

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2026,
Volumen 10, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2

**CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y ANÁLISIS
MULTIVARIADO DE LA MIEL ARTESANAL DXIÑAGUIE'
(OAXACA, MÉXICO) FRENTE A ESTÁNDARES NACIONALES E
INTERNACIONALES**

**PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF ARTISANAL DXIÑAGUIE'
HONEY FROM SOUTHERN MEXICO: A QUALITY ASSESSMENT UNDER
NATIONAL PRODUCTION STANDARDS**

Gilka F. Nivón-Torres

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca – México

Sergio Alberto Ramirez Garcia

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca – México

Ivonne Arisbeth Díaz Santiago

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca – México

Antonio Canseco Urbieto

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca – México

Alicia Sylvia Gijón Cruz

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca – México

Erik Martínez Torres

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca – México

Jorge Alejandro Santiago Urbina

Universidad Tecnológica de los Valles – México

Juan Luis Bautista Martínez

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca – México

Aristeo Segura Salvador

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca – México

Hipócrates Nolasco Cancino

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca - México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2.23314

Caracterización fisicoquímica y análisis multivariado de la miel artesanal Dxiñague' (Oaxaca, México) frente a estándares nacionales e internacionales

Gilka F. Nivón-Torres¹

gilka.nivon03@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-4196-6433>

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca
Oaxaca de Juárez, Oaxaca México

Sergio Alberto Ramirez Garcia

sergionabmsp@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6343-9278>

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca
Oaxaca de Juárez, Oaxaca México

Ivonne Arisbeth Díaz Santiago

idiiaz.cat@uabjo.mx

<https://orcid.org/0009-0000-6885-7594>

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca
Oaxaca de Juárez, Oaxaca México

Antonio Canseco Urbieto

acanseco.cat@uabjo.mx

<https://orcid.org/0009-0006-8457-4897>

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca
Oaxaca de Juárez, Oaxaca México

Alicia Sylvia Gijón Cruz

agijon.cat@uabjo.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5116-3801>

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca
Oaxaca de Juárez, Oaxaca México

Erik Martínez Torres

emartinez.fcq@uabjo.mx

<https://orcid.org/0009-0008-8220-4029>

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, 68120
Oaxaca de Juárez, Oaxaca México

Jorge Alejandro Santiago Urbina

jorgesantiago.urbina@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4667-0590>

Dirección de División de Carrera de Agricultura Sustentable y Protegida
Universidad Tecnológica de los Valles Centrales de Oaxaca
Oaxaca, México

Juan Luis Bautista Martínez

jlbautistam@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-4328-6295>

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca
Oaxaca de Juárez, Oaxaca México

Aristeo Segura Salvador

ass@aristeosegura.com.mx

<https://orcid.org/0009-0000-0882-9241>

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca
Oaxaca de Juárez, Oaxaca México

Hipócrates Nolasco Cancino

hipocratesn@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0002-9603-6942>

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca
Oaxaca de Juárez, Oaxaca México

¹ Autor principal

Correspondencia: hipocratesn@yahoo.com

RESUMEN

Introducción: La miel artesanal del Istmo de Tehuantepec (Dxiñaguie') posee una identidad biocultural distintiva, pero carece de una validación fisicoquímica integral que la posiciona frente a estándares internacionales. **Objetivo:** Caracterizar el perfil fisicoquímico y la calidad multivariada de la miel Dxiñaguie' (MD) en comparación con mieles regionales a granel (MR) y controles certificados nacionales (CN) e internacionales (CI). **Metodología:** Se analizaron 10 parámetros fisicoquímicos bajo la normativa NOM-004-SAG/GAN-2018. Los datos se procesaron mediante ANOVA de una vía (Tukey-Kramer), Análisis de Componentes Principales (PCA) y diagramas de radar para evaluar la huella dactilar química. **Resultados:** La miel MD presentó indicadores de frescura excepcionales (HMF: 17.79 ± 0.53 mg/kg; Diastasa: 14.30 ± 0.46 U; Lactonas: 5.11 ± 0.19 meq/kg), estadísticamente indistinguibles ($p > 0.05$) de los controles premium (CN y CI). En contraste, el grupo MR exhibió deterioro térmico severo (HMF: 36.32 mg/kg) y procesos fermentativos iniciales (pH 3.70; Acidez Total 44.0 meq/kg). El PCA explicó el 97.3% de la varianza total, revelando que la miel Dxiñaguie' comparte un espacio multivariado de "alta estabilidad" con la miel de origen internacional, separándose drásticamente del clúster de degradación de la miel regional. **Conclusión:** La miel Dxiñaguie' no solo cumple con la normativa mexicana, sino que posee una estabilidad funcional equivalente a estándares internacionales de alto valor. Su perfil químico la distingue significativamente de la oferta regional estándar, validando el impacto positivo de su manejo postcosecha artesanal.

Palabras clave: NOM-004-SAG/GAN-2018; miel artesanal; caracterización fisicoquímica; hidroximetilfurfural (HMF); actividad diastásica; Istmo de Tehuantepec.



Physicochemical Characterization of Artisanal Dxiñague' Honey from Southern Mexico: A Quality Assessment under National Production Standards

ABSTRACT

Introduction: Artisanal honey from the Isthmus of Tehuantepec (Dxiñague') possesses a distinctive biocultural identity but lacks an integral physicochemical validation to position it against international standards. **Objective:** To characterize the physicochemical profile and multivariate quality of Dxiñague' honey (MD) in comparison with bulk regional honeys (MR) and certified national (CN) and international (CI) controls. **Methodology:** Ten physicochemical parameters were analyzed under the NOM-004-SAG/GAN-2018 regulation. Data were processed using one-way ANOVA (Tukey-Kramer), Principal Component Analysis (PCA), and radar charts to evaluate the chemical fingerprint. **Results:** MD honey presented exceptional freshness indicators (HMF: 17.79 ± 0.53 mg/kg; Diastase: 14.30 ± 0.46 U; Lactones: 5.11 ± 0.19 meq/kg), statistically indistinguishable ($p > 0.05$) from premium controls (CN and CI). In contrast, the MR group exhibited severe thermal deterioration (HMF: 36.32 mg/kg) and initial fermentative processes (pH 3.70; Total Acidity 44.0 meq/kg). The PCA explained 97.3% of the total variance, revealing that Dxiñague' honey shares a multivariate space of "high stability" with international-origin honey, separating drastically from the regional honey degradation cluster. **Conclusion:** Dxiñague' honey not only complies with Mexican regulations but also possesses functional stability equivalent to high-value international standards. Its chemical profile significantly distinguishes it from the standard regional offer, validating the positive impact of its artisanal post-harvest management.

Keywords: NOM-004-SAG/GAN-2018; artisanal honey; physicochemical characterization; hydroxymethylfurfural; diastase activity; Isthmus of Tehuantepec

Artículo recibido 28 febrero 2026

Aceptado para publicación: 28 marzo 2026



INTRODUCCION

La miel es un producto natural complejo sintetizado principalmente por especies del género *Apis spp.*, entre ellas *Apis mellifera* (abeja europea introducida) y *Apis mellifera scutellata* (abeja africanizada), ambas ampliamente distribuidas en México (Pérez-Soto et al., 2025; Requier, 2019). A lo largo de la historia, la miel ha sido valorada no solo como alimento energético, sino también por sus propiedades nutracéuticas y farmacológicas, lo que ha motivado un creciente interés científico en su composición química, autenticidad y calidad funcional (Samarghandian, Farkhondeh, & Samini, 2017; Sharaf El-Din, Farrag, Wu, Huang, & Wang, 2025).

Desde el punto de vista químico, la miel constituye una matriz altamente heterogénea caracterizada por un elevado contenido de monosacáridos (principalmente fructosa y glucosa) (Mostoles et al., 2025), enzimas bioactivas (diastasa, invertasa y glucosa oxidasa) (Ogwu & Izah, 2025; Tlak Gajger, Dar, Ahmed, Aly, & Vlainic, 2025), compuestos volátiles y una amplia gama de metabolitos secundarios derivados de la flora melífera, como polifenoles, flavonoides y ácidos fenólicos (Escuredo & Seijo, 2024; Inaudi, Garzino, Abollino, Malandrino, & Giacomino, 2025; Manyi-Loh, Ndip, & Clarke, 2011). Esta diversidad química está estrechamente influenciada por el origen botánico, las condiciones ambientales y las prácticas apícolas, lo que explica la variabilidad significativa en las propiedades fisicoquímicas y biológicas observadas entre mieles de distintas regiones (Harbane et al., 2024; Nidhi et al., 2025).

Numerosos estudios han documentado que la miel presenta actividades biológicas relevantes, incluyendo propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antiinflamatorias, gastroprotectoras y cicatrizantes, así como efectos antidiabéticos, cardioprotectores y antiproliferativos en modelos celulares y animales (Rahmani & Babiker, 2025). Estos efectos se atribuyen a mecanismos como la neutralización de especies reactivas de oxígeno (ROS- del inglés *Reactive Oxygen Species*), la producción de peróxido de hidrógeno, la modulación de citoquinas proinflamatorias y la estimulación de procesos de reparación tisular (Verma et al., 2025). Meta-análisis recientes confirman que la magnitud de estas actividades varía de forma significativa entre regiones geográficas, reflejando la influencia del entorno ecológico y del origen floral sobre el potencial biológico de la miel (Mongi, 2024; Nidhi et al., 2025).



