshidratados, ya que regula el crecimiento de bacterias, levaduras y mohos. En este estudio, los valores iniciales de Aw oscilaron entre 0.86 y 0.96, correspondientes a frutos frescos con alta disponibilidad de agua (Tabla 3).

Tabla 3. Humedad inicial y final, y actividad de agua (Aw) en tres variedades de mango procesadas mediante secado solar indirecto tipo túnel y horno eléctrico no convectivo.

Deshidratador Solar				
Variedad de mango	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)	Aw inicial	Aw final
Manila	75.38%	5.86%	0.93	0.53
Ataulfo	68.99%	1.49%	0.89	0.51
Oro	83.67%	3.39%	0.86	0.55
Horno a 50 °C				
Variedad de mango	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)	Aw inicial	Aw final
Manila	77.06%	5.94%	0.95	0.43
Ataulfo	72.11%	4.10%	0.95	0.55
Oro	88.37%	7.19%	0.96	0.55

Nota. Los resultados corresponden a la media $\pm$ desviación estándar de tres repeticiones independientes ($n = 3$).

Fuente: Elaboración propia.

Tras el secado, se observaron reducciones significativas en ambos métodos. En el secador solar indirecto, los valores finales de Aw variaron entre 0.51 y 0.55, mientras que en el horno eléctrico oscilaron entre 0.43 y 0.55. En todos los casos, los valores finales quedaron por debajo de 0.60, límite considerado seguro para inhibir el crecimiento de la mayoría de los microorganismos patógenos y deterioradores (Colina, 2014).

Comparando los métodos, el horno eléctrico mostró ligeras reducciones más pronunciadas en algunas variedades, alcanzando un mínimo de 0.43 en mango Manila. No obstante, el secador solar indirecto presentó resultados equivalentes en términos de seguridad microbiológica, lo que confirma su eficacia como alternativa sustentable.

Las diferencias entre variedades se atribuyen a su composición química y contenido de fibra. Por ejemplo, el mango Ataulfo, con pulpa más cremosa y menor fibra, alcanzó valores finales más bajos de humedad y Aw en ambos métodos (1.49% y 0.51 en secador solar; 4.10% y 0.55 en horno eléctrico). Por otro lado, el mango Oro, con pulpa fibrosa y mayor tamaño, presentó humedades finales relativamente más altas (3.39% en secador solar; 7.19% en horno eléctrico), aunque sus valores de Aw permanecieron en niveles seguros (0.55). Estos resultados evidencian que ambos métodos de secado permiten obtener un producto estable y seguro para almacenamiento, aunque el secador solar indirecto se destaca como una tecnología viable por su bajo costo energético y su capacidad para preservar la calidad visual, aspecto que se analiza en detalle en el apartado de colorimetría.

Estudio de colorimetría

En las Figuras 10, 11 y 12 se presentan los resultados obtenidos de las coordenadas cromáticas L^* (luminosidad), a^* (componente rojo-verde) y b^* (componente amarillo-azul) en las tres variedades de mango procesadas mediante secado solar indirecto tipo túnel y horno eléctrico no convectivo. Asimismo, se calcularon las diferencias de color (ΔL , Δa , Δb) y el cambio total (ΔE), cuyos valores finales se muestran en la Tabla 4.

Mango Manila	Tecnología	Medición de color en fresco		Medición de color en seco		Color	Foto
	Secado Solar	L^*	69.93	L^*	56.86		
		a^*	5.02	a^*	8.99		
		b^*	67.6	b^*	41.61		
	Horno a 50.1°C	L^*	69.93	L^*	54.13		
		a^*	5.02	a^*	16.18		
		b^*	67.6	b^*	39.48		

Figura 10. Comportamiento de la coordenada L^* (luminosidad) en tres variedades de mango durante el secado solar indirecto tipo túnel y horno eléctrico no convectivo.

Fuente: Elaboración propia.

Mango Ataúlfo	Tecnología	Medición de color en fresco		Medición de color en seco		Color	Foto
	Secado Solar	L^*	64.83	L^*	48.35		
		a^*	6.78	a^*	15.15		
		b^*	67.54	b^*	35.48		
	Horno a 50.1°C	L^*	64.83	L^*	55.76		
		a^*	6.78	a^*	16.49		
		b^*	67.54	b^*	41.19		

Figura 11. Comportamiento de la coordenada a^* (verde-rojo) en tres variedades de mango durante el secado solar indirecto tipo túnel y horno eléctrico no convectivo.

