

**Perspectivas actuales
y tendencias en la producción
y aprovechamiento integral
de cítricos en México**

Castañón Rodríguez, Juan Francisco

Perspectivas actuales y tendencias en la producción y aprovechamiento integral de cítricos en México / Juan Francisco Castañón Rodríguez .—Ciudad de México : Colofón ; Universidad Autónoma de Tamaulipas, 2019.

136 págs. ; 17 x 23 cm.

1. Naranja – Industria y comercio – Tamaulipas (México : Estado)

LC: HD2959.N3 C37

DEWEY: 334 C37

Centro Universitario Victoria

Centro de Gestión del Conocimiento. Tercer Piso

Cd. Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87149

consejopublicacionesuat@outlook.com

D. R. © 2019 Universidad Autónoma de Tamaulipas

Matamoros SN, Zona Centro Ciudad Victoria, Tamaulipas C.P. 87000

Consejo de Publicaciones UAT

Tel. (52) 834 3181-800 • extensión: 2948 • *www.uat.edu.mx*

 **Fomento Editorial** Una edición del Departamento de Fomento Editorial de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Edificio Administrativo, planta baja, CU Victoria

Ciudad Victoria, Tamaulipas, México

Libro aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT

ISBN UAT: 978-607-8626-53-3

Colofón

Franz Hals núm. 130, Alfonso XIII

Delegación Álvaro Obregón C.P. 01460, Ciudad de México

www.paraleer.com/colofonedicionesacademicas@gmail.com

ISBN: 978-607-8663-92-7

Publicación financiada con recurso PFCE 2018

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra incluido el diseño tipográfico y de portada, sea cual fuere el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento por escrito del Consejo de Publicaciones UAT.

Impreso en México • *Printed in Mexico*

El tiraje consta de 300 ejemplares

Este libro fue dictaminado y aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT mediante un especialista en la materia. Asimismo fue recibida por el Comité Interno de Selección de Obras de Colofón Ediciones Académicas para su valoración en la sesión del segundo semestre 2019, se sometió al sistema de dictaminación a “doble ciego” por especialistas en la materia, el resultado de ambos dictámenes fue positivo.

Perspectivas actuales y tendencias en la producción y aprovechamiento integral de cítricos en México

Dr. Juan Francisco Castañón Rodríguez



UJAT



Consejo de
Publicaciones



Fomento
Editorial



COLOFÓN



Ing. José Andrés Suárez Fernández
PRESIDENTE

Dr. Julio Martínez Burnes
VICEPRESIDENTE

Dr. Héctor Manuel Cappello Y García
SECRETARIO TÉCNICO

C.P. Guillermo Mendoza Cavazos
VOCAL

Dra. Rosa Issel Acosta González
VOCAL

Lic. Víctor Hugo Guerra García
VOCAL

Consejo Editorial del Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Lourdes Arizpe Slogher • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Amalio Blanco** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dra. Rosalba Casas Guerrero** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Francisco Díaz Bretones** • Universidad de Granada, España | **Dr. Rolando Díaz Lowing** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Manuel Fernández Ríos** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dr. Manuel Fernández Navarro** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dra. Juana Juárez Romero** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dr. Manuel Marín Sánchez** • Universidad de Sevilla, España | **Dr. Cervando Martínez** • University of Texas at San Antonio, E.U.A. | **Dr. Darío Páez** • Universidad del País Vasco, España | **Dra. María Cristina Puga Espinosa** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Luis Arturo Rivas Tovar** • Instituto Politécnico Nacional, México | **Dr. Aroldo Rodríguez** • University of California at Fresno, E.U.A. | **Dr. José Manuel Valenzuela Arce** • Colegio de la Frontera Norte, México | **Dra. Margarita Velázquez Gutiérrez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. José Manuel Sabucedo Cameselle** • Universidad de Santiago de Compostela, España | **Dr. Alessandro Soares da Silva** • Universidad de São Paulo, Brasil | **Dr. Akexandre Dorna** • Universidad de CAEN, Francia | **Dr. Ismael Vidales Delgado** • Universidad Regiomontana, México | **Dr. José Francisco Zúñiga García** • Universidad de Granada, España | **Dr. Bernardo Jiménez** • Universidad de Guadalajara, México | **Dr. Juan Enrique Marcano Medina** • Universidad de Puerto Rico-Humacao | **Dra. Ursula Oswald** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Arq. Carlos Mario Yori** • Universidad Nacional de Colombia | **Arq. Walter Debenedetti** • Universidad de Patrimonio, Colonia, Uruguay | **Dr. Andrés Piqueras** • Universitat Jaume I, Valencia, España | **Dr. Yolanda Troyano Rodríguez** • Universidad de Sevilla, España | **Dra. María Lucero Guzmán Jiménez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dra. Patricia González Aldea** • Universidad Carlos III de Madrid, España | **Dr. Marcelo Urra** • Revista Latinoamericana de Psicología Social | **Dr. Rubén Ardila** • Universidad Nacional de Colombia | **Dr. Jorge Gissi** • Pontificia Universidad Católica de Chile | **Dr. Julio F. Villegas** • Universidad Diego Portales, Chile | **Ángel Bonifaz Ezeta** • Universidad Nacional Autónoma de México



