



Perspectivas actuales en la caracterización no destructiva de edulcorantes

Current perspectives on the non-destructive characterization of sweeteners

Renzo Laiza-Calderón¹ *

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

ORCID de los autores

R. Laiza-Calderón: <https://orcid.org/0009-0002-6010-770X>

RESUMEN

La creciente preocupación por la calidad, autenticidad e inocuidad de los alimentos ha incentivado el desarrollo de métodos analíticos confiables para la detección y cuantificación de edulcorantes, tanto naturales como sintéticos. En este contexto, las técnicas espectroscópicas han cobrado relevancia por su rapidez, sensibilidad y carácter no destructivo, convirtiéndose en herramientas clave para el análisis de productos alimentarios. Esta revisión examina las principales tendencias científicas en el estudio de edulcorantes mediante un enfoque bibliométrico, describe los fundamentos y la evolución de tecnologías como FTIR, NIR, UV-Vis y espectroscopía Raman, y analiza sus aplicaciones específicas en la identificación y cuantificación de estos compuestos. Asimismo, se abordan las implicancias de dichas metodologías en los sistemas de control de calidad y en la seguridad alimentaria, destacando su papel estratégico en la prevención del fraude y en la protección del consumidor, así como en la mejora de la trazabilidad y transparencia de los alimentos industrializados.

Palabras clave: Quimiometría; Adulteración; Análisis multicomponente; Autenticación.

ABSTRACT

The growing concern for food quality, authenticity, and safety has driven the development of reliable analytical methods for the detection and quantification of both natural and synthetic sweeteners. In this context, spectroscopic techniques have gained prominence due to their speed, sensitivity, and non-destructive nature, positioning them as key tools for food product analysis. This review examines current scientific trends in sweetener analysis through a bibliometric approach, describes the theoretical foundations and evolution of technologies such as FTIR, NIR, UV-Vis, and Raman spectroscopy, and explores their specific applications in the identification and quantification of these compounds. Additionally, the review discusses the implications of these methodologies for quality control systems and food safety, highlighting their strategic role in prevention of fraud, consumer protection, and the improvement of traceability and transparency in processed food products.

Keywords: Chemometrics; Adulteration; Multicomponent analysis; Authentication.

1. Introducción

La creciente preocupación de los consumidores por la calidad, autenticidad e inocuidad de los alimentos ha intensificado la vigilancia sobre el uso de aditivos, en particular los edulcorantes, tanto naturales como sintéticos (Chapple et al., 2023; Farhat et al., 2021). Esta inquietud responde no sólo a motivos de salud pública, sino también a la demanda creciente de transparencia en el etiquetado y la composición de los productos de consumo diario (de Carvalho et al., 2022; Cruz-Casarrubias et al., 2021; Mukhovha et al., 2025). En este contexto, en las últimas décadas se ha incrementado significativamente el interés por desarrollar y aplicar métodos analíticos confiables para la detección y cuantificación de edulcorantes, en respuesta a los desafíos relacionados con la calidad y seguridad alimentaria (Mao & Song, 2018; Souza et al., 2025).

Entre las herramientas más prometedoras en este campo, las técnicas espectroscópicas han emergido como alternativas clave, debido a su rapidez, alta sensibilidad y capacidad para generar perfiles moleculares específicos (Pezzotti et al., 2024; Calle et al., 2023). Tecnologías como la espectroscopía Raman, FTIR (infrarrojo por transformada de Fourier), NIR (infrarrojo cercano) y UV-Vis han sido ampliamente utilizadas para autenticar, cuantificar y detectar adulteraciones en productos que contienen edulcorantes como aspartame, sucralosa, stevia y sacarina (Kujundžić et al., 2017; Hou et al., 2025).

Estas aplicaciones no solo fortalecen los sistemas de control de calidad en la industria alimentaria,

sino que también contribuyen significativamente a la protección del consumidor frente al uso fraudulento o indebido de estos compuestos (Dumancas et al., 2022; Souza et al., 2025). En este sentido, la espectroscopía representa una convergencia estratégica entre la ciencia analítica moderna y la innovación tecnológica aplicada al control de alimentos.

Esta revisión tiene como objetivo analizar la evolución y aplicación de las técnicas espectroscópicas en la detección y cuantificación de edulcorantes, con énfasis en su relevancia para el control de calidad y la seguridad alimentaria. Se abordan las tendencias científicas mediante un enfoque bibliométrico, los fundamentos y avances de técnicas como Raman, FTIR, NIR y UV-Vis, así como sus aplicaciones en la identificación de edulcorantes. Además, se discuten las implicancias de estos métodos en la vigilancia de aditivos y la protección del consumidor.

2. Tendencias científicas en el análisis de edulcorantes mediante espectroscopía: enfoque bibliométrico

La comunidad científica ha mostrado un interés creciente en la aplicación de estas técnicas para el análisis de edulcorantes, impulsado por la necesidad de métodos analíticos eficientes para su detección, cuantificación, autenticación y control de adulteraciones. La Figura 1 muestra la evolución del número de artículos originales publicados en la base de datos Scopus entre 2000 y 2025, utilizando una estrategia de búsqueda centrada en espectroscopía y edulcorantes.

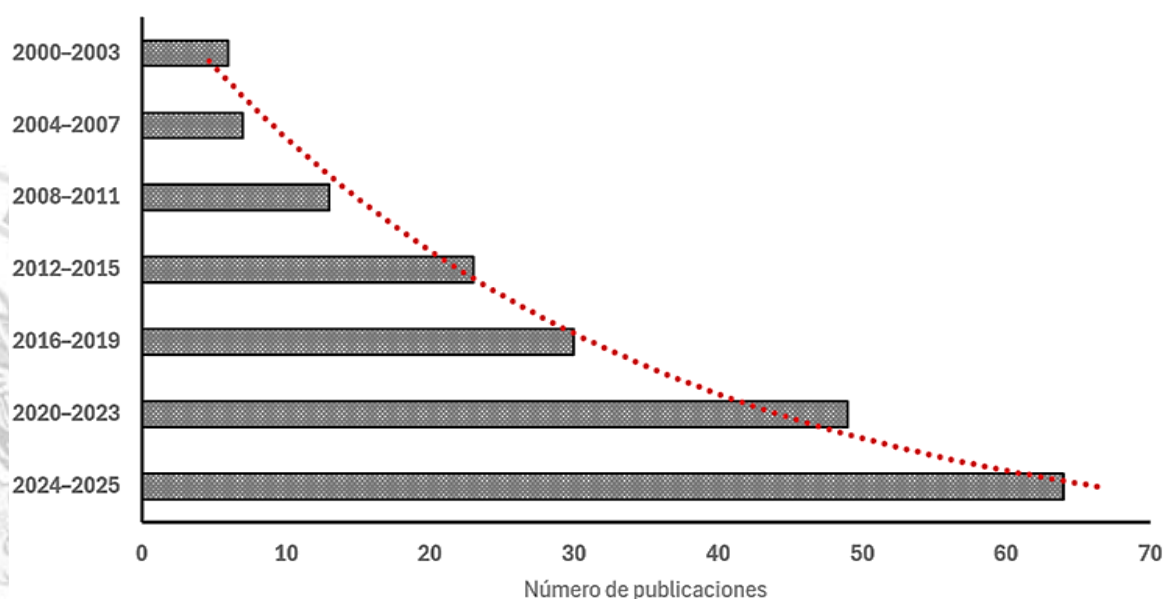


Figura 1. Artículos científicos originales publicados por períodos entre los años 2000 y 2025. Fuente: Scopus).

Figure 1. Scientific articles published by period between the years 2000 and 2025. Source: Scopus).

