

Avances en la extracción y purificación de pigmentos, alcaloides y aceites esenciales de importancia económica en México

Advances in the extraction and purification of economically important pigments, alkaloids, and essential oils in Mexico

Eugenia Lugo Cervantes¹, Gustavo Adolfo Castillo Herrera¹, Jorge Alberto García Fajardo^{2*}

¹Subsede Zapopan. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ), Cam. Arenero 1227, El Bajío, 45019. Zapopan, Jal., México.

²Subsede Noreste. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ), Autopista Mty-Aeropuerto, Vía de la Innovación 404, Parque PIIT, 66628. Apodaca, N.L., México.

*Autor de correspondencia: jgarcia@ciatej.mx

Palabras clave:

fitoquímicos, aceites esenciales, pigmentos, alcaloides, agroindustria

Keywords:

phytochemicals, essential oils, pigments, alkaloids, agroindustry

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar los desarrollos tecnológicos del CIATEJ relacionados con la extracción, purificación y caracterización de compuestos de alto valor económico provenientes de recursos vegetales cultivados o aprovechados en México. La metodología consistió en revisar los procesos de obtención, purificación y análisis químico aplicados a tres grupos de fitoquímicos: pigmentos, alcaloides y aceites esenciales. Los resultados muestran que la aplicación de tecnologías eficientes de extracción, destilación y purificación puede mejorar el rendimiento, la pureza y la calidad de estos metabolitos secundarios en comparación con los métodos convencionales, además de optimizar los perfiles químicos, que permiten verificar su calidad. En conjunto, estos avances proporcionan bases para el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad y ofrecen alternativas de valor agregado para los sectores agroindustrial, farmacéutico y alimentario.

Abstract

The review presents CIATEJ's technological developments related to the extraction, purification, and characterization of economically valuable compounds obtained from plant resources cultivated or used in Mexico. The methodology consisted of reviewing and optimizing the extraction processes, purification, and chemical analysis applied to three groups of phytochemicals: pigments, alkaloids, and essential oils. The results show that efficient extraction, distillation, and purification technologies can improve the yields, purity, and quality of these secondary metabolites compared with conventional methods, while providing chemical profiles that support quality assessment. Overall, these advances provide a foundation for the sustainable use of biodiversity and offer value-added alternatives for the agro-industrial, pharmaceutical, and food sectors.

Recibido: 20 de mayo 2026
Revisado: 25 de junio 2026
Aceptado: 10 de julio 2026
Publicado: 01 de agosto 2026



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

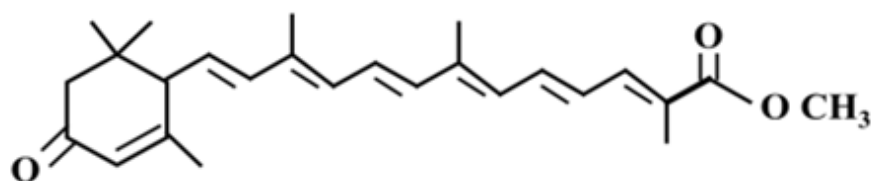
Introducción

La amplia biodiversidad botánica de México constituye un reservorio invaluable de metabolitos secundarios con elevado potencial económico. Históricamente, el aprovechamiento de estos recursos se ha limitado a su comercialización como materias primas o extractos de bajo valor agregado. Sin embargo, la transición hacia una bioeconomía circular y sustentable requiere desarrollar e implementar tecnologías avanzadas de extracción y purificación. En el marco del 50 aniversario del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), este trabajo presenta los avances tecnológicos de la institución en la obtención de tres grupos de fitoquímicos de alta demanda industrial: pigmentos naturales, alcaloides y aceites esenciales. La optimización de procesos, desde el manejo de la materia prima hasta su aplicación industrial, muestra cómo la caracterización química y la ingeniería de procesos permiten obtener compuestos de alto valor que cumplen los requerimientos de calidad de los sectores alimentario, farmacéutico y cosmético.

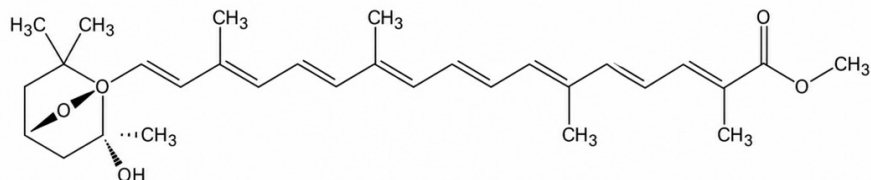
Pigmentos naturales: innovación en extracción y estabilización para la industria alimentaria