—



Prólogo	11
Capítulo I	
Aprovechamiento de la naranja en Tamaulipas y tendencias de usos alternativos de sus subproductos	15
<i>Dr. Juan Francisco Castañón Rodríguez, Dr. José Alberto Ramírez de León, L.N. Maricela Guadalupe Soto Gómez.</i>	
Capítulo II	
Aprovechamiento de los residuos de la industrialización de limón persa para la extracción de flavonoides bioactivos	43
<i>Dra. Anaberta Cardador Martínez, Dr. José Daniel Padilla de la Rosa.</i>	
Capítulo III	
Propiedades bioactivas en aceites esenciales de limas y limones	67
<i>Dr. Oscar Andrés del Ángel Coronel, Ing. Alba Martínez Castillo, Ing. Luis Eduardo Colorado Acosta, Ing. Víctor González Flores.</i>	
Capítulo IV	
Importancia de la pectin metilesterasa en los cítricos y su relevancia tecnológica en la industria alimentaria	93
<i>M.C. Jesús Andrés Salas Tovar, M.C. Sarai Escobedo García, Dra. Adriana Carolina Flores Gallegos, PhD. Raúl Rodríguez Herrera.</i>	
Capítulo V	
Uso de la cáscara de naranja para la obtención de polimetoxiflavonas (PMF), como compuestos bioactivos antiinflamatorios	115
<i>Dra. Rocío Margarita Uresti Marín, M.S.P. Melissa Daniela González Hinojosa, Dra. Frida Carmina Caballero, Rico</i>	



—



Los hábitos alimenticios de los consumidores están cambiando debido a una mejor comprensión de los efectos saludables de los alimentos, ya que desde la antigüedad se ha registrado el uso de productos naturales de plantas y alimentos como medicamentos, pues los constituyentes claves se utilizaban en forma de extractos, polvos, pociones y aceites. Sin embargo, se basaron en la combinación de compuestos muy complejos e incrustados en la matriz, en lugar de compuestos puros e individuales. Hoy en día, los componentes puros de estos compuestos son productos identificados predominantemente como metabolitos secundarios de las plantas y estos compuestos llamados fitoquímicos son los principales compuestos bioactivos presentes en frutas y verduras y les han atribuido estos efectos benéficos.

Las frutas cítricas y los productos derivados tienen además de nutrientes, altas concentraciones de estos compuestos bioactivos que mantienen la salud humana, ya que el aumento en su consumo se ha asociado con disminución en la incidencia de diabetes, enfermedades cardiovasculares, cáncer, Alzheimer; además de beneficiar la salud ósea. La ingesta diaria de naranja mínimamente procesada aumenta los niveles de hesperetina en plasma. Los cítricos han recibido en las últimas décadas, mucha atención debido a sus propiedades antioxidantes por lo que se ha incrementado su consumo. Entre estos cítricos, las naranjas son una buena fuente de compuestos bioactivos, como la vitamina C, carotenoides y flavanonas, cuyo consumo aumenta los niveles de vitamina C en plasma y reduce los marcadores de estrés oxidativo en humanos.

Se ha encontrado que los residuos agroindustriales son una buena fuente de compuestos bioactivos, que se pueden extraer y aislar para una mayor utilización en las industrias alimentarias, cosméticas y farmacéuticas. El procesamiento de frutas y verduras produce altas cantidades de subproductos tales como cáscaras, semillas, pulpa residual, piezas enteras desechadas, entre otros, que son ricos en compuestos fitoquímicos como compuestos fenólicos, fibra dietética, vitamina C, tocoferoles y minerales que pueden ser utilizados como fuentes de bajo costo para la obtención de ingredientes funcionales, por lo que la recuperación y reciclaje de estos subproductos podría ser económicamente atractivo para las industrias. En la actualidad, los productores y la industria alimentaria requieren de formas innovadoras de utilizar estos desechos como subproductos para una mayor explotación en la producción de aditivos o suplementos con alto valor nutricional y funcional, así como métodos emergentes para la obtención y purificación de estos fitoquímicos. Este libro aborda varios estudios que se han realizado en México por diferentes grupos de investigación, sobre el uso de subproductos agroindustriales de cítricos producidos en el país, desde una perspectiva de aprovechamiento integral con el fin de contribuir a la valorización de los cítricos.