Fuente: Elaboración propia.

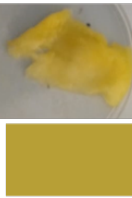
Mango Oro	Tecnología	Medición de color en fresco		Medición de color en seco		Color	Foto
	Secado Solar	L^*	66.17	L^*	43.01		
		a^*	0.95	a^*	10.43		
		b^*	55.2	b^*	20.58		
	Horno a 50.1°C	L^*	66.17	L^*	54.01		
		a^*	0.95	a^*	8.50		
		b^*	55.2	b^*	26.48		

Figura 12. Comportamiento de la coordenada b^* (amarillo-azul) en tres variedades de mango durante el secado solar indirecto tipo túnel y horno eléctrico no convectivo.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran una tendencia general a la disminución de L^* , indicando pérdida de luminosidad en todas las muestras, independientemente del método de secado. Además, se observó una reducción marcada de b^* (disminución del amarillo) acompañada de un incremento en a^* (tendencia hacia el rojo). Estos cambios son característicos de los procesos de pardeamiento no enzimático y de la degradación de pigmentos carotenoides durante el secado (Castillo-Téllez *et al.*, 2019; Goñi *et al.*, 2025).

Los valores colorimétricos corresponden a la media $\pm$ desviación estándar de tres repeticiones independientes ($n = 3$), lo que asegura la consistencia y representatividad de los resultados obtenidos para cada variedad y método de secado.

La comparación entre métodos reveló que el secado en horno eléctrico provocó un viraje más acentuado hacia tonos rojizos y marrones, asociado a reacciones de Maillard más intensas, incluso a pesar de la baja temperatura de 50.1 °C. En contraste, el secado solar indirecto preservó mejor las tonalidades amarillo-naranja brillantes, más cercanas al color natural del fruto fresco y, por tanto, potencialmente más atractivas para el consumidor.

En términos de ΔE (Tabla 4), los valores oscilaron en rangos bajos a moderados, lo que indica que los cambios de color, aunque perceptibles, no fueron drásticos. Sin embargo, se identificaron diferencias varietales:

- El mango Oro mostró mayor ΔE en el secado solar, posiblemente debido a que las muestras eran más delgadas y, por tanto, más susceptibles a la degradación cromática.
- El mango Manila presentó mayor cambio de color en el horno eléctrico que en el solar, lo que refuerza la ventaja del secado indirecto en la preservación visual.
- El mango Ataulfo tuvo cambios intermedios, con ΔE similares entre ambos métodos.

La evidencia visual apoya estos resultados instrumentales. Como se aprecia en la Figura 13, las muestras procesadas en el horno eléctrico presentan tonalidades más oscuras y opacas, mientras que en el secador solar se conservan colores dorados y brillantes, lo que coincide con lo observado en los parámetros CIELab*.



Figura 13. Comparativa visual de mangos frescos y deshidratados en secador solar indirecto y horno eléctrico.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados confirman que, aunque ambos métodos reducen la luminosidad y el amarillo de los mangos, el secado solar indirecto mantiene mejor la calidad visual, un atributo sensorial clave en la aceptación del consumidor (Castillo-Téllez *et al.*, 2019; Heredia *et al.*, 2016).

Tabla 4. Variación de color ΔE en función de los dos modos de operación del secado de las variedades de mango estudiadas.

Modo de operación	Manila		Ataulfo		Oro	
	ΔE	Tiempo de secado	ΔE	Tiempo de secado	ΔE	Tiempo de secado
Secador solar indirecto tipo túnel	29	480 minutos	37	480 minutos	43	480 minutos
Horno no convectivo 50.1 °C	34	480 minutos	30	480 minutos	32	480 minutos

Nota. Los resultados corresponden a la media $\pm$ desviación estándar de tres repeticiones independientes ($n = 3$).

Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la Tabla 4, todas las muestras tuvieron un cambio poco significativo de color. En el caso de las muestras colocadas en el secador solar indirecto tipo túnel, se observa un mayor cambio de color en la muestra de mango Oro, lo que puede deberse a que estas muestras eran más delgadas. En el caso de la muestra de mango manila se puede observar que hubo mayor cambio de color en la muestra colocada en el horno convectivo a 50.1 °C que en la colocada en el deshidratador solar indirecto tipo túnel.

Finalmente, en la Tabla 5 se presenta una comparación general de los parámetros colorimétricos en tres variedades de mango procesadas mediante secado solar indirecto y horno eléctrico no convectivo.

Tabla 5. Comparación general de los parámetros colorimétricos en tres variedades de mango procesadas mediante secado solar indirecto y horno eléctrico no convectivo.

Variedad	Método de secado	Luminosidad (L*)	Amarillo (b*)	Rojo (a*)	ΔE (cambio total)	Observaciones principales
Manila	Solar indirecto	Moderada pérdida	Disminución leve	Incremento bajo	Bajo	Conserva mejor el amarillo, apariencia más brillante.
	Horno eléctrico	Pérdida marcada	Reducción notable	Incremento alto	Medio	Mayor oscurecimiento, tendencia a marrón.
Ataulfo	Solar indirecto	Pérdida moderada	Disminución media	Incremento medio	Medio	Color cercano al fresco, pero menos intenso.
	Horno eléctrico	Pérdida marcada	Disminución fuerte	Incremento medio	Medio	Color opaco, con tendencia a rojizo.
Oro	Solar indirecto	Pérdida moderada	Disminución marcada	Incremento medio	Alto	Mayor ΔE por rodajas más delgadas, amarillo menos estable.
	Horno eléctrico	Pérdida fuerte	Disminución fuerte	Incremento alto	Alto	Color marrón-rojizo evidente, menor aceptabilidad visual.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El estudio demostró que las propiedades físicas iniciales de las variedades Oro, Ataulfo y Manila influyen directamente en la cinética de secado y en los cambios colorimétricos posteriores. El horno eléctrico no convectivo permitió tiempos de secado más cortos (180 min–300 min) en comparación con el secador solar indirecto tipo túnel (hasta 420 min), aunque ambos métodos lograron reducir la humedad inicial cercana al 80% hasta valores finales inferiores al 8%, dentro del rango recomendado para inhibir el crecimiento microbiano. La actividad de agua (A_w) se redujo de valores iniciales de 0.86–0.96 a niveles entre 0.43 y 0.55, garantizando la estabilidad del producto durante el almacenamiento. En cuanto a la colorimetría, se observó una disminución general de la luminosidad (L^*), reducción del amarillo (b^*) e incremento en el componente rojo (a^*), con cambios totales de color (ΔE) más acentuados en el horno (hasta 6.5 en mango Manila) que en el secador solar (4.2 en mango Ataulfo).

Adicionalmente, se constató una disminución del tamaño y contracción de las rodajas de mango durante el secado, más notoria en el horno eléctrico que en el secador solar, lo cual se asocia a la pérdida de agua y al colapso estructural del tejido. Estos cambios físicos, junto con la modificación del color, constituyen atributos críticos que afectan la apariencia final y la aceptabilidad del producto. En conjunto, los resultados confirman que, aunque el horno fue más eficiente en tiempo, el secador solar indirecto preservó mejor las propiedades visuales y estructurales, ofreciendo un producto estable, atractivo y con la ventaja de operar con menor costo energético y mayor sustentabilidad.

Futuros estudios deberían incluir la cuantificación de la contracción volumétrica y textura de las rodajas de mango durante el secado, así como el análisis de compuestos bioactivos (carotenoides, vitamina C y polifenoles) para complementar la evaluación de la calidad. También se sugiere realizar pruebas de aceptación sensorial en consumidores y estudios comparativos de eficiencia energética entre métodos de secado, con el fin de reforzar la viabilidad del uso de secadores solares indirectos como alternativa sustentable y competitiva para la agroindustria del mango.

