

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

**Compuestos fenólicos, minerales y propiedades nutraceuticas de betabel
(*Beta vulgaris* L.) cultivado en Zacatecas**

**Phenolic compounds, minerals and nutraceutical properties of beetroot (*Beta
vulgaris* L.) grown in Zacatecas**

Authors/Autores: Aguayo-Rojas, J., Mora-Rochín, S., Navarro-Cortez, R.O., Tovar-Jiménez, X., Menchaca-Armenta, M., Ayala-Lujan J.L.

ID: e2135

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2135>

Received/Fecha de recepción: December 17th 2025

Accepted /Fecha de aceptación: August 18th 2026

Available online/Fecha de publicación: September 24th 2026

Please cite this article as/Como citar este artículo: Aguayo-Rojas, J., Mora-Rochín, S., Navarro-Cortez, R.O., Tovar-Jiménez, X., Menchaca-Armenta, M., Ayala-Lujan J.L. (2026). Phenolic compounds, minerals and nutraceutical properties of beetroot (*Beta vulgaris* L.) grown in Zacatecas. *Revista Bio Ciencias*, 13, e2135. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2135>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original/ Original article

Compuestos fenólicos, minerales y propiedades nutraceuticas de betabel (*Beta vulgaris* L.) cultivado en Zacatecas

Phenolic compounds, minerals and nutraceutical properties of beetroot (*Beta vulgaris* L.) grown in Zacatecas

Propiedades Nutraceuticas de betabel/Nutraceutical properties of beetroot

Aguayo-Rojas, J.^{1*}(0000-0003-4882-5522), Mora-Rochín, S.²(0000-0002-9630-2518), Navarro-Cortez, R.O.³(0000-0003-3351-6583), Tovar-Jiménez, X.⁴(0000-0002-6626-6237), Menchaca-Armenta, M.⁵(0000-0001-5688-0463), Ayala-Lujan J.L.¹(0000-0001-5602-2266)

- 1: Unidad Académica de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera Zacatecas-Guadalajara Km 6, La Escondida. C.P. 98160, Zacatecas, Zacatecas, México.
- 2: Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Universidad Autónoma de Sinaloa. Boulevard de las Américas S/N, Col. Universitaria. C.P 80000, Culiacán, Sinaloa, México.
- 3: Instituto de Ciencias Agropecuarias. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Avenida Universidad Km. 1, Ex-Hacienda de Aquetzalpa. C.P 43600, Tulancingo, Hidalgo, México.
- 4: Ingeniería en Biotecnología. Universidad Politécnica de Pachuca. Carr. Pachuca-Cd. Sahagún Km. 20, Ex-Hacienda de Santa Bárbara. C.P 43830, Zempoala, Hidalgo, México.
- 5: Departamento de investigación y posgrado en alimentos. Universidad de Sonora. Boulevard Luis Encinas S/N, Col. Centro. C.P 83000, Hermosillo, Sonora, México.

***Corresponding Author:**

Jesús Aguayo-Rojas. Unidad académica (Químico en alimentos/Biotecnología). Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera Zacatecas-Guadalajara Km 6, La Escondida. C.P. 98160, Zacatecas, Zacatecas, México. Teléfono: (492) 243 0682. E-mail: jesus_aguayo@uaz.edu.mx

RESUMEN

El betabel (*Beta vulgaris* L.) es considerado un superalimento debido a su contenido de compuestos bioactivos y nutrientes (vitaminas, fibra y minerales), no obstante, son pocos los estudios realizados de este tubérculo cultivado en México. El objetivo de la presente investigación fue investigar el contenido de compuestos fenólicos totales, flavonoides, taninos, y cumarinas, así como de minerales (Ca, P, Mg, Fe, Na, K y Mo). Se realizaron extractos metanólicos para evaluar la capacidad antioxidante, se determinó por tres métodos DPPH, ABTS y ORAC, el potencial antihipertensivo evaluado con el porcentaje de inhibición de la enzima convertidora de angiotensina I (ACE). Los resultados obtenidos indican que el contenido de compuestos fenólicos y minerales en betabel es igual o superior a lo reportado en otros tubérculos o variedades de betabel cultivado en otros países, además de presentar una capacidad antioxidante alta por los tres métodos en comparación con otras variedades y un efecto inhibitorio de la ACE del 53 %. Los resultados pueden concluir que el betabel cultivado en el estado de Zacatecas, que es poco valorado, presenta un potencial benéfico para la salud que puede ser empleado para su consumo en fresco o ser empleado para la elaboración de alimentos funcionales.

PALABRAS CLAVE:

Fitoquímicos, Capacidad antioxidante, Actividad antihipertensiva, Compuestos fenólicos.

ABSTRACT

Beetroot (*Beta vulgaris* L.) is regarded as a superfood due to its high content of bioactive compounds and essential nutrients (vitamins, dietary fiber, and minerals). Nonetheless, there is limited research on beetroot grown in Mexico. This study aimed to quantify total phenolic compounds, flavonoids, tannins, coumarins, and minerals (Ca, P, Mg, Fe, Na, K, and Mo). Methanolic extracts were used to evaluate antioxidant activity through DPPH, ABTS, and ORAC assays. The antihypertensive potential was assessed by determining the percentage inhibition of angiotensin-converting enzyme I (ACE). Results indicated that beetroot cultivated in Zacatecas has phenolic and mineral contents similar to or exceeding those of other tuber crops and beetroot varieties from other countries. Additionally, this beetroot exhibited high antioxidant capacity across all three assays compared to previously reported varieties and showed 53 % ACE inhibitory activity. These results suggest that beetroot from Zacatecas, though currently undervalued, has significant health benefits and can be consumed fresh or incorporated into functional foods.

KEYWORDS:

Phytochemicals; Antioxidant capacity; Antihypertensive activity; Phenolic compounds.

Introducción

El betabel (*Beta vulgaris* L.) es un tubérculo que pertenece a la familia *Chenopodiaceae* y es originario de la región mediterránea, norte de África y sur de Europa. La familia *Chenopodiaceae* incluye aproximadamente 1400 especies divididas en 105 géneros (Chhikara *et al.*, 2019). Numerosos estudios han reportado los beneficios a la salud que presenta el betabel como actividad antiinflamatoria, antihipertensiva y antioxidante, además de ayudar a prevenir el cáncer y enfermedades cardiovasculares (Seremet *et al.*, 2020; Mancini *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021; Ojo *et al.*, 2024). Con respecto a la actividad antioxidante, el betabel se encuentra dentro de los 10 vegetales con mayor valor de este parámetro, esto debido a la presencia de betaninas, un tipo de betalaína que presenta un potencial de neutralización de radicales libres de hasta 2 veces más que lo presentado por compuestos fenólicos (Chen *et al.*, 2021; Borjan *et al.*, 2022; Abdullah *et al.*, 2023). También debido a su contenido de compuestos bioactivos el betabel ha sido empleado tradicionalmente para el tratamiento de enfermedades infecciosas, lo que provee la base para determinar su efecto inhibitor sobre patógenos (Gong *et al.*, 2022). El betabel es considerado como un superalimento debido a su contenido en nutrientes como minerales, antioxidantes y vitaminas (A, B y C), fibra, nitratos y colorantes naturales (Moulick *et al.*, 2023). Colorantes, como betalaínas, contenidas en betabel han sido señalados como sustitutos prometedores de los sintéticos, debido a su variado efecto en la salud, además de ser una opción sustentable y saludable debido a sus propiedades organolépticas y tecnológicas cuando son incorporados a los productos alimenticios (Salman *et al.*, 2024). Las betalaínas pueden prevenir enfermedades como cáncer debido a su alta actividad antioxidante y antimicrobiana (Stoica *et al.*, 2025). Adicionalmente estos pigmentos son considerados aditivos saludables y empleados como conservadores en el procesamiento de alimentos, debido a su naturaleza hidrofílica, a su estabilidad al pH e inocuidad (Dhiman *et al.*, 2021). El betabel también contiene otros compuestos bioactivos como polifenoles, flavonoides, saponinas y carotenoides (Chhikara *et al.*, 2019). Muchos consumidores no están interesados en el betabel debido a su sabor y olor a tierra, por lo que este tubérculo debe ser procesado o ser añadido con otros ingredientes para enmascarar su sabor y aroma (Bangar *et al.*, 2022). En México es consumido principalmente crudo, cocido, en ensaladas, postres y jugos (Ramírez-Melo *et al.*, 2022), en otros países es consumido en su forma fermentada o adicionado como aditivo en leches fermentadas como el yogurt (Abdullah *et al.*, 2023; Daliri *et al.*, 2023). Condiciones genéticas y edafoclimáticas

influyen en el contenido y tipo de compuestos bioactivos y por consiguiente de sus propiedades biológicas, por lo que es importante evaluar el contenido de fitoquímicos y el potencial benéfico a la salud del betabel cultivado en diferentes regiones.

