



Variabilidad bromatológica e índice de calidad nutricional en cultivares tradicionales de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en México †

[Bromatological variability and nutritional quality index in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) landraces in Mexico]

Lily Lorena Luna-Castellanos¹, Alejandra Soto-Estrada^{1*},
Isaac Meneses-Márquez², Oscar Burbano-Figueroa³,
Octavio Ruiz-Rosado¹ and Eliseo García-Pérez¹

¹Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, km 88.5 carretera federal Xalapa-Veracruz, Tepetates, Manlio F. Altamirano, Veracruz. C.P. 91690, México. Email: luna.lily@colpos.mx; alejandras@colpos.mx*, octavior@colpos.mx; geliseo@colpos.mx

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Cotaxtla, Carretera Federal Veracruz Córdoba km 34.5, Medellín de Bravo, Veracruz, México. Email: meneses.isaac@inifap.gob.mx

³Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Centro de Investigación Turipaná, km 13 vía Cereté-Montería, Cereté, Córdoba, Colombia. Email: oburbano@agrosavia.co

*Corresponding autor

SUMMARY

Background. Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) is an important staple crop in Mexico's traditional farming systems, and its genetic diversity offers largely unexplored potential. Understanding its bromatological variability is essential for designing strategies to integrate cassava into short food supply chains and differentiated value chains. **Objective.** To characterize the bromatological composition of Mexican cassava roots and to develop nutritional quality indices. **Methodology.** Twelve-month-old roots from 14 landraces were evaluated. Samples, processed in triplicate under a completely randomized design (CRD), were analyzed for moisture, dry matter (DM), crude protein (CP), crude fiber (CF), ash, and nitrogen-free extract (NFE). Data were subjected to multivariate analysis (PCA, hierarchical clustering), followed by ANOVA and Tukey's test to compare groups. A nutritional quality index (NQI) was calculated based on PCA loadings. **Results.** PCA distinguished two bromatological axes: an energy–industrial axis associated with DM–NFE and a lipid–protein axis dominated by fat and CP. In addition, PCA indicated a compositional trade-off between the energy fraction (DM–NFE) and the mineral fraction (ash). Landraces MMVER03 and MMVER04 showed the highest NQI values, combining a balanced set of energy- and nutrient-related attributes, positioning them as dual-purpose materials with both food and agroindustrial potential. **Implications.** The observed variability is linked to genotype–environment interaction and metabolic differences among landraces; therefore, multi-environment testing is recommended to disentangle genetic and environmental effects. These findings underscore the value of incorporating bromatological analyses into characterization and selection programs as a basis for strengthening short supply chains, culinary innovation, and agroindustrial applications. **Conclusions.** The bromatological diversity of traditional Mexican cassava landraces is expressed as distinct combinations of proximal components, reflecting meaningful genotypic contrasts. The NQI synthesized this variability and supported the pre-selection of landraces with overall performance (particularly for human or animal consumption), avoiding single-trait approaches. These results provide technical criteria for the functional

† Submitted November 7, 2025 – Accepted April 27, 2026. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6686>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = L.L. Luna-Castellanos: <https://orcid.org/0000-0003-2172-7842>; A. Soto-Estrada: <https://orcid.org/0000-0001-8265-761X>; I. Meneses-Márquez: <https://orcid.org/0000-0002-8764-5914>; O.A. Burbano-Figueroa: <https://orcid.org/0000-0002-6604-7333>; O. Ruiz-Rosado: <https://orcid.org/0000-0002-0333-2911>; E. García-Pérez: <https://orcid.org/0000-0002-4752-3752>

valorization of cassava and for designing selection strategies aligned with sustainable food and agroindustrial systems.

Key words: starch; proximate analysis; biplot; carbohydrates; plant genetic resources.

RESUMEN

Antecedentes. La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es un cultivo clave en sistemas agrícolas tradicionales de México, cuya diversidad genética ofrece un potencial inexplorado. Conocer su variabilidad bromatológica es esencial para diseñar estrategias de inclusión en circuitos cortos de comercialización y cadenas de valor diferenciadas. **Objetivo.** Caracterizar la composición bromatológica de raíces de yuca mexicanas y establecer índices de calidad nutricional. **Metodología.** Se evaluaron raíces de 12 meses de edad pertenecientes a 14 cultivares. Las muestras, procesadas por triplicado en un diseño completamente al azar (DCA), se analizaron para determinar humedad, materia seca (MS), proteína cruda (PC), fibra cruda (FC), cenizas y extracto libre de nitrógeno (ELN). Los datos se sometieron a análisis multivariado (ACP, agrupamiento jerárquico), seguido de ANOVA y prueba de Tukey para comparar grupos. Con base en las contribuciones del ACP se calculó el índice de calidad nutricional (ICN). **Resultados.** El ACP diferenció dos ejes bromatológicos: un eje energético-industrial asociado a MS-ELN y un eje lipídico-proteico dominado por grasas y PC. Además, el ACP evidenció una compensación composicional entre la fracción energética (MS-ELN) y la fracción mineral (cenizas). Los cultivares MMVER03 y MMVER04 presentaron los valores más altos de ICN, integrando una combinación balanceada de atributos energéticos y nutricionales, lo que los posiciona como materiales de doble propósito con potencial tanto alimentario como agroindustrial. **Implicaciones.** La variabilidad observada está vinculada a la interacción genotipo-ambiente y a diferencias metabólicas entre cultivares; por ello, se recomienda su evaluación multi-ambiente para discriminar atributos genéticos y ambientales. Estos hallazgos resaltan la relevancia de integrar análisis bromatológicos en programas de caracterización y selección, como base para impulsar circuitos cortos, innovaciones culinarias y aplicaciones agroindustriales. **Conclusiones.** La diversidad bromatológica de los cultivares tradicionales mexicanos de yuca se expresa en combinaciones diferenciadas de sus componentes proximales, reflejando contrastes genotípicos relevantes. El uso del ICN permitió sintetizar esta variabilidad y apoyar la preselección de cultivares con desempeño integral (particularmente para consumo humano o animal), evitando enfoques centrados en un solo atributo. Estos resultados aportan criterios técnicos para la valorización funcional de la yuca y para el diseño de estrategias de selección orientadas a sistemas alimentarios y agroindustriales sostenibles.

Palabras clave: almidón; análisis proximal; biplot; carbohidratos; recursos fitogenéticos.

INTRODUCCIÓN

La yuca, mandioca o guacamote (*Manihot esculenta* Crantz) es un cultivo perenne nativo de América Latina y constituye la quinta fuente mundial de carbohidratos después del trigo, arroz, maíz y papa (FAO, 2021). Mundialmente, la producción asciende a 300 millones de toneladas anuales y sostiene la seguridad y soberanía alimentaria de más de 800 millones de habitantes en África, Asia y América Latina (Chávez *et al.*, 2005; Ceballos *et al.*, 2013; Scaria *et al.*, 2024). La resiliencia agronómica de la yuca frente a suelos de baja fertilidad y sequías recurrentes la posiciona como recurso fitogenético estratégico para mitigar la vulnerabilidad socioeconómica en regiones rurales (Burns *et al.*, 2010; Howeler *et al.*, 2013).

En México, la superficie sembrada con yuca es de 1,935 ha distribuidas en siete entidades federativas: Tabasco, Morelos, Michoacán, Veracruz, Yucatán, Guerrero y el Estado de México (SIAP, 2024). Esta base productiva coexiste con una amplia diversidad de germoplasma que refleja siglos de selección y

conservación en comunidades indígenas y campesinas (Allem, 2002; Schaal *et al.*, 2006). Esta riqueza genética se manifiesta en múltiples cultivares tradicionales, cada uno adaptado a condiciones agroecológicas específicas y caracterizado por atributos morfológicos, fisiológicos y potencialmente nutricionales distintivos (Del Rosario-Arellano *et al.*, 2024). Los cultivares tradicionales o locales no solo constituyen un patrimonio genético invaluable, sino que también representan un acervo etnobotánico que integra el conocimiento tradicional sobre su manejo agronómico, las metodologías de procesamiento postcosecha y sus usos en la alimentación (Pérez *et al.*, 2019).

Aunque la raíz de yuca es reconocida principalmente por su contenido de almidón, el cual representa entre el 17.28 % y el 35.37 % del peso fresco de la raíz y puede alcanzar hasta un 70–80 % en base seca (Chisenga *et al.*, 2019), la composición bromatológica muestra una variabilidad genotípica considerable que influye en su calidad nutricional y en su potencial

agroindustrial y nutracéutico (Sánchez *et al.*, 2006; Montagnac *et al.*, 2009). Parámetros como proteínas, fibra, humedad y materia seca determinan su valor alimentario y su aptitud tecnológica para la producción de almidón, etanol y derivados fermentados (Nduwumuremyi *et al.*, 2016; Zainuddin *et al.*, 2018; Mohidin *et al.*, 2023).

La caracterización bromatológica de raíces aporta evidencia para seleccionar cultivares con mejor desempeño nutricional, orientar estrategias de biofortificación y sustentar acciones de diversificación alimentaria. Asimismo, la integración de parámetros bromatológicos en un índice de calidad nutricional permite sintetizar el perfil de los cultivares de yuca, facilitar la comparación entre materiales, así como la selección de genotipos de interés agroalimentario (Ceballos *et al.*, 2021; Lambebo y Deme, 2022; Chen *et al.*, 2024).