Durante este periodo, se observa un crecimiento sostenido en la producción científica. En los dos intervalos más recientes (2020 – 2023 y 2024 – 2025), se registraron 113 publicaciones, en marcado contraste con las 49 publicaciones contabilizadas entre 2000 y 2015. Esta tendencia refleja no solo el avance en las tecnologías analíticas, sino también una creciente preocupación por la autenticidad y seguridad de los alimentos que contienen edulcorantes.

El crecimiento sostenido de la producción científica sobre el uso de técnicas espectroscópicas en el análisis de edulcorantes evidencia su creciente importancia en el control de calidad y la inocuidad alimentaria. En este contexto, se llevó a cabo una revisión integral de los avances recientes y las perspectivas futuras en esta área, mediante un enfoque sistémico y un análisis crítico de la literatura especializada. La presente revisión examina la evolución, fundamentos y aplicaciones de los métodos espectroscópicos en la detección, cuantificación y autenticación de edulcorantes, destacando su papel estratégico en el desarrollo de herramientas analíticas innovadoras para la industria alimentaria.

La Figura 2 presenta la distribución geográfica de la producción científica en el campo de los edulcorantes y las técnicas espectroscópicas de análisis para el periodo 2001 – 2025, generada mediante el análisis bibliométrico. Los resultados indican que China se destaca con la tonalidad más oscura en el mapa, lo que refleja su posición

como el país con la mayor producción científica a nivel global en este ámbito, seguida de cerca por Estados Unidos y Canadá. En Europa Occidental, países como Alemania, Reino Unido y Francia exhiben una contribución científica sustancial, consolidándose como centros regionales de investigación. En Asia, India y Japón también presentan un volumen de publicaciones significativo, mientras que, en Oceanía, Australia se destaca por su notable contribución al campo. En América Latina, países como Brasil, Argentina, México y Chile muestran una producción científica considerable, aunque de menor magnitud en comparación con los líderes globales. En contraste, la mayoría de los países de África presentan una producción limitada, con la excepción de Sudáfrica, que se distingue como el principal contribuyente del continente. En el Medio Oriente y Asia del Sur, naciones como Arabia Saudita e Irán registran una presencia emergente en la literatura científica sobre el tema, evidenciando un interés creciente en esta área de investigación.

El análisis de co-ocurrencia de palabras clave permitió identificar cinco clústeres temáticos principales, diferenciados cromáticamente para su visualización (Figura 3). Entre ellos, el clúster verde, centrado en el análisis de alimentos y quimiometría, emergió como el más interconectado, evidenciando la centralidad de los enfoques analíticos multivariados en la investigación contemporánea sobre los edulcorantes.

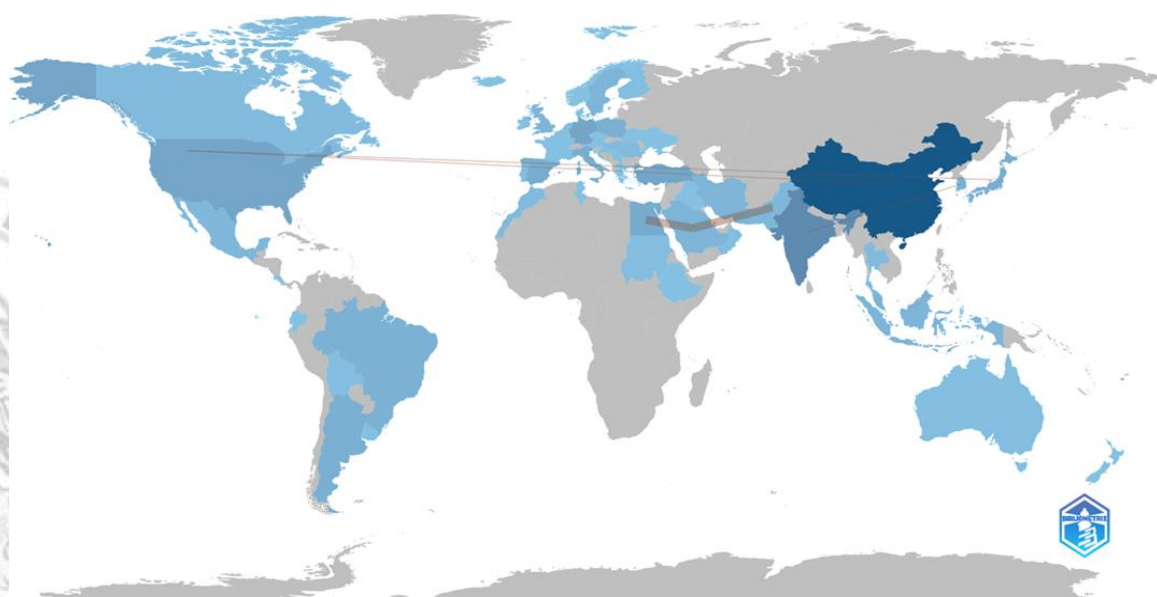


Figura 2. Mapa mundial de producción científica por países.

Figure 2. World map of scientific production by country.

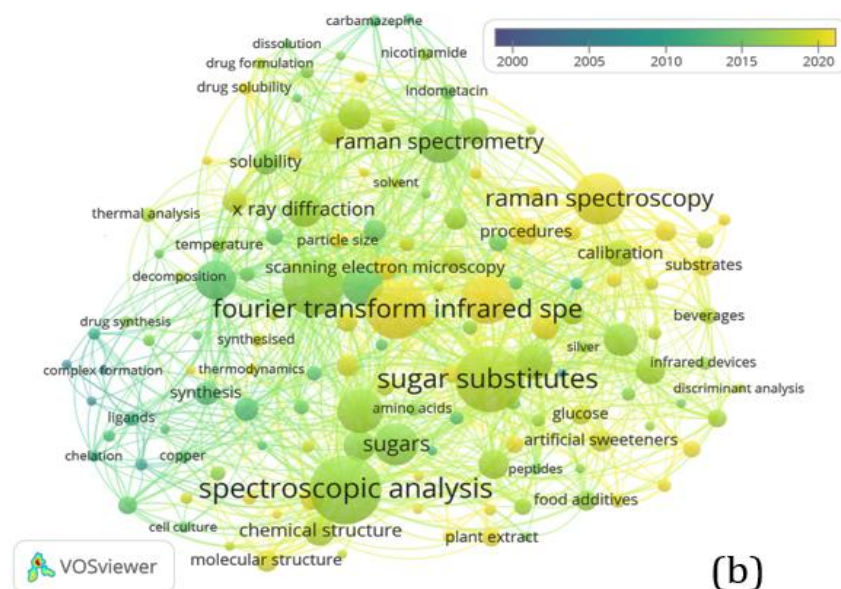
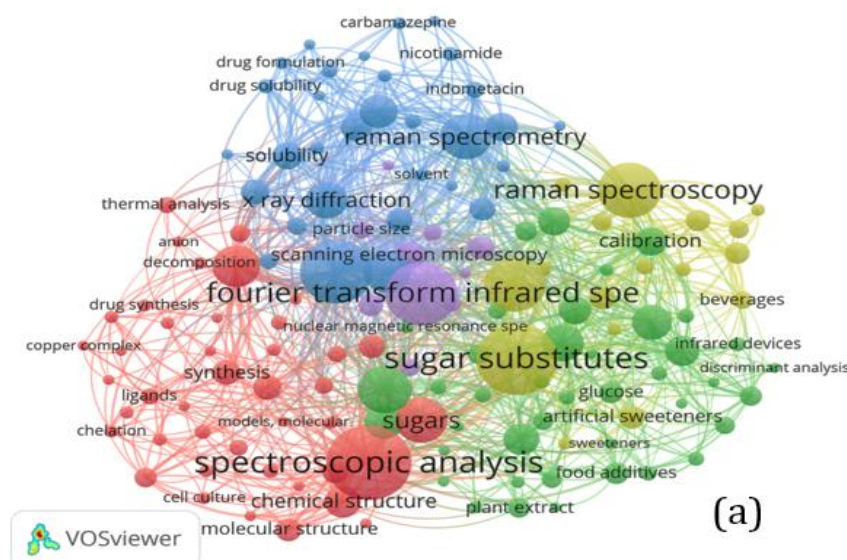


Figura 3. Co-ocurrencia de todas las palabras clave con relación a documentos (a) clústeres, (b) visualización en el tiempo.