Desde una perspectiva de biología de sistemas, la expresión funcional de matrices biológicas complejas depende de la interacción entre factores moleculares, ambientales y de estrés, lo que justifica la aplicación de esquemas de caracterización analítica rigurosos y estandarizados para su adecuada validación científica (Cabrera-Fuentes, Barreto, et al., 2025; Cabrera-Fuentes, Liehn, & Al-Suhaimi, 2025; Liehn & Cabrera-Fuentes, 2015). Asimismo, se ha documentado que variables ambientales y climáticas influyen de manera determinante en la variabilidad regional de productos naturales y en sus propiedades funcionales, particularmente en contextos de alta vulnerabilidad ecológica en Latinoamérica (Vega et al., 2025). En México, persisten brechas estructurales que limitan la traducción del conocimiento científico en aplicaciones normativas y de valor agregado, reforzando la necesidad de estudios con enfoque regulatorio y translacional (Perez-Campos, Del Rio, & Cabrera-Fuentes, 2025). Estudios realizados en México y otros países de Latinoamérica han evidenciado una marcada variabilidad regional en parámetros fisicoquímicos clave de la miel, particularmente en el contenido de humedad, los niveles de hidroximetilfurfural (HMF) y la actividad enzimática (Lemos, Venturieri, Filho, & Dantas, 2017; Raweh, Badjah-Hadj-Ahmed, Iqbal, & Alqarni, 2023), subrayando la necesidad de implementar esquemas de control de calidad adaptados al origen botánico, las condiciones ambientales y, en algunos casos, a las especies de abejas involucradas, especialmente en sistemas apícolas tradicionales y de alta diversidad biológica (Xolalpa-Aroche et al., 2024). La creciente incidencia de fraudes en el mercado apícola ha impulsado el desarrollo y la aplicación de metodologías analíticas de alta sensibilidad que integran análisis fisicoquímicos, trazabilidad y registros de manejo apícola, elementos esenciales para la detección de adulteraciones y la validación de la autenticidad y calidad de la miel (Amadei, Maldonado, Salomón, Alvarez, & Gaggiotti, 2022).

En México, la apicultura representa una actividad agropecuaria de alto impacto socioeconómico y cultural (Laynes-Magana et al., 2025; Martínez-Martínez, Ramos-Soto, Cruz-Domínguez, Palacios-Pineda, & Valadez-Solana, 2025). El país se ubica entre los diez principales productores de miel a nivel mundial, con una producción anual cercana a las 57,000 toneladas y exportaciones que superan los 150 millones de dólares estadounidenses (Luna-Olea, Omaña Silvestre, Quintero Ramírez, & Farrera-Vázquez, 2025). La producción se distribuye de manera heterogénea en el territorio nacional, destacando regiones como la Península de Yucatán, Chiapas, Veracruz y Oaxaca (Díaz, Segovia, &



Rivera, 2025; Gallardo-López, Landini, & Hernández-Chontal, 2022). No obstante, a pesar de su relevancia económica, la calidad de la miel mexicana enfrenta desafíos persistentes, entre ellos la adulteración con jarabes industriales, la contaminación por residuos agroquímicos y la pérdida de trazabilidad botánica (Margaoan et al., 2025; Zhang, Gu, Liu, Qing, & Nie, 2023).

Con el fin de proteger al consumidor y garantizar la autenticidad del producto, en México se estableció la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SAG/GAN-2018, la cual define parámetros fisicoquímicos y microbiológicos estrictos, incluyendo límites máximos de humedad, HMF, sacarosa, sólidos insolubles y conductividad eléctrica, así como valores mínimos de actividad diastásica (2020). Esta normativa se encuentra alineada con los estándares internacionales del Codex Alimentarius (Codex Alimentarius, 1981) y con la Directiva 2001/110/CE del Consejo de la Unión Europea (European-Council, 2002), que reconocen a la miel como un producto natural libre de aditivos (Daugaliyeva et al., 2025). Sin embargo, estudios recientes indican que hasta un 30 % de las mieles comerciales no cumplen con estos criterios, lo que pone de manifiesto la necesidad de evaluaciones analíticas más rigurosas y de estudios regionales específicos (Almutairi & Alqahtani, 2025; Brar et al., 2022; Janković, Kobiljski, & Torović, 2026).

En este contexto, el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, emerge como una región de particular interés debido a su elevada biodiversidad y a la presencia de ecosistemas de selva baja caducifolia que favorecen una flora melífera diversa, con especies endémicas como *Bursera spp.* y *Lysiloma spp.* (Becerra, 2005; Pérez-García, Meave, & Cevallos-Ferriz, 2012; Rendon et al., 2023; Villaseñor, Ortiz, & Meave, 2025). Investigaciones preliminares sugieren que las mieles producidas en esta región presentan perfiles polínicos complejos y una composición química diferenciada, lo que podría traducirse en ventajas antioxidantes y funcionales frente a mieles de otras procedencias (Bonsignore, Martinotti, & Ranzato, 2024; Ramírez, Navarro-Calvo, & Díaz-Carbajal, 2011).

Dentro de este escenario se inserta la miel *Dxiñaguie'*, cuyo nombre en lengua zapoteca significa “néctar de la flor”. Este producto destaca no solo por su potencial calidad fisicoquímica, sino también por su identidad biocultural, resultado de una tradición apícola que integra conocimientos ancestrales con prácticas contemporáneas de manejo sustentable. Desde una perspectiva normativa, esta actividad se integra en el rubro pecuario y cumple con requisitos formales de trazabilidad legal, como el registro del título de fierro de herrar ante la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Pesca y Acuicultura del



estado (Honorable Congreso del Estado de, 2012). En este sentido, la miel Dxiñaguie' cuenta con el Registro No. API-389/16, se encuentra debidamente inscrita en el Padrón Ganadero Nacional con Clave de Unidad de Producción Pecuaria 20-207-214R-001 y está registrada ante el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria con la clave única de identificación 20-09195-H (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 2016).

La apicultura itinerante practicada en la región, basada en el traslado estratégico de colmenas hacia zonas de floración óptima, constituye una estrategia adaptativa frente a fenómenos como el cambio climático, la deforestación y el uso intensivo de agroquímicos, y puede influir positivamente en la frescura, autenticidad y estabilidad fisicoquímica de la miel producida (Mezentsev, 2024; Vega et al., 2025). La singularidad de este entorno natural, respaldada por una infraestructura formal de registro y trazabilidad, no solo condiciona las propiedades fisicoquímicas del producto, sino que le confiere un valor añadido desde el punto de vista biológico, cultural y de certeza comercial.

A pesar de estas características, la miel Dxiñaguie' carece de una validación científica sistemática que respalde su calidad bajo los criterios establecidos por la NOM-004-SAG/GAN-2018 y que permita compararla objetivamente con mieles comerciales nacionales e internacionales de alto valor agregado. La ausencia de este tipo de estudios limita su posicionamiento en mercados especializados y su reconocimiento como un producto premium con identidad territorial claramente definida (Escuredo & Seijo, 2024; Stanojevic et al., 2024).

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo evaluar de manera integral la calidad fisicoquímica de la miel Dxiñaguie' producida en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, mediante la determinación de parámetros clave establecidos por la normativa mexicana y su comparación con mieles comerciales seleccionadas. Este enfoque busca generar evidencia científica sólida que respalde su autenticidad, valor diferencial e identidad biocultural, contribuyendo a su valorización y potencial inserción en mercados nacionales e internacionales de alta exigencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del Estudio y Obtención de Muestras

Se realizó un estudio de carácter comparativo, analítico y transversal para evaluar la calidad fisicoquímica de la miel de abeja (*Apis mellifera*). El diseño experimental se basó en un modelo de



aleatorización triple ciego; todas las muestras fueron codificadas alfanuméricamente por un agente externo para asegurar que los analistas no tuvieran acceso al origen de las mismas durante el procesamiento.

El estudio analizó cuatro grupos de miel. La miel artesanal Dxiñaguie' (MD; n=6) fue recolectada directamente de apiarios tradicionales en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, garantizando su origen botánico multifloral y procesado mínimo. Como contraste regional, se adquirió miel comercial local a granel, denominada "Regional" (MR; n=6), representativa de la oferta en mercados locales sin etiquetado de certificación.

Para la validación comparativa de calidad, se utilizaron dos estándares comerciales certificados: 1- Control Nacional (CN; n=3): Miel industrial homogeneizada líder en el mercado mexicano (*Carlota*®, México), etiquetada como 100% pura y sometida a procesos estandarizados de filtrado y pasteurización. 2 - Control Internacional (CI; n=3): Miel monofloral de Manuka (*Leptospermum scoparium*) importada de Nueva Zelanda (*Manuka Health*®), certificada con un contenido de metilglioxal (MGO 115+), utilizada globalmente como referencia de miel *premium* de alto valor nutracéutico.

Criterios de Inclusión y Trazabilidad

Para las muestras MD y MR, se verificó el origen geográfico mediante apiarios georreferenciados y certificados de cosecha del periodo 2024. El procesamiento postcosecha incluyó una filtración controlada mediante mallas de acero inoxidable con una apertura de poro de 200 µm, superando el estándar mínimo de limpieza para garantizar la eliminación de impurezas sin afectar el perfil polínico. Las mieles comerciales se seleccionaron bajo el criterio de cumplimiento de la NOM-051-SCFI/SSA1 (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos, 2021), asegurando que fueran productos 100% miel de abeja sin aditivos.

Determinación de Parámetros Físicoquímicos

Los análisis se realizaron siguiendo los protocolos oficiales establecidos en la NOM-004-SAG/GAN-2018 (NOM-2018-DOF-Mexico, 2020). Todos los ensayos se ejecutaron por triplicado técnico para cada una de las muestras (n), empleando reactivos de grado analítico.

El contenido de humedad se determinó por refractometría a 20 °C de acuerdo con la Sección 8.3 de la NOM-004 (NOM-2018-DOF-Mexico, 2020) y el método oficial de la Association of Official Analytical

Chemists (AOAC) 969.38 (AOAC-Moisture-in-honey-International, 2012). Para ello, se utilizó un refractómetro tipo Abbe debidamente calibrado, colocando una gota de muestra homogenizada sobre el prisma; los resultados se expresaron en porcentaje (%). La cuantificación de HMF se realizó mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) siguiendo lo establecido en la Sección 8.10.2 de la normativa oficial. Se empleó un sistema de HPLC equipado con un detector UV ajustado a una longitud de onda de 285 nm, donde las señales de las muestras fueron comparadas con soluciones estándar de concentración conocida, expresando los resultados en mg/kg.

La actividad diastásica fue evaluada mediante espectrofotometría a 660 nm siguiendo el protocolo de la Sección 8.11 de la NOM-004 (NOM-2018-DOF-Mexico, 2020). El método se basó en determinar la tasa de hidrólisis de una solución de almidón al 1% incubada con la muestra de miel; la actividad enzimática se calculó y expresó en Unidades Schade (US). La concentración de sacarosa se determinó por HPLC de acuerdo con la Sección 8.4.3 de la NOM-004 (NOM-2018-DOF-Mexico, 2020). Para el análisis, se utilizó una columna de fase estacionaria amino (NH₂) acoplada a un detector de índice de refracción (RID), y los resultados fueron reportados en porcentaje (%).