A pesar de ello, la variabilidad bromatológica de los cultivares tradicionales de yuca en México ha sido escasamente documentada. Los estudios en el país se han orientado a aplicaciones específicas, como la determinación de materia seca y contenido de almidón (Meneses *et al.*, 2014); el análisis de la composición nutricional de la raíz bajo distintos niveles de fertilización orgánica (Yam-Chale *et al.*, 2018); la evaluación de características agroindustriales asociadas a la extracción de almidón (Del Rosario-Arellano *et al.*, 2020); y la caracterización proximal de harina de tubérculo sin pelar en dietas para gallinas ponedoras (Díaz-Echeverría *et al.*, 2025). La escasa sistematización del conocimiento bromatológico sobre cultivares locales representa un vacío científico que limita tanto la valorización del recurso genético como el diseño de políticas de aprovechamiento agroalimentario integral.

En este contexto, el objetivo de este estudio fue caracterizar la composición bromatológica de raíces de cultivares tradicionales mexicanos de

yuca, con el fin de cuantificar su variabilidad nutricional y construir índices de calidad nutricional que faciliten la comparación entre clones y permitan identificar genotipos con atributos sobresalientes. Se espera que, con los resultados, los productores fortalezcan la toma de decisiones de producción y de agregación de valor y reorienten la selección de cultivares según su uso (consumo fresco, transformación o extracción de almidón). Asimismo, estos hallazgos contribuirán a comprender el potencial alimentario y tecnológico del germoplasma mexicano y proporcionarán bases científicas para programas de mejoramiento genético.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se evaluaron 14 cultivares del banco de germoplasma de yuca del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, localizado en el Predio Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México, en los 19°11'40.91" N y 96°20'25.43" O, a 39 msnm. Los cultivares se recolectaron en agroecosistemas de Morelos (MMMOR01), Tabasco (MMTAB01 y MMTAB02) y Veracruz (MMVER01-MMVER11), y corresponden a cultivares locales conservados y manejados por comunidades rurales mediante prácticas agrícolas sustentadas en saberes tradicionales, lo que respalda su relevancia socio-cultural y su representatividad potencial de la variabilidad local. La selección se basó en atributos de preferencia por el productor y desempeño reconocidos a nivel local: producción de raíces, sabor, cocción rápida y aceptación en el mercado, así como resistencia a la sequía y a plagas, contenido de almidón y tolerancia al acame (Mutoni *et al.*, 2023).

La Tabla 1 presenta los caracteres cualitativos de la raíz observados en los 14 cultivares, registrados conforme a Fukuda *et al.* (2010).

Tabla 1. Caracteres cualitativos de la raíz de 14 cultivares de yuca.

Accesión	Tipo de pedúnculo de raíz	Constricciones en la raíz	Forma de la raíz	Color externo de raíz	Color del parénquima (pulpa)	Color de la corteza	Facilidad de pelado	Textura de la epidermis	Sabor de la raíz cruda	Grosor de la corteza
MMMOR01	Mixta	Pocas o ninguna	Cónica-cilíndrica	Marrón oscuro	Crema	Blanca o crema	Difícil	Intermedia	Dulce	Delgada
MMTAB01	Mixta	Pocas o ninguna	Cónica-cilíndrica	Marrón claro	Crema	Rosada	Fácil	Intermedia	Intermedia	Intermedia
MMTAB02	Pedunculada	Pocas o ninguna	Cilíndrica	Marrón claro	Crema	Rosada	Fácil	Rugosa	Intermedia	Intermedia
MMVER01	Sésil	Pocas o ninguna	Cónica	Marrón oscuro	Crema	Rosada	Fácil	Intermedia	Intermedia	Gruesa
MMVER02	Mixta	Algunas	Irregular	Marrón claro	Crema	Rosada	Difícil	Lisa	Dulce	Intermedia
MMVER03	Mixta	Pocas o ninguna	Cónica-cilíndrica	Marrón oscuro	Crema	Blanca o crema	Fácil	Rugosa	Dulce	Gruesa
MMVER04	Mixta	Pocas o ninguna	Cilíndrica	Marrón oscuro	Crema	Blanca o crema	Difícil	Intermedia	Dulce	Intermedia
MMVER05	Pedunculada	Pocas o ninguna	Cilíndrica	Marrón claro	Crema	Rosada	Difícil	Rugosa	Intermedia	Delgada
MMVER06	Pedunculada	Pocas o ninguna	Cilíndrica	Marrón claro	Blanca	Rosada	Fácil	Rugosa	Intermedia	Intermedia
MMVER07	Mixta	Pocas o ninguna	Cilíndrica	Marrón oscuro	Crema	Rosada	Fácil	Rugosa	Intermedia	Intermedia
MMVER08	Pedunculada	Algunas	Cilíndrica	Marrón claro	Crema	Rosada	Fácil	Lisa	Intermedia	Intermedia
MMVER09	Mixta	Pocas o ninguna	Cilíndrica	Marrón claro	Crema	Rosada	Fácil	Rugosa	Dulce	Intermedia
MMVER10	Pedunculada	Pocas o ninguna	Cilíndrica	Marrón oscuro	Crema	Rosada	Fácil	Intermedia	Dulce	Gruesa
MMVER11	Pedunculada	Pocas o ninguna	Cónica	Amarilla	Amarilla	Amarilla	Fácil	Lisa	Dulce	Gruesa

Condiciones de establecimiento en campo

Los cultivares fueron multiplicadas a partir de esquejes (estacas) de 20 cm de longitud con aproximadamente 3 cm de diámetro y de seis a ocho yemas. Estas se seleccionaron por su alta calidad sanitaria y vigor a partir de plantas en estado óptimo de madurez fisiológica (10 a 12 meses de edad) (Rodríguez Henao *et al.*, 2021; Espitia Montes *et al.*, 2022). Previo a la siembra, los esquejes se desinfectaron mediante tratamiento químico por inmersión durante cinco minutos en una solución de metalaxil + azoxistrobin a razón de 3 g L⁻¹ de agua y clorpirifos etil + permetrina en dosis de 1 mL L⁻¹ de agua.

La siembra se llevó a cabo en marzo de 2024, en el campo experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz, donde predomina un ambiente con clima Aw (w) (i'), denominado cálido subhúmedo con precipitaciones estivales (García, 2004); precipitación promedio anual de 1,100 mm; temperatura media de 26 °C, con una variación anual entre 5 y 7 °C; y 5 % de lluvia concentrada en la temporada invernal.

En el suelo donde se establecieron los cultivares predominó una textura franca con contenido moderadamente alto de materia orgánica (2.95 %), densidad aparente de 1.11 g·cm⁻³ y pH de 7.54. Nutricionalmente, se registraron 17.4 mg kg⁻¹ de nitrógeno (N-NO₃), 44.0 mg kg⁻¹ de fósforo disponible, 408 mg kg⁻¹ de potasio (K) y 1,896 mg kg⁻¹ de calcio (Ca). Además, se detectó una deficiencia moderada de micronutrientes, particularmente boro (0.28 mg kg⁻¹) y cobre (0.60 mg kg⁻¹). La conductividad eléctrica fue baja (0.55 dS m⁻¹), lo cual denota una condición no salina del suelo (0–2 dS m⁻¹) y lo califica como apto para siembra de yuca; tampoco se registraron indicios de acumulación significativa de carbonatos.

El suelo se acondicionó mecánicamente mediante labores de barbecho y rastreo cruzado con el propósito de garantizar un adecuado drenaje y propiciar un desarrollo radicular uniforme. Cada cultivar se estableció en una parcela de 6 × 3 m, conformada por cuatro surcos con siete plantas cada uno, dispuestas a un espaciamiento de 1 m entre surcos y 1 m entre plantas. Las estacas se sembraron en posición inclinada a 45° (Rosas-González *et al.*, 2014). Los cultivares se distribuyeron aleatoriamente en un diseño completamente al azar (DCA), siguiendo lineamientos de caracterización bromatológica

previamente descritos en yuca (Yeoh y Truong, 1996; Chávez *et al.*, 2005; Ceballos *et al.*, 2006).

Manejo agronómico de los cultivares

Los cultivares se establecieron bajo condiciones de temporal. El control de arvenses se llevó a cabo mediante deshierbe manual y mecánico en las etapas iniciales del ciclo. La sanidad del cultivo se aseguró mediante un monitoreo continuo y la aplicación preventiva de un extracto botánico (Biocontrol NEEM® a razón de 2.0 mL L⁻¹), utilizados como estrategia de manejo para reducir la incidencia de insectos plaga.

El plan de fertilización se estableció a partir de los requerimientos nutricionales del cultivo de yuca (Cadavid, 2002) y la disponibilidad inicial de nutrientes en el suelo. Se aplicaron 85.2 g planta⁻¹ de sulfato de amonio (21-0-0-24(S)), complementados con 5 g planta⁻¹ de un fertilizante compuesto (formulación N-P₂O₅-K₂O-MgO-S-B-Cu-Co-Fe-Mn-Zn), con el fin de mitigar posibles limitaciones asociadas a deficiencias de micronutrientes identificadas en el análisis de suelo. La dosis total se aplicó en dos momentos: 40 % a los 60 días después de la siembra (DDS) y el 60 % restante a los 90 DDS.

Análisis bromatológico

A los 12 meses después de la siembra (MDDS), se realizó la caracterización bromatológica comparativa del germoplasma clonal. El muestreo se efectuó según el esquema estándar propuesto para yuca por Chávez *et al.* (2005) y Ceballos *et al.* (2006): en cada parcela útil se seleccionaron tres plantas sanas y representativas en cuanto a vigor, arquitectura (tallos gruesos y erectos) y producción. De cada planta se tomaron de dos a tres raíces tuberosas enteras; de tipo comercial (≥ 300 g de peso y ≥ 20 cm de longitud); y libres de daños mecánicos, plagas o pudriciones. Lo anterior de acuerdo con los lineamientos establecidos para yuca fresca por la comisión del Codex Alimentarius (Codex Alimentarius Commission [CCA], 2003) y los criterios operativos descritos por Sánchez *et al.* (2014). Posteriormente, se lavaron, se les retiró la cáscara y se cortaron en secciones de aproximadamente 2 cm para conformar una muestra homogénea de 300 g por planta. Las muestras se secaron a 65 °C en un horno (modelo FE-293 AD®, marca Felisa, fabricado en México) y pesaron hasta peso constante para determinar la materia seca (MS), calculada como el porcentaje del peso seco respecto al peso fresco. Luego, se

molieron en un molino (marca Micro-Mill H37250® de Scienceware, hecho en Estados Unidos) y se tamizaron a través de una malla de 1 mm, obteniéndose una harina homogénea para el análisis. Los parámetros humedad, MS, proteína cruda (PC), fibra cruda (FC), cenizas y grasas (extracto etéreo (EE)) fueron determinados por triplicado siguiendo los lineamientos oficiales de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2016).

