

Optimización multirrespuesta del secado convectivo de la cáscara de mango Keitt: equilibrio entre el rendimiento tecno-funcional y la retención de antioxidantes en una harina de valor añadido

Multi-response optimization of convective drying of Keitt mango peel: balancing techno-functional performance and antioxidant retention in a value-added flour

Ramona Julieta Espinoza-Moreno¹ ; Georgina Vizcarra-Félix¹ ; Xóchitl Ariadna Ruiz-Armenta² ; María Fernanda Quintero-Soto¹ ; Oscar Daniel Argüelles-López² ; Fernando Salas-López³ ; Mario Armando Gómez-Favela^{2*} 

¹Ingeniería Agroindustrial, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra (UPMYS), Carretera a Potrerillos del Norte Km 3, La Cruz, Elota, Sinaloa, México. C.P. 80027.

²Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calz. de las Américas Nte. 2771, Cd. Universitaria, Col. Burócrata, Culiacán, Sinaloa, México. C.P. 80030.

³Departamento de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Occidente, UR Culiacán. Blvd. Lola Beltrán y Blvd. Rolando Arjona, 4 de marzo, Culiacán, Sinaloa, México. C.P. 80020.

RESUMEN

La cáscara de mango, subproducto del deshidratado de la pulpa, es rica en fibra y compuestos fitoquímicos. Su transformación en harina requiere condiciones de secado que equilibren la funcionalidad y la retención de antioxidantes. El objetivo fue optimizar la temperatura (DT) y el tiempo (Dt) de secado para obtener harina de cáscara de mango (*Mangifera indica* L.) cv. Keitt con buenas propiedades tecno-funcionales, contenido de carotenoides y actividad antioxidante lipofílica. El secado convectivo se modeló mediante un diseño central compuesto, con DT de 50–80 °C y Dt de 8–36 h. Se optimizaron simultáneamente los índices de absorción de agua (WAI), solubilidad en agua (WSI) y absorción de aceite (OAI), los carotenoides totales (TC) y la actividad antioxidante lipofílica mediante ABTS (L_{ABTS}) y DPPH (L_{DPPH}). Los modelos reducidos fueron significativos ($p < 0.0001$), sin falta de ajuste, y explicaron entre 86.2 y 94.7% de la variabilidad. La temperatura afectó negativamente WAI, TC, L_{ABTS} y L_{DPPH} , mientras que incrementó WSI. La combinación óptima fue DT = 50 °C y Dt = 36 h, con deseabilidad global de 0.905. Frente a la cáscara sin tratar, la harina presentó mayores WAI, WSI, OAI y dispersabilidad, y retuvo 75.0% de TC, 83.9% de L_{ABTS} y 85.8% de L_{DPPH} . Estos resultados demuestran que el secado a temperatura moderada mejora las propiedades tecno-funcionales y favorece la retención de carotenoides y actividad antioxidante lipofílica.

Palabras claves: *Mangifera indica*; subproducto agroindustrial; metodología de superficie de respuesta; secado con aire caliente

ABSTRACT

Mango peel, a by-product of pulp dehydration, is rich in fiber and phytochemicals. Its conversion into flour requires drying conditions that balance functionality and antioxidant retention. This study aimed to optimize drying temperature (DT) and drying time (Dt) to produce mango peel flour (*Mangifera indica* L.) cv. Keitt with desirable techno-functional properties, carotenoid content, and lipophilic antioxidant activity. Convective drying was modeled using a central composite design, with DT ranging from 50 to 80 °C and Dt from 8 to 36 h. The water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), oil absorption index (OAI), total carotenoid content (TC), and lipophilic antioxidant activity measured using ABTS (L_{ABTS}) and DPPH (L_{DPPH}) assays were simultaneously optimized. All reduced models were significant ($p < 0.0001$), showed no significant lack of fit, and explained 86.2–94.7% of the variability in the responses. Increasing temperature negatively affected WAI, TC, L_{ABTS} , and L_{DPPH} , whereas it increased WSI. The optimal combination was DT = 50 °C and Dt = 36 h, with an overall desirability of 0.905. Compared with untreated peel, the flour exhibited higher WAI, WSI, OAI, and dispersibility, retaining 75.0% of TC, 83.9% of L_{ABTS} , and 85.8% of L_{DPPH} . These findings demonstrate that drying at a moderate temperature improves techno-functional properties and promotes the retention of carotenoids and lipophilic antioxidant activity.

Keywords: *Mangifera indica*; agro-industrial by-product; response surface methodology; hot-air drying

INTRODUCCIÓN

El mango (*Mangifera indica* L.) se procesa para elaborar jugos, pulpas, productos deshidratados y conservas, lo que genera subproductos, como la cáscara y la semilla, que pueden representar una proporción considerable del fruto original. La disposición de estos materiales implica la pérdida de componentes potencialmente valiosos e incrementa los costos de manejo y ambientales. La cáscara de mango presenta especial interés por su contenido de fibra dietética, pectina, carotenoides, ácidos fenólicos, flavonoides, galotaninos y xantonas, aunque su composición varía según el cultivar, el grado de madurez, las condiciones de cultivo y los tratamientos de procesamiento previos (Jahurul et al., 2015; Marçal & Pintado, 2021; Gupta et al., 2022; Kučuk et al., 2024). Por consiguiente, transformar la cáscara en una harina estable durante el almacenamiento constituye una de las estrategias más directas para reincorporar esta biomasa a la cadena alimentaria.

La harina de cáscara de mango puede aportar capacidad de retención de agua y aceite, sólidos solubles, color y compuestos fenólicos asociados con la fibra a las formulaciones alimentarias. Los compuestos fenólicos ligados son particularmente importantes, ya que la extracción únicamente con disolventes puede subestimar considerablemente la fracción fenólica asociada con la matriz de la pared celular (Ajila & Prasada-Rao, 2013). Se ha estudiado la incorporación de estas harinas en productos a base de cereales y de panificación; sin embargo, su uso satisfactorio depende no solo de su composición química, sino también de la hidratación de las partículas, la solubilidad, la dispersabilidad y la estabilidad (Larrauri et al., 1996; Serna-Cock et al., 2015; Marçal & Pintado, 2021). Por lo tanto, es necesario caracterizar tanto sus propiedades tecnológicas como sus atributos fitoquímicos antes de proponer la harina de cáscara como ingrediente alimentario.

El secado es necesario para reducir la susceptibilidad al deterioro y facilitar la molienda; sin embargo, también modifica la estructura de la matriz y los compuestos bioactivos. La desestructuración del tejido y la concentración de sus componentes pueden incrementar la extractabilidad o exponer sitios de interacción con el agua y el aceite, mientras que el oxígeno y el calor pueden promover la isomerización y oxidación de los carotenoides, así como la degradación o transformación de los compuestos fenólicos. Los estudios que comparan la liofilización y el secado al vacío, por infrarrojos y con aire caliente han demostrado que la dirección y magnitud de estos

cambios dependen del método de secado y de la variable de respuesta evaluada (Dorta et al., 2012; Sogi et al., 2013; Akther et al., 2023). Asimismo, revisiones recientes señalan que la optimización del secado de la cáscara de mango es un requisito para obtener harinas que conserven sus compuestos fitoquímicos sin comprometer sus propiedades tecnológicas (Marçal & Pintado, 2021; Kučuk et al., 2024).