Carotenoides

Los carotenoides son compuestos formados generalmente por 40 átomos de carbono, cuya unidad estructural fundamental es el isopreno. Se encuentran principalmente en flores y frutos, aunque también pueden estar presentes en semillas, como ocurre en *Ditaxis heterantha*, conocida como azafrán de bolita (Méndez Robles et al., 2004). En el marco de un proyecto del fondo SIMORELOS se estudiaron distintos métodos de extracción, purificación e identificación de los carotenoides presentes en esta semilla. La especie, endémica de México y perteneciente a la familia *Euphorbiaceae*, se distribuye en zonas semiáridas de Jalisco, Zacatecas e Hidalgo. Su semilla molida se utiliza tradicionalmente como colorante en alimentos como arroz, caldo de pollo y menudo. Las semillas recolectadas se extrajeron con solventes no polares y los compuestos se purificaron mediante cromatografía en columna con éter etílico y éter de petróleo. La identificación se realizó por espectrometría de masas y resonancia magnética nuclear (RMN) (Figura 1). Debido a la disponibilidad limitada de equipos de RMN en Jalisco, los análisis se efectuaron finalmente en el Departamento de Química del CINVESTAV. Este trabajo se desarrolló dentro del proyecto «Aprovechamiento agroindustrial del azafrán de bolita (*Ditaxis heterantha*) para la obtención de amarillos naturales».



Methyl 3-oxo-12'-apo-ε-carotene-12'-oate



Methyl 3β, 6β-epoxy-5β-hydroxy-4,5-dihydro-8'-apo-ε-carotene-8'-oate

Figura 1. Apocarotenoides identificados mediante MS+ y RMN de *Ditaxis heterantha*

Betalaínas

Las betalaínas son pigmentos nitrogenados presentes principalmente en unas 13 a 17 familias de plantas del orden Caryophyllales, entre las que destacan Amaranthaceae y Cactaceae. En las cactáceas se localizan sobre todo en flores y frutos, donde producen tonalidades amarillas, naranjas, rojas y púrpuras. En otro proyecto del fondo SIMORELOS se estudiaron las betalaínas de los frutos de *Stenocereus queretaroensis*, especie conocida como pitaya de Jalisco. El objetivo principal fue identificar y caracterizar las betalaínas presentes en estos frutos, así como establecer un procedimiento adecuado para su recuperación. El estudio formó parte del proyecto «Aprovechamiento integral del chile (*Capsicum annuum*) y pitaya (*Stenocereus queretaroensis*) para la producción de colorantes naturales rojos sustituyentes de los sintéticos». La extracción se llevó a cabo con una mezcla de metanol y agua, mientras que la identificación se realizó mediante espectrometría de masas y RMN. Como se muestra en la Tabla 1, se identificaron distintos compuestos, entre ellos filocactina, una betalaína característica de las cactáceas (Calva Estrada et al., 2022).

Tabla 1. Espectrometría de masas de las betalainas de *Stenocereus queretaroensis*

Compuesto Número de pico	RT (min)	Contenido (%)	Longitud de onda máx (nm)	LC-MS M ⁺ H ⁺ (m/z)	Betalainas
1	11.1	0.2	469	n.d	Vulgaxantina I
2	17.7	8.4	476	309	Isoindicaxantina
2	18.3	51.8	475	309	Indicaxantina
3	20.4	1.2	403	n.d	Ac. betalámico
4	21.2	0.3	538	n.d	Betanina
4	22.9	0.1	536	n.d	Isobetanina
5	23.6	0.3	536	n.d	Betacianina
6	25.1	29.2	538	637	Filocactina
6	26.5	3.9	538	n.d	Isofilocactina
7	26.8	1.5	536	n.d	Betacianina

Compuestos fenólicos y procianidinas

Los compuestos fenólicos constituyen uno de los grupos más abundantes de metabolitos secundarios de las plantas, junto con los alcaloides y los terpenos, entre los que se incluyen los componentes de los aceites esenciales. Sus principales clases comprenden fenoles simples, taninos, cumarinas, lignanos, antraquinonas y flavonoides.

En términos generales, la composición de los granos de cacao comprende 32–39% de agua, 30–32% de grasa, 8–10% de proteína, 4–6% de almidón, 2–3% de celulosa, 2–3% de sacarosa, 5–6% de polifenoles, 1–2% de teobromina, 1% de ácidos orgánicos y aproximadamente 1% de cafeína. Los tres principales grupos de polifenoles reportados en los granos de cacao son los flavan-3-oles (~37%), las procianidinas (~58%) y las antocianinas (~4%). Entre los flavan-3-oles, la (–)-epicatequina es la forma monomérica predominante (hasta el 35% del total de polifenoles) en los granos de cacao desgrasados recién cosechados, seguida por menores cantidades de (+)-catequina y trazas de (+)-galocatequina, (–)-epigallocatequina y (–)-epicatequina-3-O-galato.

Las procianidinas están compuestas por unidades monoméricas de flavan-3-oles unidas mediante enlaces interflavonoides. La fracción de antocianinas está dominada por dos glucósidos de cianidina: cianidina-3- α -L-arabinosido y cianidina-3- β -D-galactósido. Adicionalmente, se han encontrado polifenoles no flavonoides, tales como derivados de ácidos hidroxibenzoicos e hidroxicinámicos, en los granos de cacao. Los principales derivados del ácido benzoico detectados son los ácidos gálicos, p-hidroxibenzoico, protocatéquico, vainílico y siríngico; mientras que los ácidos cafeicos, ferúlico y p-cumárico son los principales ácidos hidroxicinámicos presentes.