La PC se estimó a partir del contenido de nitrógeno total mediante el método Kjeldahl, utilizando un factor de conversión de 6.25. El contenido de grasas (extracto etéreo, EE) se determinó por el método de Soxhlet, conforme a la norma NMX-F-615-NORMEX-2018 (DOF, 2018), mientras que la FC se cuantificó mediante digestión ácida y alcalina, de acuerdo con la NMX-F-090-S-1978 (DOF, 1978). Las cenizas se cuantificaron por la vía seca a partir de la incineración del material vegetal durante 4 horas a 550 °C, siguiendo la norma NMX-F-066-S-1978 (DOF, 1978).

El extracto libre de nitrógeno (ELN) se calculó con la expresión siguiente:

$$\text{ELN (\%)} = 100 - (\text{Proteína cruda} + \text{Fibra cruda} + \text{grasas} + \text{Cenizas})$$

La composición proximal (PC, FC, grasas, cenizas y ELN) se expresó en base seca (g 100 g⁻¹ de MS). La humedad se determinó en raíz fresca para estimar la MS y permitir la conversión entre bases cuando se requiera.

Análisis de datos

Los datos se organizaron y procesaron en el entorno RStudio® versión 4.4.3 (R Core Team, 2024). En primer lugar, se efectuó un análisis descriptivo de cada variable bromatológica con el fin de caracterizar la composición general de las raíces y explorar la amplitud de los valores observados. Posteriormente, se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) sobre las variables estandarizadas (z-score) para identificar los ejes de mayor varianza y las variables con mayor contribución a la diferenciación entre cultivares. Los resultados se representaron mediante biplots para visualizar simultáneamente la dispersión de los cultivares y la correlación entre variables. El ACP y las contribuciones de las variables se obtuvieron mediante la función *fviz_pca_biplot*, *fviz_contrib*.

Con el fin de visualizar patrones de similitud entre cultivares, se generó un mapa de calor (heatmap) a partir de las medias estandarizadas (z-score), utilizando distancia euclidiana y enlace completo (*complete linkage*). Las diferencias globales en el perfil bromatológico entre los grupos obtenidos se evaluaron mediante un análisis de varianza multivariante permutacional (PERMANOVA, 9999 permutaciones; distancia euclidiana). La homogeneidad de dispersión multivariada se verificó mediante betadisper y su prueba por permutación (permutest, 9999 permutaciones), considerando heterogeneidad cuando $p \leq 0.05$, con el fin de descartar que la significancia del PERMANOVA se debiera a diferencias de dispersión y no a separación de centroides multivariados. Adicionalmente, para cada variable bromatológica se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad y, posteriormente, se aplicó un ANOVA de una vía con el grupo de cultivares como factor; cuando el efecto fue significativo ($p \leq 0.05$), las medias se compararon mediante la prueba de Diferencia Honesta significativa de Tukey (DHS).

Índice de Calidad Nutricional (ICN)

Apartir de las contribuciones de las variables principales obtenidas del ACP, se calculó un Índice de Calidad Nutricional (ICN) para cada cultivar, según la expresión siguiente:

$$\text{ICN}_i = \sum_{j=1}^p \mathbf{Z}_{ij} * \mathbf{W}_j \quad (1)$$

Donde:

ICN_i = índice de calidad nutricional del cultivar *i*;
z_{ij} = valor estandarizado de la variable nutricional *j* para el cultivar *i*;

w_j = peso de la variable *j* según su contribución relativa en el ACP;

p=número de variables.

La dirección del efecto (signo) se asignó con base en la carga (loading) de la variable en el ACP (biplot), de modo que variables proyectadas en sentido opuesto al gradiente principal recibieran signo negativo. Para facilitar la interpretación y evitar dominancia por escala, los valores del índice se re-escalaron linealmente al intervalo (-0.5 a 0.5), donde valores cercanos a cero indican desempeño bromatológico neutro, los valores positivos reflejan un mayor aporte relativo y los negativos un desempeño limitado. Para su interpretación, se definieron tres rangos: bajo (<0), intermedio (0-0.3) y destacado (>0.3).

El ICN se empleó como un enfoque exploratorio de integración multivariada, cuyo valor radica en proporcionar un ordenamiento comparativo que permite identificar aquellos cultivares que concentran un mayor número de atributos bromatológicos positivos. De esta manera, el ICN apoya la preselección y priorización de cultivares en etapas iniciales de caracterización del germoplasma de yuca, orientando decisiones posteriores de caracterización específica, validación en campo o análisis bajo distintos escenarios productivos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición bromatológica

El análisis de las raíces permitió determinar la composición proximal de los 14 cultivares

tradicionales de yuca de México (Tabla 2). Los valores de humedad fluctuaron entre 56.20 y 67.33 %, cercanos a los reportados para raíces frescas de yuca en América Latina y etiopía ($\approx 60\text{--}70\%$) (Fakir *et al.*, 2012; Bilate-Daemo *et al.*, 2022).

La materia seca osciló entre 32.67 y 43.87 %, intervalo favorable para el procesamiento agroindustrial, particularmente en aplicaciones orientados a la extracción de almidón, y consistente con los rangos descritos para variedades africanas (30-40 %) (Bayata, 2019). Estas diferencias son indicadores de contrastes en acumulación de reservas entre accesiones, rasgo frecuentemente utilizado como criterio de selección en programas de mejoramiento. El ELN, que representa la fracción energética asociada principalmente al almidón, presentó valores entre 81.14 y 89.98 %. Los valores superiores de este rango superan aquellos

Tabla 2. Composición bromatológica (%) de 14 cultivares de yuca en México.

Cultivar	Humedad	MS	ELN	Cenizas	Grasas	FC	PC
MMMOR0	66.36 ±	33.64 ±	84.06 ±	2.49 ±	0.93 ±	4.52 ±	7.99 ±
1	1.72	2.11	1.29	0.16	0.06	1.16	0.41
MMTAB0	62.52 ±	37.47 ±	86.21 ±	2.84 ±	1.12 ±	4.88 ±	4.94 ±
1	3.83	4.69	0.51	0.09	0.26	0.50	0.34
MMTAB0	64.24 ±	35.76 ±	87.59 ±	2.90 ±	0.94 ±	3.51 ±	5.06 ±
2	3.63	4.45	2.37	0.52	0.20	1.10	1.00
MMVER0	67.33 ±	32.67 ±	81.28 ±	4.35 ±	1.01 ±	4.41 ±	8.94 ±
1	3.04	3.73	2.26	0.82	0.06	1.46	0.44
MMVER0	63.60 ±	36.40 ±	85.53 ±	2.99 ±	1.00 ±	4.04 ±	6.43 ±
2	1.60	1.96	1.96	0.20	0.26	1.50	0.75
MMVER0	65.33 ±	34.34 ±	83.48 ±	3.16 ±	1.38 ±	4.08 ±	7.89 ±
3	2.96	4.08	1.84	0.79	0.03	0.94	1.45
MMVER0	64.85 ±	35.15 ±	83.73 ±	3.21 ±	1.18 ±	3.68 ±	8.20 ±
4	3.17	3.89	3.52	0.55	0.21	0.65	2.35
MMVER0	65.29 ±	34.70 ±	84.59 ±	2.82 ±	0.87 ±	3.24 ±	8.47 ±
5	0.52	0.65	2.29	0.18	0.17	0.51	1.82
MMVER0	63.80 ±	36.20 ±	84.36 ±	2.84 ±	0.88 ±	3.43 ±	8.47 ±
6	1.23	1.51	1.17	0.25	0.11	1.04	0.18
MMVER0	62.81 ±	37.19 ±	81.14 ±	2.84 ±	0.96 ±	4.16 ±	10.90 ±
7	1.60	1.96	2.14	0.45	0.21	2.53	0.76
MMVER0	62.33 ±	37.67 ±	85.53 ±	2.85 ±	0.85 ±	3.08 ±	7.68 ±
8	0.91	1.12	1.41	0.29	0.15	1.01	1.13
MMVER0	62.10 ±	37.89 ±	88.10 ±	2.68 ±	0.89 ±	2.33 ±	5.99 ±
9	2.18	2.67	3.11	0.19	0.26	1.16	1.69
MMVER1	60.34 ±	39.66 ±	88.46 ±	2.39 ±	0.87 ±	2.27 ±	6.01 ±
0	1.77	2.17	0.93	0.16	0.09	0.25	0.58
MMVER1	56.2 ±	43.87 ±	89.98 ±	2.37 ±	0.83 ±	2.64 ±	4.18 ±
1	0.73	1.01	0.82	0.37	0.25	0.44	0.93
Mínimo	55.310	28.920	78.860	2.140	0.606	1.36	3.30
Máximo	71.080	44.890	90.860	4.950	1.412	6.87	11.77
CV	3.116	6.241	2.946	9.670	14.657	18.37	10.10

Nota. Valores expresados como media ± desviación estándar (n = 3). MS = materia seca; ELN = extracto libre de nitrógeno; FC = fibra cruda; PC = proteína cruda; CV = coeficiente de variación.

reportados para cultivares del norte de Tailandia (80-86 %) por Charles *et al.* (2005), lo que sugiere la presencia de cultivares con un mayor potencial energético. En conjunto, el ELN confirma el predominio de carbohidratos que representan aproximadamente 85-95 % de la materia seca de la raíz de yuca.