La determinación de sólidos insolubles en agua se llevó a cabo mediante el método de filtración gravimétrica descrito en la Sección 8.8 de la normativa mexicana. Se utilizaron crisoles de vidrio sinterizado con una porosidad de 15-40 µm; tras la filtración de la muestra disuelta, los residuos fueron sometidos a un proceso de secado en estufa a 135 °C hasta peso constante, expresando los valores finales en porcentaje (%). Finalmente, la conductividad eléctrica se midió en una solución de miel al 20% (p/v) preparada a 20 °C, de acuerdo con la Sección 8.6 de la NOM-004 (NOM-2018-DOF-Mexico, 2020). Se utilizó un conductímetro digital previamente calibrado con una solución estándar de KCl 0.1 M, y los resultados se expresaron en milisiemens por centímetro (mS/cm).

Finalmente, el perfil de acidez (libre, lactonas y total) se determinó mediante titulación potenciométrica siguiendo la Sección 8.5 de la normativa oficial (NOM-2018-DOF-Mexico, 2020). Se disolvieron 10 g de miel en agua destilada libre de CO₂ y se tituló con NaOH 0.05 N hasta pH 8.5 para la acidez libre; posteriormente, se agregó un exceso de NaOH y se realizó una retrotitulación con HCl 0.05 N hasta pH 8.3 para determinar las lactonas. La acidez total se calculó por la suma de ambos componentes, reportando los resultados en miliequivalentes por kilogramo (meq/kg).



Análisis Estadístico y Procesamiento de Datos

Para evitar la pseudoreplicación y asegurar la independencia estadística, se promediaron los triplicados técnicos de cada medición, considerando este promedio como una única unidad biológica. El tamaño muestral final fue de $n=6$ para los grupos experimentales (MD y MR) y $n=3$ para los controles comerciales (CN y CI). Los resultados se expresan como la media \pm la desviación estándar (SD). La comparación entre los cuatro grupos se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía. Para las diferencias significativas ($*p < 0.05$), se aplicó la prueba *post-hoc* de Tukey-Kramer, seleccionada por su robustez estadística en diseños con tamaños de muestra desiguales. Como análisis exploratorio multivariado, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) basado en la matriz de correlación de Pearson. Este enfoque implicó una estandarización automática de los datos (transformación *Z-score*, media=0, SD=1) para eliminar el sesgo dimensional derivado de las diferentes escalas de medida (mg/kg vs. %) y asegurar un peso estadístico equitativo a todas las variables. Todos los análisis estadísticos, el procesamiento de datos y la generación de gráficos se realizaron con el software GraphPad Prism versión 10.0 (GraphPad Software, Boston, MA, USA). Se emplearon gráficos de dispersión de columnas (*column scatter plots*) para visualizar la variabilidad biológica individual. Finalmente, para la evaluación visual de la 'huella dactilar' fisicoquímica (Gráfico de Radar), los datos medios se normalizaron previamente mediante el método *Min-Max* para homogeneizar las escalas a un rango adimensional de 0 a 1, aplicando la fórmula: $X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$; donde X_{min} y X_{max} representan los valores mínimos y máximos absolutos observados en el conjunto total de datos para cada parámetro específico.

RESULTADOS

La caracterización fisicoquímica reveló diferencias estructurales claras entre los cuatro grupos (MD, MR, CN y CI) evaluados (**Tabla 1**). Mientras que la miel artesanal Dxiñaguie' (MD) mostró un perfil de alta estabilidad similar a los estándares internacionales, la miel regional (MR) exhibió marcadores consistentes de degradación. A continuación se detallan los valores medios obtenidos; las diferencias estadísticas específicas y la distribución de los datos se ilustran en las **Figuras 1-3**.

Humedad y estabilidad microbiológica



La miel Dxiñague' (MD) presentó un contenido de humedad de $16.23 \pm 0.18\%$, valor que refleja una maduración óptima en el panal y un manejo postcosecha adecuado. Este nivel de humedad se asocia con baja actividad de agua y, por tanto, con una menor probabilidad de fermentación espontánea, en concordancia con lo descrito para mieles frescas de alta calidad (Singh & Singh, 2018). La miel regional (MR) mostró un valor significativamente mayor ($18.51 \pm 0.27\%$, $p < 0.05$; **Figura 1A**), lo que sugiere una mayor susceptibilidad a procesos degradativos y una posible recolección en etapas menos maduras. Por su parte, los controles comerciales mostraron valores estadísticamente comparables a MD: CN ($16.65 \pm 0.15\%$) y CI ($16.63 \pm 0.14\%$), ambos dentro del rango esperado para mieles estabilizadas industrialmente. Todas las muestras cumplieron con el límite máximo del 20% establecido por la NOM-004-SAG/GAN-2018 y el Codex Alimentarius, destacando que MD, CN y CI se agruparon en un rango de alta estabilidad ($<17\%$), característico de mieles grado premium.

Perfil de acidez y estabilidad química

La estabilidad química, evaluada conjuntamente con la humedad, mostró diferencias críticas en el perfil de acidez (**Figura 1B-D**). La acidez libre de MD fue de 14.43 ± 0.65 meq/kg, valor que confirma un estado sanitario óptimo y ausencia de fermentación. La acidez total (19.54 ± 0.80 meq/kg) se encuentra dentro del rango ideal para mieles frescas y estables (Cetintas, 2025). MR mostró valores significativamente mayores (34.95 ± 1.25 meq/kg, $p < 0.001$), lo que podría indicar procesos iniciales de fermentación acética o una mayor presencia de ácidos orgánicos derivados de la flora local. CN presentó 28.10 ± 1.10 meq/kg, mientras que CI mostró 17.80 ± 0.60 meq/kg. La estabilidad química de MD se explica por su sistema tampón natural, asociado a lactonas (**Tabla 1**) y ácidos débiles, lo que le confiere resistencia a variaciones de pH y prolonga su vida útil. Este patrón, correlacionado con su alta humedad (**Figura 1A**), sugiere procesos activos de fermentación acética o degradación microbiológica en la miel regional, mientras que MD mantiene una capacidad tampón y frescura equivalentes a los estándares internacionales.

Hidroximetilfurfural (HMF) y termolabilidad

El HMF es un marcador ampliamente utilizado para evaluar deterioro térmico y envejecimiento de la miel (Fazakas & Mot, 2025). Los niveles de HMF en MD fueron de 17.79 ± 0.53 mg/kg, confirmando la frescura del producto y la ausencia de sobrecalentamiento durante la extracción o almacenamiento

(Figura 2A). Este valor es inferior al observado en los controles comerciales (CN: 19.91 ± 0.71 mg/kg y CI: 19.28 ± 0.59 mg/kg), aunque estadísticamente se encuentran en el mismo rango de calidad. En contraste, MR mostró un incremento drástico (36.32 ± 1.49 mg/kg, $p < 0.01$), aproximándose peligrosamente al límite normativo de 40 mg/kg (NOM-2018-DOF-Mexico, 2020) y evidenciando un manejo postcosecha deficiente o almacenamiento prolongado. La baja concentración de HMF en la miel Dxiñaguie' valida su estatus como un producto fresco que supera en calidad térmica a la oferta regional estándar.

Actividad diastásica y calidad biológica

La actividad diastásica de MD fue de 14.30 ± 0.46 U Schade, valor que indica una alta vitalidad enzimática y un manejo cuidadoso del producto (Figura 2B). La diastasa es un indicador sensible de exposición térmica y envejecimiento, y su preservación es característica de mieles frescas y no adulteradas (Bell & Grainger, 2023). Contrario a lo observado en mieles procesadas térmicamente en exceso, el CN y el CI mantuvieron niveles enzimáticos altos (13.66 ± 0.47 U y 13.82 ± 0.10 U, respectivamente), sin diferencias significativas respecto a la miel artesanal MD. Sin embargo, la MR presentó una actividad significativamente reducida (9.08 ± 0.85 U, $p < 0.01$), situándose apenas por encima del mínimo de 8 U exigido por la norma. Estos resultados confirman que MD preserva sus propiedades biológicas al mismo nivel que las marcas comerciales de prestigio. La relación inversa entre el alto HMF y la baja diastasa en el grupo MR (Figura 2) confirma el deterioro térmico severo de estas muestras frente a la integridad de la miel artesanal MD.

Concentración de sacarosa y grado de madurez

MD presentó un contenido residual de sacarosa de 2.15 ± 0.14 , lo que confirma una hidrólisis enzimática eficiente y una maduración completa (Figura 3A). Este valor es característico de mieles auténticas y no adulteradas (Kanelis, Liolios, Tananaki, & Rodopoulou, 2022). Este perfil fue indistinguible del Control Internacional ($2.25 \pm 0.15\%$) y del Control Nacional ($2.41 \pm 0.04\%$), desestimando cualquier sospecha de adulteración o cosecha temprana en estos grupos. Por el contrario, MR mostró niveles significativamente mayores ($4.15 \pm 0.16\%$, $p < 0.05$), acercándose al límite legal del 5%. La consistencia de MD en este parámetro refuerza su autenticidad como miel floral madura.

Conductividad eléctrica y origen botánico



La conductividad eléctrica de MD fue de 0.42 ± 0.03 mS/cm (**Figura 3B**), valor característico de mieles de origen floral y consistente con perfiles multiflorales de regiones tropicales y subtropicales (Cabrera M. & Santander E., 2022). MR presentó una conductividad significativamente mayor (0.68 ± 0.03 mS/cm, $p < 0.01$), lo que sugiere una mayor carga mineral y la posible presencia de mielatos. CN mostró 0.43 ± 0.01 mS/cm, mientras que CI presentó 0.44 ± 0.01 mS/cm, consistente con mieles florales de alta pureza. Todas las muestras cumplieron con el límite de ≤ 0.8 mS/cm establecido por la NOM-004 (NOM-2018-DOF-Mexico, 2020), confirmando su origen floral.