Figure 3. Co-occurrence of all keywords in relation to documents (a) clusters, (b) visualization over time.

Las técnicas espectroscópicas más prevalentes identificadas fueron la espectroscopía Raman y la espectroscopía en el infrarrojo cercano. Estas técnicas aparecieron frecuentemente asociadas a términos como control de calidad, detección de adulteración y quimiometría, lo que indica su aplicación predominante en el aseguramiento de la autenticidad y seguridad alimentaria. Cabe destacar la fuerte correlación observada entre los métodos de infrarrojo cercano y el uso de técnicas quimiométricas, en particular con el análisis de componentes principales y la regresión por mínimos cuadrados parciales, lo que refleja la necesidad de abordar la complejidad de las matrices alimentarias mediante herramientas estadísticas avanzadas.

Desde una perspectiva temporal, se identificó un incremento notable en las investigaciones centradas en sacarina a partir de 2016, consolidándose como el edulcorante artificial más estudiado mediante espectroscopía Raman y FTIR durante el período 2016–2018. Este fenómeno coincide con la emergencia de estudios que emplean nanopartículas metálicas, representadas en el clúster amarillo, y espectroscopía Raman de superficie mejorada para la detección ultrasensible de edulcorantes en muestras complejas.

Asimismo, se evidenció una transferencia metodológica significativa entre la caracterización farmacéutica, agrupada en el clúster azul, y el análisis de alimentos, particularmente en el uso

compartido de técnicas como FTIR, difracción de rayos X y calorimetría diferencial de barrido. Esto sugiere que los avances en la caracterización de sólidos farmacéuticos han sido adaptados para el estudio de edulcorantes y matrices alimentarias, enriqueciendo el arsenal analítico disponible.

La Tabla 1 presenta las diez palabras clave con mayor impacto dentro del corpus documental analizado, según su frecuencia de aparición y su fuerza de enlace. Las cinco palabras clave con mayor frecuencia de ocurrencia son "spectroscopic analysis", "Raman spectrometry", "infrared spectroscopy", "sugar substitutes" y "saccharin", con 43, 25, 23, 41 y 36 ocurrencias, respectivamente. Estas mismas palabras clave también presentan una alta fuerza de enlace, lo que refleja su fuerte co-ocurrencia con otros términos dentro del dominio de estudio. Por

ejemplo, "saccharin" y "Fourier transform infrared spectroscopy" alcanzan una fuerza de enlace de 499 y 377, respectivamente, lo que evidencia su relevancia central en las investigaciones sobre métodos espectroscópicos aplicados al análisis de edulcorantes. Con el fin de mantener un enfoque temático específico, se excluyeron del análisis términos genéricos o amplios que carecen de especificidad dentro del campo de estudio.

El análisis de mapeo temático (Figura 4) revela la estructura intelectual del campo de estudio sobre los edulcorantes y sus técnicas analíticas, organizando los temas según su centralidad y densidad de desarrollo. Para garantizar la precisión y especificidad del análisis, se aplicó un proceso de normalización terminológica en el que se agruparon términos sinónimos o conceptualmente equivalentes.

Tabla 1

Palabras clave más utilizadas (basado en ocurrencias)

Table 1

Most frequently used keywords (based on occurrences)

Top 10	Keyword	Ocurrencia	Fuerza
1	Saccharin	36	499
2	Sugar substitutes	41	444
3	Spectroscopic analysis	43	392
4	Fourier transform infrared spectroscopy	36	377
5	Raman spectrometry	25	358
6	Infrared spectroscopy	23	357
7	Unclassified drug	26	338
8	Crystal structure	23	337
9	Raman spectroscopy	31	316
10	X ray diffraction	20	300

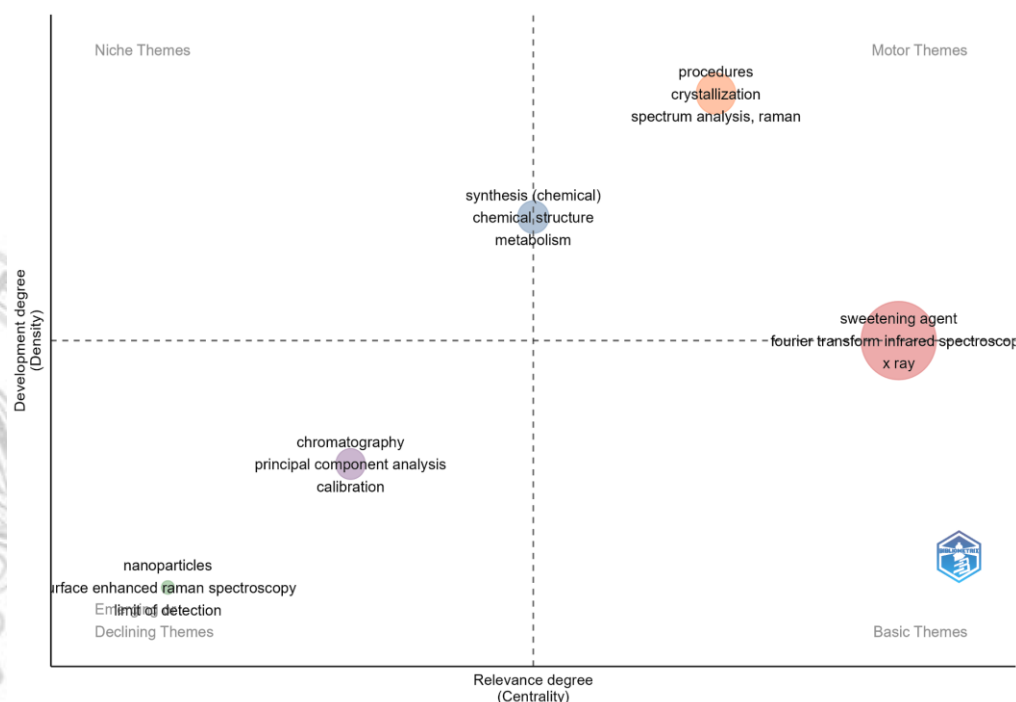


Figura 4. Mapa temático de la investigación. / **Figure 4.** Thematic map of the research.

Entre las consolidaciones realizadas se encuentran: términos espectroscópicos (por ejemplo, “raman scattering”, “raman spectrometry”, “raman spectroscopy”, “fir spectroscopy”, “infrared spectroscopy”), técnicas cromatográficas (por ejemplo, “high performance liquid chromatography”, “hplc”), edulcorantes (por ejemplo, “sweetening agent”, “artificial sweeteners”, “sugar substitutes”), métodos de caracterización (por ejemplo, “scanning electron microscopy”, “transmission electron microscopy”, “x ray diffraction”, “thermal analysis”) y conceptos metodológicos (por ejemplo, “synthesis (chemical)”, “synthesis”, “in vitro study”, “in vitro”). Asimismo, se filtraron términos genéricos y poco específicos como “article”, “chemistry”, “controlled study”, “nonhuman”, “animal”, “human” y “nohuman”, con el fin de enfocar el análisis en los conceptos técnicos centrales del dominio.

