

8. Uso del bagazo de betabel como fuente de pigmentos naturales: Extracción de betalaínas y aplicación en tortillas de maíz



CÉSAR ALBERTO ROLDÁN CRUZ*

ALEJANDRO MARTÍNEZ VELASCO**

ADRIEL AZUARA VICARIO***

ABRIL RAMÍREZ HIGUERA****

GABRIELA BLASCO LÓPEZ*****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.348.08>

Resumen

La valorización de residuos alimentarios es muy importante, pues promueve la sostenibilidad, la reducción del impacto ambiental y su aplicación en el desarrollo de productos alimentarios que mejoran la salud. Este estudio se enfocó en el aprovechamiento del bagazo de betabel, un residuo resultante en la obtención del jugo, para la extracción de pigmentos naturales con potenciales propiedades antioxidantes. Para optimizar el proceso de extracción, se utilizó una metodología de superficie de respuesta (MRS), con tres factores: potencia del microondas (30, 60 y 100 %), tiempo de extracción (10, 30 y 60 s) y relación etanol: agua (1:1, 2:1 y 3:1), así como 2 variables respuesta que fueron el contenido de betacianinas (BC) y betaxantinas (BX). En total, se realizaron 27 tratamientos que resultaron de la combinación de los diferentes factores. La MSR indicó que las condiciones que maximizan la extracción BC fueron 81.30 % de potencia, 1:1 relación etanol:agua y 60 s, para obtener 135.97 mg/100g de muestra seca. Para BX fueron 30.71 % po-

* Doctor en Biotecnología. Docente de tiempo completo de la Universidad Veracruzana, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8992-8176> ; Scopus: 57118083700 ; correo electrónico: croidan@uv.mx

** Doctor en Biotecnología. Docente de asignatura de la Universidad Veracruzana, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0955-554X>

*** Licenciado en Nutrición por la Universidad Veracruzana, región Veracruz, México.

**** Doctora en Biotecnología. Docente de asignatura de la Universidad Veracruzana, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1430-2689>

***** Doctora en Alimentos. Docente-investigadora de tiempo completo de la Universidad Veracruzana, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5045-4164>

tencia, 1:1 relación etanol:agua y 60 s para obtener 40.38 mg/100g de muestra seca. Estas condiciones, con el mayor contenido de BC y BX, se utilizaron como pigmentos naturales en la elaboración de tortillas de maíz, a las cuales se les midió el color. Este estudio no solo aprovechó un residuo alimentario utilizando una tecnología amigable con el medioambiente, sino que también permitió obtener una fuente novedosa de pigmentos naturales con potencial aplicación en la industria alimentaria.

Palabras clave: *valorización, bagazo de betabel, residuo alimentario, pigmentos naturales, betalainas.*

Introducción

La producción de alimentos genera muchos residuos agroindustriales que, cuando no se manejan correctamente, generan contaminación ambiental y problemas relacionados con el cambio climático. Para ello, se ha propuesto el estudio y generación de alternativas para una gestión eficiente de los residuos, utilizando de manera complementaria diferentes tecnologías emergentes y amigables con el medioambiente (Raza-Carrillo y Acosta, 2022). Entre estas tecnologías se encuentran el ultrasonido de alta intensidad, microondas, campos eléctricos pulsantes, altas presiones hidrostáticas y fluidos supercríticos, las cuales han reportado un menor tiempo de extracción, alto rendimiento y calidad en la extracción de compuestos bioactivos a partir de residuos alimentarios (p. ej.; cáscara de uva, pitaya, tuna, vainas de leguminosas y tallos de remolacha), en comparación con los métodos convencionales (Cazón y Sanches, 2024). Con ello se busca generar materias primas con alto valor agregado (polisacáridos, antioxidantes y pigmentos) a partir de residuos agroindustriales para la industria alimentaria (Salazar-López et al., 2023). Hay un interés particular en la búsqueda de pigmentos naturales para reemplazar a los colorantes sintéticos en la formulación de alimentos y bebidas. El consumo de este tipo de pigmentos se ha relacionado de manera positiva con la disminución del envejecimiento prematuro, además de la disminución en el desarrollo de determinados tipos de cáncer, diabetes y otras (Fiedor y Burda, 2014). Entre estos pigmentos se encuentran