Pureza física: sólidos insolubles

MD mostró un contenido de sólidos insolubles de $0.04 \pm 0.004\%$, reflejando un proceso de filtración y clarificación altamente eficiente (**Tabla 1**). Este valor se encuentra muy por debajo del límite máximo permitido de 0.1% (Kamal, Rashid, Mondal, El Taj, & Jung, 2019). Este nivel de pureza física fue idéntico al observado en el Control Internacional ($0.04 \pm 0.003\%$) y muy similar al Nacional ($0.05 \pm 0.004\%$). La miel regional (MR) presentó el valor más alto ($0.09 \pm 0.01\%$), situándose en el límite de aceptación, lo cual subraya la superioridad técnica del proceso de clarificación empleado en la miel Dxiñaguie’.

Análisis multivariante (PCA)

El análisis de componentes principales (PCA) integró los 10 parámetros fisicoquímicos evaluados, logrando capturar una varianza acumulada del 97.3% en las dos primeras dimensiones. Este alto porcentaje indica que el modelo bidimensional preserva casi la totalidad de la información bioquímica original, minimizando la pérdida de datos. El primer componente (PC1) explicó por sí solo la mayor parte de la variabilidad (95.5%), actuando como un vector de deterioro global con cargas positivas altas para HMF, acidez total, humedad y conductividad. El segundo componente (PC2) aportó un 1.8% adicional, asociado principalmente a variaciones residuales del pH (**Figura 4**). El gráfico de dispersión (Biplot) reveló una discriminación espacial contundente entre los grupos. La miel regional (MR) se ubicó en el extremo positivo del PC1, confirmando matemáticamente que su perfil está dominado por vectores de degradación térmica y fermentativa. En contraste, la miel Dxiñaguie’ (MD) se agrupó estrechamente con los controles internacionales (CI) y nacionales (CN) en el cuadrante negativo del PC1, indicando una equivalencia estadística en términos de frescura, madurez y estabilidad enzimática.

Este patrón valida que, pese a su origen artesanal, la miel MD alcanza estándares de calidad fisicoquímica indistinguibles de los productos premium de exportación, superando significativamente a la oferta regional estándar carente de control postcosecha.

Integración del perfil fisicoquímico (Huella Dactilar)

La integración gráfica de los 10 parámetros evaluados mediante un diagrama de radar (**Figura 5**) permitió visualizar la "huella dactilar" química global de cada grupo. El perfil de la miel Dxiñague' (MD, polígono azul) se caracterizó por una contracción hacia el centro del gráfico en los ejes asociados al deterioro (HMF, acidez, humedad), superponiéndose extensamente con los perfiles de los controles comerciales de referencia (CN lila y CI rojo). Esta huella compacta es indicativa de alta frescura, estabilidad microbiológica y pureza botánica. En contraste agudo, la miel Regional (MR, polígono verde) mostró una expansión drástica hacia los vértices de los marcadores de degradación, ilustrando visualmente el desbalance químico sistémico provocado por un manejo postcosecha deficiente y confirmando su distinción como un producto de calidad inferior.

DISCUSIÓN

Estabilidad oxidativa y resistencia a la fermentación

Uno de los hallazgos más críticos de este estudio fue la diferenciación drástica en la estabilidad química entre la miel artesanal Dxiñague' (MD) y la oferta regional a granel (MR). Mientras que MD mantuvo un perfil de acidez equilibrado, indistinguible de los controles *premium*, la miel regional exhibió una "huella de deterioro" caracterizada por la acidificación simultánea de todos sus marcadores (pH bajo, alta acidez libre y lactonas elevadas). La concentración de lactonas (ésteres internos de gluconolactona) actúa como una reserva de acidez que aumenta progresivamente con el envejecimiento de la miel o el inicio de procesos fermentativos. El hecho de que la miel MD presentara el nivel más bajo de lactonas (5.11 meq/kg) sugiere un equilibrio hidrolítico estable y una ausencia de fermentación secundaria. En contraste, los niveles duplicados en el grupo MR (9.05 meq/kg), correlacionados con su alta humedad (>18.5%), indican una inestabilidad microbiológica activa. Este fenómeno es consistente con lo reportado por Sereia *et al.* (2017) (**Sereia et al., 2017**), quienes asocian el incremento de lactonas y acidez libre con la acción de levaduras osmofílicas en mieles cosechadas con maduración incompleta. Por lo tanto, la superioridad de la miel Dxiñague' no es accidental; es el resultado directo de una

cosecha selectiva de panales operculados (baja humedad), lo que previene la hidrólisis ácida que claramente ya ha comprometido la vida útil de la miel regional comercializada a granel.

Calidad térmica y preservación enzimática

La evaluación conjunta del HMF y la actividad diastásica reveló el impacto crítico del manejo postcosecha sobre la calidad biológica de la miel. Mientras que la MD mantuvo niveles de HMF (17.79 mg/kg) característicos de un producto fresco y sin procesar, la MR exhibió un valor de 36.32 mg/kg, situándose peligrosamente cerca del límite normativo de 40 mg/kg. Este incremento drástico en el HMF del grupo regional, coincidente con una caída significativa de su actividad diastásica (9.08 U), es indicativo de un estrés térmico severo.

Este patrón de degradación es consistente con las prácticas comunes en la comercialización a granel, donde la miel suele ser sometida a calentamiento excesivo para reducir su viscosidad y facilitar el envasado, o bien, es almacenada por periodos prolongados bajo condiciones inadecuadas. Como señalan Tlak Gajger *et al.* (2025) (Tlak Gajger et al., 2025), el tratamiento térmico no controlado acelera la deshidratación de la fructosa a HMF y desnaturaliza enzimas termolábiles como la diastasa, comprometiendo las propiedades terapéuticas y funcionales del producto. A diferencia de lo reportado recientemente para otras mieles de la región de Oaxaca que presentan variabilidad en su frescura (Pérez-Soto et al., 2025), la miel MD demostró una calidad térmica superior, estadísticamente indistinguible de los controles *premium*. Esto confirma que el proceso artesanal implementado en Dxiñague' respeta la integridad biológica de la miel, preservando su sistema enzimático natural tal como lo exigen los estándares de calidad internacional (Raweh et al., 2023).

4.3 Identidad multivariada y autenticidad

Más allá de los parámetros individuales, el análisis multivariado (PCA) proporcionó una validación integral de la autenticidad de la miel Dxiñague'. La capacidad del modelo para explicar el 97.3% de la varianza total permitió identificar una "huella dactilar" fisicoquímica única. La ubicación espacial de MD en el gráfico de componentes principales (biplot), superpuesta con el Control Internacional (Manuka) y el Control Nacional, demuestra que la miel artesanal del Istmo alcanza estándares de calidad global.



Esta agrupación no es trivial; indica que, a pesar de las diferencias geográficas y botánicas, la miel Dxiñague' comparte la misma estabilidad estructural y pureza que mieles de alto valor comercial. La separación diametral del grupo regional (MR) en el análisis de clúster confirma que la "calidad artesanal" no es solo una etiqueta de marketing, sino una realidad química medible. Este hallazgo respalda la importancia de la caracterización fisicoquímica rigurosa para proteger a los productores locales frente a la competencia desleal de mieles adulteradas o degradadas, un problema creciente en el mercado global (Marín, Grau-Noguer, Gervilla-Cantero, Ripolles-Avila, & Castillo, 2025; Morariu et al., 2024). En conclusión, la miel Dxiñague' se perfila no solo como un producto que cumple la normativa, sino como un alimento funcional con una integridad química superior.

Consideraciones sobre poder estadístico y limitaciones del estudio

Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran patrones consistentes y reproducibles en los parámetros fisicoquímicos evaluados, particularmente en la comparación entre la miel artesanal Dxiñague' (MD) y la MR a granel. No obstante, estos hallazgos deben interpretarse considerando las limitaciones metodológicas asociadas al diseño experimental y al tamaño muestral.

El estudio se basó en un número moderado de muestras independientes para los grupos experimentales principales (MD y MR; $n = 6$) y en un número reducido para los controles comerciales certificados (CN y CI; $n = 3$). Esta distribución, si bien es comparable a la empleada en estudios exploratorios de caracterización fisicoquímica de mieles (Lemos et al., 2017; Raweh et al., 2023), limita el poder estadístico para detectar diferencias de pequeña magnitud entre MD, CN y CI. En este contexto, la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre estos tres grupos (**Tabla 1; Figuras 1–3**) debe interpretarse como una equivalencia dentro del rango de variabilidad observada, y no como una demostración concluyente de identidad fisicoquímica absoluta.

Por el contrario, las diferencias observadas entre MD y MR fueron de gran magnitud y consistentes a través de múltiples parámetros independientes, incluyendo humedad, HMF, actividad diastásica, acidez total y conductividad eléctrica (**Tabla 1; Figuras 1–3**). La baja dispersión intragrupo y la coherencia entre indicadores de madurez y deterioro sugieren que, para estos contrastes específicos, el tamaño muestral fue suficiente para detectar diferencias relevantes desde el punto de vista tecnológico y



normativo. Esta interpretación se ve reforzada por la concordancia entre los análisis univariados y la integración multivariante de los datos.

En relación con el PCA, el alto porcentaje de varianza explicada por las dos primeras componentes (97.3%; **Figura 4**) indica una fuerte covariación entre los parámetros fisicoquímicos evaluados. Sin embargo, debe considerarse que el número limitado de observaciones, particularmente en los grupos de control, puede favorecer la dominancia del primer componente y amplificar la influencia de variables altamente correlacionadas, como HMF, acidez y humedad. Por esta razón, el PCA se empleó con un enfoque descriptivo y exploratorio, orientado a visualizar tendencias globales de estabilidad y deterioro químico, y no como una herramienta predictiva o de clasificación definitiva.

De manera similar, la representación de la “huella dactilar” mediante el diagrama de radar (**Figura 5**) debe entenderse como un recurso visual integrador que facilita la comparación relativa entre perfiles medios, más que como una cuantificación exhaustiva de similitud o equivalencia funcional. La superposición observada entre MD, CN y CI en este análisis refleja patrones globales consistentes con los resultados univariados, pero no sustituye análisis adicionales con mayor resolución química o biológica.

Finalmente, el carácter transversal del estudio impide evaluar la estabilidad temporal de los parámetros analizados y su variabilidad entre cosechas. Asimismo, no se incluyeron análisis botánicos directos, microbiológicos ni ensayos funcionales, lo que limita las inferencias sobre el origen floral específico, la dinámica microbiana o las propiedades biológicas de la miel. Estudios futuros con un mayor tamaño muestral, diseño longitudinal y la incorporación de herramientas complementarias permitirán profundizar y generalizar las conclusiones aquí presentadas.

