










Impacto del secado y la extracción asistida por ultrasonidos en el contenido fenólico total de pulpa de nopal (*Opuntia ficus*)

Impact of drying and ultrasound-assisted extraction on total phenolic content of cactus pear (*Opuntia ficus*) pulp

-  [Isla-Cárdenas, Ariana Metis¹](#)
-  [Juárez-Crisanto, Bravand Yean Pierre¹](#)
-  [Arana-Torres, Nancy Maribel¹](#)
-  [Ruiz-Flores, Luis Alberto¹](#)
-  [Muñoz-More, Henry Daniel¹](#)
-  [Nole-Jaramillo, Juliana Maricielo¹](#)
-  [Espinoza-Espinoza, Luis Alfredo¹](#)
-  [Cornelio-Santiago, Heber Peleg¹](#)
-  [Valdiviezo-Marcelo, Jaime¹](#)

¹Universidad Nacional de Frontera, Sullana, Piura, Perú.

Recibido: 27 Nov. 2024 | Aceptado: 28 Nov. 2024 | Publicado: 07 Ene. 2024

Autor de correspondencia*: jvaldiviezom@unf.edu.pe

Cómo citar este artículo: Valdiviezo-Marcelo, J. & Isla-Cárdenas, A.M. & Juárez-Crisanto, B.Y.P. & Arana-Torres, N.M. & Ruiz-Flores, L.A. & Muñoz-More, H.D. & Nole-Jaramillo, J.M. & Espinoza-Espinoza, L.A. & Cornelio-Santiago, H.P. (2024). Impacto del secado asistida por ultrasonidos en el contenido fenólico total de pulpa de nopal (*Opuntia ficus*). *Revista Científica Aypate*, 3(4), 42–54. <https://doi.org/10.57063/ricay.v3i4.119>

RESUMEN

Introducción: La pulpa de nopal (*Opuntia ficus*) contiene valiosos compuestos bioactivos, incluyendo compuestos fenólicos. Este estudio investigó el efecto de la temperatura de secado y la extracción asistida por ultrasonidos (EAU) sobre el contenido fenólico total (TPC) de cladodios de nopal.

Métodos: Se secaron láminas de cladodios de nopal por aire caliente a 50, 60, 70 y 80°C. Las muestras secas se sometieron a EAU a frecuencias de 37 y 80 kHz durante 20 y 30 minutos. Se realizó también una extracción convencional por agitación. El TPC se determinó mediante el método de Folin-Ciocalteu. Se aplicó un diseño factorial 3A×2B×3C y se analizaron los datos mediante ANOVA y prueba de Tukey.

Resultados: Se observaron interacciones significativas entre las variables estudiadas sobre el TPC extraído ($p < 0.05$). El mayor contenido fenólico (265.37 ± 10.08 mg GAE/100g) se obtuvo con una temperatura de secado de 50°C, frecuencia ultrasónica de 80 kHz y 20 minutos de tratamiento. La EAU propició una mayor recuperación de TPC comparado con la extracción convencional. El incremento de la temperatura de secado de 50°C a 70°C resultó en una disminución del 69% en el TPC extraído.

Discusión: Los resultados demuestran que tanto la temperatura de secado como los parámetros de EAU influyen significativamente en la extracción de compuestos fenólicos de cladodios de nopal. La temperatura de secado de 50°C y tiempos cortos de EAU (20 min) fueron más efectivos para la extracción de TPC. Temperaturas más altas pueden degradar

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de atribución de Creative Commons, que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se cite debidamente la obra original.



los compuestos fenólicos. La optimización de estas condiciones permitirá maximizar la obtención de compuestos bioactivos, lo cual tiene implicaciones importantes para su aplicación en la industria alimentaria.

Palabras clave: Compuestos bioactivos, cladodios de nopal, EAU, secado por aire caliente, condiciones de extracción.

ABSTRACT

Introduction: Cactus pear pulp (*Opuntia ficus*) contains valuable bioactive compounds, including phenolic compounds. This study investigated the effect of drying temperature and ultrasound-assisted extraction (UAE) on the total phenolic content (CPT) of cactus pear cladodes.

Methods: Cactus pear cladode slices were hot air dried at 50, 60, 70 and 80°C. Dried samples were subjected to EAU at frequencies of 37 and 80 kHz for 20 and 30 minutes. Conventional extraction by agitation was also performed. TPC was determined using the Folin-Ciocalteu method. A 3A×2B×3C factorial design was applied, and data were analyzed using ANOVA and Tukey's test.

Results: Significant interactions were observed between the studied variables on the extracted CPT ($p < 0.05$). The highest phenolic content (265.37 ± 10.08 mg GAE/100g) was obtained with a drying temperature of 50°C, ultrasonic frequency of 80 kHz, and 20 minutes of treatment. UAE led to a higher recovery of CPT compared to conventional extraction. Increasing the drying temperature from 50°C to 70°C resulted in a 69% decrease in extracted CPT.

Discussion: The results demonstrate that both drying temperature and EAU parameters significantly influence the extraction of phenolic compounds from cactus pear cladodes. A drying temperature of 50°C and short UAE times (20 min) were more effective for CPT extraction. Higher temperatures may degrade phenolic compounds. Optimization of these conditions will maximize the obtaining of bioactive compounds, which has important implications for their application in the food industry.

Keywords: Bioactive compounds, ctus cladodes, UAE, hot air drying, conditions for extraction.