las antocianinas, carotenoides, betalaínas, clorofilas, los cuales pueden obtenerse de los tejidos vegetales de residuos agroindustriales. El betabel (*Beta vulgaris*) se ha estudiado como una fuente potencial y sostenible de colorantes naturales, debido a su alto contenido de betalaínas, así como de minerales, vitaminas y muchos fitocomponentes con propiedades medicinales (Carreón-Hidalgo et al., 2022). Normalmente, el betabel se utiliza para la elaboración de jugos, mermeladas y bebidas, y como subproductos genera una gran cantidad de pulpa, cáscaras y tallos. Existen pocos estudios enfocados en el aprovechamiento de los residuos que se obtienen del betabel, pero ninguno hasta el momento que haya realizado la optimización de las condiciones de extracción de pigmentos naturales (betalaínas) a partir del bagazo y su aplicación en la formulación de alimentos. Por ello, el presente estudio tuvo como finalidad la valorización del bagazo del betabel como fuente potencial de pigmentos naturales, utilizando la extracción asistida por microondas y la metodología de superficie de respuesta, con la finalidad de encontrar las mejores condiciones de potencia, relación etanol:agua y tiempo, que permitan la mayor extracción de betalaínas (betacianinas y betaxantinas) y su aplicación como pigmento natural en la formulación de tortillas de maíz.

Metodología

Material biológico: se utilizaron frutos de betabel (*Beta vulgaris*) en madurez fisiológica, los cuales se lavaron y cortaron en trozos rectangulares. Posteriormente se introdujeron en un extractor de jugo (marca Turmix, modelo TU04, México) y se separó el bagazo del betabel (BV; material fibroso) del jugo, el cual se mantuvo en refrigeración hasta su utilización.

Diseño experimental

Los factores estudiados fueron potencia de microondas (30 %, 60 %, y 100 %), relación etanol:agua (1:1, 2:1, 3:1) y tiempo (10, 30, y 60 s). Se realizó una metodología de superficie de respuesta para obtener las condiciones de ex-

tracción óptimas, utilizando un diseño completamente al azar, tres factores con tres niveles, que generó un total de 27 corridas experimentales para la extracción de betalaínas (betacianinas (BC) y betaxantinas (BX)).

Extracción y cuantificación de betalaínas

Se pesaron 5 gramos de muestra de BV y se mezclaron con 50 ml de solvente etanol:agua, y luego la mezcla se sometió a condiciones de potencia de microondas (marca MABE modelo JES70W, México) y tiempo, de acuerdo con las condiciones para cada tratamiento indicado en la tabla 8.1. Los extractos se filtraron con un papel filtro Whatman n° 1 y se determinó el contenido de betalaínas utilizando un espectrofotómetro (LAMBDA 365, PerkinElmer, EE. UU.) a longitudes de onda de 540 y 480 nm (Chew et al., 2019). El contenido de BC y BX se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$BC \left(\frac{mg}{g} \right) = \frac{A (PM) V(FD)}{\epsilon LP}$$

Donde *BC* es el contenido de betalaínas y bataxantinas (mg/g, respectivamente); *V* es el volumen en mililitros del extracto obtenido; *FD* es el factor de dilución de la muestra; *L* es la longitud del paso óptico en cm; *P* es el peso de la muestra en gramos; *A* es la absorbancia medida a 538 nm y 480 nm para betacianinas y betaxantinas, respectivamente; *PM* es el peso molecular para betanina (550 g/mol) e indicaxantina (308 g/mol); *ε* es la absortividad molar (60 000 l/mol·cm para betanina y 48 000 l/mol·cm para indicaxantina).