A pesar de sus amplios beneficios nutricionales y a la salud, este tipo de planta no ha sido lo suficientemente utilizada o explotada en México para su uso alimentario, por lo que el estudio del betabel cultivado en el país ayudará a promover su consumo y empleo como ingrediente funcional, por lo que el objetivo de la presente investigación fue evaluar el contenido de compuestos fenólicos y minerales, así como evaluar sus propiedades nutraceuticas como capacidad antioxidante y antihipertensiva del betabel cultivado en el estado de Zacatecas.

Material y Métodos

Material vegetal

Tubérculos de betabel (*Beta vulgaris* L.) fueron colectados en el municipio de Fresnillo, Zacatecas, México (23° 10' 30"N 102° 52' 06"O) a una altura sobre el nivel del mar de 2180 m, en el mes de octubre del 2022. El material fue lavado y desinfectado con hipoclorito de sodio (200 ppm), cortado en rodajas y secado en un horno de aire forzado (Precisión Instruments, Model DN-43) a 40°C por 48 horas. Los vegetales secos fueron molidos (UD Cyclone Sample Mill, UD Corp., Boulder, CO) hasta pasar por una malla 80-US (0.180 mm) y empacados en bolsas de plástico (1 kg). La harina resultante contenía todas las partes anatómicas del bulbo (cáscara y pulpa). La harina de betabel resultante fue almacenada a -10 °C en un congelador (Thermo Scientific) hasta su uso y en oscuridad para evitar la degradación de fitoquímicos.

Extracción de fitoquímicos

0.5 g de harina se mezclaron con 10 mL de metanol al 80 %; esta suspensión se agitó en un rotator (OVAN noria R, EUA, 2010) por 10 min, y fue centrifugada a 3000 x g/10°C/10 min. El sobrenadante se concentró a 35°C (Speed Vac Concentrator, Thermo Electron Corporation) hasta alcanzar un volumen final de 2 mL. (Adom & Liu, 2002).

Flavonoides

En una placa de 96 celdas, se agregaron 20 µL del extracto de fitoquímicos. Los extractos se mezclaron con 80 µL de agua destilada y 6 µL de NaNO₂ al 5 %, y se dejaron en reposo por 5 minutos. Posteriormente fueron adicionados 12 µL de AlCl₃ al 10 %, 10 µL de NaOH 1 M y 20 µL de agua destilada. La absorbancia fue determinada a 510 nm (Synergy HT, Biotek Instrument), después de 30 minutos. Se preparó una curva de calibración utilizando catequina (25-300 ppm) y el contenido de flavonoides fue expresado como mg equivalentes de catequina, CE/100 g, las determinaciones se realizaron por triplicado (Adom & Liu, 2002).

Taninos condensados

1 g de harina se mezcló con 10 mL de acetona al 80 %, posteriormente se tomó una alícuota de 20 µL del extracto y la misma cantidad de una curva estándar de catequina; se mezclaron con 1200 µL de vainillina al 4 % en metanol y 600 µL de HCL concentrado. Se dejaron en reposo durante 15 min. La solución resultante se vertió en una celda de cuarzo y posteriormente se registró la absorbancia a 500 nm (Synergy HT, Biotek Instrument). Los resultados se calcularon y expresaron como mg equivalentes de catequina, CE/100 g, empleando una curva de calibración de catequina 50 a 1000 µg/mL. Las determinaciones se realizaron por triplicado (Xu & Chang, 2007).

Cumarinas

A 24 mg de la harina de betabel se le adicionaron 50 mL de una solución metanol/agua (80:20), a partir de esta disolución se tomaron 8 mL, y se aforaron a 25 mL con metanol:agua (80:20), y se filtró con papel Whatman No. 2, obteniendo una concentración final teórica de 153.6 µg/mL. El extracto fue obtenido a temperatura ambiente (25 °C) bajo agitación constante por 3 min, se seleccionó esta concentración con base en ensayos preliminares con el fin de obtener señales dentro del rango lineal de detección del método espectrofotométrico utilizado para la cuantificación de cumarinas. Las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro (Synergy HT, Biotek Instrument), a una longitud de onda de 275 nm. Se preparó una curva de calibración tomando como estándar de cumarina, la 2H-1-benzopirano-2-ona, 3,8-trihidroxí (Sigma-Aldrich) a diferentes concentraciones (4.8 a 10.8 µg/mL), los resultados fueron expresados como mg equivalentes de cumarina, CUE/100 g, las mediciones se realizaron por triplicado (Soares e Silva *et al.*, 2012).

Compuestos fenólicos

En una placa de 96 celdas, se agregaron 20 µL del extracto de fitoquímicos. Se mezclaron con 180 µL del reactivo de Folin Ciocalteu. Posteriormente, la reacción se llevó a un medio alcalino mediante la adición de 50 µL Na₂CO₃ al 7 % y la mezcla se dejó reposar durante 90 min. La absorbancia fue registrada a 750 nm (Synergy HT, Biotek Instrument), se preparó una curva de calibración utilizando ácido gálico como estándar. El contenido de fenólicos totales fue expresado como mg equivalentes de ácido gálico, AGE/100 g, las determinaciones se realizaron por triplicado (Singleton *et al.*, 1999).

Capacidad antioxidante por DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo)

Se preparó una solución 150 µmol/L de DPPH en metanol al 80 %, se mezcló 20 µL de la curva estándar de trolox y del extracto de fitoquímicos con 200 µL de la solución de DPPH en una placa de 96 celdas. Se incubó por 30 minutos, en oscuridad. La absorbancia fue determinada a 540 nm (SynergyTM HT Multi-Detection, BioTek, Inc., Winooski, VT). Se construyó una curva estándar de trolox (25-100 µM) y la actividad antiradical fue expresada como µmol equivalentes de Trolox, TE/100 g. Las determinaciones se realizaron por triplicado (Cardador-Martínez *et al.*, 2002).

Capacidad antioxidante por ABTS (ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolin)-6-sulfónico)

El radical ABTS•+ se obtiene tras la reacción de ABTS (7 mM) con persulfato potásico (2.45 mM) mezclados en partes iguales e incubados en oscuridad durante 16 h. Una vez formado el radical se diluyó en una solución amortiguadora de fosfatos hasta obtener un valor de absorbancia entre 0.70 ± 0.02 a 735 nm. A 1980 µL de la dilución del radical ABTS•+ se le añadieron 20 µL de extracto de fitoquímicos y se incubaron 15 min en oscuridad para posteriormente medir la absorbancia a 735 nm (SynergyTM HT Multi-Detection, BioTek, Inc., Winooski, VT). Se construyó una curva estándar de trolox (25-100 µM). La actividad antiradical fue expresada como µmol equivalentes de Trolox, TE/100 g. Las determinaciones se realizaron por triplicado (Re *et al.*, 1999).