1. INTRODUCCIÓN

El nopal (*Opuntia ficus*) es una planta cactácea ampliamente distribuida en regiones semiáridas de países como México, Marruecos, Túnez, Perú, Bolivia y Brasil (Kudanga y Aruwa, 2021). Esta versátil planta ofrece múltiples beneficios, siendo sus cladodios (hojas carnosas) y frutos aprovechados para el consumo humano, mientras que sus derivados como el jugo y el mucílago se utilizan en la purificación del agua (Mahdeb et al., 2021). Los cladodios de nopal han despertado un creciente interés en la comunidad científica y la industria alimentaria debido a sus propiedades funcionales, atribuidas a su alto contenido de compuestos bioactivos como ácidos orgánicos, fibra, mucílago, pigmentos, minerales y compuestos fenólicos (Aragona et al., 2018; Barba et al., 2022).

Los compuestos fenólicos, también conocidos como polifenoles, son metabolitos secundarios presentes en las plantas que poseen propiedades antioxidantes beneficiosas para la salud humana. En el caso específico de los cladodios de nopal, Martínez-Soto et al. (2016) reportaron un contenido fenólico total que oscila entre 100 y 230 mg GAE/100 g de muestra fresca. Sin embargo, la extracción eficiente de estos compuestos bioactivos representa un desafío tecnológico, ya que los métodos convencionales de extracción a menudo implican el

uso de altas temperaturas, largos tiempos de procesamiento y un elevado consumo de solventes y energía (Medina-Torres et al., 2017).

En respuesta a estas limitaciones, la comunidad científica ha explorado técnicas alternativas de extracción, entre las cuales destaca la extracción asistida por ultrasonidos (EAU). Esta tecnología emergente ha demostrado ser prometedora para la obtención de compuestos de alta calidad en tiempos reducidos, gracias al fenómeno de cavitación que facilita la ruptura celular y mejora la transferencia de masa (Bhargava et al., 2021; Fu et al., 2020). La EAU se caracteriza por su simplicidad, bajo costo de equipamiento, cortos tiempos de extracción, alta calidad de los extractos obtenidos, limitado consumo de solventes y menor daño a los compuestos sensibles al calor (Albero et al., 2019; Altemimi et al., 2015).

Investigaciones previas han explorado la eficacia de la EAU en la extracción de compuestos fenólicos de diversas matrices vegetales. Mahdeb et al. (2021) estudiaron la extracción asistida por ultrasonidos (42 kHz) de cladodios de nopal y observaron que el rendimiento de compuestos fenólicos totales aumentaba con el tiempo de sonicación, alcanzando valores máximos a los 30 y 60 minutos de tratamiento. Vázquez et al. (2021) investigaron el efecto del tratamiento ultrasónico (20 kHz, 10 min) en cladodios de nopal y encontraron una mayor recuperación de compuestos fenólicos totales en comparación con muestras no tratadas. En otro estudio, Arruda et al. (2019) lograron una alta recuperación de compuestos fenólicos de la cáscara de *Araticum* con solo 5 minutos de tratamiento ultrasónico.

A pesar de estos avances, aún existen interrogantes sobre cómo los diferentes parámetros del proceso afectan la extracción de compuestos fenólicos de los cladodios de nopal. Factores como la temperatura de secado previa a la extracción, la frecuencia de ultrasonidos y el tiempo de exposición al tratamiento ultrasónico pueden influir significativamente en la eficiencia de extracción y la calidad de los compuestos fenólicos obtenidos. La comprensión de cómo estos parámetros interactúan y afectan el rendimiento de extracción es fundamental para sentar las bases de futuros estudios de optimización y para desarrollar protocolos eficientes que maximicen la recuperación de compuestos fenólicos de los cladodios de nopal. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo investigar el efecto de la temperatura de secado (50, 60 y 70°C) y los parámetros de extracción asistida por ultrasonidos (frecuencias de 37 y 80 kHz, tiempos de exposición de 20 y 30 minutos) sobre el contenido fenólico total de pulpa de nopal (*Opuntia ficus*).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Muestra y reactivos

Los cladodios de nopal (*Opuntia ficus*) fueron recolectados de huertos artesanales en la provincia de Sullana, región de Piura, Perú, durante los meses de febrero y marzo de 2023. Se utilizó una muestra de 5 kg de cladodios para el desarrollo de este estudio. Los especímenes fueron seleccionados in situ y posteriormente trasladados al Laboratorio de Alimentos Funcionales y Bioprocesos de la Universidad Nacional de Frontera (UNF) para su procesamiento y análisis.

Para los ensayos analíticos, se emplearon los siguientes reactivos de grado analítico: ácido gálico, reactivo de Folin-Ciocalteu, carbonato de sodio (Sigma-Aldrich, ACS, Lima, Perú) y etanol (96% de pureza).

2.2. Preparación de la muestra y secado

Los cladodios de nopal fueron sometidos a un proceso de lavado exhaustivo con agua potable para eliminar impurezas superficiales. Posteriormente, se procedió a retirar la cubierta exterior (epidermis) de los cladodios. Utilizando una cortadora industrial, se obtuvieron láminas de pulpa con dimensiones estandarizadas de 5 cm x 10 cm x 0.5 cm. El proceso de secado se llevó a cabo en un deshidratador de bandejas (modelo ST-01, rango de temperatura 40-90°C). Las láminas fueron sometidas a cuatro temperaturas de secado diferentes (50, 60,

70 y 80°C) durante un período de 15 horas, manteniendo una velocidad constante de flujo de aire de 2.5 m/s. Tras el secado, las muestras fueron pulverizadas utilizando un molino de cuchillas (modelo A-S3000) hasta obtener un polvo fino con un tamaño de partícula inferior a 850 µm, según lo descrito por Castillo-Zapata et al. (2024) (2023).