Optimización de las condiciones de extracción de betalaínas

Los valores obtenidos del contenido de BC y BX (betalaínas) de los 27 tratamientos generados por el diseño experimental utilizado se analizaron con una metodología de superficie de respuesta, conforme a lo indicado en el apartado de análisis estadístico, para obtener las condiciones óptimas de potencia de microondas, relación etanol: agua y tiempo, que permitan la mayor extracción del contenido de BC y BX. Estos extractos se secaron en

un horno de convección a 35 °C por 24 h y se almacenaron en refrigeración para posteriormente ser incorporados en la elaboración de tortillas.

Aplicación en la elaboración de tortillas de maíz

Se elaboraron muestras de tortilla utilizando 45 gramos de harina de maíz y 5 gramos de extracto de betabel deshidratado. Posteriormente, se añadieron 60 ml de agua a la mezcla y se procedió a mezclar hasta obtener una masa homogénea. Se pesaron fracciones de 50 g de masa y se llevaron a la prensa para la obtención de las tortillas. Se colocaron en una parrilla eléctrica a 180 a 200 °C, y se dejaron 1.5 minutos de cada lado.

Medición de color en tortillas

Se obtuvieron los valores de luminosidad (L^*), a^* (coordenadas rojo/verde) y b^* (coordenadas amarillo/azul). A partir de estos resultados, se calculó el ángulo de tono o Hue (0° representa el rojo; 90°, el amarillo; 180°, el verde; y 270°, el azul) y la saturación de color o “croma” (C^*), de acuerdo a las expresiones que se presentan enseguida:

$$Hue = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$$

$$croma = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Análisis estadístico

Para el análisis de los resultados se utilizó la metodología de superficie de respuesta (MSR) con el software Statgraphics Centurion XVI (Statistical Graphics Corp., Manugistics, Inc., Cambridge, MA, EE. UU.), aplicando un diseño estadístico completamente al azar con tres variables para la extracción de betacianinas y betaxantinas (tabla 8.1). Los datos del diseño se analizaron mediante regresión múltiple de mínimos cuadrados para ajustar los

modelos polinomiales que permitan predecir las concentraciones de betalaínas en función de las condiciones de extracción. La significancia de los modelos se probó mediante análisis de varianza (prueba F) y coeficiente de determinación (R^2). El nivel de significancia se estableció en $p < 0.05$ para todos los factores. Los gráficos de 3D, contorno y diagramas de Pareto se obtuvieron con ayuda del software mencionado.

Tabla 8.1. Condiciones para la extracción de betalaínas y betaxantinas del bagazo del betabel

Corrida	Potencia (vatios) (A)	Relación etanol:agua (B)	Tiempo (s) (C)	BC (mg/100g)	BX (mg/100g)
1	30	1:1	10	86.46	29.03
2	30	1:1	30	66.16	25.02
3	30	1:1	60	109.23	43.35
4	30	2:1	10	64.35	19.56
5	30	2:1	30	78.10	22.71
6	30	2:1	60	111.10	30.34
7	30	3:1	10	91.96	27.18
8	30	3:1	30	75.52	21.17
9	30	3:1	60	109.89	28.34
10	60	1:1	10	69.03	24.75
11	60	1:1	30	147.29	36.11
12	60	1:1	60	144.21	44.66
13	60	2:1	10	54.51	17.86
14	60	2:1	30	110.00	24.49
15	60	2:1	60	100.65	26.72
16	60	3:1	10	73.59	20.79
17	60	3:1	30	102.79	29.80
18	60	3:1	60	132.00	35.96
19	100	1:1	10	79.47	21.25
20	100	1:1	30	88.44	28.11
21	100	1:1	60	119.35	36.58
22	100	2:1	10	52.58	23.25
23	100	2:1	30	103.40	34.80
24	100	2:1	60	97.90	25.03
25	100	3:1	10	59.23	24.33
26	100	3:1	30	109.34	33.65
27	100	3:1	60	145.20	38.12

Nota: BC = Betalaínas; BX = Betaxantinas.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