Dr. Juan Francisco Castañón Rodríguez

Capítulo I





—



Aprovechamiento de la naranja en Tamaulipas y tendencias de usos alternativos de sus subproductos¹

Dr. Juan Francisco Catañón Rodríguez²

Dr. José Alberto Ramírez de León

L.N. Maricela Guadalupe Soto-Gómez

Resumen

La naranja (*Citrus sinensis*. L. Obeck) es uno de los cítricos más populares en México, siendo Tamaulipas el segundo productor a nivel nacional; la principal variedad es la Valencia por su contenido de jugo y azúcares. Sin embargo, en los últimos años los citricultores han tenido que enfrentarse a los nuevos cambios comerciales, para seguir siendo competitivos dentro del mercado nacional e internacional. Aunado a ello, el problema de eliminación de los subproductos de naranja ha estimulado un interés significativo en desarrollar formas más responsables de tratarlos, idealmente con el beneficio de obtener productos de alto valor agregado y con un enfoque ambiental más responsable. Es necesaria la valorización de la naranja para su aprovechamiento integral dada su composición rica en azúcares solubles, celulosa, hemicelulosa, pectina y aceites esenciales, que pueden formar base de varios procesos industriales, cuyas estrategias para la utilización de los residuos generados durante la extracción de jugo incluye: extracción de aceites esenciales, pectina, producción de enzimas, bioetanol, metano, ácidos orgánicos, proteína unicelular, antioxidantes naturales, prebióticos, fibra dietética. Por tanto, el objetivo del presente capítulo es dar a conocer el procesamiento de la naranja desde la producción primaria hasta el procesamiento industrial, dando énfasis a las alternativas de uso que se le están dando a los subproductos generados en las industrias desde una perspectiva de sistemas alimentarios sostenibles.

Palabras clave: naranja, subproductos, compuestos bioactivos, aprovechamiento integral.

¹ Todos los autores se encuentran adscritos a la Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica de Trabajo Social y Ciencias para el Desarrollo Humano

² Autor para correspondencia: jfcastonon@docentes.uat.edu.mx

Generalidades de la naranja

Las frutas en cítricos cultivados tienden a ser redondeadas, ya sea completamente esféricas. El fruto maduro consta de varios carpelos o gajos fáciles de separar que contienen una pulpa de color entre el anaranjado y el rojo, jugosa y succulenta. Posee varias semillas y numerosos células jugosas cubiertas por un exocarpo coriáceo o cáscara de color anaranjado cuyo interior es blanco, con numerosas glándulas que contienen aceites esenciales (SIAP, 2016). Esta fruta cítrica esta segmentada en dos secciones: cáscara y pulpa (Figura 1).

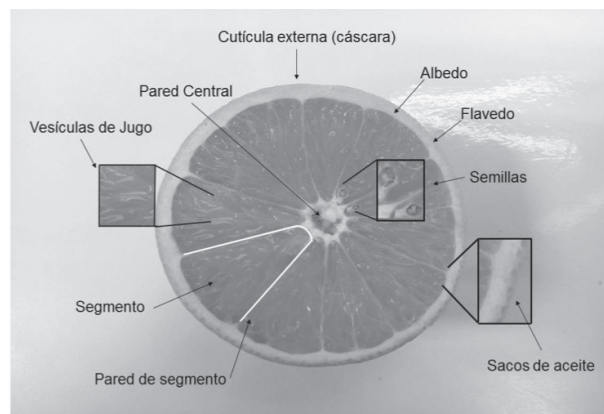


Figura 1. Estructura macroscópica de la naranja (*Citrus sinensis*)

La cáscara consiste de flavedo y albedo. El flavedo o exocarpo es la parte más externa de la fruta, contiene glándulas sebáceas que producen aceites esenciales y pigmentos. Está compuesto principalmente de celulosa pero también contiene otros compuestos, como aceites esenciales, ceras de parafina, y triterpenoides, ácidos grasos, pigmentos (carotenoides, clorofila, flavonoides), compuestos amargos (D-limoneno) y enzimas. Cuando el fruto está maduro, las células del flavedo contienen carotenoides (principalmente xantofilas) dentro de los cromoplastos, que en una etapa de desarrollo anterior, contienen clorofila. Esta progresión controlada hormonalmente en el desarrollo es responsable del cambio de color de la fruta del verde al anaranjado al madurar. La región interna del flavedo es rica en cuerpos multicelulares con formas esféricas o piriformes, que están llenos de aceites esenciales. El albedo se encuentra al lado del flavedo y es la parte interna de la cáscara que comúnmente se elimina antes de comer y es rica en pectina. El endocarpio está separado en secciones que comúnmente se llaman segmentos y en él están inmersas las semillas que pueden variar de 1 a 10 por fruto. La pulpa jugosa que rellena los segmentos se conoce como saco de jugo o vesículas. El jugo de