Capacidad antioxidante por el método ORAC (capacidad de absorción de radicales de oxígeno)

Los extractos fueron evaluados empleando Trolox como estándar y fluoresceína como prueba. Los radicales peroxilo fueron generados por 2,2-azobis (2-amidinopropano) dihidrocloruro (AAPH) a una concentración de 200 mmol/L, y la pérdida de 0.1 mmol/L de fluorescencia fue monitoreada en un Synergy Microplate Reader (SynergyTM HT Multi-Detection, BioTek, Inc., Winooski, VT) cada 2 min durante 1 h a 485 nm de excitación y 538 nm de emisión, respectivamente. La actividad antioxidante fue expresada como µmol equivalentes de Trolox, TE/100 g. Las determinaciones se realizaron por triplicado (Ou *et al.*, 2001).

Minerales

El contenido de minerales se realizó utilizando el método 955.06 de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1998) a partir de muestras calcinadas (450 °C, 6 h) y digeridas con HCl concentrado, utilizando un espectro de absorción atómica (Perkin-Elmer 2380). Los resultados de minerales fueron expresados como partes por millón (ppm). Todos los resultados fueron expresados en base seca. Las determinaciones se realizaron por triplicado

Actividad inhibitoria de la enzima convertidora de angiotensina (ACE)

Se midió la actividad de 0.05 mL de la ACE frente a su sustrato, Hipuril-L-Histidil-L-Leucina (SIGMA) a una concentración (% p/v) de 0.30 %. Bajo las mismas condiciones se realizó la medición de la actividad de la ACE adicionando enalapril (SIGMA), a una concentración de 0.4 % p/v como control positivo. De la misma manera, se evaluó la propiedad inhibitoria en los extractos de harina de betabel. La concentración de cada uno fue de 0.2 % p/v en un buffer de fosfatos PBS. Se realizó una incubación a 37 °C por 30 minutos de la enzima con su sustrato y según era el caso con los inhibidores; la reacción fue detenida con 0.25 ml de HCl 1 M. Posteriormente se realizó una extracción del producto de la actividad enzimática (ácido hipúrico) con 1.0 mL de acetato de etilo, seguido de su evaporación; este producto se solubilizó en 1.5 ml de agua destilada. Se determinó la absorbancia del producto obtenido a una longitud de onda de 228 nm (Synergy HT, Biotek Instrument), todos los análisis se realizaron por triplicado (Wang *et al.*, 2003). La actividad antihipertensiva se expresó como % inhibición de la ACE y se calculó como sigue:

$$\% \text{ Inhibición} = (\text{Absorbancia control} - \text{Absorbancia muestra}) / (\text{Absorbancia control}) \times 100$$

Análisis estadístico

Cada una de las determinaciones se realizó por triplicado. Los resultados son reportados como la media y desviación estándar.

Resultados y Discusión

Flavonoides

De los numerosos metabolitos secundarios contenidos en las plantas, los flavonoides representan una subclase de compuestos fenólicos, con una amplia distribución en el reino vegetal y son encontrados en la mayoría de sus tejidos (hojas, frutos, flores, semillas y raíces). En nuestro estudio se obtuvieron valores de 780 mg CE/100 g (Tabla 1). Existen varios reportes del contenido de flavonoides en betabel, sin embargo, la mayoría han sido empleando quercetina como estándar, en cultivos de Egipto, Pakistan, Sri Lanka y Bangladesh se han reportado valores de 190 a 730 mg QE/100 g (Moulick *et al.*, 2023; Rangani & Ranaweera, 2023; Farhan *et al.*, 2024; Sheir *et al.*, 2025). En la planta completa, se ha reportado que el mayor contenido de flavonoides es encontrado en el bulbo, en comparación con las hojas y los tallos (Abdo *et al.*, 2020; Boatemaa *et al.*, 2025). Los principales flavonoides identificados en betabel son quercetina, apigenina, rutina, miricetina, isoquercetina, kaempferol y eriodictiol (Arjeh *et al.*, 2022; Ojo *et al.*, 2024). Con respecto a la salud humana, los flavonoides son empleados en campos importantes, como el farmacéutico y el cosmético, además de su potencial nutricional y nutraceutico (Ullah *et al.*, 2020; Nicolescu *et al.*, 2025). Su contenido en vegetales depende de varios factores, incluyendo el tipo de planta (variedad, estado de maduración) condiciones de cultivo (clima, cosecha), además de las condiciones de almacenamiento (Sentkowska & Pyrzynska, 2023). Se ha comprobado que el contenido total de compuestos fenólicos depende del lugar de su cultivo (Rao *et al.*, 2020), por lo que es importante la determinación de flavonoides y de compuestos fenólicos en betabel cultivado en México. La bioactividad de los flavonoides está relacionada con su estructura y la posición de los grupos hidroxilo

(Días *et al.*, 2021). En la salud humana, los flavonoides tienen un rol terapéutico significativo. Se ha demostrado que pueden proteger las células del daño oxidativo, el cual ha sido relacionado con diversas enfermedades crónicas como cáncer, enfermedades cardiovasculares y diabetes (Alsawaf *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2022).

Tabla 1. Contenido de compuestos fenólicos.

Flavonoides mg CE/100 g	Taninos mg CE/100 g	Cumarinas mg CUE/100 g	Fenólicos totales mg AGE/100 g
780 ± 6	440 ± 8	44 ± 5	321 ± 10

Taninos

No existen muchos reportes del contenido total de taninos en betabel, pero cultivos de este tubérculo originarios de Azerbaiyán empleando ácido gálico como estándar han reportado valores de 370 mg AGE/100 g en pulpa y en la cáscara es donde se ha encontrado una mayor cantidad con 580 mg AGE/100 g (Arjeh *et al.*, 2022). En nuestra muestra de betabel obtuvimos 440 mg CE/100 g (Tabla 1). Se ha reportado que el contenido de taninos en la planta de betabel se encuentra principalmente en los bulbos, encontrándose en menor cantidad en las hojas y en los tallos (Boatema *et al.*, 2025). Los taninos pueden alterar las propiedades de los alimentos al interactuar con diversas biomoléculas como proteínas y polisacáridos presentes en los sistemas alimentarios a través de enlaces covalente y no covalentes. Los taninos exhiben actividades antioxidantes que pueden potencialmente ayudar a mejorar la salud, al elevar el nivel nutricional de los productos alimenticios (Moura de Melo *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2025). Estos polifenoles también influyen en la fluidez, dureza, viscosidad y otras propiedades reológicas de los almidones (Wu *et al.*, 2024). En vegetales los taninos son los polifenoles más ampliamente distribuidos en la naturaleza y presentan varios efectos biológicos, como actividad antioxidante, antibacteriana, antiparasitaria, antiviral y propiedades anticarcinogénicas (Cosme *et al.*, 2025; Ozogul *et al.*, 2025). Los taninos pueden promover el crecimiento en animales al regular el balance en la microbiota intestinal, además de aumentar la capacidad antioxidante y mejorar el sistema inmune en el cuerpo (Peng *et al.*, 2021).

Cumarinas

Existen pocos reportes sobre el contenido de cumarinas en betabel por lo que es importante su determinación. En nuestro estudio se encontró un valor de 44 mg CUE/100 g (Tabla 1). Se han reportado hasta 15 diferentes tipos en frutos como el membrillo de bengala (*Aegle marmelos*), también se ha reportado su presencia en pomelo (*Citrus maxim*), siendo cuatro, las principales cumarinas identificadas, imperatorina, isoimperatorina, xantotoxina y bergapteno (Sapkota *et al.*, 2022; Sahoo *et al.*, 2025). En plantas, las cumarinas son encontradas en su forma libre o como glucósidos, son un grupo de fitoquímicos con olor dulce y en la actualidad están siendo utilizadas para el tratamiento de desórdenes de salud mental como esquizofrenia, ansiedad y depresión (Sahni *et al.*, 2021). La diversidad de formas que presentan es lo que permite que tengan una amplia y diversa actividad biológica, como antiinflamatoria, antitrombótica, antimicrobiana, antifúngica, antiviral, anticonvulsivante, antioxidante y antitumoral (Hussain *et al.*, 2024; Rabelo *et al.*, 2024). Muchas plantas contienen diferentes concentraciones de cumarinas. El haba tonka (*Coumarouna odorata*), regaliz (*Glycyrrhiza glabra*) y la canela cassia (*Cinnamomum cassia*) presentan altas concentraciones de cumarinas naturales. A pesar de su olor dulce los animales tienden a evitar a las plantas que contienen este fitoquímico debido a su sabor amargo (Menezes & Diederich, 2019). Son conocidas por su agradable olor a vainilla, por lo que son empleadas como potenciadores de aroma en la elaboración de diversos alimentos y en panificación (Lončar *et al.*, 2020).