El contenido de BC y BX obtenido del bagazo de betabel en función de la combinación de condiciones de potencia, relación etanol:agua y tiempo de microondas, se colocaron en la tabla 8.1 y se ven ilustrados en la figura 8.1. El contenido de BC fluctuó en un rango de 52.58 mg/100 g con el tratamiento 22, hasta 147.29 mg/100 g en el tratamiento 11. Por otro lado, en contenido de BX, los valores estuvieron comprendidos entre 17.86 mg/100 g con el tratamiento 13 hasta 43.35 mg/100 g con las condiciones del tratamiento 3. Se encontró que el contenido de BC se favoreció con potencias y tiempos altos, y menos influencia de la relación etanol:agua. El contenido de BX fue altamente sensible a la extracción con etanol, ya que con la relación más baja de 1:1 (etanol:agua) se favoreció la mayor extracción de estos componentes con tiempo altos, independientemente de la potencia de microondas aplicada, tal como se observa en T3 de la figura 8.1. De acuerdo con Kaba et al. (2024), las betacianinas son colorantes vegetales solubles en agua que pueden tener una tonalidad rojo violeta y las betaxantinas un color amarillo. Se ha informado que las betacianinas son antioxidantes más potentes que las betaxantinas (Azeredo, 2008), los cuales se pueden incorporar en productos alimenticios como colorantes naturales o como suplementos nutricionales, para mejorar su valor nutricional.

Figura 8.1. Extractos obtenidos con betalaínas y betaxantinas de bagazo de betabel a partir de las diferentes corridas experimentales



Fuente: Elaboración propia.

Con base en el análisis de regresión múltiple aplicado a los datos, se desarrollaron modelos predictivos para el contenido de BC y BX (tabla 8.2). Para evaluar la calidad de los modelos, se usaron los coeficientes de determinación (R^2), que indican el porcentaje de variabilidad de los datos que puede explicar un modelo. De acuerdo con Gutiérrez-Pulido y de la Vara-Salazar (2012), un modelo fuerte se considera cuando el valor de R^2 está por arriba del 70 %. En este estudio, ambos modelos estuvieron en estos valores de R^2 , los cuales, si bien están en el límite de confiabilidad, si permiten tener una referencia que explique el comportamiento de BC y BX.

Tabla 8.2. Modelos de regresión para betacianinas y betaxantinas

Variables respuesta	Modelo de regresión
BC	$= 93.892 + 1.06676 \times A - 63.7818 \times B + 0.674738 \times C - 0.00999637 \times A^2 + 0.0261667 \times AB + 0.00797333 \times AC + 14.6661 \times B^2 + 0.0815667 \times BC - 0.00545689 \times C^2$ $R^2 = 0.705$
BX	$= 45.1894 - 0.0705859 \times A - 26.0586 \times B + 0.291612 \times C - 0.000482086 \times A^2 + 0.0732619 \times AB + 0.000449524 \times AC + 5.47611 \times B^2 - 0.0644 \times BC + 0.000468444 \times C^2$ $R^2 = 0.705$