2.3. Extracción de compuestos fenólicos

2.3.1. Preparación de muestras

La extracción se realizó utilizando etanol al 96% (v/v) en una proporción 1:10 (p/v) con respecto a la muestra. El proceso de homogeneización se llevó a cabo en recipientes de vidrio con tapas metálicas. Todos los ensayos se realizaron por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

2.3.2. Extracción asistida por ultrasonidos (EAU)

Se pesaron 2 g de polvo de cladodios de nopal en frascos de vidrio y se añadieron 20 mL de etanol al 96% (v/v). Los frascos se sumergieron en un baño de ultrasonido (modelo P 30 H-ELMA) equipado con una canasta de acero inoxidable. El proceso de extracción se realizó bajo las siguientes condiciones de Frecuencias (37 y 80 kHz), tiempo de extracción (20 y 30 minutos), Potencia (100%) y Temperatura ambiente (25°C).

Tras el tratamiento ultrasónico, los extractos se centrifugaron a 4500 rpm durante 20 minutos. Se recuperó el sobrenadante y los extractos se homogeneizaron según cada tratamiento. Las muestras se protegieron de la luz con papel de aluminio, se etiquetaron y se almacenaron en congelación hasta su análisis (Giacometti et al., 2018).

2.3.3. Extracción por agitación convencional (EAC)

Se pesaron 2 g de polvo de cladodios de nopal en recipientes adecuados y se añadieron 20 mL de etanol al 96% (v/v). Las muestras se sometieron a agitación magnética a 2500 rpm durante dos tiempos diferentes: 20 y 30 minutos. Tras la agitación, cada muestra se centrifugó a 4500 rpm durante 20 minutos. El sobrenadante se recuperó y se homogeneizó para obtener el extracto final. Los extractos se protegieron de la luz con papel de aluminio, se etiquetaron y se almacenaron en congelación hasta su análisis (Cornelio-Santiago et al., 2019).

2.4. Determinación del contenido de Compuestos Fenólicos Totales (TPC)

El TPC se determinó mediante un ensayo colorimétrico utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu, según lo descrito por Cornelio-Santiago et al. (2019). Para ello, se mezclaron 1.364 mL de agua destilada con 0.3 mL del extracto y 136 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu. La mezcla resultante se incubó a temperatura ambiente durante 8 minutos en la oscuridad. Posteriormente, se añadieron 1.2 mL de una solución de carbonato de sodio al 7.5%, permitiendo que la reacción se completara en un lapso de 2 horas, también en oscuridad a temperatura ambiente.

Las absorbancias de las muestras se midieron a 760 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Visible (Genesys, modelo S-150, número de serie 6287015). La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración de ácido gálico en el rango de 10 a 60 ppm ($R^2 = 0.9998$). Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico (GAE) por cada 100 gramos de muestra.

2.5. Análisis de datos

Se empleó un diseño factorial 3x2x2, considerando los siguientes factores: temperatura de secado (50, 60 y 70°C), frecuencia de ultrasonido (37 y 80 kHz) y tiempo de extracción (20 y 30 minutos). Los datos obtenidos para cada condición de extracción se expresaron como media \pm desviación estándar. El análisis estadístico se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) de tres vías, seguido de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey,

para determinar diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

3.RESULTADOS

3.1. TPC de polvo de cladodios de nopal, utilizando diferentes temperaturas de secado, frecuencia y tiempo de ultrasonidos.

Se realizó la determinación del TPC para los extractos obtenidos en las diferentes condiciones de extracción. Los resultados para TPC se expresaron en mg GAE/100g. Para el análisis estadístico del TPC por cada tratamiento, se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianza de Bartlett; para ambas pruebas los P-valor fue de 0.100 y 0.903 respectivamente, valores > 0.05 . Por ende, se aplicó análisis de varianza (ANOVA), arrojando como resultado que, los factores y las interacciones son significativas, ejerciendo un efecto sobre el TPC (Tabla 1 y Figura 4). Finalmente, se contrastó a través de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, que los tratamientos son estadísticamente diferentes entre sí (Tabla 1).

Tabla 9.

Contenido fenólico total (mg GAE/100g) de Cladodios de Nopal (Opuntia ficus-indica), en las diferentes condiciones de extracción

Tipo de extracción	N°	Condiciones de extracción				TPC*
		Secado	Agitación	Ultrasonidos		
		T(°C)	t (min)	F (Khz)	T (min)	
EAU	T1	50	-	37	20	247.03 ± 7.36 ^b
	T2	50	-	37	30	211.29 ± 6.06 ^{de}
	T3	50	-	80	20	265.37 ± 10.08 ^a
	T4	50	-	80	30	244.75 ± 6.15 ^{bc}
	T5	60	-	37	20	201.51 ± 5.05 ^{ef}
	T6	60	-	37	30	228.55 ± 2.90 ^{cd}
	T7	60	-	80	20	164.16 ± 4.06 ^h
	T8	60	-	80	30	190.27 ± 5.85 ^{fg}
	T9	70	-	37	20	99.32 ± 3.68 ^k
	T10	70	-	37	30	90.08 ± 3.48 ^{kl}
	T11	70	-	80	20	33.86 ± 4.34 ^m
	T12	70	-	80	30	78.84 ± 9.04 ^l
ECA	C1	50	20	-	-	211.69 ± 3.68 ^{de}
	C2	50	30	-	-	236.18 ± 6.06 ^{bc}
	C3	60	20	-	-	173.94 ± 5.62 ^{gh}
	C4	60	30	-	-	171.66 ± 6.75 ^h
	C5	70	20	-	-	145.10 ± 4.23 ⁱ
	C6	70	30	-	-	121.41 ± 3.87 ^j

<i>ANOVA</i>	<i>P-value</i>
TS: Temperatura de secado (°C)	0.000
FUS: Frecuencia de US (kHz)	0.000
TUS: Tiempo de US (min)	0.013
TS x FUS	0.000
TS x TUS	0.000
FUS x TUS	0.000
TS x FUS x TUS	0.000

*Diferentes superíndices (a-m) en la columna TPC, indican diferencia significativa entre los tratamientos. EAU= Extracción asistida por ultrasonidos, CSE= Extracción convencional, N°=Número de tratamiento.