Los temas básicos, ubicados en el cuadrante inferior derecho de la Figura 4, incluyen términos como “sugar substitutes”, “aspartame” y “high performance liquid chromatography”. Estos conceptos representan las bases fundamentales en la investigación sobre el análisis de edulcorantes, en particular su identificación, cuantificación y autenticación mediante métodos analíticos establecidos y ampliamente adoptados en el campo. En el cuadrante inferior izquierdo, correspondiente a los temas emergentes o en declive, se encuentran términos como “raman spectroscopy”, “surface enhanced raman spectroscopy” y “substrates”. Estos términos sugieren un interés creciente, aunque todavía incipiente, por incorporar técnicas

avanzadas y altamente sensibles de espectroscopía Raman en el estudio de edulcorantes, posiblemente orientadas hacia la detección a bajas concentraciones o en matrices complejas.

Los temas de nicho, situados en el cuadrante superior izquierdo, incluyen conceptos como “chromatography”, “principal component analysis”, “calibration”, “nanoparticles” y “limit of detection”. Este conjunto refleja áreas de investigación altamente especializadas y metodológicamente consolidadas, aunque con una interconexión limitada con otras líneas temáticas dentro del mapa. Los temas motores (cuadrante superior derecho), aunque no están explícitamente etiquetados en la Figura 4, corresponden a aquellos con alta centralidad y alto desarrollo, actuando como ejes vertebradores de la investigación en este dominio. La identificación de estas áreas permite visualizar no solo el estado actual del conocimiento, sino también las trayectorias temáticas emergentes y las oportunidades para investigación futura en el análisis espectroscópico y quimiométrico de edulcorantes.

La Figura 5 presenta el mapa factorial de la estructura conceptual del campo de estudio, generado mediante un Análisis de Correspondencias Múltiples (MCA). Este mapa organiza los términos clave en función de sus relaciones semánticas dentro de la literatura científica publicada entre 2001 y 2025. La Dimensión 1 explica el 32,37% de la variabilidad total, mientras que la Dimensión 2 representa un 24,92%, lo que permite una interpretación clara y significativa de las principales áreas temáticas identificadas.

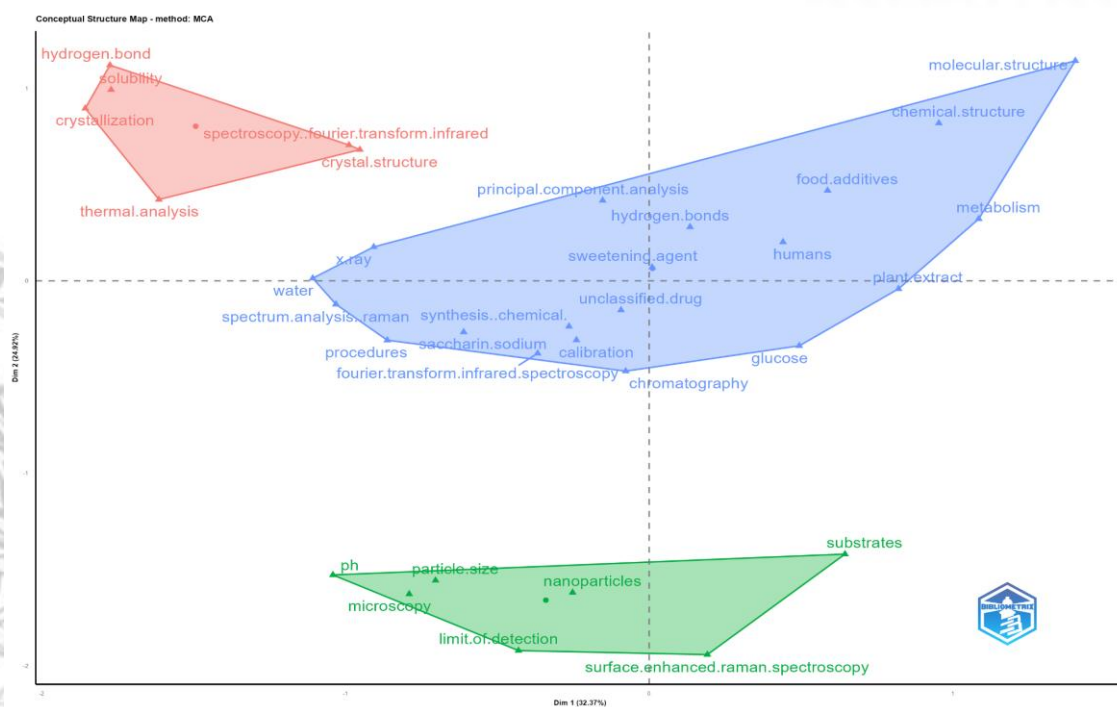


Figura 5. Estructura conceptual de la Investigación sobre Lignocelulosa con Análisis de Correspondencias Múltiples (MCA).

Figure 5. Conceptual structure map of the Research on Lignocellulose using Multiple Correspondence Analysis (MCA).

En el lado izquierdo del mapa, se observa un conglomerado de términos asociados principalmente a técnicas fisicoquímicas y de caracterización estructural. Este grupo incluye conceptos como “hydrogen bond”, “solubility”, “crystallization”, “crystal structure”, “thermal analysis” y “fourier transform infrared spectroscopy”. La proximidad de estos términos sugiere un enfoque experimental orientado hacia el estudio de las propiedades moleculares, termodinámicas y estructurales de los edulcorantes, en particular de compuestos como la sacarina, mediante técnicas bien establecidas como la espectroscopía infrarroja, la difracción de rayos X y el análisis térmico diferencial.

Hacia la zona central y superior del mapa, se distingue un segundo grupo que integra términos relacionados con el análisis químico, metabólico y de control de calidad. Este conjunto incluye “molecular structure”, “chemical structure”, “food additives”, “plant extract”, “glucose”, “substrates”, “principal component analysis”, “calibration”, “chromatography”, “unclassified drug” y “sweetening agent”. La cohesión de estos conceptos refleja una línea de investigación centrada en la caracterización molecular, la detección de componentes, la autenticidad de aditivos alimentarios y la aplicación de métodos quimiométricos, como el análisis de componentes principales, para el procesamiento e interpretación de datos analíticos.

Finalmente, en la parte inferior derecha del mapa, se configura un tercer grupo temático asociado a técnicas espectroscópicas avanzadas y aplicaciones en detección. Este conglomerado reúne términos como “raman spectrometry”, “surface enhanced raman spectroscopy”, “limit of detection”, “nanoparticles”, “ph”, “particle size” y “spectrum analysis”. La agrupación de estos

conceptos sugiere un interés investigativo enfocado en el desarrollo y aplicación de métodos sensibles y selectivos, en particular la espectroscopía Raman de superficie mejorada (SERS), para la detección, cuantificación y estudio de edulcorantes en matrices complejas, frecuentemente mediada por el uso de nanomateriales.

3. Fundamentos y evolución de las técnicas espectroscópicas en edulcorantes

Uno de los principales edulcorantes es la Stevia rebaudiana, una planta ampliamente utilizada como fuente de edulcorantes naturales sin calorías (Jahangir et al., 2020). Sus compuestos activos principales son los glucósidos de esteviol, entre los que destacan el esteviósido y el rebaudiósido A, responsables del sabor dulce característico de la planta. Estos compuestos son diterpenos glicosilados que se encuentran en distintas proporciones en las hojas de stevia, siendo el esteviósido el más abundante (4% – 13%) y el rebaudiósido A (2% – 4%) el más dulce y deseado por su mejor perfil sensorial (Jahangir et al., 2020) (Figura 6).