naranja es uno de los principales productos comercializados en todo el mundo, y el jugo de fruta, el más consumido. El aroma del jugo de naranja recién exprimido se ha atribuido a aldehídos (principalmente acetaldehído, hexanal, octanal y decanal), ésteres (especialmente butanoato de etilo) y terpenos (como mirceno, α -pineno, limoneno), además de algunos alcoholes y cetonas (Bittar et al., 2015).

Entre las principales variedades cultivadas en México destacan la Valencia, Navel-Lane-Late y Navelina, siendo la naranja Valencia o Valenciana la principal ya que es jugosa y dulce y por ello muy orientada a la producción de jugo, resaltando la parte externa o cáscara, la parte interna compuesta de material fibroso cuyos sáculos contienen el jugo.

Compuestos bioactivos presentes en las naranjas

Del Toro et al., (2015) realizaron una revisión de los principales compuestos bioactivos presentes en los cítricos tanto en la cáscara como en el jugo, los cuáles de acuerdo a su importancia biológica son: los carotenos, aceites esenciales y flavonoides, estos compuestos están presentes en diversas proporciones dependiendo del cítrico, de su madurez y zona de cultivo. En este trabajo se compila una serie de resultados de diversos estudios realizados en cítricos que van desde la extracción, caracterización y evaluación de la actividad antioxidante. Por otro lado, Ledesma-Escobar y de Castro (2014) muestran el estado de explotación de residuos provenientes de la industria citrícola mediante discusión de la forma en que se realiza el muestreo y acondicionamiento de las muestras, mostrando sus deficiencias y dando soluciones para ello, los diseños experimentales para la optimización de los pasos del proceso analítico y propuestas de nuevos diseños, muestran las ventajas y desventajas de diferentes métodos para la extracción de alto y bajo precio de los cítricos y la degradación potencial que pueden sufrir, enfatizando las deficiencias de los equipos analíticos convencionales utilizados para la identificación y cuantificación de los compuestos objetivo y proponen equipos analíticos de vanguardia y la forma en que deben procesarse los datos proporcionados, concluyendo que hay una gran variabilidad en todos los aspectos antes mencionados por lo que abren una puerta a la explotación integral de los residuos de cítricos y estudios de intervención a través de la evolución del perfil de metabolitos durante el crecimiento, maduración y almacenamiento de cítricos.

Los principales compuestos presentes en los cítricos se muestran en el Cuadro 2, destacando su contenido en nutrimentos y compuestos bioactivos. Esta composición es afectada por varios factores tales como las condiciones de crecimiento, madurez, portainjertos, variedad y el clima. Específicamente la naranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck) contiene una variedad de fitoquímicos que contribuyen al sabor

y propiedades generales de la fruta. Estas sustancias, presentes en el jugo, incluyen azúcares como sacarosa, fructosa y glucosa; ácidos orgánicos (principalmente ácidos cítricos, málico e isocítrico); carotenoides tales como xantofilas y carotenos; vitaminas C, A, B1, B6 y B3; compuestos de sabor y aroma, que incluyen varios ésteres, alcoholes, cetonas, lactonas e hidrocarburos volátiles, y polifenoles como flavonoides y ácidos hidroxicinámicos (Pérez-Cacho y Rouseff, 2008).

Cuadro 1. Principales compuestos presentes en cítricos

Compuestos principales	Ejemplos
Lípidos	Ácido oleico, linoleico, linolenico, palmitico, esteárico, glicerol y fitoterol
Azúcares	Glucosa, fructosa, sacarosa
Ácidos	Cítrico, málico, tártrico, benzoico, oxálico y succínico
Carbohidratos insolubles	Celulosa, hemicelulosa, pectina
Enzimas	Pectinesterasa, fosfatasa, peroxidasa
Flavonoides	Hesperidina, naringina
Principios amargos	Limonina, isolimonina
Aceite de la cáscara	d-limoneno
Constituyentes volátiles	Alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, hidrocarburos y ácidos
Pigmentos	Carotenos, xantofilas
Vitaminas	Ácido ascórbico, vitaminas del complejo B, carotenoides
Minerales	Calcio, potasio