El contenido de polifenoles en los granos de cacao Criollo representa aproximadamente dos tercios del observado en la variedad Forastero (Figura 2). No obstante, la variedad Criollo puede presentar concentraciones elevadas de procianidinas, compuestos que contribuyen al sabor astringente y amargo del chocolate elaborado con este cultivar.

Durante los procesos de fermentación, el secado y el tostado disminuyen principalmente el contenido de epicatequina. Debido a que los polifenoles suelen estar asociados con moléculas de azúcar, presentan solubilidad en solventes polares. Para su extracción, la muestra se desengrasa primero con hexano y, posteriormente, se trata con una mezcla de acetona, agua y ácido acético. Acevez-Mares et al. (2025) evaluaron la actividad antioxidante de cinco variedades de cacao criollo y encontraron que la variedad Rojo Samuel puede modular la inflamación y el metabolismo lipídico en un modelo de adipocitos.

En el CIATEJ, la línea de Tecnología Alimentaria ha participado en diversos proyectos relacionados con el cacao, particularmente con su manejo poscosecha (SAGARPA-Cacao, desde 2009; FINNOVA, 2015; SAGARPA, 2017). Estos proyectos desarrollados con productores de Chiapas y Tabasco, han abordado las etapas de fermentación, secado y tostado, con la colaboración de investigadores del grupo de Biotecnología Industrial.

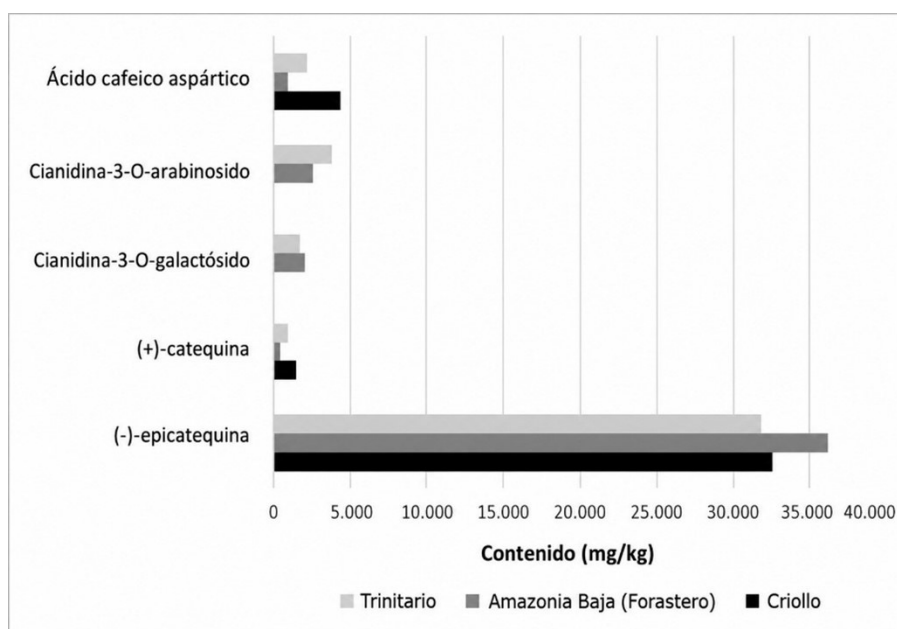


Figura 2. Contenido de polifenoles en tres variedades de cacao

Alcaloides: de la biodiversidad mexicana a la purificación de moléculas de interés farmacológico

El aprovechamiento integral de materias primas y subproductos agroindustriales representa una estrategia relevante para desarrollar ingredientes funcionales, reducir el impacto ambiental y generar alternativas de valor agregado para las industrias alimentaria, farmacéutica y biotecnológica. En este contexto, el cultivo de chile y la producción de café tienen una gran importancia económica y social en México, donde ambos sectores forman parte de la actividad agrícola y del sustento de miles de productores.

México destaca por su producción y diversidad de especies del género *Capsicum*, caracterizadas por su contenido de capsaicinoides, compuestos responsables de la pungencia del chile y reconocidos por sus propiedades antimicrobianas y antiinflamatorias, así como por su potencial aplicación en alimentos funcionales, productos farmacéuticos y formulaciones cosméticas. Por ello, se requieren procesos eficientes para obtener oleorresinas y extractos ricos en capsaicinoides que garanticen su calidad, estandarización y seguridad de uso industrial. No obstante, numerosos procesos convencionales dependen de solventes orgánicos como hexano, metanol o éter, cuyos residuos implican limitaciones regulatorias, ambientales y tecnológicas. Aunque existen alternativas consideradas verdes, como la extracción con fluidos supercríticos, la destilación molecular y las técnicas cromatográficas de alta resolución, sus costos operativos, capacidad de procesamiento y dificultades de escalamiento pueden restringir su aplicación. En consecuencia, resulta pertinente desarrollar procesos accesibles, sostenibles y escalables para obtener extractos con alto contenido de compuestos bioactivos y reducir el uso de solventes, además de favorecer el aprovechamiento de residuos como los aceites vegetales usados.