T: Temperatura; t: tiempo; F: Frecuencia; TPC: Compuestos Fenólicos Totales expresados en mg GAE/100 gr.

La figura 1 que tanto los factores como las combinaciones de los mismos superan el valor crítico, evidenciando su significancia, mientras que la figura 2 se observa el efecto que los factores: Frecuencia de ultrasonidos (FUS) y Tiempo de exposición al ultrasonido (TUS) ejercen sobre el TPC. FUS, propicia un mayor impacto que TUS, no obstante, el grado de influencia incrementa al interactuar con la temperatura de secado (TS); por último, la figura 3 muestra la interacción de los factores, demostrando la significación resultante del análisis de la varianza.

La temperatura de secado junto con la interacción entre Temperatura de secado x Frecuencia de US, ejercen la mayor influencia sobre el TPC extraído de Cladodios de nopal. El tiempo de exposición al tratamiento ultrasónico, por sí mismo ejerce el menor efecto, pero significativo

Se obtiene un mayor contenido de TPC a 50°C, a medida que aumenta la temperatura, el contenido de TPC disminuirá progresivamente; paralelamente, la frecuencia a 37 kHz muestra eficiencia en la extracción del mayor contenido fenólico; sin embargo, el tiempo muestra un comportamiento particular, el TPC aumenta a los 30 minutos y disminuye a los 20 y 40 minutos.

Figura 6.

Diagrama de Pareto de los efectos normalizados en el contenido de TPC

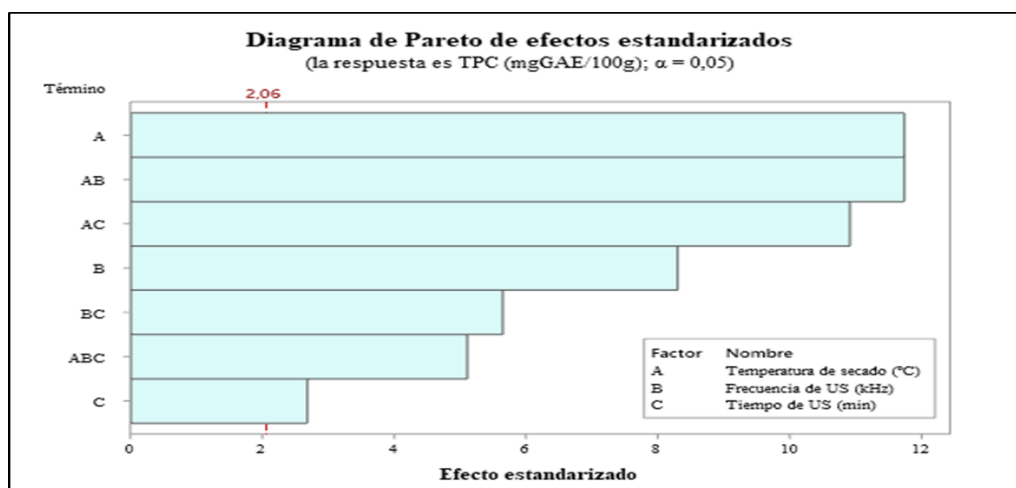
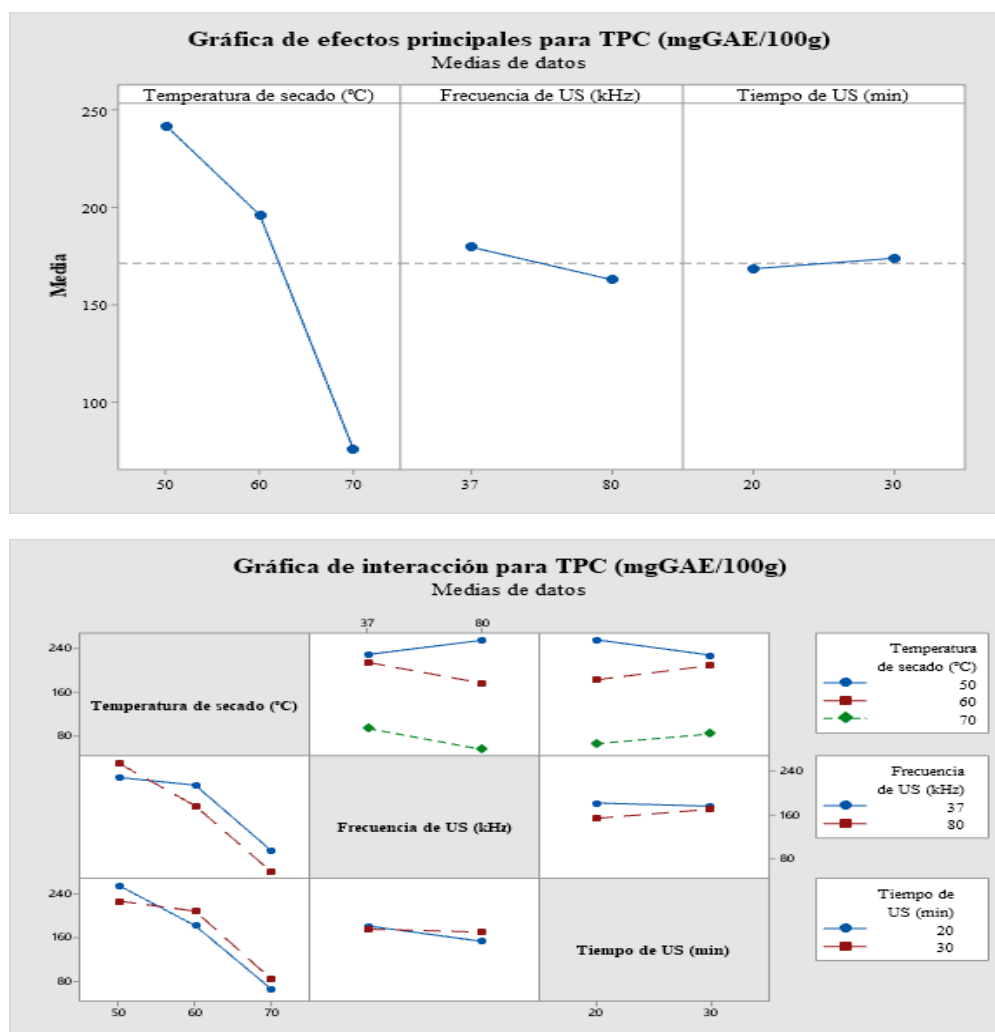