El contenido de cenizas varió entre 2.37 y 4.35 %, valores ligeramente superiores a los reportados para raíces secas peladas (2.3-2.9 %) (Fakir *et al.*, 2012). Estas diferencias podrían estar asociadas tanto a variaciones genotípicas en la acumulación mineral como a efectos positivos del manejo de la fertilización durante el desarrollo del cultivo. Los valores de grasas se distribuyeron entre 0.83 y 1.38 %, coherentes con el bajo contenido lipídico característico de la especie. Aunque tradicionalmente se reportan concentraciones de lípidos entre 0.1 y 0.3 % en base seca (Abera y Rakshit, 2003), estudios recientes han evidenciado una mayor amplitud en determinados grupos de germoplasma, como en clones de yuca etíopes (0.26 a 1.4 %) (Bilate-Daemo *et al.*, 2022). Esta variabilidad ha sido relacionada principalmente a factores genéticos, en concordancia con los altos componentes de variación genotípica descritos para este carácter, y se ha respaldado con evidencia metabólica y lipídica que muestra diferencias consistentes entre cultivares, particularmente entre materiales de pulpa amarilla y pulpa blanca (Xiao *et al.*, 2021). Asimismo, se ha documentado una relación positiva entre el contenido de carotenoides y el contenido total de lípidos, especialmente en galactolípidos asociados al plastidio, lo que sugiere una interacción funcional entre el metabolismo lipídico y la acumulación de compuestos bioactivos en las raíces de almacenamiento (Drapal *et al.*, 2024).

El contenido de fibra se ubicó en el extremo medio a alto de los rangos reportados para raíces de yuca en Asia y África (1.5-3.5 %) (Fakir *et al.*, 2012; Bayata, 2019). Estos niveles son consistentes con el carácter predominantemente energético de la raíz y resultan favorables desde una perspectiva de digestibilidad y procesamiento industrial. Asimismo, el contenido de proteína cruda mostró variación entre cultivares, en concordancia con la diversidad composicional esperable en

germoplasma local. A escala global, la caracterización del germoplasma de yuca ha demostrado una amplia dispersión para este carácter. En particular, Ceballos *et al.* (2006), al evaluar accesiones del banco de germoplasma del CIAT en Palmira (Colombia), reportaron valores extremos que oscilaron entre 0.95 % en una variedad originaria de Tailandia y 6.42 % en una accesión procedente de Colombia, confirmando la existencia de una base genética diversa para este carácter. En ese mismo estudio, el cultivar mexicano MMEX108 presentó un contenido de proteína cruda del 3.3 %, ubicándose en un rango intermedio-alto dentro de la distribución global. Las diferencias observadas en el contenido de proteína cruda responden principalmente a la variabilidad genética inherente al germoplasma de yuca, particularmente en un carácter cuantitativo asociado a la asignación de nitrógeno y controlado por múltiples loci (Ceballos *et al.*, 2006; Liang *et al.*, 2022). Estudios previos indican que este rasgo está más estrechamente vinculado a diferencias genotípicas en la relación fuente-vertedero que a efectos ambientales puntuales cuando los materiales se evalúan bajo condiciones agronómicas homogéneas (Wang *et al.*, 2025).

Las diferencias bromatológicas observadas entre cultivares en este estudio reflejan variación en parámetros de calidad de la raíz, atribuible principalmente a contrastes genotípicos entre clones y no a variación intra-clonal. Este patrón es consistente con lo reportado en estudios de caracterización bromatológica y de calidad en germoplasma de yuca, donde se ha documentado una alta uniformidad intra-clón y una mayor contribución de la variación inter-clonal a la expresión de rasgos químicos de la raíz, modulada por la interacción genotipo-ambiente (IGA) (Yeoh y Truong, 1996; Chávez *et al.*, 2005; Ceballos *et al.*, 2006).

Patrones de variabilidad bromatológica entre cultivares de yuca

El ACP explicó 79.3 % de la varianza total, con 62.2 % atribuida al CP1 y 17.1 % al CP2 (Figura 1), lo que indica una reducción dimensional adecuada sin pérdida sustancial de información (Jolliffe, 2005).

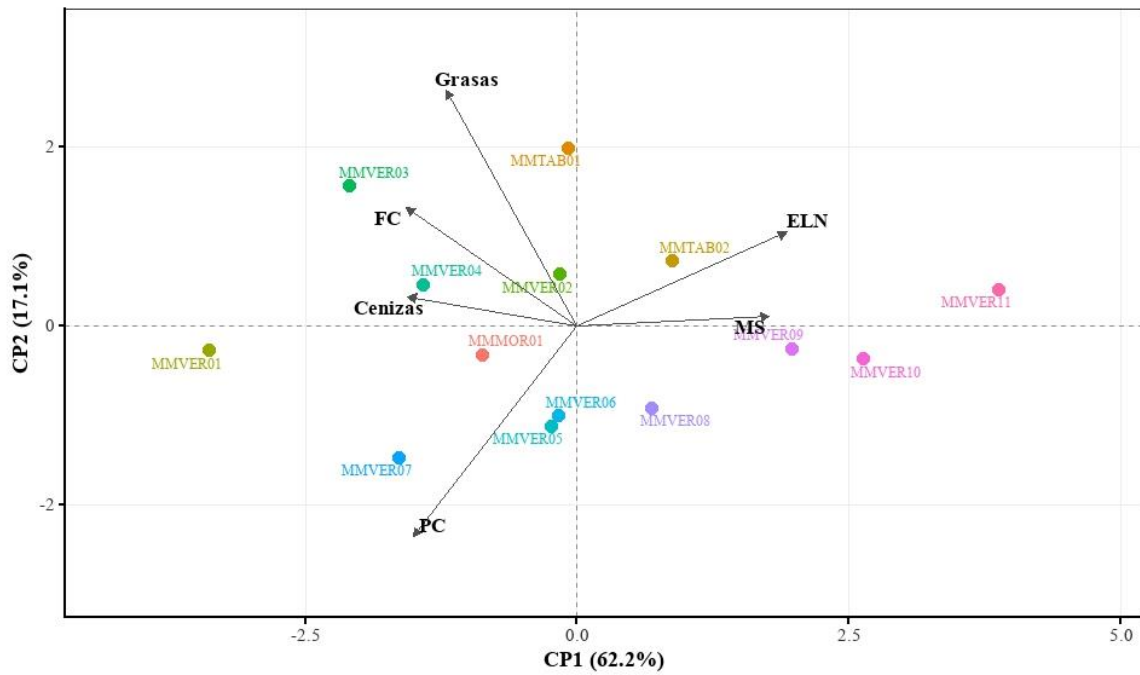


Figura 1. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables bromatológicas de 14 cultivares de yuca. MS: materia seca; ELN: extracto libre de nitrógeno; FC: fibra cruda; PC: proteína cruda.

Las variables con mayor contribución al CP1 fueron ELN (24.03 %) y MS (20.15 %), mientras que el CP2 estuvo dominado por grasas (44.84 %) y PC (35.95 %) (Figura 2). Estos resultados evidencian la presencia de dos gradientes

bromatológicos: el primero, relacionado con la densidad energética y al contenido de sólidos totales (ELN y MS), y el segundo relacionado con la composición lipídica y proteica de la raíz.

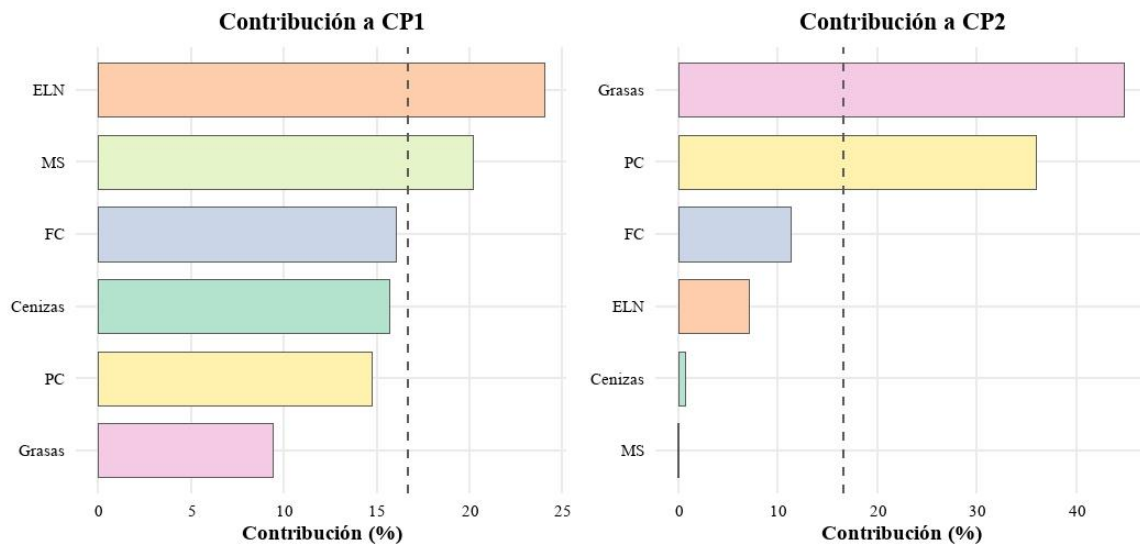


Figura 2. Contribución de variables bromatológicas. MS: materia seca; ELN: extracto libre de nitrógeno; FC: fibra cruda; PC: proteína cruda.