La mayoría de los estudios previos han comparado métodos de secado o temperaturas específicos. Aunque estas comparaciones son útiles, no permiten establecer explícitamente un equilibrio entre múltiples objetivos de calidad. Una condición que maximiza la solubilidad puede no preservar los carotenoides, mientras que una condición seleccionada únicamente para favorecer la retención de antioxidantes puede requerir un tiempo excesivo o producir una harina con propiedades de hidratación menos favorables. La metodología de superficie de respuesta y las funciones de deseabilidad proporcionan un marco sistemático para cuantificar los efectos simultáneos de las variables del proceso y seleccionar una solución de compromiso entre las respuestas (Derringer & Suich, 1980).

El objetivo de este estudio fue modelar y optimizar los efectos de la temperatura y el tiempo de secado convectivo sobre las propiedades tecnológicas, el contenido de carotenoides totales y la capacidad antioxidante lipofílica de la harina de cáscara de mango (*Mangifera indica* L.) cv. Keitt.

MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIA PRIMA Y PRETRATAMIENTO

Las cáscaras de mango (*Mangifera indica* L.) cv. Keitt se obtuvieron de la empresa deshidratadora Damaya, ubicada en El Saladito, Elota, Sinaloa, México. Las cáscaras se lavaron con agua potable, se sumergieron en agua clorada (20 ppm) durante 3 min y se escaldaron a 95 °C durante 2 min. Posteriormente, se dejaron escurrir sobre papel absorbente durante 15 min, se envasaron en bolsas de plástico selladas y se almacenaron a 4 °C durante 12 h hasta su secado.

DISEÑO EXPERIMENTAL Y SECADO CONVECTIVO

Se empleó un diseño central compuesto rotatable para evaluar la temperatura de secado ($X_1 = 50\text{--}80\text{ °C}$) y el tiempo de secado ($X_2 = 8\text{--}36\text{ h}$). El diseño comprendió cuatro puntos factoriales, cuatro puntos axiales y cinco repeticiones del punto central, para un total de 13 corridas experimentales

(Tabla 1). En cada corrida se utilizó un lote de 100 g de cáscara pretratada, cortada en piezas de aproximadamente $4 \times 2 \times 0.3$ cm de largo, ancho y espesor, respectivamente. Las muestras se distribuyeron sobre papel encerado colocado en bandejas de acero inoxidable de 80×50 cm de largo y ancho, respectivamente, dejando una separación aproximada de 1 cm entre columnas de muestras. El secado se realizó en una estufa CRAFT HFA-1200 DPT con convección forzada (flujo de aire no especificado por el fabricante).

Tabla 1. Diseño central compuesto para el secado convectivo de la cáscara de mango (*Mangifera indica* L.) cv. Keitt.

Tratamientos	X ₁	X ₂
1	54	12
2	76	12
3	54	32
4	76	32
5	50	22
6	80	22
7	65	8
8	65	36
9	65	22
10	65	22
11	65	22
12	65	22
13	65	22

X₁= Temperatura de secado (°C), X₂= Tiempo de secado (h)

Las cáscaras deshidratadas de cada tratamiento se molieron en un molino Hamilton Beach 80350R hasta obtener un tamaño de partícula <250 µm. Las harinas se envasaron en bolsas de plástico selladas y se almacenaron en refrigeración a 4 °C durante 30 días hasta su análisis. Todos los valores de las variables de respuesta se expresaron en base seca, salvo que se indique lo contrario.

ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA (WAI) E ÍNDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA (WSI)

El WAI y el WSI se determinaron de acuerdo con Ruiz-Armenta et al. (2022). Se suspendieron 2.5 g de harina en 30 mL de agua destilada a 30 °C; la suspensión se agitó a 250 rpm durante 30 min y se centrifugó a $3000 \times g$ y 25 °C durante 10 min. El sedimento se pesó y el WAI se calculó mediante la ecuación 1, expresándose como gramos de gel formado por gramo de muestra. El sobrenadante se transfirió a un recipiente previamente pesado y se secó a 110 °C durante 12 h. El WSI se calculó a partir de los sólidos solubles recuperados mediante la ecuación 2 y se expresó como porcentaje de los sólidos secos iniciales. Las determinaciones se realizaron por triplicado.

$$WAI \left(\frac{\text{g gel formado}}{\text{g muestra}} \right) = \frac{W_g - W_i}{W_s} \quad (1)$$

$$WSI(\%) = \frac{W_F - W_v}{W_s} \times 100 \quad (2)$$

Donde W_g= peso del gel, W_i= peso inicial de la muestra, W_f= peso final (vaso + sólidos secos), W_v= peso del vaso, W_s= peso inicial de la muestra.

ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE ACEITE (OAI) Y DISPERSABILIDAD

El OAI se determinó de acuerdo con Chandra et al. (2015), con algunas modificaciones. Se mezclaron 0.5 g de harina con 3 mL de aceite vegetal (Cristal®), se agitaron en un mezclador de vórtex durante 1 min y se dejaron reposar durante 30 min. Posteriormente, la mezcla se centrifugó a $1600 \times g$ y 25 °C durante 25 min. La cantidad de aceite absorbido se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$OAI = \frac{(V_1 - V_2)}{\text{g muestra}} \quad (3)$$

donde V₁ y V₂ corresponden a los volúmenes inicial y final de aceite, respectivamente. El OAI se expresó en mL de aceite absorbido por gramo de muestra. La determinación se realizó por triplicado.

La dispersabilidad se determinó de acuerdo con Mora-Escobedo et al. (1991). Se suspendió 1 g de harina en 10 mL de agua desionizada y se homogeneizó a 10,000 rpm durante 5 min con un homogeneizador (T18 Basic Ultra-Turrax, IKA, Reino Unido). Posteriormente, la suspensión se dejó reposar durante 30 min. El volumen de la fase que permaneció dispersa se determinó

visualmente y se expresó como porcentaje. Las determinaciones se realizaron por triplicado.

CAROTENOIDES TOTALES

La determinación se realizó mediante el método descrito por Kimura y Rodríguez-Amaya (2004). Se pesó 1 g de muestra, se rehidrató con 5 mL de agua desionizada y se dejó reposar durante 30 min en un agitador Vari-Mix. Posteriormente, se añadieron 10 mL de acetona y la mezcla se homogeneizó durante 15 min con el mismo equipo. La mezcla se filtró al vacío con papel filtro Whatman No. 40. Se recolectó el extracto y el residuo se sometió a una nueva extracción con 5 mL de acetona. Este procedimiento se repitió hasta que el residuo quedó incoloro. A continuación, se transfirió un tercio del volumen del extracto recuperado y se añadieron 7 mL de éter de petróleo y 20 mL de agua destilada, sin agitar para evitar la formación de emulsiones.