En conjunto, estas limitaciones no invalidan los resultados principales, sino que delimitan su alcance interpretativo, situando este trabajo como una caracterización fisicoquímica comparativa sólida, alineada con criterios normativos, que proporciona una base analítica rigurosa para investigaciones posteriores de mayor complejidad y alcance.

Implicaciones socioeconómicas y desarrollo regional

La validación científica de la calidad *premium* de la miel Dxiñaguie’ proporciona la base técnica necesaria para transitar de un modelo de comercialización de *commodity* (granel) a uno de producto

diferenciado con alto valor agregado (Bose & Padmavati, 2024). En el contexto del Istmo de Tehuantepec, esta diferenciación no solo representa una oportunidad económica para mejorar los ingresos de los apicultores artesanales mediante el acceso a nichos de mercado *gourmet* o de exportación, sino que también revaloriza el saber-hacer tradicional (*know-how*) como un activo biocultural (Dolores-Mijangos, Santiago-Cruz, Coronado, & Utrera-Quintana, 2017).

La evidencia de que el manejo artesanal genera una estabilidad superior a la oferta industrial regional justifica la implementación de esquemas de protección, como Marcas Colectivas o Indicaciones Geográficas (Mazé, 2023). Estas herramientas permitirían desvincular el precio de la miel Dxiñague' de la volatilidad del mercado de graneles, fomentando un desarrollo endógeno sostenible que premie la calidad sobre el volumen y desincentive las prácticas de sobrecalentamiento y cosecha temprana que actualmente devalúan la apicultura local.

CONCLUSIONES

El presente estudio proporciona la primera evidencia fisicoquímica integral de que la miel artesanal Dxiñague' posee una calidad superior a la oferta regional estándar del Istmo de Tehuantepec. El análisis comparativo demostró que, mientras la miel comercializada a granel (MR) presenta marcadores claros de deterioro térmico y fermentativo (HMF > 36 mg/kg; Lactonas > 9 meq/kg), la miel Dxiñague' mantiene una frescura biológica y una estabilidad oxidativa estadísticamente equivalentes a los estándares internacionales más exigentes. La validación multivariada (PCA) confirmó que el manejo artesanal no es solo una práctica cultural, sino un método tecnológicamente eficiente que preserva la integridad enzimática y la pureza botánica del producto. En consecuencia, la miel Dxiñague' cumple con holgura la normativa NOM-004-SAG/GAN-2018 y posee las características funcionales necesarias para posicionarse en mercados de alto valor (*premium*). Estos hallazgos científicos respaldan la implementación de estrategias de diferenciación comercial, como marcas de certificación, que protejan la identidad biocultural del producto y fortalezcan la economía de los apicultores zapotecas frente a la competencia de mieles industriales degradadas.

Conflicto de interés.

Sin conflicto de intereses.



Tabla 1. Perfil fisicoquímico medio de la miel artesanal Dxiñaguie' en comparación con mieles regionales y controles de calidad.

Parámetro	Miel Dxiñaguie'	Control Nacional	Control Internacional	Miel Regional
Fisicoquímico	(MD)	(CN)	(CI)	(MR)
<i>Indicadores de Madurez</i>				
Humedad (%)	16.23 ± 0.18	16.65 ± 0.15	16.63 ± 0.14	18.51 ± 0.27
Sacarosa (%)	2.15 ± 0.14	2.41 ± 0.04	2.25 ± 0.15	4.15 ± 0.16
Sólidos Insolubles (%)	0.04 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.09 ± 0.01
<i>Indicadores de Deterioro</i>				
HMF (mg/kg)	17.79 ± 0.53	19.91 ± 0.71	19.28 ± 0.59	36.32 ± 1.49
Act. Diastásica (U. Schade)	14.30 ± 0.46	13.66 ± 0.47	13.82 ± 0.10	9.08 ± 0.85
<i>Perfil Electroquímico</i>				
pH	3.94 ± 0.04	3.86 ± 0.02	4.03 ± 0.01	3.70 ± 0.02
Acidez Libre (meq/kg)	14.43 ± 0.43	19.81 ± 0.14	17.49 ± 0.58	34.95 ± 1.42
Lactonas (meq/kg)	5.11 ± 0.19	6.63 ± 0.43	5.81 ± 0.14	9.05 ± 0.32
Acidez Total (meq/kg)	19.54 ± 0.36	26.43 ± 0.50	23.30 ± 0.50	44.00 ± 1.53
Cond. Eléctrica (mS/cm)	0.42 ± 0.03	0.43 ± 0.01	0.44 ± 0.01	0.68 ± 0.03

Nota: Los valores se expresan como la Media ± Desviación Estándar (SD).

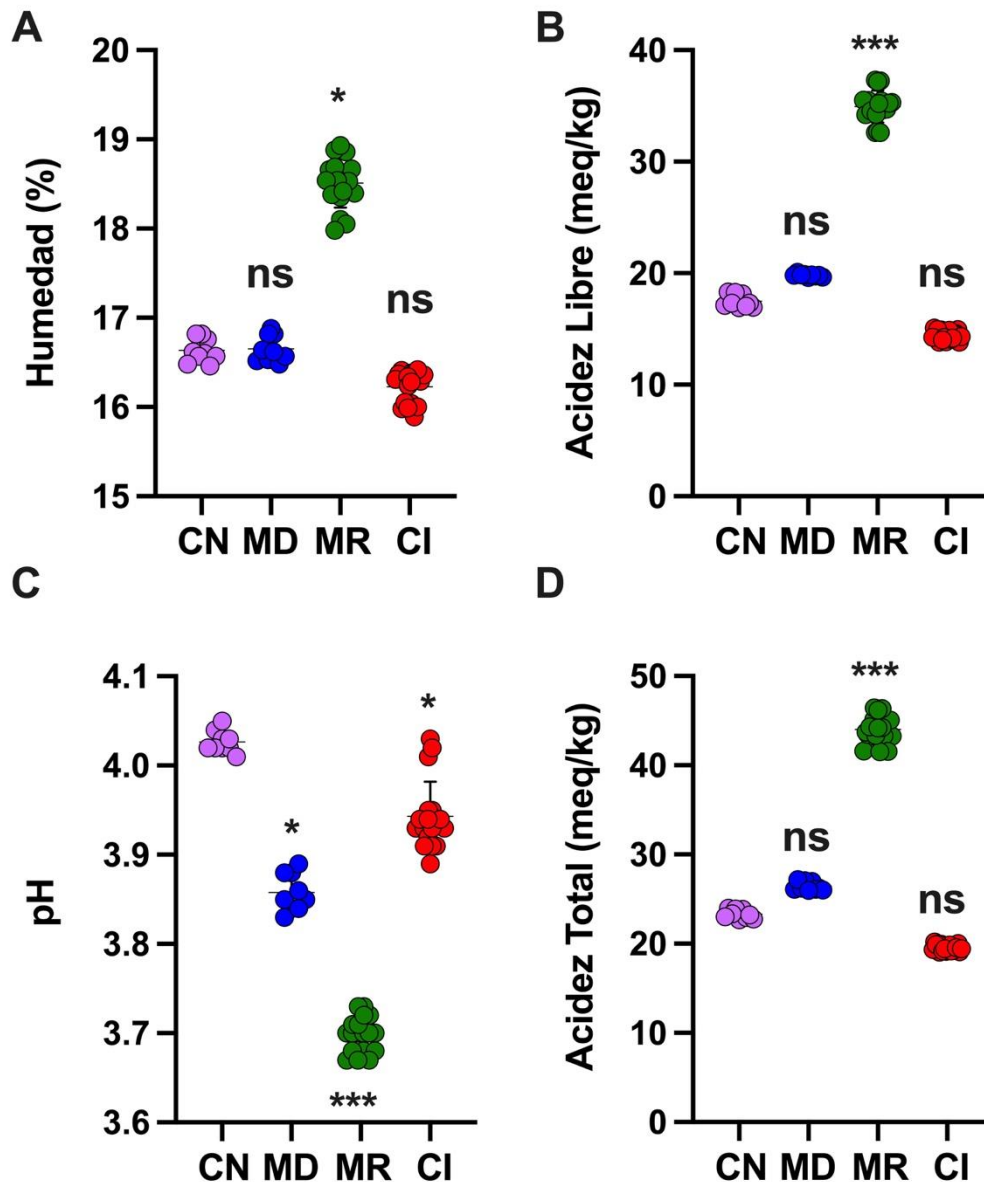


Figura 1. Parámetros de estabilidad microbiológica y acidificación fermentativa. Evaluación multiparamétrica de la estabilidad postcosecha: (A) Humedad, (B) Acidez Total, (C) pH y (D) Acidez Libre. El código de colores corresponde a: Control Nacional (CN, lila), Miel Dxiñaguie' (MD, azul), Miel Regional (MR, verde) y Control Internacional (CI, rojo). Se observa un patrón consistente de degradación en el grupo MR, caracterizado por un exceso de humedad que correlaciona con una acidificación severa (caída de pH < 3.75). Los datos representan la media \pm SD de n=6 (MD, MR) y n=3 (CN, CI). $**p < 0.001$ comparado con el grupo MD. En el panel C (pH), se observaron diferencias menores pero significativas ($*p < 0.05$) entre MD y los controles, atribuibles a la baja variabilidad

natural del parámetro, aunque todos los grupos excepto MR se mantuvieron en rangos de calidad (>3.85).