Fenólicos totales

El contenido total de compuestos fenólicos en betabel fue de 321 mg AGE/100 g (Tabla 1). En jugo de betabel se han reportado valores de 89 a 367 mg AGE/100 g (Ramírez-Melo *et al.*, 2022) y en cultivos de Italia, Pakistán y Azerbaiyán se han reportado valores de 313 a 560 mg AGE/100 g (Rocchetti *et al.*, 2020; Arjeh *et al.*, 2022; Farhan *et al.*, 2024). Factores como la fenología y cambios en las condiciones climáticas, influyen en las rutas biosintéticas de estos compuestos bioactivos, influyendo en el contenido, composición y actividades biológicas relacionadas a este tipo de fitoquímico (Misra *et al.*, 2023). En las plantas tienen un amplio rango en composición y contenido, además de variar entre especies y dentro especies. Los factores que contribuyen a estas diferencias son variabilidades genéticas y condiciones edafoclimáticas (Misra *et al.*, 2023). En la planta de betabel completa, se ha detectado un mayor contenido en las hojas, seguido por el bulbo y en menor contenido en los tallos (Boatema *et al.*, 2025). Los compuestos fenólicos en plantas son conocidos por proteger el cuerpo humano del estrés oxidativo interno y externo, evitando el daño celular (Tacias-Pascacio *et al.*, 2022). Compuestos fenólicos como ácidos fenólicos, taninos, cumarinas y flavonoides se han detectado en betabel (Bangar *et al.*, 2022; de Oliveira *et al.*, 2023). La potente actividad antioxidante de estos fitoquímicos es debida a sus distintivos grupos funcionales y estructuras químicas. Las propiedades antioxidantes que presentan son derivadas del potencial reactivo de los grupos hidroxilo en su anillo aromático. Al donar electrones o hidrógenos, los compuestos fenólicos pueden neutralizar radicales libres y evitar su daño oxidativo, esto resulta en un efecto protector en la salud humana, asociado con la prevención de enfermedades como cáncer y enfermedades cardiovasculares (Chaves *et al.*, 2020; Singh & Yadav, 2022).

Minerales

El betabel es considerado una fuente importante de minerales que influyen en muchos procesos fisiológicos, que originan beneficios a la salud, los minerales detectados en nuestra muestra son mostrados en la Tabla 2 (Chen *et al.*, 2021). El calcio es útil en varios procesos fisiológicos como la contracción muscular, conducción nerviosa, coagulación sanguínea y en la integridad estructural ósea (Kheeree *et al.*, 2022). Los requerimientos diarios de calcio son de 1500 a 2000 mg/día (Dwarkanath *et al.*, 2024) y en betabel se obtuvieron valores de 1537 mg/kg. El fósforo es muy relevante para el funcionamiento de la célula, ya que forma parte del DNA y de las membranas celulares, y es útil para actividades relacionadas con la producción de energía y numerosas funciones del metabolismo. También es un constituyente importante de los huesos y dientes (Fulgioni *et al.*, 2022). El consumo diario recomendado de fósforo es de 800 a 1000 mg/día (Schneider *et al.*, 2024) y en nuestra muestra se encontró un valor de 19 mg/kg. El magnesio es responsable de numerosas funciones en el organismo, incluyendo el desarrollo óseo, funciones neuromusculares, rutas de señalización, almacenamiento de energía, metabolismo de glucosa, lípidos y proteínas, estabilidad del DNA y RNA (Fiorentini *et al.*, 2021), los requerimientos diarios de este mineral en adultos son de 340 a 370 mg/día (Fiorentini *et al.*, 2021) y lo obtenido en betabel fue de 953 mg/kg. Las propiedades oxido-reductoras del hierro y su propensión a intercambiar electrones, hacen a este elemento esencial para la vida y un factor importante para el funcionamiento de numerosas proteínas (hemoglobinas, oxidasas y citocromos), además de funcionar como cofactor para diversas enzimas (aconitasa mitocondrial y proteínas hierro-azufre) (Silvestri *et al.*, 2023). Su consumo diario requerido es de 58 a 75 mg/día para hombres y 77 a 100 mg/día para mujeres (Catapano *et al.*, 2025) y lo encontrado en betabel fue 275 mg/kg. El molibdeno funciona como cofactor en varias enzimas importantes como sulfito oxidasa, xantina oxidasa y diversas enzimas cruciales para la defensa antioxidante y el metabolismo de energía (Jomova *et al.*, 2022). La dosis diaria recomendada en adultos es de 120 a 240 µg/día y en betabel se detectaron 3.32 mg/kg (Adamus *et al.*, 2024). El sodio y potasio son electrolitos esenciales que tienen un rol interdependiente en mantener la homeostasis fisiológica, incluyendo el balance de fluidos, transmisión nerviosa y función muscular (Gałęska *et al.*, 2022). Se recomienda un consumo diario de sodio menor de 2000 mg/día (5 g de sal) y de potasio

de 3500 mg/día, traduciéndose en una relación aproximada Na:K de 0.57, el excesivo consumo de sodio e inadecuado consumo de potasio elevan esta relación a niveles asociados al incremento del riesgo a hipertensión, enfermedades cardiovasculares y enfermedades crónicas del riñón, la relación en betabel Na:K fue de 0.11 mucho menor al límite recomendado (Souza *et al.*, 2025).

Tabla 2. Contenido de minerales.

Calcio ppm	Fósforo ppm	Magnesio ppm	Hierro ppm	Sodio ppm	Potasio ppm	Molibdeno ppm
1,537 ± 1.03	19 ± 0.75	953 ± 0.96	275 ± 0.98	195 ± 0.43	1,758 ± 0.43	3.32 ± 0.44

Actividad antioxidante

El consumo de productos procesados con alto contenido de grasas y carbohidratos ha aumentado notablemente en los últimos años y su demanda no ha disminuido, pero también ha sido común el aumento en adicionar cierto tipo de antioxidantes a este tipo de alimentos. Es muy importante el uso de antioxidantes en alimentos para extender la vida de anaquel y asegurar la calidad de los alimentos procesados (Leyva-Porras *et al.*, 2021). Para evaluar la capacidad antioxidante es importante emplear más de una técnica, la especificidad y sensibilidad de un solo método no indica la completa exanimación de los fitoquímicos en el extracto, de esta forma, la combinación de varios métodos puede proveer una evaluación más confiable del perfil de antioxidantes (Szewczyk *et al.*, 2022). Los resultados obtenidos en betabel se muestran en la Tabla 3, obteniendo 9,125, 7,752 y 6,180 µmol TE/100 g por ABTS, ORAC y DPPH, respectivamente. La mayoría de los valores de capacidad antioxidante reportados en betabel es en base al valor del IC₅₀ donde indica la concentración efectiva del antioxidante en el cual los radicales ABTS y DPPH son neutralizados al 50 % (Arjeh *et al.*, 2022; Rangani & Ranaweera, 2023; Boatemaa *et al.*, 2025). No existen muchos datos de capacidad antioxidante en betabel tomando como referencia al trolox, pero en cultivos de Nigeria, Polonia y Brasil se han reportado valores de 1,133 a 4,971 µmol TE/100 g por ABTS y de 1,020 a 3,287 µmol TE/100 g por DPPH y en ORAC valores de 5,880 µmol TE/100 g en el tubérculo entero y en harina de la cáscara de 3,032 µmol TE/100 g (Raupp *et al.*, 2011; Olumese & Oboh, 2016; Sawicki *et al.*, 2016; Mancini *et al.*, 2021; Coimbra *et al.*, 2023). En el jugo de una muestra de betabel cultivado en Hidalgo, México se han reportado valores de 245 a 374 µmol TE/100 mL y de 215 a 308 µmol TE/100 mL por DPPH y ABTS, respectivamente (Ramírez-Melo *et al.*, 2022).