Figura 2
Efecto de los factores (a) y su interacción (b).



4. DISCUSIÓN

4.1. Efecto de la TS sobre el TPC

El análisis del efecto de la TS sobre el TPC revela hallazgos significativos en cuanto a la optimización de procesos de extracción y preservación de compuestos bioactivos. Los resultados obtenidos mediante la EAU y EAC demuestran una variabilidad considerable en el TPC, oscilando entre 33.86 y 265.37 mg GAE/100g para EAU, y entre 121.41 y 236.18 mg GAE/100g para CSE. Esta disparidad subraya la superioridad de la EAU en la recuperación de compuestos fenólicos, probablemente debido a sus mecanismos de cavitación que facilitan la liberación de estos compuestos de las matrices vegetales.

La comparación entre tratamientos revela patrones interesantes: la ausencia de diferencias significativas entre C1 y T2, así como entre T4 y C2, sugiere que ciertos parámetros de CSE pueden lograr eficiencias similares a EAU en condiciones específicas. Sin embargo, los tratamientos T1 (247.03 ± 7.36 mg GAE/100g) y T3 (265.37 ± 10.08 mg GAE/100g) destacan por su rendimiento superior, superando incluso el rango de 100 a 230 mg GAE/100g reportado por Martínez-Soto et al. (2016). Estos resultados excepcionales,

obtenidos a 50°C de TS con tiempos de tratamiento de ultrasonido reducidos, indican una sinergia óptima entre temperatura y método de extracción.

El análisis estadístico corrobora la importancia crítica de la TS, con un P-valor de 0.000 (<0.050), estableciendo su influencia significativa sobre el TPC extraído. La relación inversa observada entre TS y TPC, evidenciada por una degradación del 69% a 70°C comparado con 50°C, concuerda con los hallazgos de De Santiago et al. (2018). Este fenómeno se atribuye a múltiples factores: la ruptura de estructuras celulares que facilita la lixiviación de TPC, la migración de componentes que resulta en pérdidas por filtración, y la descomposición por reacciones químicas influenciadas por enzimas, luz y oxígeno (Youssef y Mokhtar, 2014). Además, la formación de o-quinonas y o-semi-quinonas a partir de estructuras fenólicas degradadas (Ettalibi et al., 2020) y la escisión de fracciones unidas a glicósidos y ésteres de ácidos fenólicos (Yap et al., 2022) contribuyen a la reducción del TPC a temperaturas elevadas.

La identificación de 50°C como temperatura óptima para la retención de compuestos bioactivos en el polvo de hojas de guayaba (Nguyen et al., 2022) y la observación de valores similares de compuestos fenólicos y flavonoides en hojas de verdolaga secadas a esta temperatura mediante liofilización y aire caliente (Youssef y Mokhtar, 2014) respaldan la eficacia de este parámetro. Este fenómeno podría explicarse por la polimerización de flavonoides que conduce al aumento de taninos condensados, así como por la dinámica de los compuestos fenólicos que alcanzan un pico máximo seguido de una disminución constante en función de la temperatura (Christiani et al., 2021).

4.2. Efecto de las condiciones de la EAU: Frecuencia y tiempo de exposición al tratamiento por ultrasonidos.

El análisis de los factores que influyen en la EAU de TPC revela una compleja interacción entre la FUS, el tiempo de exposición al ultrasonido TUS y la TS.

La Figura 2 ilustra claramente que la FUS ejerce un impacto más significativo que el TUS sobre el TPC extraído. Sin embargo, es crucial notar que esta influencia se ve potenciada al interactuar con la TS, lo que subraya la importancia de considerar estos factores de manera integrada. La Figura 5(a) muestra una tendencia general donde una menor frecuencia de US contribuye a una mayor recuperación de TPC. En contraste, para el TUS, se requiere un tiempo de tratamiento más prolongado para lograr un efecto comparable. No obstante, esta relación no es uniforme y varía significativamente en función de la TS. La Figura 5(b) revela un fenómeno intrigante: a 50°C, el patrón de interacción con las demás variables es opuesto al observado a 60°C y 70°C. Esta inversión del comportamiento a diferentes temperaturas de secado enfatiza la complejidad de las interacciones entre estos parámetros y la necesidad de un enfoque holístico en la optimización del proceso.