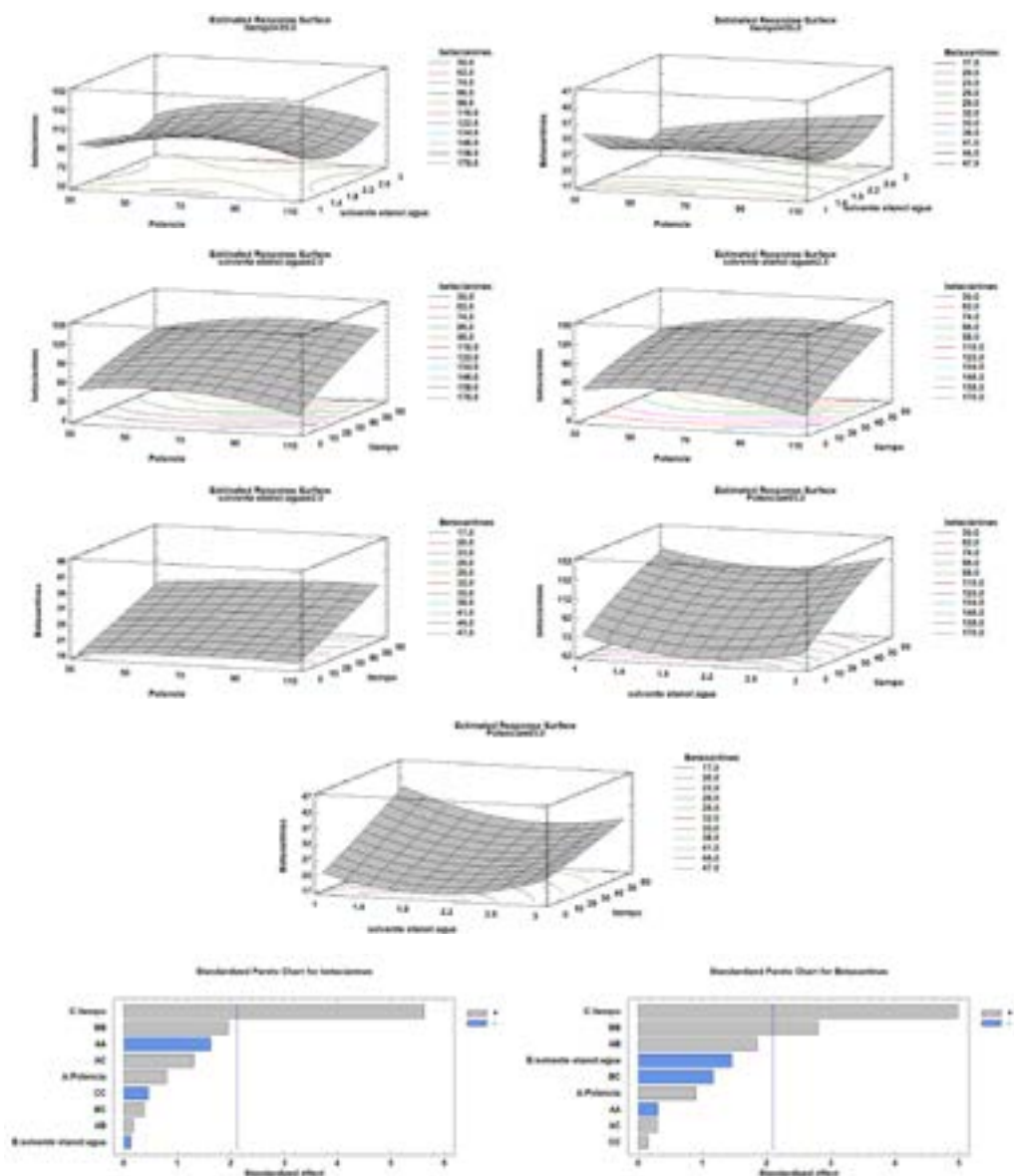
Nota: A = potencia; B = Relación etanol:agua; C) tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de varianza del contenido de BC y BX del bagazo de betabel indicó un comportamiento diferente en la influencia de los factores estudiados (potencial, relación etanol:agua y tiempo de microondas) sobre las variables respuesta, ya que en el caso de las betalainas solo el factor tiempo tuvo un efecto significativo para la mayor extracción de este compuesto ($p < 0.05$). En el caso de las BX tanto el factor tiempo ($p < 0.05$) y la interacción del solvente etanol:agua ($p < 0.05$), fueron las que tuvieron un efecto significativo y, por lo tanto, son las variables que se deben considerar para aumentar la extracción de este compuesto. Seo et al. (2014) reportaron que una solución al 50 % de etanol fue más efectiva que las soluciones acuosas y metanólicas en la extracción de compuestos fenólicos con actividad antioxidante de guayaba (*Psidium guajava* L.).