Tabla 3. Capacidad antioxidante.

DPPH µmol TE/100 g	ABTS µmol T/E100 g	ORAC µmol TE/100 g
6,180 ± 113	9,125 ± 115	7,752 ± 95

Los compuestos antioxidantes pueden actuar por varios mecanismos (quelación de metales de transición, capacidad reductora y neutralización de radicales libres) y de esta forma ayudan a reducir el riesgo de contraer enfermedades crónicas (Gulcin, 2025). Hoy en día, la actividad antioxidante en vegetales ha sido considerada como un indicador de sus posibles efectos benéficos para la salud humana (Xu, 2025). La capacidad de neutralizar los radicales libres de los compuestos antioxidantes contenidos en los vegetales es atribuida al tipo de compuestos bioactivos, junto con factores ambientales, variaciones genéticas y los métodos usados en su extracción (Zargoosh *et al.*, 2019). La capacidad antioxidante en betabel es atribuida no solo a los compuestos fenólicos (flavonoides y

taninos), sino también por los carotenoides, betalaínas, vitamina A y vitamina C, que también pueden jugar un rol sinérgico en prevenir el daño inducido por los radicales en las macromoléculas biológicas y en las células del organismo (Bangar *et al.*, 2022). En la planta completa de betabel, aunque en las hojas se presentan los mayores niveles de vitamina C, compuestos fenólicos y carotenoides, los tallos y bulbos presentan la mayor capacidad antioxidante originado a la mayor presencia de betalaínas, taninos y flavonoides (Boatema *et al.*, 2025).

Actividad inhibitoria de la enzima convertidora de angiotensina

El empleo de inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina (ACE) es uno de los principales agentes terapéuticos para el tratamiento de la hipertensión. La ACE es un componente importante del sistema renina-angiotensina-aldosterona. Esta enzima tiene un rol principal en el mecanismo homeostático en los mamíferos, al contribuir en el mantenimiento normal de la presión arterial y en el balance de los electrolitos (Balakumar & Jagadeesh, 2025). Los inhibidores convencionales de la ACE como temocapril, lisinopril, captopril y enalapril han mostrado eficacia en el control de la hipertensión, sin embargo, estos medicamentos generalmente provocan efectos secundarios (tos, erupciones cutáneas y afectación al sentido del gusto) lo que justifica la búsqueda de nuevos inhibidores naturales más seguros y de menor costo (Pinciroli *et al.*, 2019). Actualmente, varios extractos de plantas son empleados como inhibidores de la ACE, particularmente plantas ricas en polifenoles, debido a sus estructuras aromáticas y grupos hidroxilo, los cuales proveen una fuerte habilidad para neutralizar radicales libres y especies reactivas de oxígeno, por lo que existe una relación entre la capacidad antioxidante y antihipertensiva de las plantas ricas en estos compuestos (Rudrapal *et al.*, 2022). Estudios previos han confirmado que el pH y el contenido de compuestos fenólicos pueden contribuir a la inhibición de la ACE, además interacciones sinérgicas entre los distintos compuestos fenólicos en plantas también aumentan el potencial antihipertensivo (Chaisan *et al.*, 2025). El extracto metanólico de betabel logró una inhibición de la ACE del 53 ± 1 %. En betabel cultivado en Polonia se han reportado valores de inhibición del 30 %, no obstante, en el jugo y cáscara del tubérculo se han reportado valores de inhibición del 86 y 87 %, debido a su mayor contenido de compuestos fenólicos (Sawicki *et al.*, 2019). El control positivo enalapril presentó una inhibición de la enzima del 98 ± 1 %. En plantas empleadas para el control de la hipertensión en la India como *Stevia rebaudiana*, *Cynara scolymus*, *Coscinium fenestratum* y *Embelia ribes* se reportaron valores de inhibición del 40 al 53 % (Khan & Kumar, 2019). Un posible mecanismo de inhibición de la ACE por los compuestos fenólicos, como los contenidos en betabel, es la generación de quelatos capaces de formar complejos con el zinc dentro del centro activo de la enzima y de esta forma inactivarla (Zielińska *et al.*, 2025). Estudios *in silico* han mostrado que los compuestos bioactivos presentes en betabel pueden unirse al sitio activo de la ACE y establecer interacciones químicas simultáneamente con aminoácidos y los átomos de zinc, causando alteraciones en la estructura 3-D del sitio proteico catalítico y de esta forma probar ser un inhibidor efectivo de la ACE (Abdullah *et al.*, 2023).

Conclusiones

Los resultados obtenidos indican los primeros estudios sobre el contenido de compuestos fenólicos y el potencial nutracéutico evaluado con la capacidad antioxidante y actividad antihipertensiva del betabel cultivado en el estado de Zacatecas, estos resultados sugieren la considerable cantidad de fitoquímicos presentes en el tubérculo que pueden ser considerados como una fuente de ingredientes funcionales para aplicaciones alimentarias, así mismo, el contenido de minerales como Ca, Mg y Fe contribuyen al aporte dietario de minerales esenciales, no obstante son necesarios estudios adicionales de biodisponibilidad o ensayos *in vivo* para conocer las dosis requeridas de betabel, que pudieran satisfacer los requerimientos diarios requeridos. Estos resultados ayudarán a promover su consumo, ya que comprueban la importancia del betabel como una fuente de nutrientes naturales que es poco conocida.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, A-R. J., A-L. J.L.; desarrollo de la metodología, A-R. J., M-R. S.; manejo de software, N-C. R.O., T-J. X.; validación experimental, M-A. M., N-C. R.O., T-J. X.; análisis de resultados, A-R. J., M-R. S.; Manejo de datos, M-A. M., A-L. J.L.; escritura y preparación del manuscrito, M-R. S., A-R. J.; redacción, revisión y edición, A-R. J., M-R. S., M-A. M.; administrador de proyectos, M-A. M., N-C. R.O.; adquisición de fondos, A-L. J.L., M-R. S., A-R. J.

Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada con fondos propios.

Agradecimientos

Agradecimiento a la Universidad Autónoma de Zacatecas por las facilidades otorgadas para la realización de la presente investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Abdo, E., El-Sohaimy, S., Shaltout, O., Abdalla, A., & Zeitoun, A. (2020). Nutritional evaluation of beetroots (*Beta vulgaris* L.) and its potential application in a functional beverage. *Plants*, 9(12), 1752. <https://doi.org/10.3390/plants9121752>
- Abdullah, R., Arshad, H., Kaleem, A., Iqtedar, M., Aftab, M., & Saleem, F. (2023). Assessment of angiotensin converting enzyme inhibitory activity and quality attributes of yoghurt enriched with *Cinnamomum verum*, *Elettaria cardamomum*, *Beta vulgaris* and *Brassica oleracea*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(2), 103556. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103556>
- Adamus, J. P., Ruszczyńska, A., & Wyczalkowska-Tomasik, A. (2024). Molybdenum's Role as an Essential Element in Enzymes Catabolizing Redox Reactions: A Review. *Biomolecules*, 14(7), 869. <https://doi.org/10.3390/biom14070869>
- Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6182-6187. <https://doi.org/10.1021/jf0205099>
- Alsawaf, S., Alnuaimi, F., Afzal, S., Thomas, R. M., Chelakkot, A. L., Ramadan, W. S., Hodeify, R., Matar, R., Merheb, M., Siddiqui, S. S., & Vazhappilly, C. G. (2022). Plant Flavonoids on Oxidative Stress-Mediated Kidney Inflammation. *Biology*, 11(12), 1717. <https://doi.org/10.3390/biology11121717>
- Arjeh, E., Khodaei, S. M., Barzegar, M., Pirsá, S., Karimi, S. I., Rahati, S., & Mohammadi, F. (2022). Phenolic compounds of sugar beet (*Beta vulgaris* L.): Separation method, chemical characterization, and biological properties. *Food Science and Nutrition*, 10(12), 4238-4246. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3017>
- Association of Official Analytical Chemists [AOAC]. (1998). Official methods of analysis (16th ed.). AOAC
- Balakumar, P., & Jagadeesh, G. (2025). Game-changing breakthroughs to redefine the landscape of the renin-angiotensin-aldosterone system in health and disease. *Cellular Signalling*, 126, 111459. <https://doi.org/10.1016/j.cellsig.2024.111459>