Las naranjas y las mandarinas acumulan carotenoides como violaxantina, luteína, zeaxantina, β -criptoxantina, α -caroteno y β -caroteno según lo reportado por Kato et al., (2004) y de Moraes et al., (2013); sin embargo, otros carotenos presentes en la naranja de acuerdo al estudio de Agócs et al., (2007) son: el neocromo, violaxantina + furanoide, β -citraurina, luteoxantina, criptocromo, α -criptoxantina y ξ -caroteno, cuyas concentraciones varían en la pulpa y la cáscara. En la fibra de naranja los principales grupos de compuestos fenólicos son flavanones (nariturina, hesperidina, poncirina y naringina), flavones (diosmina y neodiosmina) y ácidos hidroxicinámicos (ácido caféico, ácido ferúlico y ácido cumárico) (Fernández et al., 2009).

Rapisarda et al., (1999) evaluaron la efectividad antioxidante del jugo fresco de cinco variedades de naranjas, concluyendo que la eficiencia antioxidante de los jugos de naranja quizá son atribuidos en una parte significativa al contenido de fenoles totales, mientras que el ácido ascórbico parece jugar un rol menor, la actividad antioxidante se relaciona no solamente con las características estructurales

de fitoquímicos contenidos en ellos, sino también a su capacidad de interactuar con biomembranas y finalmente en los jugos pigmentados, su eficiencia antioxidante parece ser ampliamente influenciada por su nivel de antocianinas, por tanto, recomiendan que el consumo de jugo de naranja aporta fenoles antioxidantes que proveen protección adicional de la oxidación *in vivo* de biomoléculas celulares.

Los problemas de los subproductos generados podrían ser superados asignando grandes cantidades de este producto en sectores comerciales diferentes de la tradicional industria alimentaria tales como los nutracéuticos, para obtener productos con alto valor agregado. En particular la naranja ha despertado gran interés debido a su efectos benéficos potenciales sobre la salud humana, tales como actividad anti-diabética e hipocolesterolemica (Titta et al., 2010).

Taxonomía y variedades

El árbol de naranja o naranjo es un árbol de la familia de las rutáceas; llega a medir hasta 10 m de altura, con la copa redondeada. Presenta tallos ligeramente espinosos, hojas coriáceas, elípticas, agudas y con el peciolo provisto de alas estrechas, además de flores de color blanco muy perfumadas, con cinco pétalos y numerosos estambres, llamadas flores de azahar, que son utilizadas en infusiones por sus cualidades tranquilizantes.

Para el establecimiento de la plantación se deben sembrar árboles injertados, libres de plagas y enfermedades, con una buena unión del patrón y el injerto, de copa vigorosa, formada por 3 a 4 ramas bien distribuidas y una buena formación del sistema radicular. Se pueden sembrar en cualquier época del año, la más adecuada es al inicio de la temporada de lluvias. Para su crecimiento necesita suelos permeables y poco calizos, con un pH de 5.5-6.0. La temperatura óptima para su desarrollo es de 20-25°C y necesita una precipitación media anual de 1 200 a 2 000 mm, no toleran las heladas, ya que tanto las flores, los frutos y las hojas pueden desaparecer totalmente. La especie necesita de una buena cantidad de lluvia, alrededor de mil doscientos milímetros al año, requiere un ambiente húmedo en el suelo, así como mucha luz para los procesos de floración y fructificación. Las flores y los frutos se producen sobre todo en la parte exterior de la copa del árbol (SIAP, 2016).

Cosecha

La cosecha del fruto se tiene que realizar con mucho cuidado para evitar que las naranjas se golpeen o sufran heridas que afecten su calidad y conservación. Se recomienda el uso de equipo adecuado. Hay que tener una escalera de tijera, un saco de cosecha, preferentemente de lona y unas tijeras de podar. La fruta cosechada no debe dejarse expuesta al sol, hay que colocarla sobre un manto seco para

evitar que entre en contacto con la humedad del suelo. Para su comercialización se recomienda hacer uso de bolsas de tejido abierto que permitan la circulación del aire (Campo Tamaulipas, 2017). Durante la época de cosecha esta actividad genera hasta un millón de jornales al año, lo que genera una derrama económica significativa para Tamaulipas.

Producción nacional y estatal de naranjas

Brasil, China, Unión Europea, Estados Unidos y México son los principales productores de naranja a nivel mundial con una participación del 72.10%, resultando destacable Brasil con 16.70 millones de toneladas; de las cuales, 5.50 millones fueron destinadas al consumo interno; al procesamiento, 11.10 millones (concentrado a 65°Brix) y 20 mil toneladas, para exportación en fresco (USDA, 2016).