Efecto de las condiciones de extracción de betalaínas de bagazo de betabel

El análisis de las interacciones de los factores estudiados indicaron que la región que favorece la mayor extracción de BC se encuentra entre 70-75 % de potencia y relación etanol:agua 3:1 (figura 8.2). En la interacción potencia-tiempo, se observó que tiempos entre 50 a 60 s y potencia de 90 % son las que mejor favorecen la extracción de estos componentes. Finalmente, la combinación de etanol:agua-tiempo que mejor comportamiento presentó fue la relación de 3:1 y tiempos de 50 a 60 s. En el caso de BX, la zona de interacción potencia-relación etanol:agua que presentó mejor extracción se encontró en valores de potencia de 90 a 100 % y relación etanol:agua de 3:1. En la interacción potencia-tiempo, el factor que más influyó fue el tiempo, independiente de la potencia aplicada. Finalmente, la interacción solvente etanol:agua-tiempo que presentó mejor extracción de BX fue con una relación etanol:agua (1.4:1) y tiempos de 60 s. Los diagramas de Pareto indicaron que para la mayor extracción de BC, el factor que tiene más efecto es el tiempo de microondas, a diferencia de BX, donde los factores que más efecto tienen son el tiempo y la interacción del factor etanol:agua. De acuerdo con la MSR, las condiciones óptimas para la extracción de betalaínas a partir del bagazo de betabel, utilizando la extracción asistida por microondas, fueron 81.30 % de potencia, 3:1 relación etanol:agua y tiempo de 60 s para un contenido estimado de 135.97 mg/100 g de muestra seca de BC. En el caso de BX, las condiciones óptimas fueron 30.71 % de potencia, relación solvente:agua de 1:1 y tiempo de 60 s, con un contenido estimado de 40.38 mg/100 g de muestra seca. Estos resultados indican una mejora significativamente las condiciones de extracción de betalaínas, ya que los tiempos se reducen de manera significativa, en comparación a las utilizadas en la maceración (método convencional), que utiliza entre 15 hasta 30 min para lograr una buena extracción de pigmentos de fuentes naturales.

Figura 8.2. Graficas en 3D y diagrama de Pareto de las interacciones de potencia, relación solvente etanol:agua y tiempo para la obtención de BC y BX de bagazo de betabel

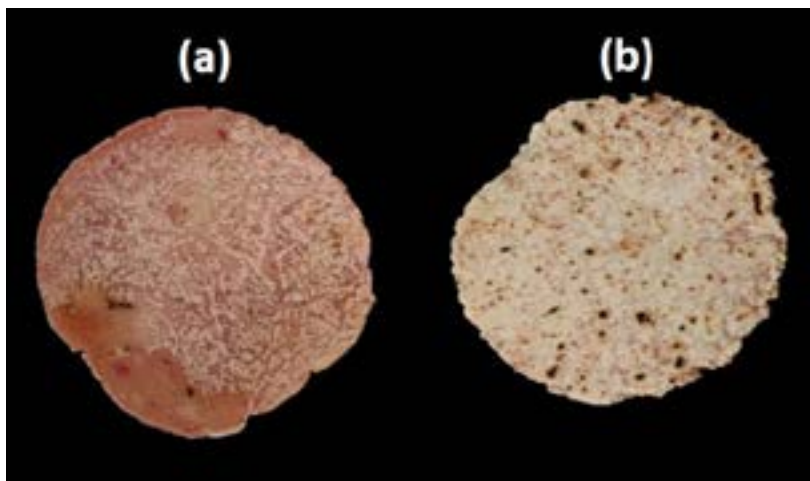


Fuente: Elaboración propia.

Aplicación de betalaínas en tortillas de maíz

Los pigmentos naturales obtenidos con las condiciones óptimas en la extracción de BC permitieron elaborar tortillas de maíz con una coloración rojo intenso (figura 8.3a), que coincidió con el ángulo de tono obtenido, pues se encontró en el rango de los tonos rojos (45.3 ± 4.04), con baja luminosidad (43.7 ± 3.90) y alta saturación de color (27.7 ± 4.15); con respecto a las tortillas formuladas con las condiciones que maximizaron el contenido de BX, donde las tortillas tuvieron un color orientado hacia los tonos amarillos (73.0 ± 7.21), con una menor saturación de color (17.3 ± 0.50) y valores de luminosidad más altos (61.0 ± 7.16) (figura 8.3b). A pesar de las condiciones de cocción de las tortillas (aprox. $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) de ambas formulaciones, el color de BC y BX no presentaron cambios significativos, lo cual se atribuyó a la protección que pueden brindarle la matriz de carbohidratos (almidones) presentes en la harina de maíz nixtamalizada, que durante el proceso de cocción de las tortillas se promueve su gelatinización y con ello este efecto de protección (Martins et al., 2024).