- Bangar, S. P., Sharma, N., Sanwal, N., Lorenzo, J. M., & Sahu, J. K. (2022). Bioactive potential of beetroot (*Beta vulgaris*). *Food Research International*, 158, 111556. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111556>
- Boatema, E., Larbie, C., Tandoh, M. A., & Lutterodt, H. E. (2025). Assessment of the nutritional and phytochemical composition in *Beta vulgaris* bulb, stalk and leaves powder. *Applied Food Research*, 5(2), 101442. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101442>
- Borjan, D., Šeregelj, V., Andrejč, D. C., Pezo, L., Šaponjac, V. T., Knez, Ž., Vulić, J., & Marevci, M. K. (2022). Green Techniques for Preparation of Red Beetroot Extracts with Enhanced Biological Potential. *Antioxidants*, 11(5), 805. <https://doi.org/10.3390/antiox11050805>
- Cardador-Martínez, A., Loarca-Piña, G., & Ooman, B. D. (2002). Antioxidant activity in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(24), 6975-6980. <https://doi.org/10.1021/jf020296n>
- Catapano, A., Cimmino, F., Petrella, L., Pizzella, A., D'Angelo, M., Ambrosio, K., Marino, F., Sabbatini, A., Petrelli, M., Paolini, B., Lucchin, L., Cavaliere, G., Cristino, L., Crispino, M., Trinchese, G., & Mollica, M. P. (2025). Iron metabolism and ferroptosis in health and diseases: The crucial role of mitochondria in metabolically active tissues. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 140, 109888. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2025.109888>
- Chaisan, W., Salee, N., Pakkaew, P., & Utama-ang, N. (2025). Enhanced angiotensin-converting enzyme inhibition and antioxidant activities through synergistic green tea and black rice extracts. *Food Chemistry Advances*, 7, 100993. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100993>
- Chaves, J. O., De Souza, M. C., Da Silva, L. C., Lachos-Perez, D., Torres-Mayanga, P. C., Machado, A. P. D. F., Forster-Carneiro, T., Vázquez-Espinosa, M., González-de-Peredo, A. V., Barbero, G. F., & Rostagno, M. A. (2020). Extraction of flavonoids from natural sources using modern techniques. *Frontiers in Chemistry*, 8, 507887. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.507887>
- Chen, L., Zhu, Y., Hu, Z., Wu, S., & Jin, C. (2021). Beetroot as a functional food with huge health benefits: Antioxidant, antitumor, physical function, and chronic metabolomics activity. *Food Science and Nutrition*, 9(11), 6406-6420. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2577>
- Chhikara, N., Kushwaha, K., Sharma, P., Gat, Y., & Panghal, A. (2019). Bioactive compounds of beetroot and utilization in food processing industry: A critical review. *Food Chemistry*, 272, 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.022>
- Coimbra, P. P. S., Silva-e-Silva, A. C. A. G. d., Antonio, A. d. S., Pereira, H. M. G., Veiga-Junior, V. F. d., Felzenszwalb, I., Araujo-Lima, C. F., & Teodoro, A. J. (2023). Antioxidant Capacity, Antitumor Activity and Metabolomic Profile of a Beetroot Peel Flour. *Metabolites*, 13(2), 277. <https://doi.org/10.3390/metabo13020277>
- Cosme, F., Aires, A., Pinto, T., Oliveira, I., Vilela, A., & Gonçalves, B. (2025). Una revisión exhaustiva de taninos bioactivos en alimentos y bebidas: Propiedades funcionales, beneficios para la salud y cualidades sensoriales. *Molecules*, 30 (4), 800. <https://doi.org/10.3390/molecules30040800>
- Daliri, E. B. M., Balnionytė, T., Stankevičiūtė, J., Lastauskienė, E., Meškys, R., & Aurelijus Burokas, A. (2023). High temperature lacto-fermentation improves antioxidant and antidiabetic potentials of Lithuanian red beetroot. *LWT*, 185(1), 115122. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115122>
- de Oliveira, S. P. A., de Albuquerque, T. M. R., Massa, N. M. L., Rodrigues, N. P. A., Sampaio, K. B., do Nascimento, H. M. A., Dos Santos Lima, M., da Conceição, M. L., & de Souza, E. L. (2023). Investigating the effects of conventional and unconventional edible parts of red beet (*Beta vulgaris* L.) on target bacterial groups and metabolic activity of human colonic microbiota to produce novel and sustainable prebiotic ingredients. *Food Research International*, 171, 112998. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112998>
- Dhiman, A. S., Taliadoros, D., Stukenbrock, E. H., McGrath, J. M., Emrani, N., & Jung, C. (2025). Signatures in domesticated beet genomes pointing at genes under selection in a sucrose-storing root crop. *BMC Biology*, 23, 299. <https://doi.org/10.1186/s12915-025-02422-5>
- Dias, M. C., Pinto, D. C. G. A., & Silva, A. M. S. (2021). Plant flavonoids: chemical characteristics and biological activity. *Molecules*, 26, 5377. <https://doi.org/10.3390/molecules26175377>
- Dwarkanath, P., Muhihi, A., Sudfeld, C. R., Wylie, B. J., Wang, M., Perumal, N., Thomas, T., Kinyogoli, S. M., Bakari, M., Fernandez, R., Raj, J. M., Swai, N. O., Buggi, N., Shobha, R., Sando, M. M., Duggan, C. P., Masanja, H. M., Kurpad, A. V., Pembe, A. B., & Fawzi, W. W. (2024). Two