De manera similar, la industria cafetalera enfrenta retos derivados de la generación de subproductos y de enfermedades fitopatológicas como la roya del café (*Hemileia vastatrix*), una de las principales amenazas para la producción mundial de café y una causa importante de pérdidas económicas, especialmente para los pequeños productores. En regiones como Pluma Hidalgo, Oaxaca, donde el café cuenta con denominación de origen y posee gran relevancia económica, las opciones de manejo de plagas y enfermedades son limitadas, por lo que es necesario explorar alternativas para aprovechar los materiales afectados. Diversos estudios indican que las hojas y los granos infectados pueden presentar cambios en su perfil de metabolitos secundarios, incluidos compuestos fenólicos, flavonoides y alcaloides. En particular, se observó una disminución de la cafeína en los granos infectados de café, característica que podría aprovecharse para su revalorización y comercialización en lugar de desecharlos o quemarlos.

Asimismo, la producción de café genera grandes cantidades de pulpa, considerada uno de los principales residuos contaminantes de esta agroindustria, en particular durante el beneficio húmedo. Este subproducto conserva cafeína, lo que limita su uso directo como alimento para animales o material de compostaje, y hace necesario desarrollar procesos sencillos para recuperarla antes de su aprovechamiento. Con este propósito se han evaluado métodos convencionales de extracción y tecnologías no convencionales, como la extracción con agua presurizada y con fluidos supercríticos. La integración de estas alternativas con procesos de purificación mediante resinas poliméricas puede incrementar el rendimiento y la pureza de la cafeína, atender la demanda de este compuesto y agregar valor a materias primas que, de otro modo, representarían un residuo.

En este contexto, la línea de Tecnología Alimentaria ha desarrollado e integrado procesos sostenibles para la extracción, concentración, purificación y caracterización de alcaloides provenientes de recursos agroalimentarios y sus residuos. Este enfoque no solo permite obtener ingredientes naturales con potencial aplicación industrial, impulsar estrategias de economía circular, disminuir el impacto ambiental de los residuos agroindustriales y fortalecer el aprovechamiento tecnológico de materias primas de alta relevancia económica para México. Durante los últimos años, los proyectos de la línea de Tecnología Alimentaria relacionados con la obtención de alcaloides se han orientado principalmente a la revalorización de materias primas y subproductos. En todos los casos se ha procurado desarrollar procesos sostenibles, con posibilidades de escalamiento y capaces de aprovechar el potencial biológico de los compuestos obtenidos. A continuación, se describen los avances alcanzados con dos materias primas de particular importancia: chile y café, incluidos los residuos y los subproductos derivados de su procesamiento tradicional.

En el género *Capsicum*, se han estudiado los capsaicinoides de chile habanero, serrano y de árbol, entre otros. Inicialmente se desarrollaron estrategias de extracción orientadas a obtener oleorresinas sin solventes orgánicos. A diferencia de los métodos convencionales basados en hexano, metanol u otros solventes con limitaciones regulatorias y ambientales, se diseñó un proceso de extracción sólido-líquido con aceites vegetales, incluidos aceites residuales de la industria restaurantera o gastronómica. Esta alternativa permite recuperar los capsaicinoides mediante un proceso más amigable con el ambiente y aprovechar los aceites generados durante la fritura de alimentos. Sin embargo, la concentración de los capsaicinoides obtenida inicialmente fue baja. Para mejorar el proceso, se evaluaron operaciones de saponificación y de extracción líquido-líquido, con las que se incrementó la concentración y pureza de los capsaicinoides, como se muestra en la Figura 3, facilitando su aplicación como ingredientes funcionales y saborizantes naturales (Rodríguez-Vera et al., 2016).



Figura 3. Extractos de capsaicinoides: a) extracto con aceite; b) saponificación del extracto; c) extracción líquido-líquido de la fracción no saponificada

En el caso del café, los trabajos han comprendido la caracterización de los alcaloides presentes en muestras procedentes de regiones productoras de Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Veracruz y Jalisco, con énfasis en la cafeína, uno de los alcaloides más conocidos, y en su potencial biológico. También se han estudiado subproductos del beneficio, principalmente del beneficio húmedo, así como hojas y granos afectados por enfermedades del cultivo. En particular, se analizaron materiales asociados con *Hemileia vastatrix*, agente causal de la roya del café, debido a que esta enfermedad representa una de las principales amenazas para la producción cafetalera mundial. Los estudios permitieron evaluar cómo la infección modifica la síntesis y el contenido de cafeína en diferentes tejidos y tipos de extracto. Para la caracterización de los alcaloides se desarrollaron metodologías cromatográficas avanzadas como HPTLC y HPLC, y se complementaron con ensayos biológicos para determinar el potencial de las fracciones obtenidas, como se muestra en la Figura 4 (Cárdenas-Ureña et al., 2025).