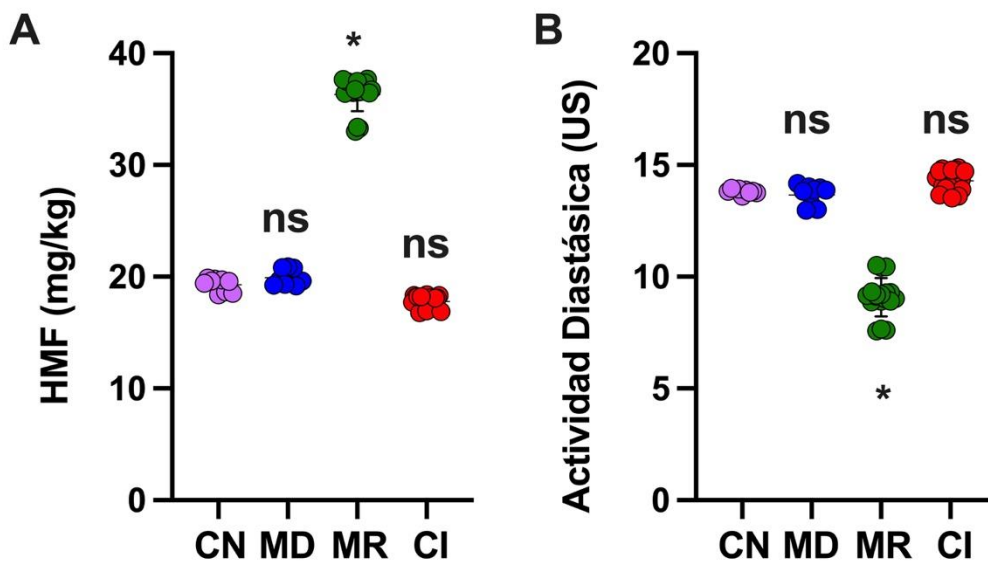


Figura 2. Marcadores de estrés térmico y envejecimiento químico. Gráficos de dispersión (*Dot plots*) comparando (A) el contenido de Hidroximetilfurfural (HMF) y (B) la Actividad Diastásica. El código de colores corresponde a: Control Nacional (CN, lila), Miel Dxiñaague' (MD, azul), Miel Regional (MR, verde) y Control Internacional (CI, rojo). Se observa una clara relación inversa dependiente del manejo: el grupo MR (verde) presenta niveles drásticamente elevados de HMF que coinciden con una pérdida significativa de actividad enzimática, indicativo de deterioro térmico severo. Por el contrario, la miel MD (azul) mantiene niveles óptimos de frescura y vitalidad enzimática, estadísticamente indistinguibles de los controles comerciales de referencia. Los datos representan la media \pm SD de $n=6$ muestras independientes (MD, MR) y $n=3$ (CN, CI). * $p < 0.001$ comparado con el grupo CN. ns = no significativo entre los grupos MD, CN y CI (ANOVA de una vía con post-hoc de Tukey).

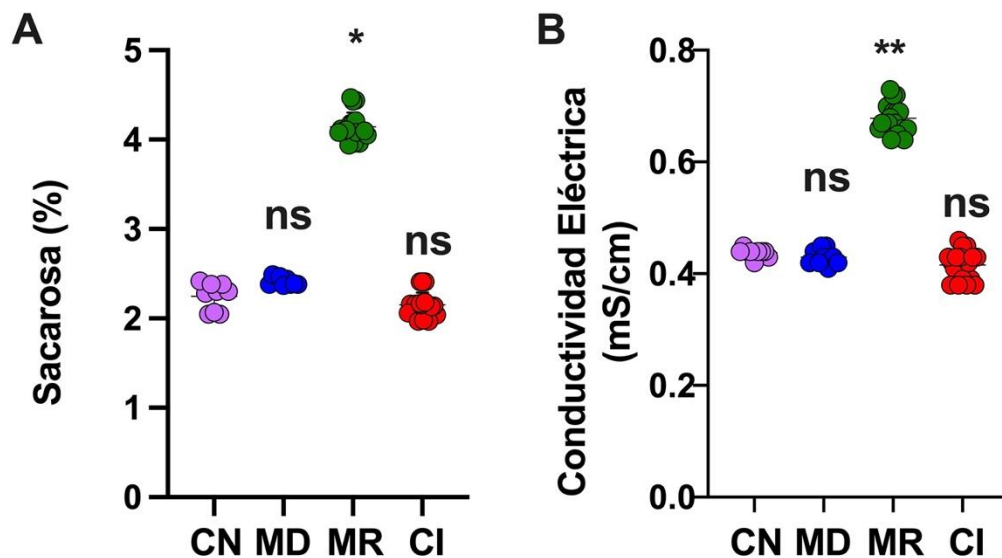


Figura 3. Indicadores de madurez enzimática y origen botánico. Comparación de (A) Sacarosa residual y (B) Conductividad eléctrica. El código de colores corresponde a: Control Nacional (CN, lila), Miel Dxiñaguie' (MD, azul), Miel Regional (MR, verde) y Control Internacional (CI, rojo). Aunque todas las muestras se mantuvieron dentro de los límites normativos (Sacarosa < 5 %; Conductividad < 0.8 mS/cm), el grupo MR presentó niveles significativamente mayores, sugiriendo una maduración incompleta o variaciones en el origen floral. Por el contrario, la superposición estadística entre MD y los controles (CN, CI) confirma una hidrólisis eficiente de la sacarosa y un perfil botánico estandarizado. Los datos representan la media \pm SD de $n=6$ muestras independientes (MD, MR) y $n=3$ (CN, CI). * $p < 0.05$ y ** $p < 0.01$ comparado con el grupo MD. ns = no significativo entre los grupos MD, CN y CI (ANOVA de una vía con post-hoc de Tukey).

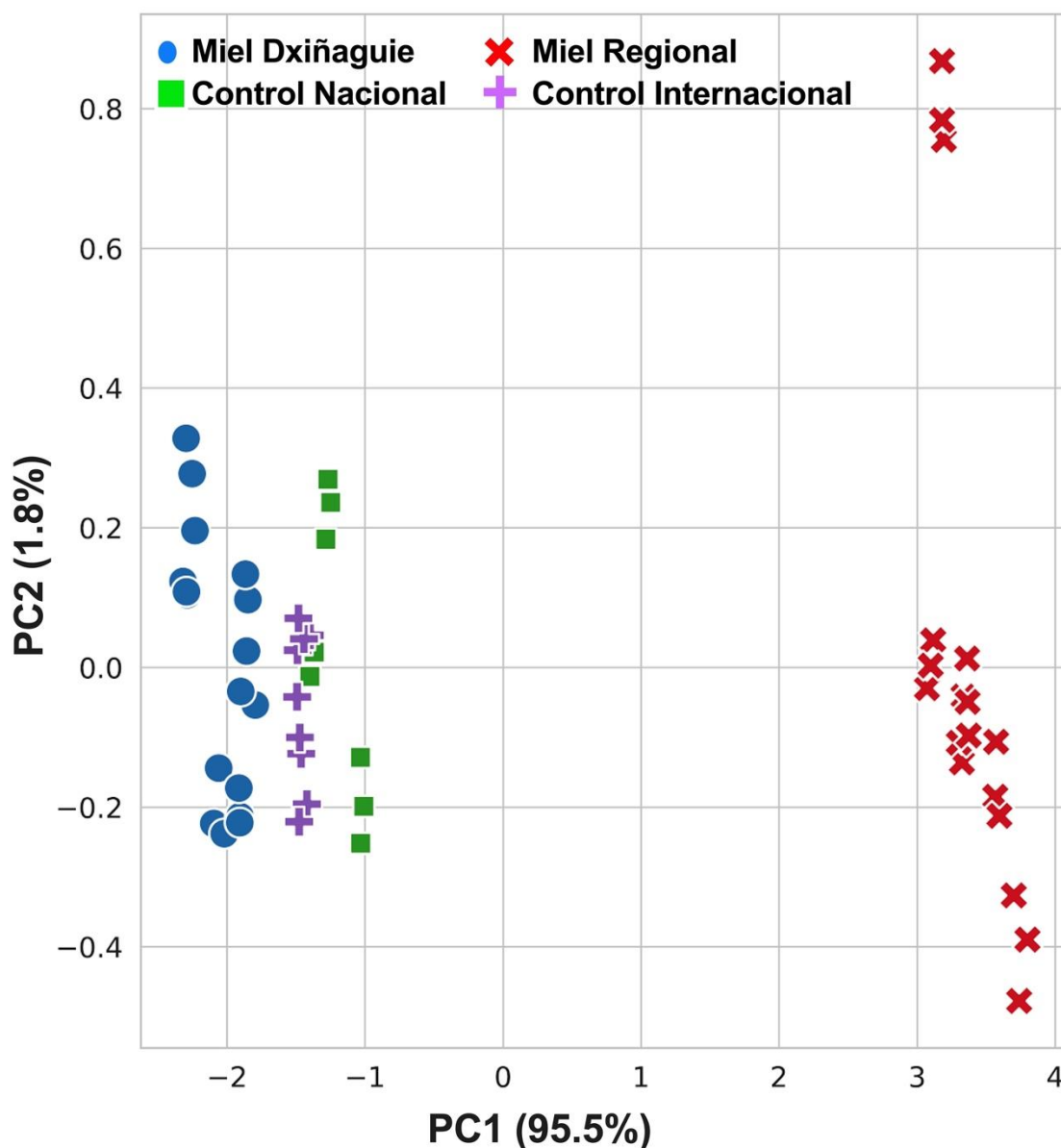


Figura 4. Análisis de Componentes Principales (PCA) del perfil fisicoquímico integral. Biplot de las dos primeras dimensiones latentes generado a partir de los 10 parámetros evaluados (Humedad, HMF, Diastasa, Sacarosa, Conductividad, pH, Acidez Total, Acidez Libre, Lactona y Sólidos Insolubles). (PC1): Eje de Deterioro Global. Explica el 95.5% de la varianza total. Este componente captura la covariación sinérgica entre los marcadores de degradación; valores positivos (derecha) se asocian fuertemente con altos niveles de HMF, acidez y humedad (característico del grupo MR), mientras que valores negativos (izquierda) indican fresca y estabilidad (grupos MD, CN, CI). (PC2): Eje de Variabilidad del pH. Explica el 1.8% de la varianza residual, dominado principalmente por las fluctuaciones del pH (carga factorial de 0.84) independientes del deterioro térmico. La varianza

acumulada del 97.3% demuestra una discriminación robusta entre la miel regional y la miel Dxiñaguie', validando la consistencia del proceso de producción artesanal.