- Randomized Trials of Low-Dose Calcium Supplementation in Pregnancy. *The New England Journal of Medicine*, 390(2), 143-153. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2307212>
- Farhan, M., Ahmad, Z., Waseem, M., Mehmood, T., Javed, M. R., Ali, M., Manzoor, M. F., & Goksen, G. (2024). Assessment of Beetroot powder as nutritional, antioxidant, and sensory evaluation in candies. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 101023. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101023>
- Fiorentini, D., Cappadone, C., Farruggia, G., & Prata, C. (2021). Magnesium: Biochemistry, Nutrition, Detection, and Social Impact of Diseases Linked to Its Deficiency. *Nutrients*, 13, 1136. <https://doi.org/10.3390/nu13041136>
- Fulgoni, K., Fulgoni, V. L., & Wallace, T. C. (2022). Association of Total, Added, and Natural Phosphorus Intakes with Biomarkers of Health Status and Mortality in Healthy Adults in the United States. *Nutrients*, 14(9), 1738. <https://doi.org/10.3390/nu14091738>
- Gałęska, E., Wrzecińska, M., Kowalczyk, A., & Araujo, J. P. (2022). Reproductive Consequences of Electrolyte Disturbances in Domestic Animals. *Biology*, 11(7), 1006. <https://doi.org/10.3390/biology11071006>
- Gong, S., Jiao, C., & Guo, L. (2022). Antibacterial mechanism of beetroot (*Beta vulgaris*) extract against *Listeria monocytogenes* through apoptosis-like death and its application in cooked pork. *LWT*, 165, 113711. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113711>
- Gulcin I. (2025). Antioxidants: a comprehensive review. *Archives of Toxicology*, 99(5), 1893-1997. <https://doi.org/10.1007/s00204-025-03997-2>
- Hussain, M. K., Khatoon, S., Khan, M. F., Akhtar, M. S., Ahamad, S., & Saquib, M. (2024). Coumarins as versatile therapeutic phytomolecules: A systematic review. *Phytomedicine*, 134, 155972. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2024.155972>
- Jomova, K., Makova, M., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H., Nepovimova, E., Kuca, K., Rhodes, C. J., & Valko, M. (2022). Essential metals in health and disease. *Chemico-Biological Interactions*, 367, 110173. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.110173>
- Khan, M. Y., & Kumar, V. (2019). Mechanism & inhibition kinetics of bioassay-guided fractions of Indian medicinal plants and foods as ACE inhibitors. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 9(1), 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2018.02.001>
- Kheeree, N., Kuptawach, K., Puthong, S., Sangtanoo, P., Srimongkol, P., Boonserm, P., Reamtong, O., Choowongkamon, K., & Karnchanatat, A. (2022). Discovery of calcium-binding peptides derived from defatted lemon basil seeds with enhanced calcium uptake in human intestinal epithelial cells, Caco-2. *Scientific Reports*, 12(1), 4659. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08380-0>. 4659
- Leyva-Porras, C., Román-Aguirre, M., Cruz-Alcantar, P., Pérez-Urizar, J. T., & Saavedra-Leos, M. Z. (2021). Application of Antioxidants as an Alternative Improving of Shelf Life in Foods. *Polysaccharides*, 2, 594–607. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2030036>
- Lončar, M., Jakovljević, M., Šubarić, D., Pavlić, M., Buzjak-Služek, V., Cindrić, I., & Molnar, M. (2020). Coumarins in Food and Methods of Their Determination. *Foods*, 9(5), 645. <https://doi.org/10.3390/foods9050645>
- Mancini, M. C. S., Ponte, L. G. S., Silva, C. H. R., Fagundes, I., Pavan, I. C. B., Romeiro, S. A., da Silva, L. G. S., Morelli, A. P., Rostagno, M. A., Simabuco, F. M., & Bezerra, R. M. N. (2021). Beetroot and Leaf Extracts Present Protective Effects against Prostate Cancer Cells, Inhibiting Cell Proliferation, Migration, and Growth Signaling Pathways. *Phytotherapy Research*, 35(9), 5241–5258. <https://doi.org/10.1002/ptr.7197>
- Menezes, J. C., & Diederich, M. (2019). Translational role of natural coumarins and their derivatives as anticancer agents. *Future medicinal chemistry*, 11(9), 1057-1082. <https://doi.org/10.4155/fmc-2018-0375>
- Misra, D., Dutta, W., Jha, G., & Ray, P. (2023). Interacciones y funciones reguladoras de los fenólicos en el nexo suelo-planta-clima. *Agronomía*, 13 (2), 280. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020280>
- Moulick, S. P., Jahan, F., Islam, M. B., Bashera, M. A., Hasan, M. S., Islam, M. J., Ahmed, S., Karmakar, D., Ahmed, F., Saha, T., Dey, S. S., Bobby, F., Saha, M., Saha, B. K., & Bhuiyan, M. N. H. (2023). Nutritional characteristics and antiradical activity of turmeric (*Curcuma longa* L.),

- beetroot (*Beta vulgaris* L.), and carrot (*Daucus carota* L.) grown in Bangladesh. *Heliyon*, 9, 11. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21495>
- Moura de Melo, L. F., Aquino-Martins, V. G. Q., Pereira da Silva, A., Oliveira Rocha, H. A., & Scortecchi, K. C. (2023). Biological and pharmacological aspects of tannins and potential biotechnological applications. *Food Chemistry*, 414, 135645. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135645>
- Nicolescu, A., Bunea, C. I., & Mocan, A. (2025). Total flavonoid content revised: An overview of past, present, and future determinations in phytochemical analysis. *Analytical Biochemistry*, 700, 115794. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2025.115794>
- Ojo, O. A., Gyebi, G. A., Ezenabor, E. H., Iyobhebhe, M., Emmanuel, D. A., Adelowo, O. A., Olujinmi, F. E., Ogunwale, T. E., Babatunde, D. E., Akingbolabo Ogunlakin, A. D., Ojo A. B., & Adeyemi, O. S. (2024). Exploring beetroot (*Beta vulgaris* L.) for diabetes mellitus and Alzheimer's disease dual therapy: *in vitro* and computational studies. *RSC advances*, 14(27), 19362-19380. <https://doi.org/10.1039/D4RA03638G>
- Olumese, F. E., & Oboh, H. A. (2016). Antioxidant and Antioxidant capacity of raw and processed Nigerian Beetroot (*Beta vulgaris*). *Nigerian Journal of Basic and Applied Science*, 24(1), 35-40. <http://dx.doi.org/10.4314/njbas.v24i1.6>
- Ou, B., Hampsch-Woodill, M., & Prior, R. L. (2001). Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4619–4626. <https://doi.org/10.1021/jf010586o>
- Ozogul, Y., Ucar, Y., Tadesse, E. E., Rathod, N., Kulawik, P., Trif, M., Esatbeyoglu, T., & Ozogul, F. (2025). Tannins for food preservation and human health: A review of current knowledge. *Applied Food Research*, 5(1), 100738. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100738>
- Peng, K., Huang, W., Zhao, H., Sun, Y., & Chen, B. (2021). Dietary condensed tannins improved growth performance and antioxidant function but impaired intestinal morphology of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Reports*, 21, 100853. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100853>
- Pincirolì, M., Aphalo, P., Nardo, A. E., Añón, M. C., & Quiroga, A. V. (2019). Broken Rice as a Potential Functional Ingredient with Inhibitory Activity of Renin and Angiotensin-Converting Enzyme (ACE). *Plant Foods for Human Nutrition*, 74, 405–413. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00754-6>
- Rabelo, V. W. H., Carneiro, L. S. d. A., Martins, L. L. B., Almeida-Souza, F., Silva, L. S., Amorim, L. d. S. C., Sanchez-Núñez, M. L., Calabrese, K. d. S., Abreu, P. A., Buarque, C. D., & Paixão, I. C. N. d. P. (2024). Biological Evaluation of 3-Aryl and/or 4-(N-Aryl) aminocoumarins Against Human Pathogens: Antileishmanial and Antiviral Activities. *Future Pharmacology*, 4(4), 919-933. <https://doi.org/10.3390/futurepharmacol4040048>
- Ramírez-Melo, L. M., Cruz-Cansino, Delgado-Olivares, L., Ramírez-Moreno, E., Zafra-Rojas, Q. Y., Hernández-Traspeña, J. L., & Suárez-Jacobo, A. (2022). Optimization of antioxidant activity properties of a thermosonicated beetroot (*Beta vulgaris* L.) juice and further *in vitro* bioaccessibility comparison with thermal treatments. *LWT*, 154, 112780. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112780>
- Rangani, S. C., & Ranaweera, K. K. D. S. (2023). Incorporation of natural antioxidants extracted from strawberry, cinnamon, beetroot, and ginger; into virgin coconut oil for expansion of its shelf life. *Applied Food Research*, 3(2), 100325. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100325>
- Rao, S., Santhakumar, A. B., Chinkwo, K. A., & Blanchard C. L. (2020). Investigation of phenolic compounds with antioxidant activity in barley and oats affected by variation in growing location. *Cereal Chemistry*, 97(4), 772-782. <https://doi.org/10.1002/cche.10291>
- Raupp, D. D. S., Rodrigues, E., Rockenbach, I. I., Carbonar, A., Campos, P. F. D., Borsato, A. V., & Fett, R. (2011). Effect of processing on antioxidant potential and total phenolics content in beet (*Beta vulgaris* L.). *Food Science and Technology*, 31, 688-693. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612011000300021>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, 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)