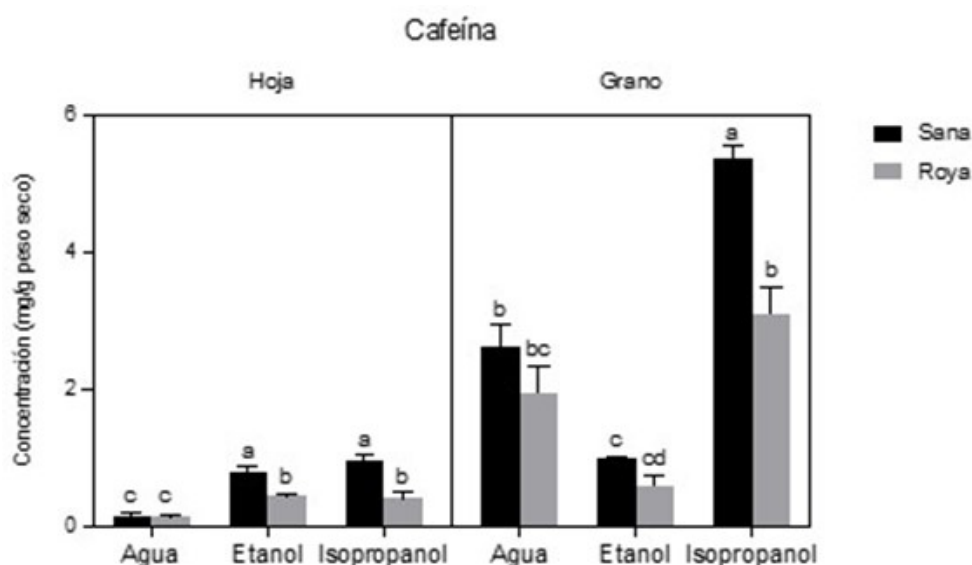


Figura 4. Concentración de cafeína en las hojas y granos sanos e infectados con roya, determinada en extractos acuosos, etanólicos e isopropanólicos mediante HPTLC. Los datos representan la media $\pm$ desviación estándar. Las letras minúsculas indican diferencias estadísticas entre las muestras de hoja y, por separado, entre las muestras de granos, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0.05$, $n=3$)

También se evaluaron procesos no convencionales para recuperar alcaloides de subproductos agroindustriales. En el caso de la pulpa de café, principal residuo contaminante del beneficio húmedo, se comparó la extracción con agua subcrítica y con CO_2 supercrítico frente a métodos tradicionales de lixiviación. La extracción con agua subcrítica proporcionó los mayores rendimientos de cafeína; posteriormente, se desarrolló un proceso de purificación con resinas poliméricas, con el que se obtuvieron fracciones de mayor pureza y actividad biológica. Estos resultados muestran el potencial de integrar tecnologías verdes y procesos de purificación selectiva para transformar residuos agroindustriales en ingredientes funcionales de alto valor agregado.

En conjunto, estos desarrollos evidencian la experiencia de la línea de Tecnología Alimentaria en el diseño y optimización de procesos de extracción, purificación y caracterización de compuestos bioactivos, así como en la aplicación de tecnologías sostenibles para el aprovechamiento integral de recursos agroalimentarios. Los resultados muestran su potencial para generar ingredientes naturales destinados a alimentos y productos nutraceuticos, al tiempo que promueven la economía circular y la valorización de residuos agroindustriales.

Aceites esenciales: de la biodiversidad mexicana a la innovación tecnológica en destilación y purificación

Los aceites esenciales son mezclas complejas de sustancias volátiles, lipofílicas y odoríferas biosintetizadas por el metabolismo secundario vegetal, y desempeñan funciones ecológicas vitales como la defensa contra fitopatógenos y la atracción de polinizadores. La diversidad climática y orográfica de México favorece una flora aromática amplia, que incluye especies endémicas y cultivos de importancia económica, como el orégano mexicano (*Lippia graveolens*), la pimienta gorda (*Pimenta dioica* Merrill) y diversas especies cítricas. Durante décadas, la recolección y el procesamiento de materias primas se realizaron principalmente mediante tecnologías empíricas, con las que se obtenían aceites crudos destinados al mercado de fragancias de bajo costo o se comercializaba directamente la biomasa seca. Sin embargo, el mercado actual demanda ingredientes especializados con perfiles químicos estandarizados y libres de residuos de solventes, plaguicidas y productos de degradación térmica. Para atender estos requerimientos y facilitar la transferencia del campo al laboratorio y a la industria, el CIATEJ ha desarrollado y validado tecnologías avanzadas de destilación, extracción y purificación, que permiten obtener fitoquímicos de calidad y mejorar la rentabilidad agroindustrial.