Los glucósidos de esteviol son diterpenos glicosilados que incluyen compuestos como el esteviósido, rebaudiósido A, D, M y dulcosido A (Martono et al., 2018; Morlock & Heil, 2020). Estas moléculas derivan de un aglicón, el esteviol, y se diferencian por patrones variables de azúcares como glucosa y ramnosa (Wang et al., 2015; Khristoforova et al., 2022; Pezzotti et al., 2024). La proporción relativa de cada glucósido varía en función del genotipo vegetal, la localidad de cultivo y el proceso de extracción. En particular, el rebaudiósido A es valorado por su perfil sensorial limpio, a diferencia del esteviósido, que posee un sabor más amargo (Martono & Rohman, 2019).

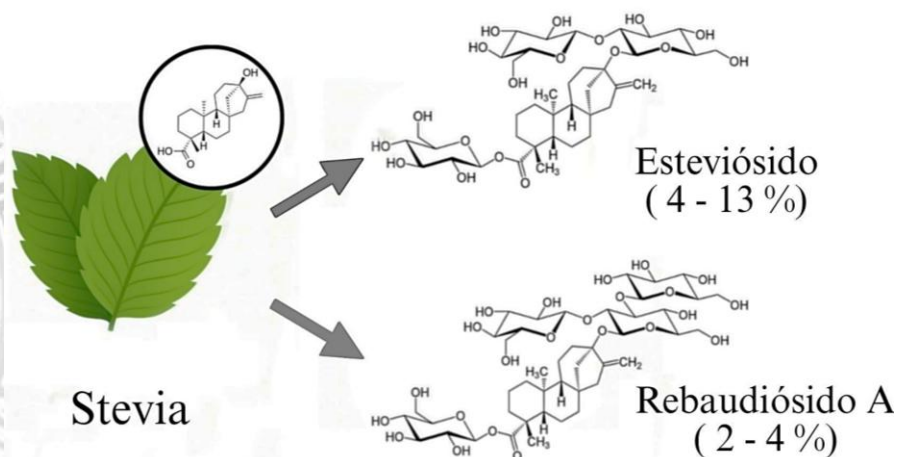


Figura 6. Principales glucósidos de stevia. / Figure 6. Main stevia glycosides.

Los métodos espectroscópicos han desempeñado un papel fundamental en la evaluación de la calidad de productos agrícolas, especialmente en el ámbito alimentario. Su utilidad radica en que permiten el análisis de componentes alimentarios con una preparación de muestra mínima o inexistente, ofrecen resultados rápidos y en tiempo real, y posibilitan la realización simultánea de múltiples determinaciones sobre una misma muestra (Li et al., 2025).

Un estudio basado en UHPLC-UV-ELSD analizó 35 productos comerciales etiquetados como stevia y detectó la presencia de glucosa en siete de ellos, con concentraciones que oscilaron entre 0,3% y 91,5% en peso. Particularmente, dos muestras presentaron niveles alarmantemente altos (61,6% y 91,5%), lo que evidencia adulteraciones sustanciales. Estos hallazgos sugieren la incorporación intencional de glucosa, un compuesto ausente de forma natural en los extractos puros de *Stevia rebaudiana*, con el fin de abaratar los costos de producción y aumentar el volumen de producto comercializable (Wang et al., 2015). Además de la glucosa, se han identificado otros adulterantes de uso frecuente en productos comercializados como “stevia pura”. Entre ellos destacan la maltodextrina, el eritritol y edulcorantes sintéticos como el ciclamato y la sacarina. En un análisis realizado mediante espectroscopía Raman, Vargas-Jentzsch et al. (2016) evaluaron seis muestras comerciales de edulcorantes etiquetados como stevia. Tres de las muestras resultaron ser falsificadas y una contenía maltodextrina declarada en su etiquetado. El mismo estudio confirmó la presencia de ciclamato y sacarina en concentraciones iguales o superiores al 5 % (p/p), lo que demuestra que estos compuestos pueden incorporarse para modificar el perfil sensorial del producto, sin ser fácilmente detectados por el consumidor final.

Asimismo, un artículo publicado en Vibrational Spectroscopy reportó el uso exitoso de espectroscopía Raman para la detección de adulterantes en productos bolivianos etiquetados como stevia, identificando tres muestras falsificadas y una con contenido elevado de maltodextrina. El método demostró sensibilidad suficiente para detectar ciclamato en niveles tan bajos como 5 % (p/p), lo que refuerza su utilidad como técnica de tamizaje rápido (Vargas-Jentzsch et al., 2016). Por otro lado, un estudio adicional integró espectroscopía Raman con modelos quimiométricos para la detección simultánea de maltodextrina y otros adulterantes en leche, alcanzando una precisión de

clasificación del 95,8% para la maltodextrina, con un límite de detección de 1,46% (p/p) (Tian et al., 2022). Estos resultados evidencian la aplicabilidad de los métodos espectroscópicos en matrices alimentarias complejas y respaldan su potencial en el control de calidad y autenticación de productos a base de stevia.

3.1. Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman se basa en la dispersión inelástica de luz monocromática, que ocurre cuando la radiación láser interactúa con la nube electrónica de una molécula, generando cambios en la longitud de onda relacionados con los modos vibracionales de los enlaces químicos (Ferraro et al., 2003). Esta propiedad permite obtener espectros vibracionales característicos, que funcionan como huellas moleculares únicas, complementando la información obtenida mediante técnicas infrarrojas (Han et al., 2017; Garbacz et al., 2018; Lech et al., 2022).

En el contexto del análisis de edulcorantes, Raman se ha consolidado como una herramienta valiosa para la identificación y cuantificación de diferentes azúcares y sustitutos del azúcar en matrices complejas (Han et al., 2017; Jiang et al., 2024). La presencia de excipientes o componentes mayoritarios en formulaciones puede generar solapamientos espectrales, lo que exige el uso de métodos quimiométricos avanzados para la extracción y selección de variables relevantes, así como para la calibración multivariante (Teklemariam et al., 2024; Ding et al., 2025). Además, la combinación de espectroscopía Raman con algoritmos de aprendizaje automático ha demostrado mejorar la precisión y rapidez en la detección, aunque la calidad de los modelos depende fuertemente de la estandarización de las condiciones experimentales y de la diversidad y representatividad de los datos de entrenamiento (Ding et al., 2025; Pezzotti et al., 2024). La similitud espectral entre algunos edulcorantes puede dificultar la clasificación, por lo que la integración con otras técnicas espectroscópicas y el uso de métodos avanzados de análisis de datos resultan estrategias prometedoras para superar estas limitaciones (Ding et al., 2025).

3.2. Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS)

La espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIR) se ha consolidado como una técnica analítica robusta y versátil para la evaluación rápida y no destructiva de edulcorantes, especialmente en

matrices complejas como los siropes de almidón (Se et al., 2019). Su capacidad para proporcionar información detallada sobre grupos funcionales que contienen enlaces C–H, O–H y N–H, sin necesidad de preparación previa de muestra, la convierte en una alternativa eficiente frente a métodos convencionales, tales como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), que suelen ser laboriosos, destructivos y generadores de residuos químicos (Erinawati et al., 2025; Khalaf & Shihab, 2025). A través de la implementación de modelos quimiométricos como la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), la espectroscopía NIR permite cuantificar parámetros críticos de calidad, tales como el grado de dextrosa (DE), así como las concentraciones individuales de glucosa, maltosa y maltotriosa, facilitando así el monitoreo efectivo de procesos industriales, como la sacarificación en la producción de edulcorantes (Allesø et al., 2008; Zhu et al., 2010; Erinawati et al., 2025; Gao et al., 2023).