Según la Tabla 1, las condiciones óptimas para la extracción se establecieron en 20 minutos de tratamiento ultrasónico a una frecuencia de 80 kHz y una temperatura de secado de 50°C. Estos parámetros corroboran la eficacia de la aplicación de ultrasonidos en la reducción del tiempo necesario para una extracción eficiente. Los resultados demuestran que los tiempos de proceso cortos son altamente efectivos para la recuperación de TPC. Específicamente, la extracción asistida por US logró recuperar 265.37 ± 10.08 mg GAE/100g de TPC, superando significativamente al proceso de extracción convencional que recuperó 236.18 ± 6.06 mg GAE/100g en 30 minutos de extracción.

Mahdeb et al. (2021) proporcionan un marco teórico valioso para comprender estos resultados, describiendo el proceso de extracción de TPC asistido por US en dos etapas distintas. La primera, denominada "etapa de lavado", ocurre en los primeros 10-20 minutos y puede recuperar hasta el 90% del TPC. En esta fase, los compuestos solubles se disuelven en la superficie de la matriz. Posteriormente, se inicia la "etapa de extracción lenta",

caracterizada por la transferencia de masa por difusión, que puede extenderse de 60 a 100 minutos. Sin embargo, es crucial notar que tiempos de sonicación prolongados pueden degradar los TPC, reduciendo el rendimiento de la extracción. Este fenómeno se observó en su estudio sobre la extracción asistida por US (42 kHz) de TPC de polvo de cladodio, donde los valores máximos de TPC se alcanzaron a los 30 y 60 minutos, mientras que, a los 70 y 80 minutos, el rendimiento comenzó a disminuir.

La eficacia de los tiempos de tratamiento cortos se ve respaldada por varios estudios. Vázquez et al. (2021) reportaron una mayor recuperación de TPC en cladodios de nopal tratados con US (20 kHz, 10 min) en comparación con muestras sin tratar. Upadhyay et al. (2015) investigaron el efecto del tiempo de sonicación (5, 10 y 15 min) en la recuperación de TPC en hojas de *Ocimum tenuiflorum*, encontrando que 10 minutos permitían un mejor rendimiento de extracción. Tiempos más prolongados resultaron en una disminución del TPC, atribuida a la saturación del solvente y la consecuente reducción del gradiente de concentración de compuestos. Además, tiempos de sonicación superiores pueden ocasionar el calentamiento del solvente y la degradación de los compuestos bioactivos.

Otros investigadores han corroborado estos hallazgos. Arruda et al. (2019) lograron recuperar un alto contenido de fenoles de la cáscara de *Araticum* con solo 5 minutos de US. Similarmente, Irakli et al. (2018) obtuvieron los mayores rendimientos de compuestos fenólicos utilizando tiempos de proceso cortos (10 a 60 min, 50% de acetona).

En cuanto a la frecuencia de US, nuestro estudio evidenció que 80 kHz permitió una mayor extracción de TPC en el tiempo mínimo. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Machado et al. (2019), quienes demostraron que diferentes frecuencias (37 y 80 kHz) actúan de forma distinta en función de la temperatura y las condiciones de operación para la extracción de TPC de cáscara de granada. A 80 kHz, se facilitó la recuperación de grupos específicos de compuestos fenólicos no obtenidos a 37 kHz, lo que indica que la frecuencia afecta de manera diferencial las clases de fenoles presentes en una misma muestra.

Sin embargo, es importante señalar que la literatura científica presenta resultados variados en cuanto a la frecuencia óptima. Benavides-Guerrero et al. (2020) encontraron que, al aumentar la frecuencia de 37 a 80 kHz, la extracción de compuestos fenólicos disminuyó significativamente. De manera similar, Altemimi et al. (2016) observaron mayores rendimientos de extracción de TPC en extractos de espinaca a 37 kHz en comparación con 80 kHz. Estos resultados se alinean con la teoría de que frecuencias más altas producen una mayor cantidad de radicales libres, lo que podría ocasionar la reducción de la cantidad de TPC extraídos (Ramón y Gil-Garzón, 2021).

5.CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que la temperatura de secado es el factor más influyente en la extracción de compuestos fenólicos, observándose una relación inversa entre la temperatura y el TPC. Se encontró que, al aumentar la temperatura de 50°C a 70°C, se produce una disminución significativa en el contenido fenólico, lo que subraya la importancia de optimizar este parámetro para preservar los compuestos bioactivos. La EAU se reveló como un método más eficiente que la EAC, logrando una mayor recuperación de compuestos fenólicos. Las condiciones óptimas de extracción se obtuvieron a 50°C de temperatura de secado, 80 kHz de frecuencia ultrasónica y 20 minutos de tratamiento EAU, alcanzando un contenido fenólico total de 265.37 ± 10.08 mg GAE/100g. Un hallazgo destacable es que los tiempos cortos de tratamiento ultrasónico resultaron más efectivos para la extracción de compuestos fenólicos, lo cual tiene implicaciones significativas para la industria en términos de reducción de tiempos de procesamiento y potencial disminución de costos energéticos. Además, se observó que el efecto de la frecuencia y el tiempo de tratamiento ultrasónico varía en función de la temperatura de secado, lo que indica una interacción compleja entre

estos parámetros y resalta la necesidad de considerarlos de manera integral en el diseño de procesos de extracción.