Degradación térmica e hidrolítica en los métodos convencionales

El aislamiento tradicional de aceites esenciales se realiza principalmente mediante hidrodestilación o destilación por arrastre de vapor (ver Figura 5a). Aunque estos procesos son económicamente accesibles y relativamente fáciles de implementar a escala rural, presentan limitaciones fisicoquímicas al procesar matrices botánicas complejas. Durante la hidrodestilación, la biomasa permanece en contacto directo con agua en ebullición durante periodos prolongados, generalmente de 2 a 6 h. Este tratamiento térmico e hidrolítico puede favorecer distintas reacciones de degradación en los compuestos termolábiles y modificar el perfil químico del aceite recuperado.

A nivel molecular, el calentamiento prolongado puede provocar la hidrólisis de ésteres volátiles, su transformación en ácidos y alcoholes menos odoríferos, la isomerización de monoterpenos (como la conversión térmica de precursores en el orégano) y la polimerización oxidativa de compuestos insaturados. Además, la solubilización parcial puede ocasionar que algunas fracciones oxigenadas, de mayor polaridad y responsables en buena medida del perfil aromático y de la actividad biológica, permanezcan disueltas en el agua de condensación conocida como hidrolato (ver Figura 5b). En consecuencia, el aceite esencial recuperado por decantación puede presentar una disminución de su calidad organoléptica y bioactividad.

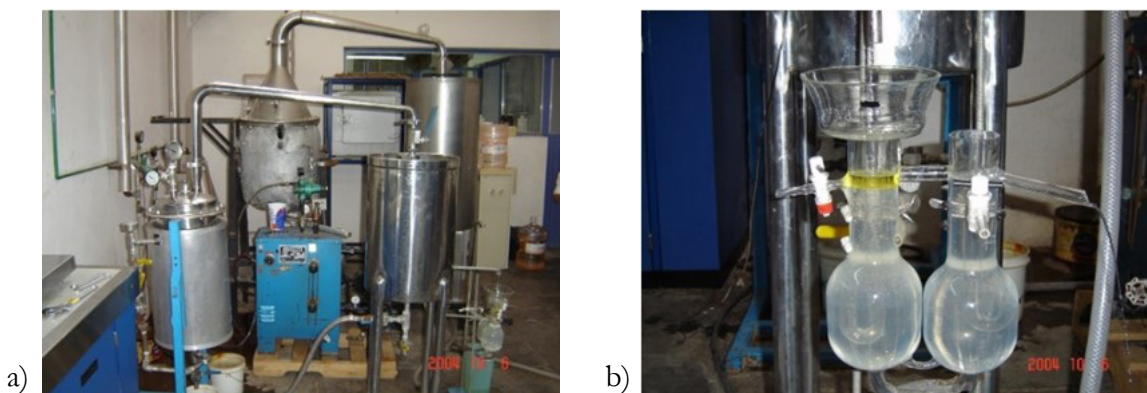


Figura 5. a) Equipo a nivel piloto de 25 L para la destilación de aceites esenciales por arrastre con vapor. b) Sistema de decantación del aceite esencial-hidrolato durante la destilación

Extracción con fluidos supercríticos

Ante las limitaciones de los procesos térmicos, la extracción por fluidos supercríticos mediante dióxido de carbono (EFS- CO_2) constituye una alternativa relevante para la valorización de fitoquímicos volátiles. El CO_2 alcanza el estado supercrítico en condiciones operativas relativamente moderadas: una temperatura crítica de 31.1°C y una presión crítica de 73.8 bar. En este estado termodinámico, el fluido presenta propiedades de transporte híbridas y altamente ajustables: posee una densidad comparable con la de un solvente orgánico líquido, que le confiere un elevado poder de solvatación y una viscosidad y difusividad similares a las de un gas. Esta combinación facilita la penetración del fluido en la matriz celular vegetal y permite modificar su selectividad mediante cambios controlados de presión y temperatura.

La utilidad de esta tecnología se demostró en los estudios comparativos realizados con pimienta gorda (*Pimenta dioica* Merrill) cultivada en regiones tropicales de México. El análisis fitoquímico mostró que la destilación tradicional por arrastre de vapor modifica la concentración de eugenol y metileugenol, componentes bioactivos relevantes de esta especie. En contraste, la EFS- CO_2 , operada a 40°C y presiones de 90 a 120 bar, permitió una extracción selectiva y exhaustiva. El extracto supercrítico no presentó productos detectables de degradación térmica y conservó con mayor fidelidad el perfil organoléptico de la especia fresca. Además, el carácter inerte del CO_2 redujo la oxidación durante el proceso y su eliminación mediante descompresión permitió obtener un extracto sin trazas de solventes (García-Fajardo et al., 1997).