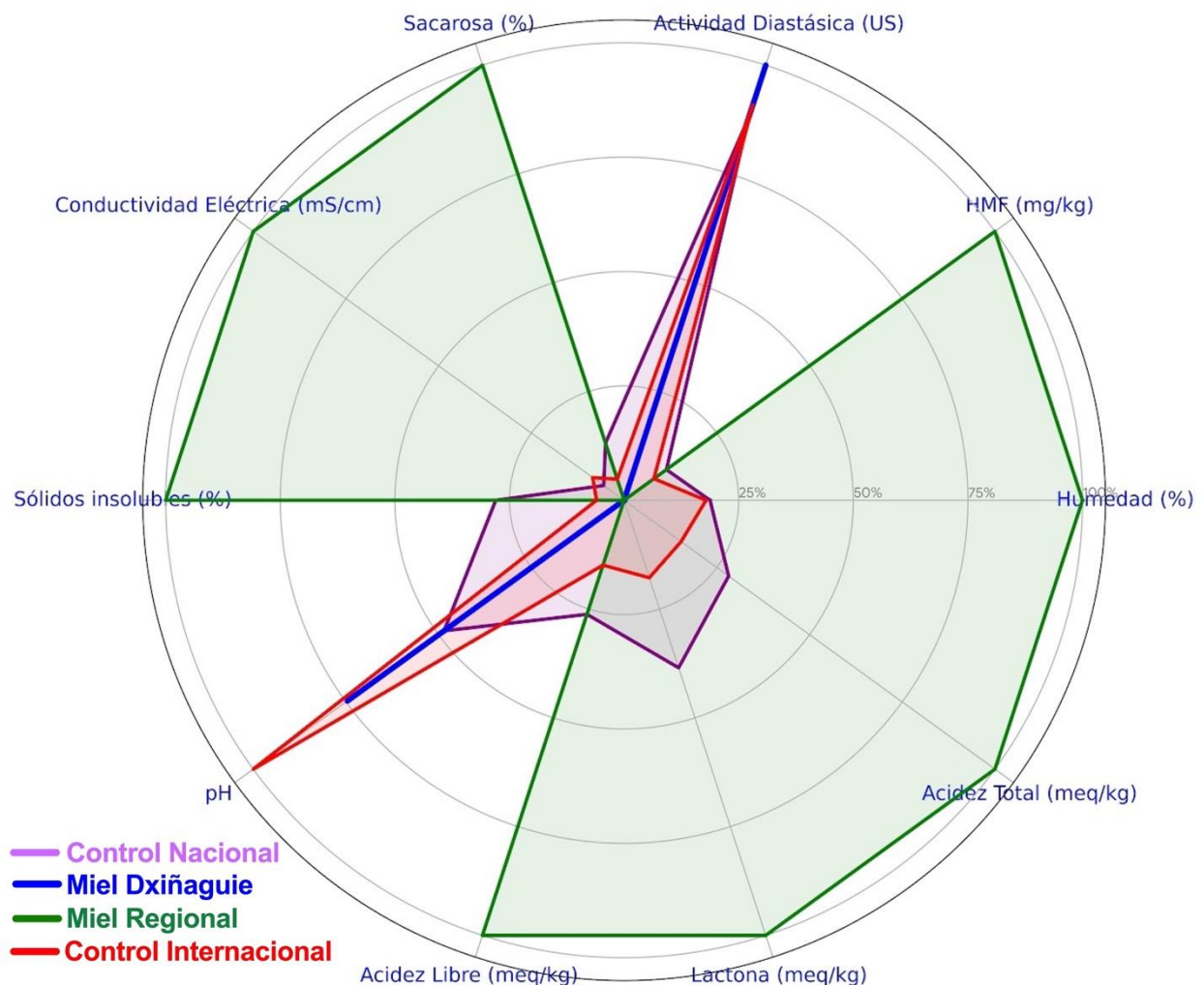


Figura 5. Perfil multivariado comparativo (Gráfica de Radar). Representación de las "huellas dactilares" fisicoquímicas de los cuatro grupos de estudio: Control Nacional (CN, lila), Miel Dxiñaguie' (MD, azul), Miel Regional (MR, verde) y Control Internacional (CI, rojo). Los ejes radiales representan las medias de cada variable normalizadas a una escala de 0 a 1 (donde 0 es el valor mínimo y 1 el máximo observado en el estudio). Se observa una superposición casi perfecta entre el perfil compacto de MD y los estándares de referencia CN y CI, lo que indica una equivalencia funcional en términos de calidad global. La expansión del polígono verde (MR) hacia los ejes de HMF, Humedad y Acidez ilustra visualmente el desbalance químico multisistémico característico de la miel regional estándar. Las etiquetas de los ejes (azul) indican las variables críticas de la normativa NOM-004.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almutairi, L. A., & Alqahtani, A. S. (2025). Compliance Investigation of Honey-Packaged Food Labels and Claims in Saudi Arabia. *Int J Food Sci*, 2025, 7113620. doi:10.1155/ijfo/7113620
- Amadei, M., Maldonado, L., Salomón, V., Alvarez, A., & Gaggiotti, M. (2022). La detección de adulteraciones en la miel. In, (pp. 109).
- AOAC-Moisture-in-honey-International. (2012). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (19th edn). Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Analytical Chemists International.
- Becerra, J. X. (2005). Timing the origin and expansion of the Mexican tropical dry forest. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 102(31), 10919–10923. doi:10.1073/pnas.0409127102
- Bell, A. R., & Grainger, M. N. C. (2023). Accelerated loss of diastase in manuka honey: Investigation of manuka specific compounds. *Food Chem*, 426, 136614. doi:10.1016/j.foodchem.2023.136614
- Bonsignore, G., Martinotti, S., & Ranzato, E. (2024). Honey Bioactive Molecules: There Is a World Beyond the Sugars. *BioTech*, 13(4), 47. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2673-6284/13/4/47>
- Bose, D., & Padmavati, M. (2024). Honey Authentication: A review of the issues and challenges associated with honey adulteration. *Food Bioscience*, 61, 105004. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105004>
- Brar, D. S., Pant, K., Krishnan, R., Kaur, S., Rasane, P., Nanda, V., ... Gautam, S. (2022). A comprehensive review on unethical honey: Validation by emerging techniques. *Food Control*, 145, 109482. doi:10.1016/j.foodcont.2022.109482
- Cabrera M., & Santander E. (2022). Physicochemical and sensory analysis of honeys from eastern Formosa province (Argentina) and its relationship with their botanical origin. *Food Chemistry Advances*, 1, 100026. doi:<https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100026>
- Cabrera-Fuentes, H. A., Barreto, G., Perez-Campos, E., Nivon-Torres, G. F., Garcia Gonzalez, A. A., Al-Suhaim, E. A., & Liehn, E. A. (2025). Targeting Inflammation and Fibrosis in Cardiovascular Disease: Emerging Mechanisms and Therapies. *FASEB J*, 39(17), e71008. doi:10.1096/fj.202500970R



- Cabrera-Fuentes, H. A., Liehn, E. A., & Al-Suhaimi, E. A. (2025). Decoding the plasma proteome: Advancing precision medicine in cardiovascular health. *Drug Discov Today*, 31(1), 104584. doi:10.1016/j.drudis.2025.104584
- Cetintas, Y. (2025). Quality, Authenticity, and Classification of Honeys Produced in Mugla Province, Turkiye. *J Food Sci*, 90(12), e70782. doi:10.1111/1750-3841.70782
- Codex Alimentarius, C. (1981). Standard for Honey (CXS 12-1981): Adopted in 1981. Revised in 1987, 2001. Amended in 2019, 2022. In: FAO/WHO.
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos, S. (2021). Manual de la MODIFICACIÓN a la Norma Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010. In. Ciudad de México, México: Secretaría de Salud / COFEPRIS.
- Daugaliyeva, S., Daugaliyeva, A., Amirova, K., Yelubayeva, A., Toktarov, N., & Peletto, S. (2025). Identifying Honey Species Composition and Verifying Label Accuracy Using Melissopalynological Analysis and DNA Metabarcoding. *Food Analytical Methods*, 18(11), 2634–2650. doi:10.1007/s12161-025-02883-y
- Díaz, A. O., Segovia, M. F., & Rivera, N. A. (2025). Stochastic frontier analysis and agricultural typologies: Applied to Mexico's sugarcane industry. *Regional Science Policy & Practice*, 17(4), 100173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsp.2025.100173>
- Dolores-Mijangos, G., Santiago-Cruz, M., Coronado, J. J., & Utrera-Quintana, F. (2017). Impact evaluation of apiculture activity in the Tehuantepec Isthmus, Oaxaca, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 14, 187–203.
- Escuredo, O., & Seijo, M. C. (2024). Authenticity of Honey: Characterization, Bioactivities and Sensorial Properties Series II. *Foods*, 13(13), 2079. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/13/2079>
- European-Council (2002). Council Directive 2001/110/EC of 20 December 2001 relating to honey. Available from <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:010:0047:0052:EN:PDF> (accessed L 10)



- Fazakas, D., & Mot, A. C. (2025). Spectrophotometric Assessment of 5-HMF in Thermally Treated Honey: Analytical Performance Comparison of Classical and Modified Methods. *Chemistry*, 7(2), 64. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2624-8549/7/2/64>
- Gallardo-López, F., Landini, F., & Hernández-Chontal, M. A. (2022). The Productive Orientation of Rural Extensionists in the Regions of Mexico: A Key Element for Agroecological Transition. *Sustainability*, 14(7), 4062. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/7/4062>
- Harbane, S., Escuredo, O., Saker, Y., Ghorab, A., Nakib, R., Rodriguez-Flores, M. S., ... Seijo, M. C. (2024). The Contribution of Botanical Origin to the Physicochemical and Antioxidant Properties of Algerian Honeys. *Foods*, 13(4)doi:10.3390/foods13040573
- Honorable Congreso del Estado de, O. (2012). Ley de Fomento Apícola del Estado de Oaxaca. *Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Oaxaca*.
- Inaudi, P., Garzino, M., Abollino, O., Malandrino, M., & Giacomino, A. (2025). Honey: Inorganic Composition as Possible Marker for Botanical and Geological Assignment. *Molecules*, 30(7), 1466. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1420-3049/30/7/1466>
- Janković, M., Kobiljski, D., & Torović, L. (2026). Behind the Buzz: Honey-Sweet risks and their implications. *Food Control*, 180, 111618. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111618>
- Kamal, M. M., Rashid, M. H. U., Mondal, S. C., El Taj, H. F., & Jung, C. (2019). Physicochemical and microbiological characteristics of honey obtained through sugar feeding of bees. *J Food Sci Technol*, 56(4), 2267–2277. doi:10.1007/s13197-019-03714-9
- Kanelis, D., Liolios, V., Tananaki, C., & Rodopoulou, M.-A. (2022). Determination of the Carbohydrate Profile and Invertase Activity of Adulterated Honeys after Bee Feeding. *Applied Sciences*, 12(7), 3661. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3661>
- Laynes-Magana, C., Cetzal-Ix, W., Lopez-Castilla, H. M. J., Tamayo-Cen, I., Martinez-Puc, J. F., Noguera-Savelli, E., ... Basu, S. K. (2025). Honey production, an economic alternative for coastal areas with mangrove ecosystems: a case study in Sabancuy, Campeche, southeastern Mexico. *J Ethnobiol Ethnomed*, 21(1), 42. doi:10.1186/s13002-025-00794-0