En el biplot del ACP (Figura 1), ELN y MS se proyectaron en la misma dirección, mientras que PC, FC y cenizas lo hicieron en sentido opuesto, lo que evidencia un contraste entre el gradiente energético-sólidos y la fracción nitrogenada/estructural-mineral de la raíz. En particular, la oposición de PC frente a MS-ELN sugiere una compensación composicional entre fracción nitrogenada y acumulación de sólidos/almidón; Sheela *et al.* (2008) reportaron asociaciones negativas entre proteína cruda y materia seca/almidón en líneas endogámicas y retrocruzas de yuca. De manera complementaria, la orientación inversa de cenizas respecto a MS-ELN respalda un escenario de dilución mineral conforme aumenta la fracción de carbohidratos de reserva; Alamu *et al.* (2020) documentaron que el incremento del contenido de almidón en raíces de pulpa amarilla se acompaña de disminuciones proporcionales en minerales como Ca, P y K.

Dentro del plano factorial, los cultivares MMVER11, MMVER10 y MMVER09 se ubicaron en el cuadrante positivo del CP1, asociados a valores altos de ELN y MS, lo que sugiere un mayor potencial energético y agroindustrial. En contraste, MMVER04 se localizó en el extremo opuesto, caracterizado por mayor contenido de cenizas y menor aporte energético. Este patrón ha sido descrito previamente en genotipos con mayor fracción mineral, los cuales suelen presentar raíces de menor densidad y concentración de almidón (Rojas, 2007; Bilate-Daemo *et al.*, 2022).

Desde el enfoque de mejoramiento, estos contrastes sugieren compensaciones entre fracciones proximales. En términos operativos, la estructura multivariada del ACP puede apoyar la toma de decisiones para (i) orientar la selección reconociendo estas compensaciones, (ii) combinar materias primas para equilibrar atributos y (iii) estandarizar acopios según el perfil composicional requerido. En particular, los cultivares con posiciones intermedias en el espacio factorial podrían ser estratégicos para esquemas que busquen balancear aptitud agroindustrial y atributos de calidad, incluidos programas de biofortificación o valorización funcional.

Clasificación y diferenciación nutricional de los cultivares de yuca

La clasificación nutricional de los cultivares de yuca permitió identificar patrones composicionales

contrastantes asociados a la fracción sólida de la raíz de almacenamiento. El análisis jerárquico distinguió tres agrupamientos principales (Figura 3).

El grupo uno agrupó ocho cultivares (MMTAB01, MMTAB02, MMVER02, MMVER07, MMMOR01, MMVER08, MMVER05, MMVER06) y se caracterizó por valores bajos a intermedios de MS y ELN, con heterogeneidad intragrupo en los componentes estructurales y nitrogenados. En particular, MMVER07 destacó por PC relativamente alta, mientras que MMTAB02 y MMVER02 tendieron a PC baja; el resto de cultivares presentó valores cercanos a la media, con variaciones moderadas en FC y grasas (Figura 3).

Los cultivares MMVER01, MMVER03 y MMVER04 conformaron el grupo dos, un conjunto diferenciado desde el punto de vista del mejoramiento, cuya separación está impulsada principalmente por rasgos de calidad específicos que adquieren mayor peso en su perfil composicional (Figura 3). MMVER01 se distingue por su mayor carga mineral (cenizas altas), mientras que MMVER03 y, en menor medida, MMVER04 presentan valores relativamente mayores de grasas. Este grupo refleja germoplasma con composición proximal contrastante, con potencial de uso en productos donde estos atributos sean relevantes (p. ej., formulaciones de harina para snacks extruidos, premezclas sin gluten y chips), o como fuente para ampliar la base de variación en programas de selección.

El tercer grupo, integrado por MMVER11, MMVER09 y MMVER10, reunió cultivares con valores relativamente altos de MS y ELN y, en general, bajos de grasas, FC, PC y cenizas; esto sugiere una mayor concentración relativa de carbohidratos y una menor fracción mineral/estructural (Figura 3).

El PERMANOVA mostró diferencias multivariadas altamente significativas entre grupos ($F_{2,11} = 8.36$; $R^2 = 0.603$; $p = 0.0001$). En concordancia, la comparación de medias (ANOVA seguida de Tukey) detectó diferencias significativas entre grupos para MS, ELN, cenizas, grasas y FC ($p \leq 0.01$), mientras que PC no mostró diferencias ($p = 0.117$) (Tabla 3).

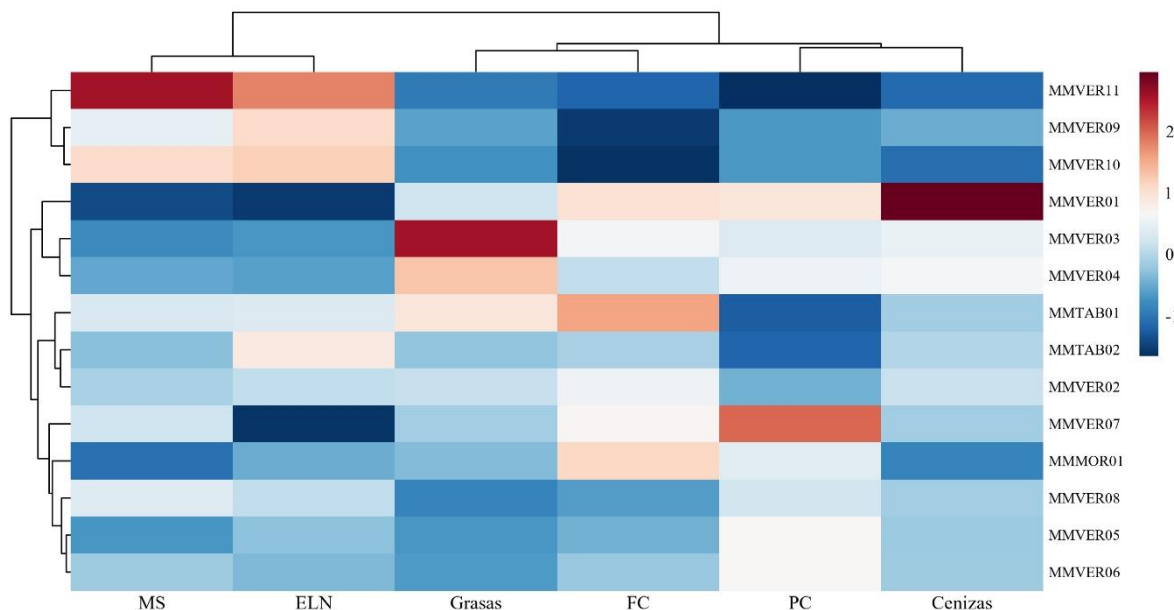


Figura 3. Mapa de calor (*heatmap*) de variables bromatológicas. Nota. Los colores representan valores estandarizados (Z-score) por variable, donde los tonos rojos indican valores superiores al promedio y los tonos azul oscuro valores inferiores al promedio. MS: materia seca; ELN: extracto libre de nitrógeno; FC: fibra cruda; PC: proteína cruda.

Tabla 3. ANOVA y prueba de Tukey para variables bromatológicas por grupos de cultivares de yuca.

Variable	Grupo	n	Media ± DE	Min.	Max.	F (2,11)	p	Tukey
MS	1	8	36.13 ± 1.40	33.6433	37.6667	10.19	0.003	b
MS	2	3	34.05 ± 1.27	32.6667	35.15			
MS	3	3	40.47 ± 3.07	37.8933	43.8667			
Cenizas	1	8	2.82 ± 0.14	2.49333	2.99	9.63	0.004	b
Cenizas	2	3	3.57 ± 0.67	3.16333	4.35			
Cenizas	3	3	2.48 ± 0.17	2.37	2.68			
Grasas	1	8	0.94 ± 0.09	0.84604	1.12325	8.16	0.007	b
Grasas	2	3	1.19 ± 0.18	1.01311	1.38112			
Grasas	3	3	0.86 ± 0.03	0.83345	0.89092			
FC	1	8	3.86 ± 0.64	3.0819	4.88084	9.15	0.005	a
FC	2	3	4.06 ± 0.37	3.67566	4.41026			
FC	3	3	2.41 ± 0.20	2.27343	2.63784			
PC	1	8	7.49 ± 1.98	4.9363	10.8981	2.62	0.117	-
PC	2	3	8.34 ± 0.54	7.88778	8.93785			
PC	3	3	5.39 ± 1.05	4.17813	6.01045			
ELN	1	8	84.88 ± 1.89	81.1397	87.5897	10.31	0.003	b
ELN	2	3	82.84 ± 1.34	81.2888	83.7315			
ELN	3	3	88.85 ± 1.00	88.1022	89.9806			

Nota. Valores expresan la media ± desviación estándar (DE) por grupo. MS: materia seca; ELN: extracto libre de nitrógeno; FC: fibra cruda; PC: proteína cruda; Min. y Máx.: corresponden a los valores mínimo y máximo observados dentro de cada grupo. Los estadísticos F (2,11) y p se refieren a la comparación de medias entre grupos definidos por el mapa de calor. Letras distintas en la columna Tukey indican diferencias significativas entre grupos ($p \leq 0.05$). Los guiones (-) indican que no se detectaron diferencias significativas entre los grupos para esa variable (el valor p del ANOVA fue mayor a 0.05).