Figura 8.3. Tortillas de maíz adicionadas con pigmentos de bagazo de betabel con las condiciones que permiten la mayor extracción de betacianinas (T_{BC}) y betaxantinas (T_{BX})



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El bagazo del betabel (*Beta vulgaris*) puede utilizarse como una fuente económica, novedosa y alternativa para obtener de betalaínas (BC y BX), gracias a la extracción asistida por microondas. La metodología de superficie de respuesta indicó que las condiciones que favorecen la mayor extracción de BC fueron 81.3 % de potencia, 3:1 relación solvente:agua y tiempo de 60 s, para un contenido estimado de 135.97 mg/100 g de muestra seca. Por otro lado, para BX las condiciones fueron 30.71 % de potencia, relación solvente:agua de 1:1 y tiempo de 60 s, para un contenido estimado de 40.382 mg/100 g de muestra seca. Es posible extraer e incorporar de estos pigmentos naturales (BC y BX) en una matriz alimentaria para elaborar tortillas de maíz. Este estudio representa una alternativa sustentable para la reutilización de residuos alimentarios como fuente de compuestos de alto valor agregado con potencial aplicación en la industria alimentaria o farmacéutica.

Referencias

- Azeredo, H. M. C. (2008). Betalains: properties, sources, applications, and stability: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(12), 2365-2376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x>
- Carreón-Hidalgo, J. P., Franco-Vásquez, D. C., Gómez-Linton, D. R. y Pérez-Flores, L. J. (2022). Betalain plant sources, biosynthesis, extraction, stability enhancement methods, bioactivity, and applications. *Food Research International*, 151, 110821. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110821>
- Cazón, P. y Sanches Silva, A. (2024). Natural pigments from food wastes: New approaches for the extraction and encapsulation: A review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 47, 100929. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100929>
- Chew, Y. M., Hung, C. H. y King, V. A. (2019). Accelerated storage test of betalains extracted from the peel of pitaya (*Hylocereus cacti*) fruit. *Journal of Food Science and Technology*, 56(3), 1595-1600.
- Fiedor, J. y Burda, K. (2014). Potential role of carotenoids as antioxidants in human health and disease. *Nutrients*, 6, 466-488.
- Gutiérrez-Pulido, H. y de la Vara-Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill Interamericana.

- Kaba, B., Zannou, O., Redha, A. A. y Koca, I. (2024). Enhancing extraction of betalains from beetroot (*Beta vulgaris* L.) using deep eutectic solvents: Optimization, bioaccessibility and stability. *Food Production Processing and Nutrition*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00208-2>
- Martins, I. R., Martins, L. H., D. S., Chisté, R. C., Picone, C. S. F. y Joele, M. R. S. P. (2024). Betalains from vegetable peels: Extraction methods, stability, and applications as natural food colorants. *Food Research International*, 195, 114956. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114956>
- Raza-Carrillo, D. y Acosta, J. (2022). Planificación ambiental y el reciclaje de desechos sólidos urbanos. *Economía, Sociedad y Territorio*, 22(69), 519-544. <https://doi.org/10.22136/est20221696>
- Salazar-López, N. J., Enríquez-Valencia, S. A., Zúñiga Martínez, B. S. y González-Aguilar, G. A. (2023). Residuos agroindustriales como fuente de nutrientes y compuestos fenólicos. *Epistemos*, 17(34). <https://doi.org/10.36790/epistemos.v17i34.265>
- Seo, J., Lee, S., Elam, M. L., Johnson, S. A., Kang, J. y Arjmandi, B. H. (2014). Study to find the best extraction solvent for use with guava leaves (*Psidium guajava* L.) for high antioxidant efficacy. *Food Science & Nutrition*, 2(2), 174-180. <https://doi.org/10.1002/fsn3.91>