La mezcla se dejó reposar durante 15 min para permitir la separación de fases. Se descartó la fase acuosa y se recolectó la fase orgánica de éter de petróleo. Este proceso se repitió dos veces más, utilizando en cada ocasión un tercio del volumen del extracto filtrado. La absorbancia del extracto se midió a 450 nm con un espectrofotómetro (UV-GENESYS modelo 10, serie AQ7-2H7G229001, Thermo Electron Scientific Instruments LLC, Madison, Wisconsin, EE. UU.). El contenido de carotenoides totales se calculó mediante la ecuación 4 y se expresó en µg de carotenoides totales por g de muestra seca:

$$TC \left(\frac{\mu g}{g} \right) = \frac{A_e \cdot V_e \cdot 10^4}{\frac{A_{1\%}}{1cm} \cdot W_s} \quad (4)$$

Donde A_e = Absorbancia del extracto, V_e = Volumen total (mL), $\frac{A_{(1\%)}}{(1cm)}$ = Coeficiente de absorción de carotenoides en éter de petróleo en una celda con 1 cm de longitud (2500), W_s = peso de la muestra (g).

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE LIPOFÍLICA

El extracto de carotenoides obtenido con éter de petróleo se utilizó para determinar la capacidad antioxidante lipofílica. Para generar el radical catión ABTS, se mezcló ABTS con $K_2S_2O_8$ y se incubó durante 16 h en oscuridad, de acuerdo con Re et al. (1999), con ligeras modificaciones. Posteriormente, la solución del radical catión ABTS se ajustó hasta alcanzar una absorbancia de 0.7 ± 0.02 . Se mezcló una alícuota de 75 µL del extracto, o de la solución estándar correspondiente a cada punto de la curva de

calibración, con 2925 µL de la solución de trabajo del radical catión ABTS. La mezcla se dejó reaccionar durante 5 min a temperatura ambiente y se registró la absorbancia a 734 nm con un espectrofotómetro (UV-GENESYS modelo 10, serie AQ7-2H7G229001, Thermo Electron Scientific Instruments LLC, Madison, Wisconsin, EE. UU.). Para el ensayo DPPH (Brand-Williams et al., 1995), se mezclaron 200 µL del extracto con 1800 µL de una solución de DPPH 150 µM en metanol. La mezcla se incubó a temperatura ambiente durante 30 min y se registró la absorbancia a 510 nm con un espectrofotómetro (UV-GENESYS modelo 10, serie AQ7-2H7G229001, Thermo Electron Scientific Instruments LLC, Madison, Wisconsin, EE. UU.). Para ambos ensayos se empleó una curva de calibración de Trolox con concentraciones de 25, 50, 100, 200, 400, 500, 600, 800 y 1000 ppm. Los resultados se expresaron como µmol de equivalentes de Trolox (TE)/100 g de muestra seca.

MODELACIÓN Y OPTIMIZACIÓN MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

Cada variable de respuesta se ajustó inicialmente a un modelo polinómico de segundo orden:

$$Y_k = \beta_{k0} + \beta_{ki} X_i + \beta_{kj} X_j + \beta_{kii} X_i^2 + \beta_{kjj} X_j^2 + \beta_{kij} X_i X_j + \epsilon \quad (5)$$

donde X_i y X_j representan las variables codificadas de temperatura de secado (DT) y tiempo de secado (Dt), respectivamente.

Las variables de respuesta fueron el índice de absorción de agua (WAI), el índice de solubilidad en agua (WSI), el índice de absorción de aceite (OAI), el contenido de carotenoides totales (TC) y la capacidad antioxidante lipofílica determinada mediante los ensayos ABTS (L_{ABTS}) y DPPH (L_{DPPH}). Los criterios de optimización consistieron en maximizar WAI, WSI, TC, L_{ABTS} y L_{DPPH} , y minimizar OAI. Se eliminaron los términos no significativos ($p > 0.10$), respetando la jerarquía del modelo cuando correspondía. La reducción de los modelos se realizó mediante un procedimiento de eliminación regresiva de los términos con $p > 0.10$, manteniendo la jerarquía del modelo durante todo el procedimiento.

Este umbral se utilizó como criterio de selección para obtener modelos parsimoniosos y evitar la eliminación prematura de efectos potencialmente relevantes para describir la superficie de respuesta. El criterio de eliminación se diferenció del nivel de significancia de $p < 0.05$ empleado para la interpretación estadística. La adecuación de los modelos reducidos

se evaluó mediante el análisis de residuos, la prueba de falta de ajuste y la comparación de sus indicadores de bondad de ajuste y capacidad predictiva con los de los modelos completos. Para evaluar la adecuación de los modelos se consideraron el valor p del modelo, la prueba de falta de ajuste, el coeficiente de determinación (R^2), el R^2 ajustado, el R^2 predicho y el coeficiente de variación. La combinación óptima de las variables independientes se obtuvo mediante el método de optimización numérica basado en funciones de deseabilidad. Este método utiliza la media geométrica de las deseabilidades individuales de las variables de respuesta para calcular un valor de deseabilidad global (D), mediante la siguiente ecuación:

$$D = (d_1 * d_2 * d_3 * d_4 * d_5 * d_6)^{\frac{1}{6}} \quad (6)$$

Un valor de deseabilidad global (D) entre 0.6 y 0.8 se considera aceptable, mientras que $D = 1$ representa el óptimo ideal (Ruiz-Armenta et al., 2022). Los análisis se realizaron con el software Design-Expert 7.0.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos se compararon mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, seguido de la prueba de comparación múltiple de Tukey, con un nivel de significancia de $p < 0.05$, utilizando el software Statgraphics Plus 5.1 (Statistical Graphics Corporation, Rockville, MD, EE. UU.). Todas las determinaciones analíticas se realizaron por triplicado.