El contenido de cenizas presentó diferencias significativas entre grupos ($p = 0.004$), con valores más altos en el grupo dos ($3.57 \pm 0.67\%$) frente a los grupos uno y tres (Tabla 3). Las cenizas reflejan la presencia de elementos esenciales como K, Ca, P, Mg y Zn, asociados con la calidad nutricional de la yuca y sus derivados. Estudios previos señalan que el contenido de cenizas en raíces frescas o harinas de yuca oscila generalmente entre 1 y 3 % en base seca, según condiciones edáficas, variedad y manejo poscosecha (Uchechukwu-Agua *et al.*, 2015; Boakye Peprah *et al.*, 2020). En este estudio, el mayor contenido de cenizas en el grupo dos sugiere una mayor densidad mineral relativa; no obstante, este patrón coincidió con una reducción aproximada del 6.8 % del ELN en el grupo dos respecto al grupo tres, lo que apunta a una menor proporción relativa de carbohidratos disponibles y, por ende, a un menor aporte energético potencial (Fanelli *et al.*, 2023). En conjunto, el contraste entre cenizas y el gradiente energético (MS-ELN) respalda un balance entre fracción mineral y fracción energética, útil para orientar la selección de cultivares según el destino de uso.

La composición proximal de las raíces resulta de la acción combinada de factores genéticos y ambientales, incluyendo la capacidad de acumulación de reservas y la formación de tejidos estructurales, así como la fertilidad del suelo, el régimen hídrico y el manejo agronómico (Ceballos *et al.*, 2004; Amelework *et al.*, 2023). Estudios recientes han identificado asociaciones entre genes implicados en rutas de almidón, pared celular y homeostasis mineral con la variabilidad en carbohidratos, fibra y fracción mineral en cultivares tradicionales (Uchendu *et al.*, 2021; Cai *et al.*, 2023). En este sentido, la heterogeneidad detectada en cultivares mexicanos refuerza la necesidad de vincular la caracterización nutricional con estrategias de selección y adaptación regional, especialmente en cadenas agroalimentarias locales (Borku, 2025).

ICN de cultivares tradicionales de yuca mexicanos

La determinación del ICN sintetizó la variabilidad bromatológica en un indicador, facilitando la comparación multivariada entre cultivares (Figura 4).

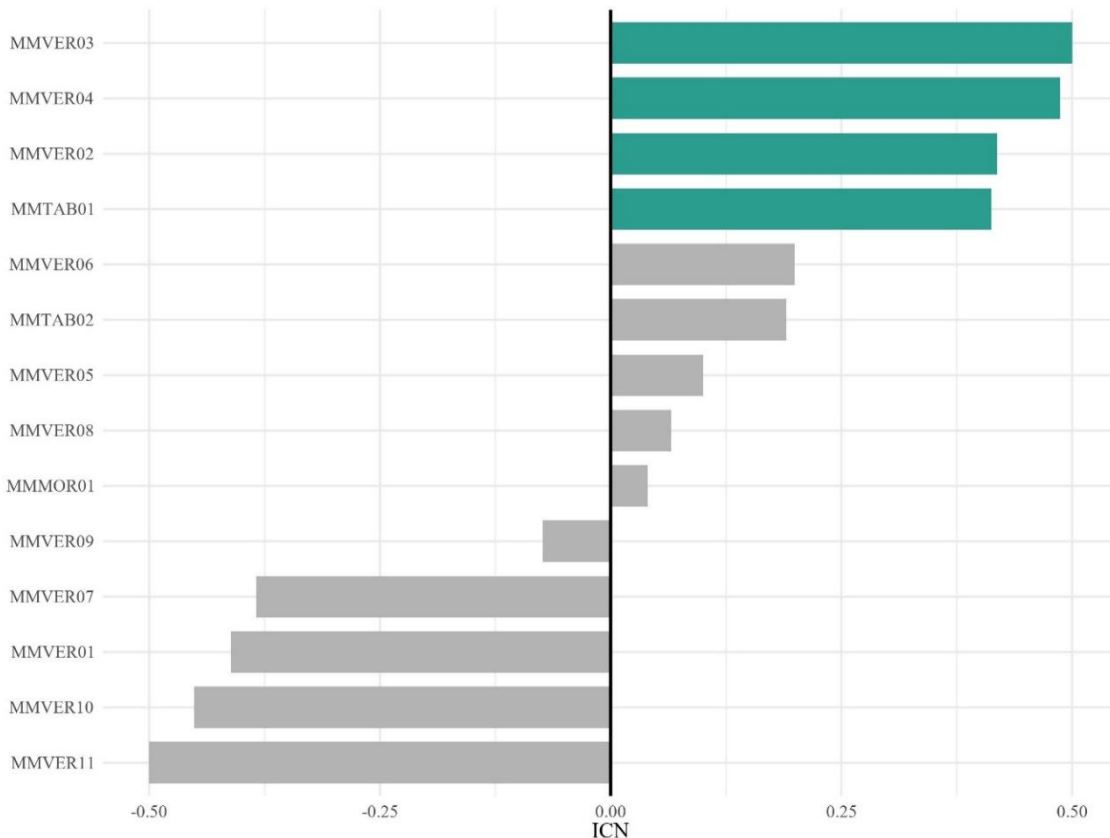


Figura 4. Índice de calidad nutricional (ICN) para cultivares de yuca. Nota. Rango de interpretación del ICN: bajo (<0), intermedio (0-0.3) y destacado (>0.3).

Bajo este enfoque, los cultivares MMVER03, MMVER04, MMVER02 y MMTAB01 se ubicaron en el rango destacado (Figura 4), reflejando una combinación favorable de atributos bromatológicos. Estos cultivares se consolidan como de doble propósito, al integrar un perfil equilibrado entre fracción energética, contenido mineral y proteína cruda que los hace potencialmente aptos tanto para consumo doméstico o culinario tradicional (tamales, tortillas, dulce, conservas, chips y yuca hervida, etc.) como para aplicaciones agroindustriales. Esta dualidad está estrechamente relacionada con lo descrito por Montagnac *et al.* (2009) y Ceballos *et al.* (2013), quienes resaltan la plasticidad funcional de la yuca como recurso alimentario y agroindustrial. En la Figura 5, se presentan los cultivares con ICN destacado.

En contraste, los cultivares con valores bajos de ICN, como MMVER11 y MMVER10, se asocian principalmente con un perfil funcional orientado al procesamiento agroindustrial, dado su elevado contenido de MS y ELN, atributos estrechamente vinculados con el rendimiento en almidón y la eficiencia en procesos de transformación (Chávez *et al.*, 2005; Montagnac *et al.*, 2009). Este patrón refuerza que un ICN bajo no implica menor calidad *per se*, sino una especialización composicional coherente con usos industriales específicos. En este sentido, el uso del ICN como herramienta de integración multivariada permite preseleccionar materiales con desempeño bromatológico

balanceado, mitigando el riesgo de seleccionar cultivares exclusivamente por su alto contenido de sólidos totales, lo cual puede conducir a fenómenos de dilución de nutrientes (White y Broadley, 2009). Este enfoque resulta coherente con los compromisos metabólicos identificados previamente y ofrece un criterio operativo para identificar cultivares que concentran simultáneamente atributos energéticos y nutricionales, apoyando decisiones tempranas de selección orientadas a la valorización integral de la yuca.

La diversidad bromatológica observada en los cultivares evaluados es consistente con reportes previos que indican que, en yuca, las ventajas suelen expresarse de manera relativa y especializada, y que raramente un mismo material concentra simultáneamente valores elevados en múltiples atributos de calidad (Montagnac *et al.*, 2009; Jansen van Rijssen *et al.*, 2013; Amelework *et al.*, 2023). En este sentido, el análisis del ICN no solo permite discriminar cultivares con diferente valor nutricional, sino que integra el efecto combinado de factores genotípicos y ambientales que modulan la composición bromatológica de la raíz. Este enfoque refuerza la necesidad de estrategias de selección que consideren la IGA, la plasticidad fisiológica (Adu, 2020) y los requerimientos del uso final que evitan aproximaciones reduccionistas centradas en un solo atributo (Chimphepo *et al.*, 2022).



Figura 5. Cultivares de yuca identificados con ICN destacado: a) MMVER03; b) MMVER04; c) MMVER02; d) MMTAB01.

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque de caracterización bromatológica comparativa, con base en una evaluación realizada a los 12 MDDS, etapa que corresponde a un estado fisiológicamente óptimo de madurez de las raíces de yuca. En este punto del ciclo del cultivo, los resultados permiten identificar contrastes bromatológicos atribuibles a diferencias genotípicas entre cultivares. No obstante, debe considerarse que los sistemas orientados al consumo humano y a la agroindustria pueden involucrar esquemas de manejo y edades de cosecha diferenciadas. En consecuencia, los hallazgos de este trabajo deben interpretarse como una etapa de preselección de cultivares con mayor potencial funcional, y no como una evaluación definitiva de su desempeño bajo calendarios de cosecha específicos. Evaluaciones futuras que incorporen múltiples edades de cosecha y ambientes contrastantes permitirán profundizar en la estabilidad temporal y ambiental, así como en la especialización funcional de los cultivares identificados.

CONCLUSIONES

El análisis bromatológico de 14 cultivares tradicionales mexicanos de yuca evidenció variabilidad composicional entre ellos, particularmente en MS, ELN, cenizas y PC, reflejando contrastes genotípicos reales entre materiales clonales. Los análisis multivariados mostraron compromisos metabólicos entre atributos energéticos y nutricionales, lo que confirma que la calidad bromatológica de la yuca no se explica por un solo carácter, sino por la interacción de múltiples fracciones químicas.

La integración de estos resultados mediante el ICN permitió identificar cultivares con perfiles balanceados; el MMVER03 y MMVER04 destacaron como materiales de doble propósito, potencialmente aptos tanto para consumo humano como para aplicaciones agroindustriales, mientras que otros cultivares mostraron una especialización composicional coherente con usos industriales. En este sentido, el ICN constituye una herramienta útil para la preselección y priorización de germoplasma en etapas iniciales de evaluación, evitando enfoques de selección basados en un solo atributo.