Los beneficios potenciales de estos hallazgos incluyen la mejora en la calidad nutricional de productos derivados del nopal, la reducción de costos y tiempos de procesamiento en la industria, y el desarrollo de nuevos productos alimenticios y nutraceuticos con alto contenido de compuestos bioactivos.

Para futuras investigaciones, se sugiere explorar el impacto de estos procesos de extracción en otros compuestos bioactivos presentes en los cladodios de nopal, investigar la estabilidad de los compuestos fenólicos extraídos durante el almacenamiento y procesamiento posterior, evaluar la aplicabilidad de estas técnicas de extracción a escala industrial y su viabilidad económica, y estudiar los efectos de estos extractos ricos en compuestos fenólicos en sistemas alimentarios y modelos biológicos para validar sus propiedades funcionales y nutraceuticas.

6. CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que la investigación se ha llevado a cabo en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un posible conflicto de intereses.

7. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

AMI-C y BYPJ-C: Redacción: Borrador original, Redacción: revisión y edición, Conceptualización, Investigación; **NMA-T y LAR-F:** Redacción: borrador original, Redacción: revisión y edición, Metodología, Investigación, Curación de datos, Análisis formal; **HDM-M y JMN-J:** Redacción: Borrador original, Redacción: revisión y edición, Análisis formal, Visualización; **HPC-S y LAE-E:** Redacción: revisión y edición, Supervisión, Validación, Análisis formal, Curación de datos, Visualización; **JV-M:** Redacción: Borrador original, Redacción: revisión y edición, Conceptualización, Investigación, Análisis formal, Curación de datos, Supervisión.

8. FINANCIAMIENTO

Esta investigación no recibió apoyo financiero.

9. DECLARACIÓN ÉTICA: INVESTIGACIÓN CON SERES HUMANOS Y ANIMALES

Los autores declaran que no se realizaron experimentos en seres humanos ni en animales durante la presente investigación

10. ABREVIATURAS

EAU: Extracción Asistida por Ultrasonidos
EAC: Extracción por Agitación Convencional
CPT: Compuestos Fenólicos Totales
FUS: Frecuencia de Ultrasonidos
TUS: Tiempo de exposición al ultrasonido
TS: Temperatura de Secado
GAE: Equivalente de Ácido Gálico

11. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Frontera por facilitar el acceso a sus laboratorios de investigación, lo que permitió llevar a cabo el presente estudio.

12. REFERENCIAS

- Albero, B., Tadeo, J. L., y Pérez, R. A. (2019). Ultrasound-assisted extraction of organic contaminants. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 739-750. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.07.007>
- Altemimi, A., Choudhary, R., Watson, D. G., y Lightfoot, D. A. (2015). Effects of ultrasonic treatments on the polyphenol and antioxidant content of spinach extracts. *Ultrasonics Sonochemistry*, 24, 247-255. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.10.023>
- Altemimi, A., Watson, D. G., Choudhary, R., Dasari, M. R., y Lightfoot, D. A. (2016). Ultrasound Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Peaches and Pumpkins. *PLOS ONE*, 11(2), e0148758. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148758>
- Aragona, M., Lauriano, E. R., Pergolizzi, S., y Faggio, C. (2018). *Opuntia ficus—Indica* (L.) Miller as a source of bioactivity compounds for health and nutrition. *Natural Product Research*, 32(17), 2037-2049. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1365073>
- Arruda, H. S., Silva, E. K., Pereira, G. A., Angolini, C. F. F., Eberlin, M. N., Meireles, M. A. A., y Pastore, G. M. (2019). Effects of high-intensity ultrasound process parameters on the phenolic compounds recovery from araticum peel. *Ultrasonics Sonochemistry*, 50, 82-95. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.002>
- Barba, F. J., Garcia, C., Fessard, A., Munekata, P. E. S., Lorenzo, J. M., Aboudia, A., Oquadia, A., y Remize, F. (2022). *Opuntia Ficus Indica* Edible Parts: A Food and Nutritional Security Perspective. *Food Reviews International*, 38(5), 930-952. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1756844>
- Benavides-Guerrero, R., Revelo-Cuarán, Y. A., Arango-Bedoya, O., y Osorio-Mora, O. (2020). Extracción asistida con ultrasonido de compuestos fenólicos de dos variedades de papas (*Solanum phureja*) nativas andinas y evaluación de su actividad antioxidante. *Información Tecnológica*, 31(5), 43-50. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000500043>
- Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K., y Sharanagat, V. S. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105293. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293>
- Castillo-Zapata, K. C., Reyes-Díaz, J. D., Cornelio-Santiago, H. P., Espinoza-Espinoza, L. A., Valdiviezo-Marcelo, J., y Ruiz-Flores, L. A. (2024). Efecto del secado con aire caliente en el contenido de fenólicos totales y capacidad antioxidante de la cáscara de pitahaya roja (*Hylocereus guatemalensis*). *Revista de Investigaciones de la Universidad Le Cordon Bleu*, 11(2), 97-106. <https://doi.org/10.36955/RIULCB.2024v11n2.009>
- Christiani, E. A., Kencana Putra, I. N., y Suparhana, I. P. (2021). Pengaruh Suhu dan Waktu Pengeringan Terhadap Sifat Kimia dan Sensori Teh Celup Herbal Daun Putri Malu (*Mimosa pudica* Linn.). *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan (ITEPA)*, 10(4), 589. <https://doi.org/10.24843/itepa.2021.v10.i04.p05>
- Cornelio-Santiago, H. P., Mazalli, M. R., Rodrigues, C. E. C., y De Oliveira, A. L. (2019). Extraction of Brazil nut kernel oil using green solvents: Effects of the