RESULTADOS Y DISCUSION

ADECUACIÓN DE LOS MODELOS

Los seis modelos reducidos fueron estadísticamente significativos ($p < 0.0001$) y no presentaron falta de ajuste (Tabla 2). Los coeficientes de determinación variaron de 0.8619 para WAI a 0.9466 para WSI, mientras que los valores de R^2 predicho oscilaron entre 0.7808 y 0.8044. Para todas las variables de respuesta, la diferencia entre el R^2 ajustado y el R^2 predicho fue inferior a 0.20, y el coeficiente de variación fue menor al 8%. En conjunto, estos indicadores estadísticos muestran que los modelos describieron adecuadamente la variabilidad de las respuestas dentro de la región experimental. Las ecuaciones de regresión obtenidas se presentan a continuación (7-12), mientras que sus correspondientes gráficas de contorno se muestran en la Figura 1.

$$Y_{WAI} = 6.52 - 0.24 X_1 - 0.14 X_2 \quad (7)$$

$$Y_{WSI} = 14.52 + 1.60 X_1 + 1.40 X_2 + 5.77 X_1^2 + 4.13 X_2^2 \quad (8)$$

$$Y_{OAI} = 1.25 + 0.079 X_1 - 0.049 X_2 + 0.17 X_1 * X_2 \quad (9)$$

$$Y_{TC} = 42.24 - 3.46 X_1 - 0.17 X_2 \quad (10)$$

$$Y_{LABTS} = 587.83 - 91.76 X_1 - 3.29 X_2 \quad (11)$$

$$Y_{LDPPH} = 750.22 - 76.49 X_1 - 3.49 X_2 - 47.69 X_1^2 + 39.41 X_2^2 \quad (12)$$

A partir de estos modelos matemáticos se generaron gráficas de superficie de respuesta para cada variable evaluada (Figura 1 A-F). Estas gráficas muestran el efecto de los factores temperatura de secado ($X_1 = DT$) y tiempo de secado ($X_2 = Dt$) sobre WAI, WSI, OAI, TC, L_{ABTS} y L_{DPPH} . Las regiones con los valores más bajos de cada respuesta se representan en azul, mientras que aquellas con los valores más altos se muestran en rojo.

HIDRATACIÓN, SOLUBILIDAD Y ABSORCIÓN DE ACEITE

El WAI varió de 6.1597 a 6.9823 g de gel formado/g de muestra y disminuyó conforme aumentaron la temperatura y el tiempo de secado. El valor experimental más alto se obtuvo a 54 °C/12 h, mientras que el más bajo se registró a 80 °C/22 h (Tabla 3). La absorción de agua podría estar determinada por la abundancia y accesibilidad de los sitios hidrofílicos, la porosidad de la matriz, el tamaño de partícula y la organización estructural de los polisacáridos asociados con la fibra (Kalla-Bertholdt et al., 2023). Los tratamientos termomecánicos pueden desestructurar las matrices compactas de la fibra y mejorar sus propiedades de hidratación (Zhai et al., 2022). Por el contrario, las temperaturas de secado elevadas o los tiempos prolongados pueden dañar la red de fibra y favorecer el colapso de los poros (Sungsinchai et al., 2017). Asimismo, las asociaciones entre fibrillas de celulosa inducidas por el secado, en las que intervienen puentes de hidrógeno, pueden restringir aún más la rehidratación mediante el fenómeno de hornificación (Luo & Zhu, 2011). Por lo tanto, los efectos negativos observados en este estudio sugieren que, en los niveles superiores de temperatura y tiempo, los cambios estructurales predominaron sobre cualquier mejora en la accesibilidad de los sitios de unión al agua.

Los valores de WAI observados se ubicaron dentro o ligeramente por encima del intervalo de 4.68-6.05 g de gel formado/g de muestra reportado por Sogi et al. (2013) para harinas de cáscara de mango obtenidas mediante liofilización y secado en gabinete, al vacío y por infrarrojos.

Tabla 2. Coeficientes de regresión en variables codificadas e indicadores estadísticos de adecuación de los modelos de respuesta.

Coeficiente	WAI	WSI	OAI	TC	L _{ABTS}	L _{OPPH}
Intercepto						
β_0	6.52	14.52	1.25	42.24	587.83	750.22
Lineal						
β_1	-0.24***	1.60**	0.079***	-3.46***	-91.76***	-76.49***
β_2	-0.14**	1.40**	-0.049***	NS	-3.29***	NS
Interacción						
$\beta_1\beta_2$	NS	NS	0.17***	NS	NS	NS
Cuadrático						
β_1^2	NS	5.77***	NS	NS	NS	-47.69***
β_2^2	NS	4.13***	NS	NS	NS	39.41***
p_{model}	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
R^2	0.8619	0.9466	0.9097	0.8749	0.8769	0.9374
$R^2_{ajustada}$	0.8343	0.9199	0.8796	0.8499	0.8523	0.9061
$R^2_{predicha}$	0.7929	0.8044	0.7857	0.8009	0.7808	0.8042
Falta de ajuste	0.5994	0.2695	0.6317	0.8095	0.5148	0.4586
CV(%)	1.55	7.61	3.66	2.77	5.23	3.41

WAI= índice de absorción de agua, WSI= índice de solubilidad en agua, OAI= índice de absorción de aceite, TC= Carotenoides totales, L_{ABTS}= ABTS lipofílica, L_{OPPH}= DPPH lipofílica. NS= no significativa. *p < 0.05; ** p < 0.01; *** p < 0.001.

Esta comparación respalda la elevada capacidad de hidratación de la harina de cáscara de mango Keitt, aunque no demuestra su superioridad frente a otros métodos de secado, ya que el cultivar, el pretratamiento, el tamaño de partícula, la composición de la fibra y las condiciones analíticas pueden influir considerablemente en la absorción de agua. De manera similar, [Marçal et al. \(2026\)](#) demostraron que el secado con aire caliente modificó las propiedades de interacción de la cáscara de mango con el agua y el aceite, aun cuando el contenido de fibra dietética total se conservó en gran medida. Por consiguiente, es más probable que los cambios en el WAI se relacionen con la reorganización de la matriz de la pared celular y las modificaciones en la accesibilidad de los poros que únicamente con la concentración de fibra.

El WSI varió de 12.784 a 29.512% y estuvo influido por los términos lineales y cuadráticos positivos de ambos factores de secado (Tablas 2 y 3). Por lo tanto, la superficie de respuesta muestra una relación no lineal, en lugar de un incremento simplemente proporcional a la temperatura o al tiempo. La desestructuración de la matriz inducida por el calor puede liberar azúcares solubles, sustancias pécticas y otros componentes de bajo peso molecular; en cambio, un calentamiento excesivo puede promover la agregación, el colapso estructural o la formación de asociaciones menos solubles. La variación relativamente amplia entre las repeticiones del punto central (12.784-16.041%) debe considerarse al interpretar esta respuesta, ya que contribuye directamente a la estimación del error puro.