El estudio se realizó a los 12 MDDS, etapa correspondiente a la madurez fisiológica óptima de la raíz, por lo que los resultados deben interpretarse como una fase de preselección comparativa entre cultivares. Evaluaciones futuras que incorporen múltiples edades de cosecha y ambientes

contrastantes permitirán profundizar en la estabilidad genotípica de los cultivares identificados y determinar su especialización funcional para su uso.

Agradecimientos

Expresamos nuestros agradecimientos a los custodios de semillas de yuca de México.

Funding. This research was funded by the Colegio de Postgraduados through the CONV_RGAA_2025_87 “Nutritional characterization and conservation of cassava varieties (*Manihot esculenta* Crantz)”.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interest.

Compliance with ethical standards. The authors declare that they complied with ethical standards. All interviewees agreed to participate in the study and gave their permission to publish the gathered information and data.

Data availability. Data supporting the conclusions of this study can be requested from the first author.

Author contributions statement (CRediT). **L. Luna-Castellanos** – Investigation, Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing, Review & editing. **A. Soto-Estrada** – Conceptualización, writing review, supervision. **O. Burbano-Figueroa** – Formal analysis, Review & editing. **I. Meneses-Márquez** – Review & editing. **O. Ruiz-Rosado** – Review. **E. García-Pérez** – Review.

REFERENCES

- Adu, M.O., 2020. Causal shoot and root system traits to variability and plasticity in juvenile cassava (*Manihot esculenta* Crantz) plants in response to reduced soil moisture. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(9), pp. 1799-1814. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00865-4>
- Alamu, E.O., Maziya-Dixon, B., Sibeso, C., Parkes, E. and Dixon, A.G., 2020. Variations of macro-and microelements in yellow-fleshed cassava (*Manihot esculenta* Crantz) genotypes as a function of storage root portion, harvesting time, and sampling method. *Applied Sciences*,

- 10(16), p. 5396.
<https://doi.org/10.3390/app10165396>
- Allem, A.C., 2002. The origins and taxonomy of cassava. En: Hillocks, R. J. and Thresh, J. M. (eds.) *Cassava: biology, production and utilization*. Wallingford: CABI, pp. 1-16.
<https://doi.org/10.1079/9780851995243.0001>
- Amelework, A.B., Bairu, M.W., Marx, R., Laing, M. and Venter, S.L., 2023. Genotype Environment Interaction and Stability Analysis of Selected Cassava Cultivars in South Africa. *Plants*, 12, p. 2490.
<https://doi.org/10.3390/plants12132490>
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC)., 2016. Official methods of analysis (20th ed.). Washington, D.C., USA: AOAC.
<https://doi.org/10.5740/jaoacint.SMPR2016.002>
- Abera, S. and Rakshit, S.K., 2003. Processing technology comparison of physicochemical and functional properties of cassava starch extracted from fresh root and dry chips. *Starch - Stärke*, 55(7), pp. 287-296.
<https://doi.org/10.1002/star.200390072>
- Bayata, A., 2019. Review on Nutritional Value of Cassava for Use as a Staple Food. *Science Journal of Analytical Chemistry*, 7(4), pp. 83-91.
<https://doi.org/10.11648/j.sjac.20190704.12>
- Bilate-Daemo, B., Yohannes, D.B., Beyene, T.M. and Abteu, W.G., 2022. Biochemical Analysis of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Accessions in Southwest of Ethiopia. *Journal of Food Quality*, 2022, p. 9904103.
<https://doi.org/10.1155/2022/9904103>
- Boakye Peprah, B., Parkes, E.Y., Harrison, O.A., van Biljon, A., Steiner-Asiedu, M. and Labuschagne, M.T., 2020. Proximate Composition, Cyanide Content, and Carotenoid Retention after Boiling of Provitamin A-Rich Cassava Grown in Ghana. *Foods*, 9(12), 1800, pp. 1-13.
<https://doi.org/10.3390/foods9121800>
- Borku, A.W., 2025. Cassava (*Manihot esculenta* Crantz): its nutritional composition insights for future research and development in Ethiopia. *Discover Sustainability*, 6(1), p. 404.
<https://doi.org/10.1007/s43621-025-00996-2>
- Burns, A., Gleadow, R., Cliff, J., Zacarias, A. and Cavagnaro, T., 2010. Cassava: the drought, war and famine crop in a changing world. *Sustainability*, 2(11), pp. 3572-3607.
<https://doi.org/10.3390/su2113572>
- Cadavid, L.F., 2002. Suelo y fertilización para la yuca. En: Ospina, A.M. y Ceballos, C.E. (eds.) *La yuca en el tercer milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. CIAT/FIDA, pp. 76-103. Disponible en:
<https://hdl.handle.net/10568/54117>
- Cai, J., Xue, J., Zhu, W., Luo, X., Lu, X., Xue, M. and Chen, S., 2023. Integrated metabolomic and transcriptomic analyses reveals sugar transport and starch accumulation in two specific germplasms of *Manihot esculenta* Crantz. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(8), p. 7236.
<https://doi.org/10.3390/ijms24087236>
- Ceballos, H., Hershey, C., Iglesias, C. and Zhang, X., 2021. Fifty years of a public cassava breeding program: evolution of breeding objectives, methods, and decision-making processes. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(8), pp. 2335-2353.
<https://doi.org/10.1007/s00122-021-03852-9>
- Ceballos, H., Iglesias, C.A., Pérez, J.C. and Dixon, A.G.O., 2004. Cassava breeding: opportunities and challenges. *Plant Molecular Biology*, 56, pp. 503-516.
<https://doi.org/10.1007/s11103-004-5010-5>
- Ceballos, H., Morante, N., Sánchez, T., Ortiz, D., Aragon, I., Chavez, A.L. and Dufour, D., 2013. Rapid cycling recurrent selection for increased carotenoids content in cassava roots. *Crop Science*, 53(6), pp.

- 2342-2351.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2013.02.0123>
- Ceballos, H., Sánchez, T., Chávez, A.L., Iglesias, C., Debouck, D., Mafla, G. and Tohme, J., 2006. Variation in crude protein content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) roots. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19, pp. 589-593.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.11.001>
- Codex Alimentarius Commission., 2003. Standard for sweet cassava (CXS 238-2003). Rome: FAO/WHO. Disponible en: <https://n9.cl/zub9x>
- Charles, A.L., Sriroth, K. and Huang, T.C., 2005. Proximate composition, mineral contents, hydrogen cyanide and phytic acid of 5 cassava genotypes. *Food Chemistry*, 92(4), pp. 615-620.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.08.058>
- Chávez, A.L., Sánchez, T., Jaramillo, G., Bedoya, J.M., Echeverry, J., Bolaños, E.A. and Iglesias, C.A., 2005. Variation of quality traits in cassava roots evaluated in landraces and improved clones. *Euphytica*, 143(1), pp. 125-133.
<https://doi.org/10.1007/s10681-005-3057-2>
- Chen, L., Chen, R., Atwa, E.M., Mabrouk, M., Jiang, H., Mou, X. and Ma, X., 2024. Nutritional Quality Assessment of Miscellaneous Cassava Tubers Using Principal Component Analysis and Cluster Analysis. *Foods*, 13(12), p. 1861.
<https://doi.org/10.3390/foods13121861>
- Chimphepo, L., Monjerezi, M., Alamu, E.O., Ntawurhunga, P. and Saka, J.D., 2022. Effects of genotype by environment interaction on agronomic and functional flour properties among cassava genotypes targeted for industrial use. *Annals of Agricultural Sciences*, 67(2), pp. 147-157.
<https://doi.org/10.1016/j.aoas.2022.08.001>
- Chisenga, S.M., Workneh, T.S., Bultosa, G. and Alimi, B.A., 2019. Progress in research and applications of cassava flour and starch: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 56(6), pp. 2799-2813.
<https://doi.org/10.1007/s13197-019-03814-6>
- Del Rosario-Arellano, J.L., Meneses-Márquez, I., Leyva-Ovalle, O.R., Aguilar-Rivera, N., Bolio-López, G.I. and Andrés-Meza, P., 2020. Morphoagronomic and industrial performance of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) germplasm for the production of starch and solid byproducts. *AIMS Agriculture and Food*, 5(4), pp. 617-634.
<https://doi.org/10.3934/agrfood.2020.4.617>
- Del Rosario-Arellano, J.L., Serna-Lagunes, R., Andrés-Meza, P., Leyva-Ovalle, O.R., Cebada-Merino, M. and Capetillo-Burela, A.C., 2024. El Estado actual y condiciones ecogeográficas de *Manihot esculenta* Crantz en la región Las Montañas, Veracruz. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(3), pp. 1-13.
<https://doi.org/10.19136/era.a11n3.3975>
- Diario Oficial de la Federación (DOF)., 1978. Norma Mexicana NMX-F-066-S-1978. Determinación de cenizas en alimentos. Ciudad de México, México: Secretaría de Economía.
<https://www.dof.gob.mx/normasOficiales.php#gsc.tab=0>
- Diario Oficial de la Federación (DOF)., 1978. Norma Mexicana NMX-F-090-S-1978. Determinación de fibra cruda en alimentos. Ciudad de México, México: Secretaría de Economía.
<https://es.scribd.com/doc/168091011/NMX-F-090-S-1978-Fibra-en-Alimentos>
- Diario Oficial de la Federación (DOF)., 2018. Norma Mexicana NMX-F-615-NORMEX-2018. Determinación de extracto etéreo en alimentos. Ciudad de México, México: Secretaría de Economía.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565079&fecha=05/07/2019#gsc.tab=0
- Díaz-Echeverría, V.F., May-Ávila, Á., Santos-Ricalde, R.H. and Segura-Correa, J.C., 2025. Effect of feeding *Manihot esculenta* Crantz on egg production in laying hens. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*,