- process variables in the oil yield and composition. *Journal of Food Process Engineering*, 42(7), e13271. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13271>
- De Santiago, E., Domínguez-Fernández, M., Cid, C., y De Peña, M.-P. (2018). Impact of cooking process on nutritional composition and antioxidants of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 240, 1055-1062. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.039>
- Ettalibi, F., Elmahdaoui, H., Amzil, J., Gadhi, C., y Harrak, H. (2020). Drying impact on physicochemical and biochemical criteria of prickly pear fruit peels of three varieties of *Opuntia* spp. *Materials Today: Proceedings*, 27, 3243-3248. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.726>
- Fu, X., Belwal, T., Cravotto, G., y Luo, Z. (2020). Sono-physical and sono-chemical effects of ultrasound: Primary applications in extraction and freezing operations and influence on food components. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, 104726. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104726>
- Giacometti, J., Žauhar, G., y Žuvić, M. (2018). Optimization of Ultrasonic-Assisted Extraction of Major Phenolic Compounds from Olive Leaves (*Olea europaea* L.) Using Response Surface Methodology. *Foods*, 7(9), 149. <https://doi.org/10.3390/foods7090149>
- Irakli, M., Chatzopoulou, P., y Ekateriniadou, L. (2018). Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds: Oleuropein, phenolic acids, phenolic alcohols and flavonoids from olive leaves and evaluation of its antioxidant activities. *Industrial Crops and Products*, 124, 382-388. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.070>
- Kudanga, T., y Aruwa, C. E. (2021). Industrial Applications of *Opuntia* spp. (Nopal, Fruit and Peel). En M. F. Ramadan, T. E. M. Ayoub, y S. Rohn (Eds.), *Opuntia spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications* (pp. 841-875). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78444-7_42
- Machado, A. P. D. F., Sumere, B. R., Mekar, C., Martinez, J., Bezerra, R. M. N., y Rostagno, M. A. (2019). Extraction of polyphenols and antioxidants from pomegranate peel using ultrasound: Influence of temperature, frequency and operation mode. *International Journal of Food Science y Technology*, 54(9), 2792-2801. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14194>
- Mahdeb, A., Adjeroud-Abdellatif, N., Mazari, A., Portillo, L., Ait Abdelouhab, K., Ait Maamer, D., y Madani, K. (2021). Identification of some *Opuntia* spp. From two Algerian regions and ultrasound-assisted extraction of their phenolic compounds. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 23, 94-120. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v23i.320>
- Martínez-Soto, G., Celis-Fabián, F., Hernández-Pérez, T., y Paredes-López, O. (2016). Effect of Drying Methods on the Nutraceutical Potential of Cactus Cladodes (*Opuntia* spp.). *International Journal of Food and Nutritional Science*, 2(6), 1-6. <https://doi.org/10.15436/2377-0619.15.023>
- Medina-Torres, N., Ayora-Talavera, T., Espinosa-Andrews, H., Sánchez-Contreras, A., y Pacheco, N. (2017). Ultrasound Assisted Extraction for the Recovery of

- Phenolic Compounds from Vegetable Sources. *Agronomy*, 7(3), 47. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030047>
- Nguyen, Q.-V., Huyen, B., Thi, B., Tran, M.-Đ., Nguyen, M.-T., Doan, M.-D., Nguyen, A.-D., Minh Le, T., Tran, V.-C., y Pham, T.-N. (2022). Impact of Different Drying Temperatures on *In Vitro* Antioxidant and Antidiabetic Activities and Phenolic Compounds of Wild Guava Leaves Collected in the Central Highland of Vietnam. *Natural Product Communications*, 17(4), 1934578X2210953. <https://doi.org/10.1177/1934578X221095349>
- Ramón, C., y Gil-Garzón, M. A. (2021). Efecto de los parámetros de operación de la extracción asistida por ultrasonido en la obtención de polifenoles de uva: Una revisión. *Tecnológicas*, 24(51), e1822. <https://doi.org/10.22430/22565337.1822>
- Upadhyay, R., Nachiappan, G., y Mishra, H. N. (2015). Ultrasound-assisted extraction of flavonoids and phenolic compounds from *Ocimum tenuiflorum* leaves. *Food Science and Biotechnology*, 24(6), 1951-1958. <https://doi.org/10.1007/s10068-015-0257-y>
- Vázquez, A., Hernández-Hernández, M., Quiñones-Muñoz, H., y Moreno-Vilet, L. (2021). Effect of ultrasound treatment on physicochemical parameters and drying time in nopal cladodes *Opuntia* spp. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 9, 51-62.
- Yap, E. S. P., Uthairatanakij, A., Laohakunjit, N., y Jitareerat, P. (2022). Influence of hot air drying on capsaicinoids, phenolics, flavonoids and antioxidant activities of ‘Super Hot’ chilies. *PeerJ*, 10, e13423. <https://doi.org/10.7717/peerj.13423>
- Youssef, K. M., y Mokhtar, S. M. (2014). Effect of Drying Methods on the Antioxidant Capacity, Color and Phytochemicals of *Portulaca oleracea* L. Leaves. *Journal of Nutrition y Food Sciences*, 04(06). <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000322>

13. DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos originales generados en este estudio están disponibles en un repositorio de acceso público. Se pueden consultar en: [<https://repositorio.unf.edu.pe/server/api/core/bitstreams/4ac72cc1-251e-4c11-aa57-74733f55d62d/content>].