También se han reportado diferencias en la solubilidad de las harinas de cáscara de mango en función del secado. [Sogi et al. \(2013\)](#) observaron la

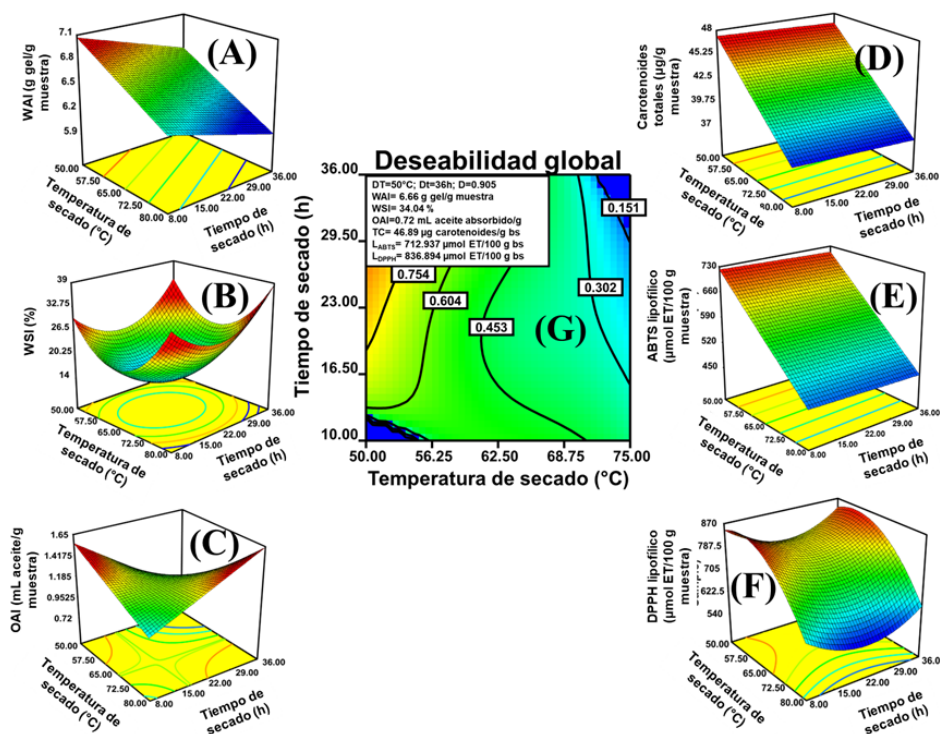


Figura 1. Gráficas de contorno predichas por los modelos para (A) índice de absorción de agua, (B) índice de solubilidad en agua, (C) índice de absorción de aceite, (D) contenido de carotenoides totales, (E) capacidad antioxidante lipofílica determinada mediante ABTS, (F) capacidad antioxidante lipofílica determinada mediante DPPH y (G) deseabilidad global, con la combinación óptima de los niveles de los factores y los valores predichos de las respuestas.

mayor solubilidad en el material liofilizado, mientras que Marçal et al. (2026) documentaron cambios en las propiedades tecnológicas después del secado con aire caliente. Estos hallazgos respaldan la interpretación del WSI como una respuesta que integra los efectos de la composición y de los cambios estructurales inducidos por el secado, y no como una medida directa del contenido de fibra dietética soluble. Por lo tanto, en el presente diseño, los valores más altos predichos cerca de los límites experimentales deben interpretarse dentro de la región de temperatura y tiempo evaluada, sin extrapolarlos a condiciones más severas.

El OAI varió de 0.9831 a 1.4350 mL de aceite absorbido/g de muestra (Tabla 3) y estuvo influido por los efectos lineales de la temperatura y el tiempo, así como por su interacción. La retención de aceite puede involucrar tanto el

atrapamiento físico en poros y capilares como las interacciones con sitios no polares expuestos. La interacción significativa indica que estos mecanismos dependieron de la combinación de temperatura y tiempo de exposición térmica, y no del efecto independiente de cada factor de secado. Debido a que no se caracterizaron detalladamente la composición, la porosidad y la distribución del tamaño de partícula, la respuesta observada no puede atribuirse a un único mecanismo estructural.

El intervalo experimental de OAI fue superior al valor de 0.11 mL de aceite absorbido/g de muestra reportado por Dereje y Girma (2020) para cáscara de mango cv. Keitt deshidratada a 50 °C durante 90 min en un secador de lecho fluidizado. Las diferencias en el tipo de aceite, las condiciones de centrifugación, el tamaño de partícula, el cultivar y las proporciones de

Tabla 3. Respuestas experimentales del secado convectivo de la cáscara de mango (*Mangifera indica* L.) cv. Keitt.

Tratamientos	WAI	WSI	OAI	TC	L _{ABTS}	L _{DPPH}
1	6.9823	20.504	1.3984	46.905	658.72	795.91
2	6.5025	23.097	1.1540	38.588	534.36	659.11
3	6.7005	22.549	0.9831	45.030	668.94	809.87
4	6.1752	26.548	1.4350	37.523	467.00	634.52
5	6.8208	25.097	1.1066	46.648	725.94	777.92
6	6.1597	29.512	1.4040	38.273	437.62	565.93
7	6.7826	22.005	1.3637	42.209	609.03	852.23
8	6.4006	26.064	1.1831	43.320	630.82	840.00
9	6.5771	12.784	1.2111	40.313	619.49	731.50
10	6.3788	13.716	1.2733	41.200	544.17	751.85
11	6.3198	14.689	1.3067	42.156	560.48	768.10
12	6.5341	16.041	1.1817	43.021	602.81	779.58
13	6.4495	15.363	1.2478	43.900	582.44	720.05

WAI= índice de absorción de agua (g gel formado/g muestra seca), WSI= índice de solubilidad en agua (%), OAI= índice de absorción de aceite (mL aceite absorbido/g muestra), TC= carotenoides totales (µg of carotenoides totales/g muestra seca), L_{ABTS}= ABTS lipofílica (µmol equivalente de Trolox (ET)/100 g muestra seca), L_{DPPH}= DPPH lipofílica (µmol equivalente de Trolox (ET)/100 g muestra seca).

proteína, lignina y fibra insoluble podrían explicar esta diferencia. Además, un OAI más alto no es necesariamente favorable: puede contribuir a la retención de compuestos de sabor y mejorar la sensación en boca en algunas formulaciones, pero también puede incrementar la cantidad de aceite retenido por el ingrediente y potencialmente susceptible a la oxidación. Por lo tanto, la relevancia tecnológica de los valores obtenidos en este estudio debe evaluarse en una matriz alimentaria específica, bajo condiciones realistas de procesamiento y almacenamiento.

CAROTENOIDES TOTALES Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE LIPOFÍLICA

El contenido de carotenoides totales varió de 37.523 a 46.905 µg de carotenoides totales/g de muestra seca. La temperatura de secado ejerció un marcado efecto lineal negativo, mientras que el tiempo de secado no fue significativo en el modelo reducido. Los carotenoides son susceptibles a la oxidación y a la isomerización geométrica durante la exposición al calor, al oxígeno y a la luz; por ello, el coeficiente negativo de la temperatura concuerda con reportes previos de pérdidas de carotenoides durante el

secado térmico de matrices de mango (Sogi et al., 2013; Marçal & Pintado, 2021; Akther et al., 2023). Por consiguiente, en las condiciones estudiadas, la temperatura tuvo mayor influencia que la duración del tratamiento sobre el contenido de carotenoides determinado analíticamente.