- Lemos, M., Venturieri, G., Filho, H., & Dantas, K. (2017). Evaluation of the physicochemical parameters and inorganic constituents of honeys from the Amazon region. *Journal of Apicultural Research*, 57, 1–10. doi:10.1080/00218839.2017.1338120
- Liehn, E. A., & Cabrera-Fuentes, H. A. (2015). Inflammation between defense and disease: impact on tissue repair and chronic sickness. *Discoveries (Craiova)*, 3(1), e42. doi:10.15190/d.2015.34
- Luna-Olea, R., Omaña Silvestre, J., Quintero Ramírez, J. M., & Farrera-Vázquez, I. (2025). Honey production logistics in Mexico and its domestic market. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 16, 646–660.
- Manyi-Loh, C., Ndip, R., & Clarke, A. (2011). Volatile Compounds in Honey: A Review on Their Involvement in Aroma, Botanical Origin Determination and Potential Biomedical Activities. *International Journal of Molecular Sciences (IJMS)*, 12, 9514–9532. doi:10.3390/ijms12129514
- Margaoan, R., Papa, G., Nicolescu, A., Cornea-Cipcigan, M., Kösoğlu, M., Topal, E., & Negri, I. (2025). Environmental pollution effect on honey bees and their derived products: a comprehensive analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(16), 10370–10391. doi:10.1007/s11356-024-33754-4
- Marín, X., Grau-Noguer, E., Gervilla-Cantero, G., Ripolles-Avila, C., & Castillo, M. (2025). Emerging technologies for detecting food fraud: A review of the current landscape in the 2020s. *Trends in Food Science & Technology*, 165, 105313. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105313>
- Martínez-Martínez, P. R., Ramos-Soto, A. L., Cruz-Domínguez, E., Palacios-Pineda, F., & Valadez-Solana, B. D. (2025). Social Capital and Sustainable Development in Community Contexts: Evidence from Beekeepers in Southern Mexico. *Sustainability*, 17(24), 11102. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/24/11102>
- Mazé, A. (2023). Geographical indications as global knowledge commons: Ostrom's law on common intellectual property and collective action. *Journal of Institutional Economics*, 19, 1–17. doi:10.1017/S1744137423000036
- Mezentsev, S. (2024). *Nomadic beekeeping as an effective way to physically protect and preserve the lives of honey bees from pesticides used in agriculture.*



- Mongi, R. J. (2024). Influence of botanical origin and geographical zones on physicochemical properties, mineral contents and consumer acceptance of honey in Tanzania. *Food Chemistry Advances*, 4, 100731. doi:<https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100731>
- Morariu, I.-D., Avasilcai, L., Vieriu, M., Lupu, V. V., Ioniuc, I., Morariu, B.-A., ... Trandafir, L. (2024). A Comprehensive Narrative Review on the Hazards of Bee Honey Adulteration and Contamination. *Journal of Food Quality*, 2024(1), 3512676. doi:<https://doi.org/10.1155/2024/3512676>
- Mostoles, D., de Krijger, F., Mara, A., Sanna, G., Saurina, J., Sentellas, S., & Núñez, O. (2025). Honey Geographical Origin Characterization and Authentication Based on Spectrophotometric Assays, Physicochemical Parameters, and LC-MS/MS Polyphenolic Profiling. *Foods*, 14(22), 3828. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/22/3828>
- Nidhi, C. N., Haldhar, S. M., Singh, K. I., Singh, N. O., Sinha, B., Kencharddi, R. N., ... Choudhary, M. (2025). Physicochemical and antioxidant properties of honey across bee species from North Eastern Hill region of India. *Scientific Reports*, 15(1), 33759. doi:10.1038/s41598-025-98040-w
- NOM-2018-DOF-Mexico (2020). NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SAG/GAN-2018, Producción de miel y especificaciones. Available from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5592435
<https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-004-sag-gan-2018/> (accessed
- Ogwu, M. C., & Izah, S. C. (2025). Honey as a Natural Antimicrobial. *Antibiotics*, 14(3), 255. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-6382/14/3/255>
- Perez-Campos, E., Del Rio, V., & Cabrera-Fuentes, H. A. (2025). Bridging translational gaps in Mexico's new science era. *Trends Mol Med*, 31(3), 202–203. doi:10.1016/j.molmed.2025.01.003
- Pérez-García, E., Meave, J., & Cevallos-Ferriz, S. (2012). Flora and vegetation of the seasonally dry tropics of Mexico: Origin and biogeographical implications. *Acta botánica Mexicana*, 100, 149–193.



- Pérez-Soto, E., Campos-Pastelin, J. M., Zaldivar-Ortega, A. K., González-Lemus, U., Cenobio-Galindo, A. d. J., & González-Montiel, L. (2025). Physicochemical Characteristics of Honey From The Sierra de Flores Magón Region, Oaxaca, Mexico. *Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA*, 19(3), e011727. doi:10.24857/rgsa.v19n3-119
- Rahmani, A. H., & Babiker, A. Y. (2025). Review on role of honey in disease prevention and treatment through modulation of biological activities. *Open Life Sci*, 20(1), 20251069. doi:10.1515/biol-2025-1069
- Ramírez, E., Navarro-Calvo, L., & Díaz-Carbajal, E. (2011). Botanical characterisation of Mexican honeys from a subtropical region (Oaxaca) based on pollen analysis. *Grana*, 50, 40–54. doi:10.1080/00173134.2010.537767
- Raweh, H. S. A., Badjah-Hadj-Ahmed, A. Y., Iqbal, J., & Alqarni, A. S. (2023). Physicochemical Composition of Local and Imported Honeys Associated with Quality Standards. *Foods*, 12(11)doi:10.3390/foods12112181
- Rendon, B., Bravo-Avilez, D., Bernal-Ramírez, L., García Mendoza, A., Espejo-Serna, A., Ferrari, A., ... Arias, S. (2023). Ethnobotanical Science in the Clouds: Useful Plants of Northeastern Oaxaca, Mexico. In, (pp. 755–869).
- Requier, F. (2019). Honey Bees in Latin America. In, (pp. p. 206–221).
- Samarghandian, S., Farkhondeh, T., & Samini, F. (2017). Honey and Health: A Review of Recent Clinical Research. *Pharmacognosy Res*, 9(2), 121–127. doi:10.4103/0974-8490.204647
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario, P. y. A. (2016). Título de Registro de Marca y Fierro de Herrar: Registro No. API-389/16. In. Oaxaca, México: Departamento de Salud Animal, Dirección de Fomento Pecuario.
- Sereia, M. J., Parpinelli, R. S., Perdoncini, M., Marçó, P. H., de Lima, E. G., & Anjo, F. A. (2017). Techniques for the Evaluation of Microbiological Quality in Honey. In V. D. A. Arnaut de Toledo (Ed.), *Honey Analysis*. London: IntechOpen.
- SharafEl-Din, M. G., Farrag, A. F. S., Wu, L., Huang, Y., & Wang, K. (2025). Health benefits of honey: A critical review on the homology of medicine and food in traditional and modern contexts.



Journal of Traditional Chinese Medical Sciences, 12(2), 147–164.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtcms.2025.03.015>

Singh, I., & Singh, S. (2018). Honey moisture reduction and its quality. *J Food Sci Technol*, 55(10), 3861–3871. doi:10.1007/s13197-018-3341-5

Stanojevic, S. P., Milincic, D. D., Smiljanic, N., Pesic, M. B., Nedic, N. M., Kolasinac, S., ... Kostic, A. Z. (2024). Conventional vs. Organically Produced Honey-Are There Differences in Physicochemical, Nutritional and Sensory Characteristics? *Foods*, 13(22)doi:10.3390/foods13223573

Tlak Gajger, I., Dar, S. A., Ahmed, M. M. M., Aly, M. M., & Vlainic, J. (2025). Antioxidant Capacity and Therapeutic Applications of Honey: Health Benefits, Antimicrobial Activity and Food Processing Roles. *Antioxidants (Basel)*, 14(8)doi:10.3390/antiox14080959

Vega, J., Aguilar, J., Morales Galicia, A. E., Campos, E., Cabrera-Fuentes, H., & Jarquín González, E. (2025). Cambio Climático y Enfermedades Infecciosas Emergentes: Riesgos, Vectores y Adaptación Sanitaria. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9, 1943–1963. doi:10.37811/cl_rcm.v9i3.17819

Verma, G., Kaur, A., Kaur, G., Sodeitou, M., Kashyap, P., Farooq, Q., & Sharma, B. (2025). The anti-inflammatory properties of honey: A natural remedy for modern health challenges. *IP Journal of Nutrition, Metabolism and Health Science*, 8, 104–115. doi:10.18231/j.ijnmhs.12374.1760001562

Villaseñor, J., Ortiz, E., & Meave, J. (2025). Floristic diversity of the tropical rainforest in Mexico. *Botanical Sciences*, 103, 899–916.

Xolalpa-Aroche, A., Hernández-Mena, D. I., Moguel-Chin, W. I., Contreras-Peruyero, H., Rivero-Cruz, B. E., Ortiz-Vázquez, E., ... Delgado-Suárez, E. J. (2024). Physicochemical Properties of Two Mexican Stingless Bee Honeys to Strengthen Their Biocultural Value. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 34(5), 1129–1139. doi:10.1007/s43450-024-00566-z

Zhang, X.-H., Gu, H.-W., Liu, R.-J., Qing, X.-D., & Nie, J.-F. (2023). A comprehensive review of the current trends and recent advancements on the authenticity of honey. *Food Chemistry: X*, 19, 100850. doi:10.1016/j.fochx.2023.100850