Los avances tecnológicos en miniaturización han permitido el desarrollo de espectrómetros NIR portátiles y de proceso, lo que posibilita su integración en entornos productivos para un control de calidad en tiempo real (Mabood et al., 2018). Estas herramientas, combinadas con técnicas quimiométricas avanzadas, permiten la extracción precisa de información a partir de espectros complejos, incluso ante interferencias físicas como la dispersión de luz (Aouadi et al., 2020).

La rápida adquisición de datos, el bajo impacto ambiental y la capacidad para realizar análisis simultáneos cualitativos y cuantitativos posicionan a la espectroscopía NIR como una metodología esencial para garantizar la calidad, autenticidad y trazabilidad de los edulcorantes en la industria alimentaria (Sringarm et al., 2022).

3.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica analítica eficiente y no destructiva para la caracterización estructural y cuantificación de compuestos, con aplicaciones destacadas en el análisis de edulcorantes (Wang et al., 2020). Basada en la absorción de radiación infrarroja por los enlaces químicos, esta técnica permite identificar grupos funcionales mediante sus vibraciones moleculares características, sin requerir disolución ni extracción previa de las muestras (Wang et al., 2020; Veerichetty et al.,

2024). Esto simplifica considerablemente el procedimiento analítico, reduce el tiempo de análisis y minimiza la generación de residuos (Vargas et al., 2016; Han et al., 2017).

La preparación estandarizada de muestras incluye el secado y la mezcla con bromuro de potasio para formar pastillas prensadas (Han et al., 2022). El control de parámetros instrumentales como la resolución espectral, el número de escaneos y las repeticiones garantiza una adecuada calidad espectral, mejora la relación señal ruido y asegura la reproducibilidad de los resultados (Han et al., 2022).

Además de su capacidad para identificar cualitativamente compuestos, FTIR permite realizar análisis cuantitativos cuando se combina con herramientas quimiométricas (Han et al., 2022). El empleo de modelos multivariados facilita la correlación entre las señales espectrales y la concentración de múltiples analitos, lo que amplía su utilidad en el monitoreo de calidad, autenticación y detección de adulteraciones en productos alimentarios (Pham et al., 2021; Dutta et al., 2018; Wang et al., 2020).

4. Aplicaciones de técnicas espectroscópicas en el análisis de edulcorantes

La cuantificación y detección de edulcorantes en diversas matrices alimentarias ha experimentado avances significativos mediante la combinación de técnicas espectroscópicas con modelos estadísticos y algoritmos de inteligencia artificial (Tabla 2). Técnicas como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), la espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS) y la espectroscopía Raman, complementadas con cromatografía en capa fina de alta resolución (HPTLC) y espectroscopía Raman con dispersión mejorada por superficie (SERS), proporcionan análisis rápidos, no destructivos y de alta sensibilidad (Wang et al., 2020; Erinawati et al., 2025; Khalaf & Shihab, 2025) (Figura 7).

En matrices líquidas, tales como bebidas y jugos, la aplicación de espectroscopía NIRS combinada con análisis multivariado ha demostrado eficacia para la detección de adulteraciones y el aseguramiento de la calidad del producto (Kujundžić et al., 2017).

En matrices sólidas, incluyendo extractos y edulcorantes en polvo, las técnicas vibracionales facilitan la caracterización simultánea de múltiples compuestos, optimizando el control de calidad y garantizando la autenticidad (Kujundžić et al., 2017).

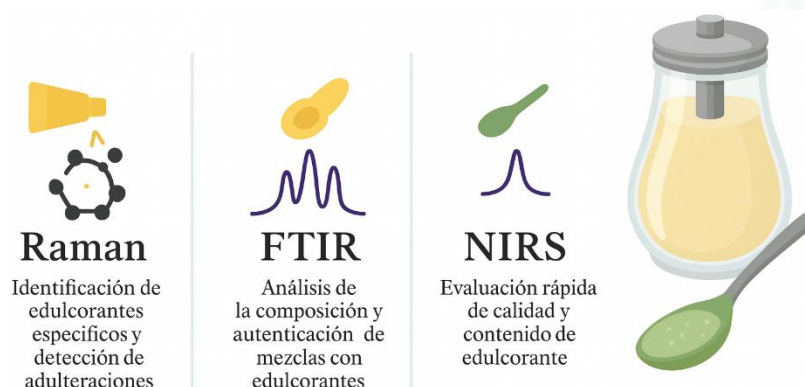
Tabla 2

Estudios que utilizaron espectroscopia en el análisis de edulcorantes

Table 2

Studies that used spectroscopy in the analysis of sweeteners

Edulcorante	Matriz	Método	Detalle	Referencia
Sacarina	Bebidas	HPTLC + SERS	Cuantificación por cromatografía en capa fina con confirmación por SERS	[Chen et al., 2022]
Sacarina	Jugos comerciales	FT-NIRS + PLS	Identificación de adulteraciones con NIR y análisis multivariado	[Mabood et al., 2018]
Acesulfamo-K	Alimentos dietéticos	ATR-FTIR + aprendizaje automático	Cuantificación con FTIR y algoritmos de IA	[Shim et al., 2008]
Aspartamo	Bebidas gaseosas	SERS (AgNPs)	Detección ultrasensible usando nanopartículas de plata	[Buyukgoz et al., 2015]
Glucósidos de esteviol	Hojas de Stevia	NIRS + quimiometría	Cuantificación de esteviósido y rebaudiósido A con NIR	[Kujundžić et al., 2017]
Glucósidos de esteviol	Extractos de Stevia	FTIR + Raman	Control de calidad con espectroscopías vibracionales	[Pezzotti et al., 2024]
Neotame	Bebidas instantáneas	SERS (papel con AgNPs)	Detección rápida en matrices líquidas con sustratos de papel	[Han et al., 2020]
Ciclamato + Sacarina	Edulcorantes en polvo	FT-Raman + PLS/iPLS	Análisis cuantitativo simultáneo con Raman y modelos avanzados	[Duarte et al., 2017]
Rebaudiósido A	Cristalización	NIRS portátil	Monitoreo en tiempo real en procesos industriales	[Gao et al., 2023]
Sucralosa	Miel	NIRS + quimiometría	Detección de adulteraciones en miel con espectroscopia NIR	[Zhu et al., 2010]

**Figura 7.** Aplicaciones de Raman, FTIR y NIR en la identificación y análisis de edulcorantes alimentarios.**Figure 7.** Applications of Raman, FTIR and NIR in the identification and analysis of food sweeteners.

5. Conclusiones

Las técnicas espectroscópicas se han consolidado como herramientas analíticas de alta eficacia, versatilidad y sostenibilidad para la detección y cuantificación de edulcorantes en matrices alimentarias complejas. Su desarrollo ha favorecido la implementación de métodos rápidos, no destructivos y sensibles, con capacidad de integración en sistemas de análisis en línea y control de calidad industrial. El análisis bibliométrico y la revisión de la literatura especializada evidencian un notable incremento en el interés científico por el uso de tecnologías

como la espectroscopia FTIR, NIR, UV-Vis y Raman, especialmente cuando se combinan con enfoques quimiométricos avanzados, lo que ha ampliado significativamente su campo de aplicación. Estas metodologías no solo mejoran la eficiencia de los procesos analíticos, sino que también refuerzan los sistemas de vigilancia y regulación ante posibles casos de adulteración o uso no autorizado de edulcorantes. En conjunto, la espectroscopia representa una solución estratégica en el marco de la innovación tecnológica orientada a garantizar la calidad, autenticidad e inocuidad de los alimentos, y a salvaguardar los derechos del consumidor.