El seguimiento de los precios para la naranja Valencia se realizó en 21 ciudades mexicanas, siendo la mayor parte de la cosecha que se comercializó en los principales mercados nacionales provenientes de los estados de Baja California, Guerrero, Jalisco, Nuevo León, Quintana Roo, Sonora, Veracruz, Yucatán y Tamaulipas. Los precios establecidos por kilogramo de naranja a lo largo de todo el año variaron como se muestra en el Cuadro 1, donde se reportan los precios más bajos y más altos; el precio promedio al productor fue de \$3.39/kg y esas cotizaciones demostraron diferencias en ocasiones hasta de \$4 pesos, con respecto a los precios al consumidor fue vendido en promedio en \$12.39/kg.

El precio al productor (\$1.49 a \$6.19/kg) se refiere al precio medio rural ponderado reportado en los Avances de Siembras y Cosechas de las Delegaciones estatales de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2017), el precio al mayoreo se refiere al precio promedio frecuente de venta y osciló durante todo el año de \$3.30 a \$14.20/kg, el precio al consumidor se refiere al precio promedio registrado en los distintos puntos de venta al menudeo y varió a lo largo de todo el año siendo enero donde se observó el precio más bajo (\$6.45/kg) y en noviembre el precio más alto (\$20.74); el margen de comercialización osciló entre \$4.21 a \$18.30/kg observándose una tendencia que a medida que iba pasando el año, este margen iba incrementando.

Cuadro 2. Márgenes de comercialización de naranja Valencia durante el año 2017 en Entidades Productoras de la República Mexicana

Mes	Entidades productoras	Precio al productor (S/kg)	Precio al mayoreo (S/kg)	Precio al consumidor (S/kg)	Margen de comercialización (S/kg)
Enero	Nuevo León, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán	\$1.49 - \$4.07	\$4.00 - \$14.16	\$6.45 - \$13.17	\$4.44 - \$11.68
Febrero	Baja California, Jalisco, Nuevo León, Quintana Roo, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán	\$1.83 - \$5.06	\$4.46 - \$13.58	\$7.46 - \$12.99	\$4.46 - \$9.27
Marzo	Baja California, Guerrero, Jalisco, Nuevo León, Sonora, Tabasco, Veracruz y Yucatán	\$1.81 - \$6.19	\$4.80 - \$12.27	\$7.46 - \$12.99	\$4.46 - \$8.87
Abril	Baja California, Guerrero, Jalisco, Nuevo León, Sonora, Veracruz y Yucatán	\$1.80 - \$4.60	\$5.00 - \$11.20	\$7.48 - \$13.13	\$4.35 - \$10.45
Mayo	Baja California Sur, Guerrero, Jalisco, Nuevo León, Quintana Roo, Sonora, Tamaulipas y Veracruz	\$2.29 - \$5.99	\$5.00 - \$11.52	\$8.40 - \$15.80	\$4.55 - \$12.01
Junio	Guerrero, Jalisco, Nuevo León, Quintana Roo, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán	\$2.76 - \$3.96	\$5.00 - \$11.52	\$8.22 - \$15.83	\$5.39 - \$12.42
Julio	Baja California, Guerrero, Jalisco, Nuevo León, Quintana Roo, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán	\$2.03 - \$4.04	\$5.20 - \$11.00	\$8.23 - \$15.50	\$5.16 - \$12.22
Agosto	Guerrero, Jalisco, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán	\$1.49 - \$4.09	\$4.80 - \$11.00	\$8.35 - \$17.70	\$6.35 - \$14.27

Mes	Entidades productoras	Precio al productor (S/kg)	Precio al mayoreo (S/kg)	Precio al consumidor (S/kg)	Margen de comercialización (S/kg)
Septiembre	Guerrero, Jalisco, Quintana Roo, Sonora, Veracruz y Yucatán	\$2.02 - \$5.38	\$4.17 - \$12.50	\$8.36 - \$18.53	\$5.25 - \$15.42
Octubre	Jalisco, Sonora, Tabasco, Veracruz y Yucatán	\$2.00 - \$3.38	\$3.30 - \$14.20	\$8.19 - \$18.51	\$5.68 - \$16.00
Noviembre	Guerrero, Jalisco, Sonora, Veracruz y Yucatán	\$2.35 - \$5.65	\$3.90 - \$13.62	\$8.16 - \$20.74	\$4.21 - \$18.30

La citricultura es una actividad de gran importancia económica y social en México que actualmente está consolidado como el quinto productor mundial de naranja, con un volumen promedio de más de cuatro millones de toneladas y la superficie establecida para el cultivo de cítricos es de cerca de 550 mil hectáreas. La naranja ocupa el primer lugar de producción de cítricos en el país con un 63%, le sigue el limón mexicano y el limón persa con un 23% y el porcentaje restante se distribuye entre la toronja, mandarina y tangerina (SAGARPA, 2017).