Fraccionamiento molecular y aislamiento de biomoléculas

La extracción supercrítica es adecuada para separar inicialmente los compuestos de la matriz vegetal; sin embargo, la purificación de los aceites esenciales crudos requiere

operaciones posteriores. La industria citrícola nacional genera grandes volúmenes de residuos agroindustriales, principalmente cáscaras de naranja, mandarina y toronja. Estudios orientados a la economía circular han mostrado que estos subproductos pueden aprovecharse mediante prensado en frío o arrastre con vapor para recuperar aceites crudos con componentes de actividad antimicrobiana (Mora-Álvarez, 2006). No obstante, estos aceites contienen más del 90% de hidrocarburos monoterpénicos, predominantemente *d*-limoneno, que son susceptibles a la autooxidación y tienen un valor comercial limitado. Por ello, el reto tecnológico consiste en fraccionar el material para concentrar las fracciones oxigenadas minoritarias de mayor valor.

Para este propósito, la destilación molecular de trayecto corto constituye una alternativa eficaz. A diferencia de la destilación fraccionada convencional que opera a vacío medio y requiere columnas de reflujo, la destilación molecular funciona a alto vacío, con presiones residuales entre 0.001 y 0.01 mbar. En estas condiciones, la distancia entre la superficie de evaporación y el condensador interno es menor que el recorrido libre medio de las moléculas en fase gaseosa. Esto permite disminuir la temperatura de ebullición de los compuestos de mayor peso molecular y reducir el tiempo de residencia térmica a pocos segundos, con lo que se limita su polimerización.

El dominio de estas tecnologías ha permitido optimizar procesos de separación altamente eficientes. En el aceite esencial de naranja dulce, la combinación de destilación fraccionada y destilación molecular con película agitada permite recuperar de manera sistemática *d*-limoneno de alta pureza y, simultáneamente, aislar y concentrar la fracción de compuestos oxigenados responsable de las notas aromáticas de mayor impacto. Esta integración mejora el aprovechamiento de la materia prima y genera fracciones con características adecuadas para diferentes aplicaciones industriales (García-Fajardo et al., 2023).

Caracterización fitoquímica de alta resolución

La instrumentación analítica avanzada constituye un soporte indispensable para diseñar, optimizar y escalar estos procesos de separación. En el CIATEJ, la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) ha sido fundamental para identificar los componentes y validar la calidad fitoquímica de los extractos. Esta herramienta es especialmente relevante para especies endémicas complejas como el orégano mexicano (*Lippia graveolens*), una planta de recolección silvestre que presenta una amplia variabilidad genética, fenotípica y química según la región geográfica, las condiciones climáticas y el estrés hídrico al que se encuentra sometida.

El análisis por GC-MS ha permitido diferenciar con precisión los quimiotipos de las poblaciones botánicas y resolver coeluciones cromatográficas importantes

para cuantificar la relación entre timol y carvacrol, dos fenoles monoterpénicos con actividad antimicrobiana. Para reducir el efecto de las variaciones climáticas y geográficas sobre la calidad del extracto, se han aplicado métodos extractivos como la hidrodestilación fraccionada. Esta modificación del proceso convencional permite estandarizar el contenido fenólico del aceite y concentrar timol y carvacrol hasta en un 74% en una sola fracción, independientemente de la región de origen de la especia en México (Castillo-Herrera et al., 2007).

El fraccionamiento y la concentración de las fases fenólicas incrementan su actividad biocida. Se ha demostrado que el aceite esencial de orégano inhibe el crecimiento de fitopatógenos de importancia agrícola, como *Erwinia carotovora* y *Fusarium oxysporum* en plantas de *Agave tequilana* Weber var. azul a concentraciones de apenas 50 ppm (Obledo et al., 2002). Asimismo, las fracciones con un contenido combinado de hasta 83% de timol y carvacrol muestran eficacia para reducir *Salmonella* spp. en productos agrícolas frescos como aguacate, tomate y limón (Estarrón-Espinosa et al., 2018).

Además de su aplicación directa en el lavado de alimentos, las fracciones ricas en carvacrol pueden emplearse en sistemas avanzados de envasado. Su incorporación en matrices de biopolímeros naturales, como películas de quitosano, modifica las propiedades fisicoquímicas y de barrera del empaque y permite conservar y liberar de forma controlada la actividad antimicrobiana y antioxidante (López-Mata et al., 2013). De este modo, la caracterización molecular contribuye a transformar el conocimiento botánico en aditivos y empaques activos funcionales.

El desarrollo de protocolos de extracción, fraccionamiento y destilación molecular de aceites cítricos y de especies endémicas debe trascender la validación de laboratorio. Para favorecer la transferencia tecnológica, los proyectos del CIATEJ se han estructurado bajo el modelo de la pentahélice que articula la participación de los sectores académico, productivo, gubernamental, social y ambiental. Este enfoque busca que el valor agregado generado a partir de pigmentos, alcaloides y aceites esenciales se traduzca en beneficios para las comunidades y contribuya a la sostenibilidad y competitividad nacional.

Conclusiones

La trayectoria de la línea de investigación de Tecnología Alimentaria del CIATEJ durante más de 30 años muestra que el valor real de los compuestos naturales de la flora cultivada y silvestre de México, pigmentos, alcaloides y aceites esenciales, puede incrementarse mediante la integración de la ingeniería de procesos con el modelo de la pentahélice. El aprovechamiento de materias primas y de residuos

agroindustriales permite reducir el impacto ambiental, generar alternativas de valor agregado para el sector productivo y fortalecer la transferencia tecnológica hacia las comunidades agrícolas. En conjunto, estos avances aportan bases para consolidar una bioeconomía sustentable, competitiva y con beneficios compartidos.