Referencias bibliográficas

- Allesø, M., Velaga, S., Alhalaweh, A., Cornett, C., Rasmussen, M. A., van den Berg, F., de Diego, H. L., & Rantanen, J. (2008). Near-infrared spectroscopy for cocrystal screening. A comparative study with Raman spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 80(20), 7755–7764. <https://doi.org/10.1021/ac8011329>
- Aouadi, B., Zaukuu, J.-L. Z., Vitális, F., Bodor, Z., Fehér, O., Gillay, Z., Bazar, G., & Kovacs, Z. (2020). Historical evolution and food control achievements of near infrared spectroscopy, electronic nose, and electronic tongue—critical overview. *Sensors (Switzerland)*, 20(19), 1–42. <https://doi.org/10.3390/s20195479>
- Buyukgoz, G. G., Bozkurt, A. G., Akgul, N. B., Tamer, U., & Boyaci, I. H. (2014). Spectroscopic detection of aspartame in soft drinks by surface-enhanced Raman spectroscopy. *European Food Research And Technology*, 240(3), 567–575. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2357-y>
- Calle, J. L. P., Punta-Sánchez, I., González-de-Peredo, A. V., Ruiz-Rodríguez, A., Ferreira-González, M., & Palma, M. (2023). Rapid and Automated Method for Detecting and Quantifying Adulterations in High-Quality Honey Using Vis-NIRs in Combination with Machine Learning. *Foods*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/foods12132491>
- Chapple, C. I., Russell, C. G., Burnett, A. J., & Woods, J. L. (2023). Sports foods are not all they shake up to be. An audit of formulated supplementary sports food products and packaging in Australian retail environments. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1042049. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1042049>
- Chen, Q., Hou, H., Zheng, D., Xu, X., Xi, X., & Chen, Y. (2022). HPTLC screening of saccharin in beverages by densitometry quantification and SERS confirmation. *RSC Advances*, 12(14), 8317–8322. <https://doi.org/10.1039/d1ra09416e>
- Cruz-Casarrubias, C., Tolentino-Mayo, L., Vandevijvere, S., & Barquera, S. (2021). Estimated effects of the implementation of the Mexican warning labels regulation on the use of health and nutrition claims on packaged foods. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 18(1), 76. <https://doi.org/10.1186/s12966-021-01148-1>
- de Carvalho, T. E. M., Waisenberg, A., Sato, P. M., Mais, L. A., Martins, A. P. B., Jaime, P. C., & Khandpur, N. (2022). Consumer perceptions of non-caloric sweeteners and the content of caloric and non-caloric sweeteners in ultra-processed products in Brazil | Percepções do consumidor sobre adoçantes não calóricos e o conteúdo de adoçantes calóricos e não calóricos em prod. *Ciencia e Saude Coletiva*, 27(5), 1989–2000. <https://doi.org/10.1590/1413-81232022275.08452021>
- Ding, Y., He, X., Zhang, R., Wu, H., & Bu, Y. (2025). Random forest-assisted Raman spectroscopy and rapid detection of sweeteners. *Infrared Physics and Technology*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2025.105871>
- Du, Y., Xue, J., & Hong, Z. (2020). Raman and terahertz spectroscopic characterization of solid-state cocrystal formation within specific active pharmaceutical ingredients. *Current Pharmaceutical Design*, 26(38), 4829–4846. <https://doi.org/10.2174/1381612826666200523173448>
- Duarte, L. M., Paschoal, D., Izumi, C. M., Dolzan, M. D., Alves, V. R., Micke, G. A., Santos, H. F. D., & De Oliveira, M. A. (2017). Simultaneous determination of aspartame, cyclamate, saccharin and acesulfame-K in powder tabletop sweeteners by FT-Raman spectroscopy associated with the multivariate calibration: PLS, iPLS and siPLS models were compared. *Food Research International*, 99(Pt 1), 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.05.006>
- Dumancas, G., Ellis, H., Neumann, J., & Smith, K. (2022). Comparison of Various Signal Processing Techniques and Spectral Regions for the Direct Determination of Syrup Adulterants in Honey Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Chemometrics. *Chemosensors*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/chemosensors10020051>
- Dutta, R., Pyne, A., & Sarkar, N. (2018). Effect of sugars on the dynamics of hydrophilic fluorophores confined inside the water pool of anionic reverse micelle: A spectroscopic approach. *Journal of Molecular Liquids*, 252, 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.12.137>
- Erinawati, D. A., Setyaningsih, W., & Palma, M. (2025a). Spectroscopy and chemometric-based method for sugar profiling in high-fructose syrup. *Applied Food Research*, 5(1). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100872>
- Erinawati, D. A., Setyaningsih, W., & Palma, M. (2025b). Spectroscopy and chemometric-based method for sugar profiling in high-fructose syrup. *Applied Food Research*, 5(1). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100872>
- Farhat, G., Dewison, F., & Stevenson, L. (2021). Knowledge and perceptions of non-nutritive sweeteners within the uk adult population. *Nutrients*, 13(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/nu13020444>
- Ferraro, J. R., Nakamoto, K., & Brown, C. W. (2003). Introductory Raman Spectroscopy: Second Edition. In Introductory Raman Spectroscopy: Second Edition. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-254105-6.X5000-8>
- Gao, L., Wang, D., Zhong, L., Yue, J., Nie, L., Li, L., Meng, Z., Cao, G., Lai, Y., & Zang, H. (2023). Rapid determination of rebaudioside A content in the macroporous resin elution process using a portable near-infrared spectrometer. *New Journal of Chemistry*, 47(45), 20920–20927. <https://doi.org/10.1039/d3nj04042a>
- Garbacz, P., & Wesolowski, M. (2018). DSC, FTIR and raman spectroscopy coupled with multivariate analysis in a study of co-crystals of pharmaceutical interest. *Molecules*, 23(9). <https://doi.org/10.3390/molecules23092136>
- Han, C., Yao, Y., Wang, W., Qu, L., Bradley, L., Sun, S., & Zhao, Y. (2017). Rapid and sensitive detection of sodium saccharin in soft drinks by silver nanorod array SERS substrates. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 251, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.05.051>
- Han, L., Guo, J., Tian, X., Jiang, X., & Yin, Y. (2022). Evaluation of PEG and sugars consolidated fragile waterlogged archaeological wood using nanoindentation and ATR-FTIR imaging. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105390>
- Hou, Z., Yan, B., Zhao, Y., Zhang, S., Su, B., Li, K., & Zhang, C. (2025). Spectral investigation of aspartame and acesulfame utilizing PXRD, Raman, FTIR, and THz technologies. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2025.105408>
- Jiang, W., Tang, Q., Zhu, Y., Gu, X., Wu, L., & Qin, Y. (2024). Research progress of microfluidics-based food safety detection. *Food Chemistry*, 441. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138319>
- Jahangir Chughtai, M. F., Pasha, I., Sadiq Butt, M., & Asghar, M. (2020). Biochemical and nutritional attributes of Stevia rebaudiana grown in Pakistan. *Progress in Nutrition*, 21(2-S), 210–222. <https://doi.org/10.23751/pn.v21i2-S.6430>
- Jentzsch, P. V., Torrico-Vallejos, S., Mendieta-Brito, S., Ramos, L. A., & Ciobotă, V. (2016). Detection of counterfeit stevia products using a handheld Raman spectrometer. *Vibrational Spectroscopy*, 83, 126–131. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2016.01.015>
- Khalaf, A. A., & Shihab, A. S. (2025). Synthesis, Characterization, Study of Biological Activity, and Molecular Docking of Some Mannich Bases and their Coordination with Cadmium and Cobalt. *Macromolecular Symposia*, 414(1). <https://doi.org/10.1002/masy.202400212>
- Khrstoforova, Y., Bratchenko, L., & Bratchenko, I. (2022). Combination of Raman spectroscopy and chemometrics: A review of recent studies published in the Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy Journal. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2210.10051>
- Kujundžić, D., Jambrak, A. R., Vukušić, T., Stulić, V., Kljusurić, J. G., Banović, M., & Herceg, Z. (2017). Near-infrared spectroscopic characterization of steviol glycosides extracted from Stevia rebaudiana Bertoni using high-power ultrasound and gas-phase plasma. *Journal of Food and Nutrition Research*, 56(2), 109–120.
- Lech, A., Garbacz, P., Sikorski, A., Gazda, M., & Wesolowski, M. (2022). New Saccharin Salt of Chlordiazepoxide: Structural and Physicochemical Examination. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19). <https://doi.org/10.3390/ijms231912050>
- Li, H., Nunekpeku, X., Adade, S. Y.-S. S., Sheng, W., Kwadzokpui, B. A., Ahlvia, E. B., & Chen, Q. (2025). Phenolic compounds detection and quantification in whole grains: A comprehensive