- 28, p.135.
<http://doi.org/10.56369/tsaes.6240>
- Drapal, M., Ovalle Rivera, T.M., Becerra Lopez-Lavalle, L.A. and Fraser, P.D., 2024. Composición y secuestro de carotenoides en raíces de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *PLoS ONE*, 19(11), p. e0312517. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0312517>
- Espitia Montes, A.A., Pérez Cantero, S., Regino Hernández, S.M., Támara Morelos, R.E., García Herazo, J.L., Martínez Figueroa, R.R. and García Peña, J.A., 2022. Manual para la producción y escalamiento de semilla de yuca (*Manihot esculenta*) de calidad. Mosquera, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manua.1.7405569>
- Fakir, M.S.A., Sarker, B.C., Hossain, M.I. and Islam, M.N., 2012. Starch and flour extraction and nutrient composition of cassava tuber. *Journal of Bangladesh Agricultural University*, 10(1), pp. 77-82. <https://www.banglajol.info/index.php/JBAU/article/view/14698/10441>
- Fanelli, N.S., Torres-Mendoza, L.J., Abelilla, J.J. and Stein, H.H., 2023. Chemical composition of cassava-based feed ingredients from South-East Asia. *Animal Bioscience*, 36(6), pp. 908-919. <https://doi.org/10.5713/ab.22.0360>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).2021. FAOSTAT Statistical Database. Consultado el 20 de agosto del 2025. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Fukuda, W. M. G., Guevara, C. L., Kawuki, R. and Ferguson, M. E., 2010. Selected morphological and agronomic descriptors for the characterization of cassava. International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria. <https://www.scirp.org/reference/referencepapers?referenceid=1834215>
- García, E., 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Disponible en: <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Howeler, R.H., Lutaladio, N. and Thomas, G., 2013. Save and grow: cassava: a guide to sustainable production intensification. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 87-97. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/handle/20500.14283/i3278eispo>
- Jansen van Rijssen, F.W., Morris, E. J. and Eloff, J.N., 2013. Food Safety: Importance of Composition for Assessing Genetically Modified Cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Journal of Agricultural and Food chemistry*, 61(35), p. 8333-8339. <https://doi.org/10.1021/jf401153x>
- Jolliffe, I., 2005. Principal Component Analysis. In: Everitt, B. S. and Howell, D. C. eds. *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*. Chichester: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470013192.bsa501>
- Lambebo, T. and Deme, T., 2022. Evaluation of Nutritional Potential and Effect of Processing on Improving Nutrient Content of Cassava (*Mannihot esculenta* Crantz) Root and Leaves. *BioRxiv*, 2022-02, pp. 1-39. <https://doi.org/10.1101/2022.02.04.479097>
- Liang, Q., Dong, M., Gu, M., Zhang, P., Ma, Q. and He, B., 2022. MeNPF4.5 improves cassava nitrogen use efficiency and yield by regulating nitrogen uptake and allocation. *Frontiers in Plant Science*, 13, p. 866855. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.866855>
- Meneses, M.I., Vásquez Hernández, A., Rosas González, X. and Becerra Leor, E.N., 2014. Contenido de materia seca y almidón en clones de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Revista Biológica Agropecuaria Tuxpan*, 2(1), pp. 107-110. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v2i1.268>
- Mohidin, S.R.N.S.P., Moshawih, S., Hermansyah, A., Asmuni, M.I., Shafqat, N. and Ming,

- L.C., 2023. Cassava (*Manihot esculenta* Crantz): A systematic review for the pharmacological activities, traditional uses, nutritional values, and phytochemistry. *Journal of Evidence-based integrative Medicine*, 28, pp. 1-26. <https://doi.org/10.1177/2515690X231206227>
- Montagnac, J.A., Davis, C.R. and Tanumihardjo, S.A., 2009. Nutritional value of cassava for use as a staple food and recent advances for improvement. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 8(3), pp. 181-194. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00077.x>
- Mutoni, C.K., Nzuve, F.M., Miano, D. W., Kivuva, B.M., Obare, I.J., Shah, T.M. and Ferguson, M.E. 2023. Genetic diversity of cassava landraces and documentation of farmer's knowledge in Lamu, Kenya. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71, pp. 2189-2201. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01710-9>
- Nduwumuremyi, A., Melis, R., Shanahan, P. and Asiimwe, T., 2016. Participatory appraisal of preferred traits, production constraints, and postharvest challenges for cassava farmers in Rwanda. *Food Security*, 8(2), pp. 375-388. <https://doi.org/10.1007/s12571-016-0556-z>
- Pérez, D., Mora, R. and López-Carrascal, C., 2019. Conservación de la diversidad de yuca en los sistemas tradicionales de cultivo de la Amazonía. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), pp. 202-212. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.75428>
- R Core Team., 2020. R: A language and environment for statistical computing (version 4.4.3). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rodríguez Henao, E., Garavito Morales, L.V., Osorio Cardona, Ó., Aguilera Arango, G.A. and Cañar Serna, D.Y., 2021. Manual técnico para la propagación masiva de semilla vegetativa de yuca por miniestacas en campo. Mosquera, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manua1.7405057>
- Rojas, J., 2007. Evaluación de seis variedades de yuca en condiciones de riego y secano en el estado Portuguesa, Venezuela. *Revista UDO Agrícola*, 7(1), pp. 23-31. <https://www.redalyc.org/pdf/4263/426339669013.pdf>
- Rosas-González, X., Meneses Márquez, I., Becerra Leor, E. N. and Vásquez Hernández, A., 2014. Efecto de la posición de estacas sobre el rendimiento de raíz de yuca (*Manihot esculenta* Crantz.) en Veracruz. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 2(1), pp. 172-177. <https://doi.org/10.47808/revistabiologia.v2i1.283>
- Sánchez, T., Ceballos, H., Dufour, D., Ortiz, D., Morante, N., Calle, F. and Davrieux, F. 2014. Prediction of carotenoids, cyanide and dry matter contents in fresh cassava root using NIRS and Hunter color techniques. *Food chemistry*, 151, pp. 444-451. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.081>
- Sánchez, T., Chavez, A.L., Ceballos, H., Rodríguez-Amaya, D.B., Nestel, P. and Ishitani, M., 2006. Reduction or delay of post-harvest physiological deterioration in cassava roots with higher carotenoid content. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(4), pp. 634-639. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2371>
- Scaria, S.S., Balasubramanian, B., Meyyazhagan, A., Gangwar, J., Jaison, J.P., Kurian, J.T. and Joseph, K.S., 2024. Cassava (*Manihot esculenta* Crantz)—A potential source of phytochemicals, food, and nutrition—An updated review. *eFood*, 5(1), p. e127. <https://doi.org/10.1002/efd2.127>
- Schaal, B.A., Olsen, K.M. and Carvalho, L.J., 2006. Evolution, domestication, and agrobiodiversity in the tropical crop cassava. En: *Darwin's harvest: New approaches to the origins, evolution, and*

- conservation of crops*. Columbia University Press, pp. 269-284. Disponible en: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/15085/1/Timothy%20J.%20Motley.pdf#page=280>
- Sheela, M.N., Radhika, V.S., John, K.S. and Abraham, K., 2008. Variation in crude protein, dry matter and starch in inbred and backcross lines of cassava. *Journal of Root Crops*, 34(2), pp. 115-119. <https://n9.cl/nwsdgu>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2024. Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Consultado el 30 de enero del 2026. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Uchechukwu-Agua, A.D., Caleb, O.J. and Opara, U.L., 2015. Postharvest Handling and Storage of Fresh Cassava Root and Products: a Review. *Food Bioprocess Technol*, 8, pp. 729-748. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1478-z>
- Uchendu, K., Njoku, D. N., Paterne, A., Rabbi, I. Y., Dzidzienyo, D., Tongoona, P., Offei, S. and Egesi, C., 2021. Genome-Wide Association Study of Root Mealiness and Other Texture-Associated Traits in Cassava. *Frontiers in Plant Science*, 12, p. 770434. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.770434>
- Xiao, L., Cao, S., Shang, X., Xie, X., Zeng, W., Lu, L. and Yan, H., 2021. Metabolomic and transcriptomic profiling reveals distinct nutritional properties of cassavas with different flesh colors. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 2, p. 100016. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2021.100016>
- Yam-Chale, E., Díaz-Echeverría, V., Chavarriá-Díaz, A., Oros-Ortega, I., Chay-Canul, A., Cen-Hoy, A. and Casanova-Lugo, F., 2018. Forage and tuber yield and nutritional composition of *Manihot esculenta* Crantz meal with organic fertilization. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), pp. 127-132. <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1263>
- Yeoh, H.H. and Truong, V.D., 1996. Protein contents, amino acid compositions and nitrogen-to-protein conversion factors for cassava roots. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 70, pp. 51-54. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740700109>
- Wang, D., Liu, Q., Xie, X., Zhang, J., Xiao, J. and Wang, W., 2025. Genomic-Wide Association Markers and Candidate Genes for the High-Protein Trait in Storage Roots of Cassava (*Manihot esculenta*). *Plants*, 14(20), p. 3162. <https://doi.org/10.3390/plants14203162>
- White, P.J. and Broadley, M.R., 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets-iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist*, 182(1), pp. 49-84. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x>
- Zainuddin, I.M., Fathoni, A., Sudarmonowati, E., Beeching, J.R., Gruissem, W. and Vanderschuren, H., 2018. Cassava post-harvest physiological deterioration: From triggers to symptoms. *Postharvest Biology and Technology*, 142, pp. 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.09.004>