- Rocchetti, G., Tomas, M., Zhang, L., Zengin, G., Lucini, L., & Capanoglu, E. (2020). Red beet (*Beta vulgaris*) and amaranth (*Amaranthus* sp.) microgreens: Effect of storage and *in vitro* gastrointestinal digestion on the untargeted metabolomic profile. *Food Chemistry*, 332, 127415. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127415>
- Rudrapal, M., Khairnar, S. J., Khan, J., Dukhyil, A. B., Ansari, M. A., Alomary, M. N., Alshabrm, F. M., Palai, S., Deb, P. K., & Devi, R. (2022). Dietary polyphenols and their role in oxidative stress-induced human diseases: Insights into protective effects, antioxidant potentials and mechanism(s) of action. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 806470. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.806470>
- Sahni, T., Sharma, S., Verma, D., & Kaur, P. (2021). Overview of coumarins and its derivatives: Synthesis and biological activity. *Letters in Organic Chemistry*, 18(11), 880-902. <https://doi.org/10.2174/1570178617999201006195742>
- Sahoo, L., Nayak, Y., & Mohanty, S. K. (2025). Exploring the phytochemical constituents of *Aegle marmelos* (bael) and their therapeutic potential against chronic diseases. *International Journal of Basic & Clinical Pharmacology*, 14(2), 316-323. <https://dx.doi.org/10.18203/2319-2003.ijbcp20250495>
- Salman, K. H., Mehany, T., Zaki, K. G., & Al-Doury, K. W. M. (2024). Development of functional probiotic yogurt from buffalo milk supplemented with red beetroot (*Beta vulgaris* L.) as an antioxidant, natural colorant, and starter growth stimulant. *Food Chemistry Advances*, 5, 100776. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100776>
- Sapkota, B., Devkota, H. P., & Poudel, P. (2022). *Citrus maxima* (Brum.) Merr. (Rutaceae): Bioactive Chemical Constituents and Pharmacological Activities. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 30, 8741669. <https://dx.doi.org/10.1155/2022/8741669>
- Sawicki, T., Bączek, N., & Wiczowski, W. (2016). Betalain profile, content and antioxidant capacity of red beetroot dependent on the genotype and root part. *Journal of Functional Foods*, 27, 249-261. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.09.004>
- Schneider, S. T., Klug, A., & Andrade, J. M. (2024). Phosphorus Knowledge and Dietary Intake of Phosphorus of US Adults Undergoing Dialysis. *Nutrients*, 16(13), 2034. <https://doi.org/10.3390/nu16132034>
- Sentkowska, A., & Pyrzynska, K. (2023). Old-Fashioned, but Still a Superfood—Red Beets as a Rich Source of Bioactive Compounds. *Applied Sciences*, 13, 7445. <https://doi.org/10.3390/app13137445>
- Seremet, L., Nistor, O. V., Andronoiu, D. G., Mocanu, G. D., Barbu, V. V., Maidan, A., Rudi, L., & Botez, E. (2020). Development of several hybrid drying methods used to obtain red beetroot powder. *Food Chemistry*, 310, 125637. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125637>
- Sheir, M. A., Ramadan, M. M., El-Messery, T. M., & Mohamed, E. N. (2025). Enhancing iron bioavailability and bioactive stability in sweet-sour beetroot sauce through liposomal vitamin C. *Food Chemistry Advances*, 7, 101020. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101020>
- Silvestri, L., Pettinato, M., Furioli, V., Bavuso Volpe, L., Nai, A., & Pagani, A. (2023). Managing the Dual Nature of Iron to Preserve Health. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 3995. <https://doi.org/10.3390/ijms24043995>
- Singh, N., & Yadav, S. S. (2022). A review on health benefits of phenolics derived from dietary spices. *Current Research in Food Science*, 5, 1508-1523. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.09.009>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidant by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Soares e Silva, L., Santos da Silva, L., Brumano, L., Stringheta P. C., de Oliveira-Pinto, M. A., Moreira Dias, L. O., de Sá Martins-Muller, C., Scio, E., Luis-Fabri, R., Castro, H. C., & Henriques do Amaral, M. P. (2012). Preparation of dry extract of *Mikania glomerata* Sprengel (Guaco) and determination of its coumarin levels by Spectrophotometry and HPLC-UV. *Molecules*, 17(9), 10344-10354. <https://doi.org/10.3390/molecules170910344>
- Souza, A. M., Bezerra, I. W. L., Torres, K. G., Pereira, G. S., Costa, R. M., & Oliveira, A. G. (2025). Association of Dietary Sodium-to-Potassium Ratio with Nutritional Composition, Micronutrient

- Intake, and Diet Quality in Brazilian Industrial Workers. *Nutrients*, 17(15), 2483. <https://doi.org/10.3390/nu17152483>
- Stoica, F., Răpeanu, G., Rațu, R. N., Stănciuc, N., Croitoru, C., Țopa, D., & Jităreanu, G. (2025). Red Beetroot and Its By-Products: A Comprehensive Review of Phytochemicals, Extraction Methods, Health Benefits, and Applications. *Agriculture*, 15(3), 270. <https://doi.org/10.3390/agriculture15030270>
- Szewczyk, A., Brzezińska-Rojek, J., Ośko, J., Majda, D., Prokopowicz, M., & Grembecka, M. (2022). Antioxidant-Loaded Mesoporous Silica—An Evaluation of the Physicochemical Properties. *Antioxidants*, 11(7), 1417. <https://doi.org/10.3390/antiox11071417>
- Tacias-Pascacio, V. G., Castaneda-Valbuena, D., Fernandez-Lafuente, R., Berenguer-Murcia, A., Meza-Gordillo, R., Gutierrez, L. F., Pacheco, N., Cuevas-Bernardino, J. C., & Ayora-Talavera, T. (2022). Phenolic compounds in mango fruit: A review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(1), 619-636. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01192-2>
- Ullah, A., Munir, S., Badshah, S. L., Khan, N., Ghani, L., Poulson, B. G., Emwas, A. H., & Jaremko, M. (2020). Important flavonoids and their role as a therapeutic agent. *Molecules*, 25, 5243. <https://doi.org/10.3390/molecules25225243>
- Wang, L., Saito, M., Tatsumi, E., & Li, L. (2003). Antioxidative and Angiotensin I-Converting Enzyme Inhibitory Activities of Sufu (Fermented Tofu) Extracts. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 37(2), 129-132. <https://doi.org/10.6090/jarq.37.129>
- Wang, F., Zhao, Q., Li, S., Sun, R., Zang, Z., Xiong, A., Seck, E. H. M., Ye, Y., & Zhang, J. (2025). Genetic mechanisms, biological function, and biotechnological advance in sorghum tannins research. *Biotechnology Advances*, 81, 108573. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108573>
- Wu, Y., Liu, Y., Jia, Y., Zhang, H., & Ren, F. (2024). Formation and application of starch–polyphenol complexes: Influencing factors and rapid screening based on chemometrics. *Foods*, 13(10), 1557. <https://doi.org/10.3390/foods13101557>
- Xu, B. J., & Chang, S. K. (2007). A Comparative Study on Phenolic Profiles and Antioxidant Activities of Legumes as Affected by Extraction Solvents. *Journal of Food Science*, 72(2), 5159-5166. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00260.x>
- Xu, B. (2025). Effect of Dietary Antioxidants in Chronic Disease Prevention. *Antioxidants*, 14(10), 1200. <https://doi.org/10.3390/antiox14101200>
- Zargoosh, Z., Ghavam, M., Bacchetta, G., & Tavili, A. (2019). Effects of ecological factors on the antioxidant potential and total phenol content of *Scrophularia striata* Boiss. *Scientific reports*, 9(1), 16021. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52605-8>
- Zhang, Y., Sun, B. H., Pei, Y. P., Vidyarthi, S. K., Zhang, W. P., Zhang, W. K., Ju, H. Y., Gao, Z. J., & Xiao, H. W. (2021). Vacuum-steam pulsed blanching (VSPB): An emerging blanching technology for beetroot. *LWT*, 147, 111532. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111532>
- Zheng, Y. Z., Deng, G., & Zhang, Y. C. (2022). Multiple free radical scavenging reactions of flavonoids. *Dyes and Pigments*, 198, 109877. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109877>
- Zielińska, D., Starowicz, M., Wronkowska, M., & Zieliński, H. (2025). Angiotensin-Converting Enzyme Inhibitory Activity of Selected Phenolic Acids, Flavonoids, Their O-Glucosides, and Low-Molecular-Weight Phenolic Metabolites in Relation to Their Oxidation Potentials. *Metabolites*, 15(7), 443. <https://doi.org/10.3390/metabo15070443>