Referencias

- Acevez-Mares, L. C., Alcázar-Valle, M., Velásquez-Reyes, D., Mojica, L., Jaramillo-Flores, M. E., Avendaño-Arrazate, C., & Lugo-Cervantes, E. (2025). Native cacao from southern Mexico: polyphenol profiling and its impact on inflammation and lipid metabolism modulation. *Bioactive Compounds in Health and Disease*, 8(10). <https://doi.org/10.31989/bchd.v8i10.1814>
- Calva-Estrada, S. J., Jiménez-Fernández, M., & Lugo-Cervantes, E. (2022). Betalains and their applications in food: The current state of processing, stability and future opportunities in the industry. *Food Chemistry: Molecular Science*, 4, 100089. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100089>
- Cárdenas-Ureña, A., Mojica-Contreras, L., Coronado-Cáceres, L., & Castillo-Herrera, G. (2025). *Evaluación del efecto de Hemilea vastatrix en cafetos de la variedad Pluma en el contenido de metabolitos secundarios y su relación con el potencial biológico de los extractos de hojas y granos verdes de café* [tesis de maestría, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.]. Repositorio institucional CIATEJ.
- Castillo-Herrera, G. A., García-Fajardo, J. A., & Estarrón-Espinosa, M. (2007). Extraction method that enriches phenolic content in oregano (*Lippia graveolens* H.B.K.) essential oil. *Journal of Food Process Engineering*, 30(6), 661–669. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00134.x>
- García-Fajardo, J. A., Flores-Méndez, D. A., Suárez-Jacobo, Á., Torres-Martínez, L. G., Granados-Vallejo, M., Corona-González, R. I., Guatemala-Morales, G. M., & Arriola-Guevara, E. (2023). Separation of D-limonene and other oxygenated compounds from orange essential oil by molecular distillation and fractional distillation with a wiped film evaporator. *Processes*, 11(4), 991. <https://doi.org/10.3390/pr11040991>
- García-Fajardo, J. A., Martínez-Sosa, M., Estarrón-Espinosa, M., Vilarem, G., Gaset, A., & de Santos, J. M. (1997). Comparative study of the oil and supercritical CO₂ extract of Mexican pimento (*Pimenta dioica* Merrill). *Journal of Essential Oil Research*, 9(2), 181–185. <https://doi.org/10.1080/10412905.1997.9699456>
- Estarrón-Espinosa, M. E., García-Fajardo, J. A., & Castillo-Herrera, G. A. (2018). The antimicrobial effect of oregano essential oil and its phenolic and terpe-

- nic fractions in the reduction of *Salmonella* spp. in avocados, tomatoes and lemons. En A. Cardador-Martínez & V. M. Rodríguez-García (Eds.), *Essential Oils: Production, Applications and Health Benefits* (pp. 139–148). Nova Science Publishers. <https://novapublishers.com/shop/essential-oils-production-applications-and-health-benefits/>
- López-Mata, M. A., Ruiz-Cruz, S., Silva-Beltrán, N. P., Ornelas-Paz, J. de J., Zamudio-Flores, P. B., & BurrueI-Ibarra, S. E. (2013). Physicochemical, antimicrobial and antioxidant properties of chitosan films incorporated with carvacrol. *Molecules*, 18(11), 13735–13753. <https://doi.org/10.3390/molecules181113735>.
- Méndez-Robles, M. D., Flores-Chavira, C., Orozco-Ávila, I., Jaramillo-Flores, M. E., & Lugo-Cervantes, E. (2004). Economic potential of ‘Azafrán de bolita’ (*Ditaxis heterantha* Zucc; Euphorbiaceae): a food pigment producing plant. *Economic Botany*, 58, 530–535. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2004\)058\[0530:C-CACDO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2004)058[0530:C-CACDO]2.0.CO;2)
- Mora-Álvarez, M. C. (2006). Evaluación de los componentes activos de aceites a partir de subproductos de naranja, mandarina y toronja con actividad antimicrobiana, por los métodos de prensado en frío y arrastre con vapor [tesis de maestría, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías]. Repositorio institucional CUCEI.
- Obledo, E. N., Javiel-Robles, E., García-Fajardo, J. A., & Ramírez-Córdova, J. J. (2002). Antimicrobial activity of the essential oil of Mexican oregano (*Lippia graveolens* HBK) against pathogens of *Agave tequilana* Weber var. azul. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 71, 143-148. <https://hero.epa.gov/reference/5241549/>
- Rodríguez-Vera, R., López-Ramírez, J., & Castillo-Herrera, G. (2016). Evaluación de un proceso para el enriquecimiento y purificación de capsaicinoides a partir de una oleorresina de chile habanero [tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara]. Repositorio institucional UDG.