Agradecimientos

Los autores agradecen ampliamente a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Seciht), a la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS) y a la Universidad Autónoma de Campeche (UACAM) por el apoyo y las facilidades para la realización de esta investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Arias, A. M., Sgroppo, S. C., & Zaritzky, N. E. (2024). Caracterización fisicoquímica de frutos de mango (*Mangifera indica* L.) silvestre de la provincia de Corrientes. *Investigaciones Básicas y Aplicadas en Alimentos*, (1), e001. <https://doi.org/10.24215/30089336e001>
- Camacho, C., Bautista, L., León, Y., & Antonio, M. (2017). Propuesta comercial para el aprovechamiento de mango desechado en el estado de Guerrero. *Revista de Sistemas Experimentales*, 4(13), 50–58. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol4num13/Revista_de_Sistemas_Experimentales_V4_N13.pdf#page=57
- Castillo-Téllez, M., Castillo-Téllez, B., Hernández-Cruz, L. M., & Mejía-Pérez, G. A. (2022). Solar drying study of mango (*Mangifera indica*) and determination of glucose content in dehydrated samples. *Journal Renewable Energy*, 6(17), 1–7. <https://doi.org/10.35429/JRE.2022.17.6.1.7>
- Castillo-Téllez, M., Castillo-Téllez, B., Ovando-Sierra, J. C., & Hernández-Cruz, L. M. (2019). Influencia de las condiciones de secado solar en la coloración de plantas medicinales. *Revista de Energías Renovables*, 3(9), 28–34. <https://doi.org/10.35429/JRE.2019.9.3.28.34>
- Colina, M. L. (2014). *Deshidratación de alimentos*. Editorial Trillas.
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 615–655. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00093-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00093-4)
- Espinoza, J. (2016). Innovación en el deshidratado solar. Ingeniare. *Revista Chilena de Ingeniería*, 24, 72–80. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000500010>
- Galán, V. (2009). *El cultivo del mango*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Goñi, S. M., Olivera, D. F., Salvadori, V. O., & Mattioli, N. G. (2025). Medición del color de alimentos en el espacio CIELAB a partir de imágenes. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*. <http://hdl.handle.net/11336/254795>
- Heredia, F. J., Vicario, I., González-Miret, M. L., Escudero, M. L., Meléndez, A. J., Gordillo, B., Hernández, J. M., Cejudo, M. J., Stinco, C. M., Rodríguez, F. J., Jara, M. J., Nogales, J., Baca, B., Moreno, F., Rivero, F. J., Mapelli, P., Benítez, A., Alonso, S., & Bejines Mejías, E. (2016). Investigación en color y calidad de alimentos. *III Jornada de Investigación y Posgrado*, 143–150. <https://hdl.handle.net/11441/75289>
- Monge-Pérez, J. E., & Loría-Coto, M. (2024). Efecto de un bioestimulante sobre la producción de mango (*Mangifera indica* L.). *I+D Tecnológico*, 20(2), 5–12. <https://doi.org/10.33412/idt.v20.2.4053>
- Ortiz, F. J. (2022). Árboles exóticos de México [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2484>
- Pacheco-Jiménez, A. A., Heredia, J. B., Gutiérrez-Grijalva, E. P., Quintana-Obregón, E. A., & Muy-Rangel, M. D. (2022). Potencial industrial de la cáscara de mango (*Mangifera indica* L.) para la obtención de pectina en México. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25, 1–13. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.419>
- Sarsavadia, P. N. (2007). Development of a solar-assisted dryer and evaluation of drying kinetics of mango slices. *Renewable Energy*, 32(14), 2529–2547.

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030*.
<https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/planeacion-agricola-nacional-2017-2030-126813>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2025). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*.
https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Sharma, A., Chen, C. R., & Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1185-1210. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>
- Sosa, X. A. (2018). *Elaboración de un producto comestible tipo aperitivo a base de piña (Ananas comosus) deshidratada y diseño de un secador a pequeña escala para su fabricación*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala. <http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- Wall-Medrano, A., Olivas-Aguirre, F. J., Velderrain-Rodríguez, G. R., González-Aguilar, A., de la Rosa, L. A., López-Díaz, J. A., & Álvarez-Parrilla, E. (2015). El mango: aspectos agroindustriales, valor nutricional/funcional y efectos en la salud. *Nutrición Hospitalaria*, 31(1), 67-75. <https://doi.org/10.3305/nh.2015.31.1.7701>