- review of recent advancements in analytical methods. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118215>
- Mabood, F., Hussain, J., Jabeen, F., Abbas, G., Allaham, B., Albroumi, M., Alghawi, S., Alameri, S., Gilani, S. A., Al-Harrasi, A., Haq, Q. M. I., & Farooq, S. (2018). Applications of FT-NIRS combined with PLS multivariate methods for the detection & quantification of saccharin adulteration in commercial fruit juices. *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 35(6), 1052–1060. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1457802>
- Mao, W., & Song, Y. (2018). Major problems and hazards in use of sweeteners commonly found in foods. *Journal of Food Science and Technology (China)*, 36(6), 9–14. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-6002.2018.06.002>
- Martono, Y., Trihandaru, S., & Rondonuwu, F. S. (2018). Determination of Stevioside and Rebaudioside A in *Stevia rebaudiana* Bertonii Leaves Using near Infrared Spectroscopy and Multivariate Data Analysis. *Indonesian Journal Of Chemistry*, 18(4), 664. <https://doi.org/10.22146/ijc.25580>
- Martono, Y., & Rohman, A. (2019). Quantitative analysis of stevioside and rebaudioside a in steviarebaudiana leaves using infrared spectroscopy and multivariate calibration. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 11(1), 38. <https://doi.org/10.22159/ijap.2019v11i1.28029>
- Morlock, G. E., & Heil, J. (2020). H1-HPTLC-UV/Vis/FLD-HESI-HRMS and bioprofiling of steviol glycosides, steviol, and isosteviol in *Stevia* leaves and foods. *Analytical And Bioanalytical Chemistry*, 412(24), 6431–6448. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02618-4>
- Mukhovha, W., Sibiya, N., Kisten, T., Mamabolo, M. K., & Dlamini, S. N. (2025). Over half of South African beverages will require warning labels for high sugar and/or artificial sweeteners. *South African Journal of Clinical Nutrition*, 38(1), 31–36. <https://doi.org/10.1080/16070658.2025.2453768>
- Pezzotti, G., Zhu, W., Aoki, T., Miyamoto, A., Fujita, I., Nakagawa, M., & Kobayashi, T. (2024). Raman Spectroscopic Analysis of Steviol Glycosides: Spectral Database and Quality Control Algorithms. *Foods*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/foods13193068>
- Pham, X. N., Pham, D. T., Ngo, H. S., Nguyen, M. B., & Doan, H. V. (2021). Characterization and application of C–TiO₂ doped cellulose acetate nanocomposite film for removal of Reactive Red-195. *Chemical Engineering Communications*, 208(3), 304–317. <https://doi.org/10.1080/00986445.2020.1712375>
- Se, K. W., Wahab, R. A., Syed Yaacob, S. N., & Ghoshal, S. K. (2019). Detection techniques for adulterants in honey: Challenges and recent trends. *Journal of Food Composition and Analysis*, 80, 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.04.001>
- Shim, J., Cho, I., Khurana, H., Li, Q., & Jun, S. (2008). Attenuated Total Reflectance–Fourier Transform Infrared Spectroscopy Coupled with Multivariate Analysis for Measurement of Acesulfame-K in Diet Foods. *Journal Of Food Science*, 73(5), C426–31. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00751.x>
- Souza, L. L. D., Candeias, D. N. C., Moreira, E. D. T., Diniz, P. H. G. D., Springer, V. H., & Fernandes, D. D. D. S. (2025). UV–Vis spectralprint-based discrimination and quantification of sugar syrup adulteration in honey using the Successive Projections Algorithm (SPA) for variable selection. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2024.105314>
- Sringarm, C., Numthum, S., Singanusong, R., Jiamyangyuen, S., Kittiwachana, S., Funsueb, S., & Rungchang, S. (2022). Quantitative determination of quality control parameters using near infrared spectroscopy and chemometrics in process monitoring of tapioca sweetener production. *LWT*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113876>
- Teklemariam, T. A., Chou, F., Kumaravel, P., & van Buskrik, J. (2024). ATR-FTIR spectroscopy and machine/deep learning models for detecting adulteration in coconut water with sugars, sugar alcohols, and artificial sweeteners. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124771>
- Tian, H., Chen, S., Li, D., Lou, X., Chen, C., & Yu, H. (2022). Simultaneous detection for adulterations of maltodextrin, sodium carbonate, and whey in raw milk using Raman spectroscopy and chemometrics. *Journal of dairy science*, 105(9), 7242–7252. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21082>
- Vargas Jentzsch, P., Torrico-Vallejos, S., Mendieta-Brito, S., Ramos, L. A., & Ciobotă, V. (2016). Detection of counterfeit stevia products using a handheld Raman spectrometer. *Vibrational Spectroscopy*, 83, 126–131. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2016.01.015>
- Veerichetty, V., Saravanabavan, I., Pradeep, A., & Abiraamasundari, R. (2024). Development of gummy bear supplements and in vitro exploration of antioxidant and antiproliferative potential of Nuciferine. *Journal of Ayurveda and Integrative Medicine*, 15(1). <https://doi.org/10.1016/j.jaim.2023.100868>
- Wang, Y.-T., Li, B., Xu, X.-J., Ren, H.-B., Yin, J.-Y., Zhu, H., & Zhang, Y.-H. (2020). FTIR spectroscopy coupled with machine learning approaches as a rapid tool for identification and quantification of artificial sweeteners. *Food Chemistry*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125404>
- Wang, Y. H., Avula, B., Tang, W., Wang, M., Elsohly, M. A., & Khan, I. A. (2015). Ultra-HPLC method for quality and adulterant assessment of steviol glycosides sweeteners - *Stevia rebaudiana* and stevia products. *Food additives & contaminants. Part A, Chemistry, analysis, control, exposure & risk assessment*, 32(5), 674–685. <https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1021863>
- Zhu, X., Li, S., Shan, Y., Zhang, Z., Li, G., Su, D., & Liu, F. (2010). Detection of adulterants such as sweeteners materials in honey using near-infrared spectroscopy and chemometrics. *Journal of Food Engineering*, 101(1), 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.014>