La respuesta de los carotenoides al secado depende en gran medida de la matriz. De Ancos et al. (2018) demostraron que los carotenoides individuales respondieron de manera diferente al secado con aire caliente y a la liofilización en cáscara y pasta de mango, incluso dentro del mismo cultivar, lo que evidencia que los efectos del procesamiento no pueden generalizarse entre subproductos. Fratianni et al. (2020) también reportaron una mayor conservación de carotenoides en frutos de mango deshidratados a 50 °C que bajo condiciones térmicas más severas. Estas observaciones respaldan la selección de la región de menor temperatura en la presente optimización. No obstante, la determinación espectrofotométrica refleja la absorbancia conjunta de los pigmentos extraídos y no permite distinguir entre la degradación, la isomerización *cis-trans* y las modificaciones en la extractabilidad. Por lo tanto, el coeficiente de temperatura debe interpretarse como un efecto neto sobre el contenido de carotenoides totales determinado analíticamente y no como una descripción de la cinética de degradación de un compuesto específico.

La capacidad antioxidante lipofílica determinada mediante ABTS (L_{ABTS}) varió de 437.62 a 725.94 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ de muestra seca y disminuyó al aumentar ambos factores de secado, siendo mayor el efecto de la temperatura. La capacidad antioxidante lipofílica determinada mediante DPPH (L_{DPPH}) osciló entre 565.93 y 852.23 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$ de muestra seca y presentó efectos cuadráticos significativos de la temperatura y el tiempo. Aunque ambos ensayos estiman la capacidad de captación de radicales libres, difieren en la naturaleza química del radical, el medio de reacción, la accesibilidad estérica y la cinética de reacción. Por lo tanto, sus superficies de respuesta deben considerarse descripciones complementarias del extracto lipofílico y no mediciones intercambiables.

Los efectos negativos de la temperatura sobre el contenido de carotenoides totales, L_{ABTS} y L_{DPPH} sugieren que la pérdida o transformación de los pigmentos contribuyó a disminuir la capacidad de captación de radicales libres de la fracción lipofílica. Sin embargo, la determinación de carotenoides totales no permite diferenciar los compuestos individuales ni descartar la contribución de otros antioxidantes lipofílicos; por ello, se requiere una caracterización del perfil cromatográfico para identificar los

componentes retenidos, transformados o degradados. Las relaciones entre el contenido de compuestos fitoquímicos y la actividad antioxidante también dependen de las condiciones de secado, los procedimientos de extracción y los fundamentos químicos de cada ensayo (Akther et al., 2023).

Las diferencias entre las superficies de respuesta de ABTS y DPPH pueden reflejar sus distintas reactividades: ABTS reacciona con diversos compuestos en medios acuosos y orgánicos, mientras que el ensayo DPPH se realiza habitualmente en medios orgánicos y es sensible a la accesibilidad molecular y al tiempo de reacción. De acuerdo con Floegel et al. (2011), estas diferencias no son contradictorias, sino que pueden indicar cambios en la composición o accesibilidad de los antioxidantes que cada ensayo detecta de manera distinta. Ninguno de los ensayos permite identificar los compuestos responsables de la actividad antioxidante.

OPTIMIZACIÓN MULTIRRESPUESTA

La función de deseabilidad permitió maximizar simultáneamente WAI, WSI, TC, L_{ABTS} y L_{DPPH} , y minimizar OAI. La mayor deseabilidad global predicha ($D = 0.905$) se obtuvo a 50 °C/36 h (Fig. 1G). De acuerdo con Ruiz-Armenta et al. (2022), un valor de deseabilidad global (D) entre 0.6 y 0.8 se considera aceptable, mientras que $D = 1$ representa el óptimo ideal; por lo tanto, la deseabilidad global obtenida en este trabajo puede considerarse muy buena y cercana al ideal. Esta condición representa una solución de compromiso entre las respuestas: la menor temperatura favoreció la retención de carotenoides y de la capacidad antioxidante lipofílica, mientras que el mayor tiempo de secado contribuyó al objetivo de maximizar el WSI. A la condición de 50 °C/36 h, los modelos predijeron un WAI de 6.66 g de gel formado/g de muestra, un WSI de 34.04%, un OAI de 0.72 mL de aceite absorbido/g de muestra, un contenido de TC de 46.89 μg de carotenoides totales/g de muestra seca, una capacidad L_{ABTS} de 712.94 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$ de muestra seca y una capacidad L_{DPPH} de 836.89 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$ de muestra seca.

La deseabilidad global es una medida relativa del desempeño dentro de la región experimental definida y conforme a los criterios de optimización seleccionados; no implica que cada variable de respuesta haya alcanzado su óptimo individual a 50 °C/36 h. Esta distinción es importante porque las respuestas presentaron tendencias diferentes y, en algunos casos, opuestas. Por lo tanto, la relevancia práctica de la condición seleccionada depende de la importancia relativa asignada a cada respuesta y de la

concordancia entre los valores experimentales y los predichos. Presentar las predicciones individuales junto con la deseabilidad global permite explicitar la solución de compromiso adoptada e identificar los atributos que contribuyeron a seleccionar la condición final.

PROPIEDADES TECNO-FUNCIONALES DE LA HARINA SELECCIONADA

El secado a 50 °C/36 h modificó sustancialmente las propiedades tecnológicas de la harina de cáscara de mango (Tabla 4). En comparación con la harina sin tratar, el WAI aumentó de 1.37 a 6.77 g de gel formado/g de muestra, el WSI de 15.32 a 33.41% y la dispersabilidad de 36.66 a 64.16%. El WAI de la harina obtenida en condiciones óptimas fue comparable con los valores reportados para la fibra dietética obtenida de cáscara de mango Hilacha deshidratada mediante secado convectivo y para harinas liofilizadas de distintos cultivares de mango (Hincapié et al., 2014; Serna-Cock et al., 2015). Los incrementos en la hidratación y la dispersabilidad sugieren una mejor interacción con los sistemas acuosos y podrían facilitar su incorporación en alimentos líquidos o semisólidos. No obstante, su desempeño en un producto formulado no puede inferirse únicamente a partir de estas determinaciones.

El OAI también aumentó, de 0.19 a 0.73 mL de aceite absorbido/g de muestra. Este resultado no contradice el criterio de optimización, ya que la minimización del OAI se realizó entre los valores predichos para las harinas deshidratadas dentro de la región experimental, sin imponer como restricción que fueran inferiores al valor de la harina sin tratar. El secado y la molienda podrían haber expuesto sitios hidrofóbicos o modificado la estructura capilar, incrementando así la retención de aceite. Esta explicación es provisional, debido a que no se determinaron los cambios asociados en la composición, la porosidad y la distribución del tamaño de partícula.