El valor de producción de naranja en México se estima en más de seis mil millones de pesos, con un consumo anual per cápita de 37.1 kilogramos y aporta el 22.5% del volumen de frutas que son producidas en el país. Referente al estimado de la producción 2016, al mes de septiembre, esta se ubica en tres millones 547 mil toneladas, lo que significa un crecimiento de 9.1%, en relación al mismo período del año previo (SAGARPA, 2017).

Durante el año 2015 se produjeron más de cuatro millones de toneladas de naranja, superior al promedio de los últimos 10 años. En lo que se refiere a comercio exterior, las exportaciones de naranja en ese mismo año, totalizaron más de 17.7 millones de dólares, con un volumen superior a las 49 mil toneladas comercializadas en Estados Unidos, Canadá, Reino Unido y Japón, entre otras naciones. Además, se explora abrir mercados potenciales en Alemania, Rusia, Francia, Arabia Saudita y Hong Kong (SAGARPA, 2017). En los últimos 10 años, la Tasa Media de Crecimiento Anual de las exportaciones fue del 15.7%, al evolucionar de 4.1 millones de dólares a 17.7 obtenidos en 2015.

De acuerdo al reporte emitido en 2017 por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) reporta en el ciclo perenne para el grupo de frutales 476 mil toneladas, siendo la naranja la que encabeza la lista con una producción de 3 281 mil toneladas. Las principales entidades productoras de naranja con Veracruz,

que aporta el 44% del volumen nacional; Tamaulipas, con un 14%, y San Luis Potosí, con un 8%, estados que conjuntan el 67% del total cosechado en el país.

La citricultura en Tamaulipas de acuerdo a la Secretaría de Desarrollo Rural (2017) es una actividad que genera más de 600 mil empleos anuales únicamente por concepto de pesca de naranja, así lo acreditan más de 600 mil empleos anuales únicamente por concepto de pesca de naranja, con más de 40 mil hectáreas establecidas con cultivos de cítricos pertenecientes a los municipios de la Zona Centro de Tamaulipas. Siendo la citricultura en Tamaulipas el segundo lugar nacional en la producción de naranja y el primer lugar nacional en calidad de este fruto. Sin embargo, entre los grandes retos que se tienen para seguir fortaleciendo este sector, es la transformación del producto, para poderle dar valor agregado al lavar, cepillar y encerar la fruta.

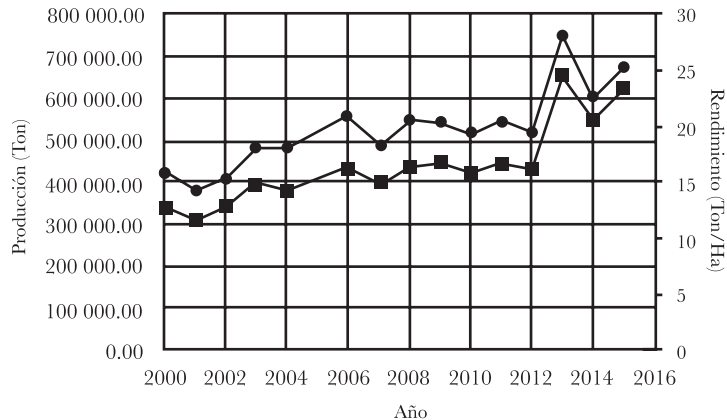


Figura 2. Producción (•) y rendimiento (□) de naranja cosechada en Tamaulipas desde 2000-2015

Los municipios de Hidalgo, Llera, Victoria, Güémez y Padilla principalmente, además de Casas y Mainero con menor producción, son los principales productores de la Zona Centro de Tamaulipas, regiones que lograron ubicar al estado en el segundo lugar a nivel nacional en la cosecha de cítricos, con una producción programada de 932 mil 750 toneladas en una superficie plantada de 47 mil 648 hectáreas (Figura 3). La naranja cultivada en Tamaulipas es más dulce que cualquiera que se cultiva en el país. Siendo el municipio de Padilla, el principal productor en el estado y segundo a nivel nacional.