En conjunto, los incrementos en WAI, WSI, OAI y dispersabilidad indican una modificación considerable de las interacciones entre las partículas de harina y los disolventes. Entre los posibles mecanismos involucrados se encuentran la ruptura de la pared celular, la redistribución de los sólidos solubles, los cambios en la estructura porosa y la exposición de sitios de unión polares y no polares. De manera similar, Marçal et al. (2026) reportaron que el secado con aire caliente modificó las propiedades tecnológicas de la cáscara de mango, acompañado de cambios modestos en la composición de los carbohidratos constituyentes de la fibra, lo que refuerza la idea de

que la composición global por sí sola no permite predecir la funcionalidad. Un WAI y una dispersabilidad mayores podrían ser ventajosos en formulaciones hidratadas, mientras que un OAI más alto podría ser relevante cuando se busca retener compuestos lipofílicos de sabor. Estas posibles aplicaciones deben confirmarse en sistemas alimentarios bajo condiciones apropiadas de pH, fuerza iónica, cizallamiento y almacenamiento.

RETENCIÓN DE ATRIBUTOS LIPOFÍLICOS E IMPLICACIONES PARA LA VALORIZACIÓN

Con respecto a la harina de cáscara sin tratar, el procesamiento a 50 °C/36 h permitió retener el 75.0% de los carotenoides totales (51.88 frente a 38.93 µg de carotenoides totales/g de muestra seca), el 83.9% de la capacidad L_{ABTS} (880.78 frente a 739.13 µmol ET/100 g de muestra seca) y el 85.8% de la capacidad L_{DPPH} (918.54 frente a 788.13 µmol ET/100 g de muestra seca) (Tabla 4). Por lo tanto, el secado no incrementó la fracción antioxidante lipofílica, sino que limitó las pérdidas asociadas con el procesamiento, al tiempo que mejoró diversas propiedades tecnológicas. Esta distinción permite describir con mayor precisión el desempeño de la condición seleccionada.

La evidencia de estudios previos indica que el contenido de carotenoides puede ser más sensible al secado térmico que el contenido global de compuestos fenólicos, aunque la magnitud y la dirección de los cambios dependen de la matriz de mango. De Ancos et al. (2018) observaron respuestas diferentes de los carotenoides en cáscara y pasta sometidas a los mismos tratamientos de secado, mientras que Fratianni et al. (2020) identificaron la temperatura como un factor determinante de la retención de carotenoides en frutos de mango deshidratados. Por lo tanto, la retención del 75.0% observada en este estudio debe considerarse un resultado específico del proceso aplicado a la cáscara de mango Keitt. Asimismo, la retención del 83.9-85.8% de la capacidad antioxidante lipofílica indica una pérdida funcional limitada, pero no demuestra la conservación de todas las moléculas que contribuyen a dicha capacidad.

Las diferencias entre cultivares en los perfiles de carotenoides y compuestos fenólicos de la cáscara de mango también limitan la extrapolación directa de los valores absolutos entre variedades u orígenes geográficos (Marcillo-Parra et al., 2021).

Tabla 4. Propiedades tecno-funcionales, contenido de carotenoides totales y capacidad antioxidante lipofílica de las harinas de cáscara de mango (*Mangifera indica* L.) cv. Keitt sin tratar y deshidratada en condiciones óptimas.

Propiedad	Sin tratar	Harina optimizada (50°C/36 h)	Valores predichos	Cambio (%)
Tecno-funcionales				
WAI (g gel formado/g muestra)	1.37 ± 0.06 ^b	6.77 ± 0.31 ^a	6.66 ± 0.55 ^a	+394.2
WSI (%)	15.32 ± 0.59 ^b	33.41 ± 0.39 ^a	34.04 ± 10.26 ^a	+118.1
OAI (mL aceite absorbido/g muestra)	0.19 ± 0.01 ^b	0.73 ± 0.07 ^a	0.72 ± 0.31 ^a	+284.2
Dispersabilidad (%)	36.66 ± 1.44 ^b	64.16 ± 1.44 ^a	NA	+75.0
TC (µg carotenoides/g muestral seca)	51.88 ± 0.53 ^a	38.93 ± 1.71 ^b	46.89 ± 6.41 ^{ab}	
Actividad antioxidante				
L _{ABTS} (µmol ET/100 g muestral seca)	880.78 ± 31.29 ^a	739.13 ± 24.54 ^b	712.94 ± 168.63 ^{ab}	-16.1
L _{DPPH} (µmol ET/100 g muestral seca)	918.54 ± 32.01 ^a	788.13 ± 23.53 ^b	836.89 ± 166.42 ^{ab}	-14.2

^{a-b} Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de una misma fila. NA= No aplicable, WAI= índice de absorción de agua, WSI= índice de solubilidad en agua; OAI= índice de absorción de aceite; TC= carotenoides totales; L_{ABTS}= capacidad antioxidante lipofílica evaluada por el método ABTS; L_{DPPH}= capacidad antioxidante lipofílica evaluada por el método DPPH.

En conjunto, el equilibrio observado entre las respuestas respalda el uso de la optimización multirrespuesta. Seleccionar las condiciones únicamente para maximizar el WSI podría favorecer temperaturas más elevadas y una mayor pérdida de compuestos fitoquímicos, mientras que una selección basada exclusivamente en los carotenoides podría pasar por alto la funcionalidad de la harina y la finalización del proceso de secado. Las optimizaciones futuras deben incorporar el contenido de humedad final o la actividad de agua, el rendimiento del secado, el color y el consumo energético. Estas variables son necesarias para determinar si la condición seleccionada a escala de laboratorio puede trasladarse a un proceso de obtención de un ingrediente seguro, estable y económicamente viable (Marçal & Pintado, 2021; Gupta et al., 2022; Kučuk et al., 2024).

CONCLUSIONES

La temperatura y el tiempo de secado afectaron significativamente las propiedades tecno-funcionales y los atributos antioxidantes de la fracción lipofílica de la harina de cáscara de mango Keitt. Los modelos de respuesta describieron adecuadamente la región experimental, y la optimización multirrespuesta permitió seleccionar la combinación de 50 °C/36 h como la mejor solución de compromiso predicha ($D = 0.905$). En comparación con la harina sin tratar, la harina obtenida en condiciones óptimas presentó mayor absorción de agua, solubilidad en agua, absorción de aceite y dispersabilidad, al tiempo que retuvo el 75.0% de los carotenoides totales y el 83.9-85.8% de la capacidad antioxidante lipofílica. En general, el secado convectivo a temperatura moderada mejoró las propiedades de hidratación

y dispersión de la harina de cáscara de mango Keitt, a la vez que limitó las pérdidas de los atributos antioxidantes de su fracción lipofílica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica del Mar y la Sierra y a la Universidad Autónoma de Sinaloa por facilitar las instalaciones necesarias para la realización de este trabajo.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener intereses financieros ni de otra índole relevantes que revelar.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron ChatGPT (OpenAI) para la revisión lingüística, la verificación del formato de las referencias y la mejora de la claridad de la estructura del texto. Posteriormente, los autores revisaron y editaron todo el contenido elaborado con apoyo de inteligencia artificial y asumen plena responsabilidad por la exactitud científica y la integridad del manuscrito final.

REFERENCIAS

- Ajila, C. M., & Prasada-Rao, U. J. S. (2013). Mango peel dietary fibre: Composition and associated bound phenolics. *Journal of Functional Foods*, 5(1), 444-450. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.11.017>
- Akther, S., Jothi, J. S., Badsha, M. R., Rahman, M. M., Das, G. B., & Alim, M. A. (2023). Drying methods effect on bioactive compounds, phenolic profile, and antioxidant capacity of mango powder. *Journal of King Saud University - Science*, 35(1), 102370. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102370>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- de Ancos, B., Sánchez-Moreno, C., Zacarías, L., Rodrigo, M. J., Sáyago-Ayerdi, S., Blancas-Benítez, F. J., Domínguez-Avila, J. A., & González-Aguilar, G. A. (2018). Effects of two different drying methods (freeze-drying and hot air-drying) on the phenolic and carotenoid profile of 'Ataulfo' mango by-products. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12, 2145-2157. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9830-4>
- Dereje, B., & Girma, A. (2020). Effect of pretreatments and drying methods on the rehydration ratio of dried mango (*Mangifera indica* L.) slices and evaluation of some properties of its peel flours. *Food Science and Quality Management*, 96, 1-10. <https://doi.org/10.7176/FSQM/96-01>
- Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214-219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- Dorta, E., Lobo, M. G., & González, M. (2012). Using drying treatments to stabilise mango peel and seed: Effect on antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 45(2), 261-268. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.08.016>
- Floegel, A., Kim, D. O., Chung, S. J., Koo, S. I., & Chun, O. K. (2011). Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(7), 1043-1048. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.01.008>
- Fратиanni, A., Adiletta, G., Di Matteo, M., Panfili, G., Niro, S., Gentile, C., Farina, V., Cinquanta, L., & Corona, O. (2020). Evolution of carotenoid content, antioxidant activity and volatiles compounds in dried mango fruits (*Mangifera indica* L.). *Foods*, 9(10), 1424. <https://doi.org/10.3390/foods9101424>
- Gupta, A. K., Gurjar, P. S., Beer, K., Pongener, A., Ravi, S. C., Singh, S., Verma, A., Singh, A., Thakur, M., Tripathy, S., & Verma, D. K. (2022). A review on valorization of different byproducts of mango (*Mangifera indica* L.) for functional food and human health. *Food Bioscience*, 48, 101783. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101783>
- Hincapié, G. A., Vásquez, D. C., Galicia, V. S., & Hincapié, C. A. (2014). Propiedades técnico-funcionales de la fibra dietaria de cáscaras de mango variedad Hilacha (*Mangifera indica* L.): Efecto del secado por convección. *Bioteecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(1), 153-160. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/bioteecnologia/article/view/311>

- Jahurul, M. H. A., Zaidul, I. S. M., Ghafoor, K., Al-Juhaimi, F. Y., Nyam, K. L., Norulaini, N. A. N., Sahena, F., & Mohd Omar, A. K. (2015). Mango (*Mangifera indica* L.) by-products and their valuable components: A review. *Food Chemistry*, 183, 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.046>
- Kalla-Bertholdt, A.M., Baier, A. K., & Rauh, C. (2023). Potential of modification of techno-functional properties and structural characteristics of citrus, apple, oat, and pea dietary fiber by high-intensity ultrasound. *Foods*, 12(19), 3663. <https://doi.org/10.3390/foods12193663>
- Rodriguez-Amaya, D. B., & Kimura, M. (2004). HarvestPlus handbook for carotenoid analysis. HarvestPlus Technical Monograph 2. International Food Policy Research Institute and International Center for Tropical Agriculture, Washington, DC and Cali.
- Kučuk, N., Primožič, M., Kotnik, P., Knez, Ž., & Leitgeb, M. (2024). Mango peels as an industrial by-product: A sustainable source of compounds with antioxidant, enzymatic, and antimicrobial activity. *Foods*, 13(4), 553. <https://doi.org/10.3390/foods13040553>
- Larrauri, J. A., Rupérez, P., Borroto, B., & Saura-Calixto, F. (1996). Mango peels as a new tropical fibre: Preparation and characterization. *LWT – Food Science and Technology*, 29(8), 729–733. <https://doi.org/10.1006/fstl.1996.0113>
- Luo, X., & Zhu, J. Y. (2011). Effects of drying-induced fiber hornification on enzymatic saccharification of lignocelluloses. *Enzyme and Microbial Technology*, 48(1), 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2010.09.014>
- Marçal, S., & Pintado, M. (2021). Mango peels as food ingredient/additive: Nutritional value, processing, safety and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 472–489. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.012>
- Marçal, S., Vilas-Boas, A. A., Campos, D. A., & Pintado, M. (2026). Effect of freeze drying, hot air drying, and hot air drying preceded by freezing on phytochemical composition, antioxidant capacity, and technological properties of mango peels. *Foods*, 15(2), 333. <https://doi.org/10.3390/foods15020333>
- Marcillo-Parra, V., Anaguano, M., Molina, M., Tupuna-Yerovi, D. S., & Ruales, J. (2021). Characterization and quantification of bioactive compounds and antioxidant activity in three different varieties of mango (*Mangifera indica* L.) peel from the Ecuadorian region using HPLC-UV/VIS and UPLC-PDA. *NFS Journal*, 23, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.02.001>
- Mora-Escobedo, R., Paredes-López, O., & Gutiérrez-López, G. F. (1991). Effect of germination on the rheological and functional properties of amaranth seeds. *LWT – Food Science and Technology*, 24(3), 241–244.
- Ruiz-Armenta, X. A., Ruiz-Armenta, J. E., Espinoza-Moreno, R. J., Gutiérrez-Dorado, R., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. J., & Gómez-Favela, M. A. (2022). Use of sesame by-product and optimized extrusion to obtain a functional flour with improved techno-functional, nutritional and antioxidant properties. *Acta Universitaria*, 32, e3494. <http://doi.org/10.15174.au.2022.3494>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Serna-Cock, L., Torres-León, C., & Ayala-Aponte, A. (2015). Evaluación de polvos alimentarios obtenidos de cáscaras de mango (*Mangifera indica*) como fuente de ingredientes funcionales. *Información Tecnológica*, 26(2), 41–50. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000200006>
- Sogi, D. S., Siddiq, M., Greiby, I., & Dolan, K. D. (2013). Total phenolics, antioxidant activity, and functional properties of ‘Tommy Atkins’ mango peel and kernel as affected by drying methods. *Food Chemistry*, 141(3), 2649–2655. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.053>
- Sungsinchai, S., Niamnuy, C., Jaree, A., & Devahastin, S. (2017). Influences of pretreatment and drying methods on composition, micro/molecular structures and some health-related functional characteristics of dietary fibre powder from orange pulp residues. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(10), 2217–2229. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13501>
- Zhai, X., Ao, H., Li, W., Zheng, J., Li, X., & Ren, D. (2022). Physicochemical and structural properties of dietary fiber from *Rosa roxburghii* pomace by steam explosion. *Journal of Food Science and Technology*, 59, 2381–2391. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05254-7>