Cuadro 3. Producción de naranja en Tamaulipas durante el 2017

Mes	Superficie sembrada (Ha)	Superficie cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)
Enero	37.004	559	13 190	23.596
Febrero	37.004	4 566	97 854	21.430
Marzo	37.004	7 657	177 019	23.118
Abril	37.004	10 113	245 173	24.243
Mayo	37.004	14 706	363 986	24.752
Junio	37.004	21 404	520 168	24.302
Julio	37.004	22 355	541 229	24.211
Agosto	37.004	25 031	589 343	23.545
Septiembre	37.004	25 597	598 284	23.374
Octubre	37.004	28 342	653 384	23.054
Noviembre	37.004	28 729	667 319	23.228
Diciembre	Datos no reportados			

Fuente: Elaborado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las Delegaciones de la SAGARPA.

Desarrollo de nuevos productos

Se ha evaluado la formulación de nuevos productos a partir del jugo y del aprovechamiento de todo el fruto utilizando tecnologías convencionales y emergentes, algunos de estos productos son:

Andrade et al., (2016) evaluaron la co-cristalización del zumo de naranja agria, modificando la proporción de jugo adicionado, pH y sólidos solubles del zumo, obteniendo co-cristales que constituyen una alternativa prometedora como fuente importante de compuestos bioactivos como la vitamina C.

Un extracto obtenido a partir de una mezcla de cáscara, pulpa y semillas obtenido por secado por aspersión fue estudiado para evaluar el contenido de polifenoles, propiedades antioxidantes y la inhibición de metaloproteinasas sobreexpresadas en enfermedades metabólicas. El estudio reveló que los flavonoides presentes en el cítrico son inestables en ambientes gástricos y el extracto microencapsulado mostró una incompleta disolución en fluidos biológicos simulados. Los microsistemas gastrorresistentes preparados conservaron el contenido de polifenoles, prolongaron la duración y eficiencia de la actividad antioxidante del extracto manteniendo sus efectos inhibitorios sobre las metaloproteinasas (Lauro et al., 2015).

Para la aplicación de la fibra de naranja en productos alimenticios, es necesario evaluar la composición, propiedades funcionales y la reología de la fibra tal como lo demostraron Lundberg et al., (2014), lo que permitirá a los fabricantes estar mejor informados en el diseño y fabricación de estos productos. Algunas aplicaciones de la fibra de naranja son en la elaboración de helados utilizándola como reemplazador de grasa (de Moraes et al., 2013), en yogurt evaluando sus propiedades viscoelásticas (Sendra et al., 2010) y propiedades reológicas (García et al., 2006).

Restrepo et al., (2011) evaluaron la viabilidad de desarrollar un producto con características funcionales a partir de cortezas de naranja, por incorporación de vitaminas D y E, utilizando la ingeniería de matrices a través de la técnica de impregnación a vacío. Las cortezas de naranja fueron desamargadas e impregnadas a vacío con soluciones de sacarosa de 45°Brix, lo que permitió obtener productos saludables con valor agregado.

Restrepo et al., (2012) evaluaron la viabilidad de desarrollar cortezas de naranja tipo *snack* fortificadas con potasio, sodio y vitaminas B1, B6 y B9 por medio de la técnica de impregnación a vacío como mecanismo de incorporación de la disolución; los resultados de la caracterización fisicoquímica no presentaron diferencias estadísticamente significativas por efecto del tratamiento de impregnación en los parámetros actividad de agua y pH, pero sí en los parámetros de porcentaje de humedad, °Brix y contenido de azúcares, con lo cual demostraron que las cortezas de naranja pueden ser aprovechadas en el desarrollo de productos con valor agregado usando ingeniería de matrices.

Productos de naranja

Las frutas cítricas antes eran comercializadas y consumidas exclusivamente como frutas frescas, aun en países donde no se produjeran cítricos. Esto fue posible debido a su extraordinaria estabilidad postcosecha lo que facilita el comercio internacional y el hecho de que la mayoría de las variedades de cítricos pueden permanecer por un largo tiempo en el árbol después de la maduración sin deteriorarse. A medida que la superficie cultivada y el tamaño de los cultivos aumentaron constantemente, la industrialización de los cítricos se convirtió en una necesidad.

Las industrias de pequeña escala para la producción de confituras, jaleas y mermeladas, además de la extracción de aceites esenciales, la industrialización a gran escala comenzó con el establecimiento de fábricas de jugos a principios del siglo XX, con el desarrollo del enlatado, extracción continua de jugos, pasteurización, refrigeración, congelación, procesos de concentración, procesamiento y almacenamiento aséptico condujeron a la producción de jugos congelados concentrados como uno de los productos cítricos más populares

durante muchos años. Por tanto, el consumo cada vez mayor de productos cítricos procesados particularmente el jugo de naranja impulsó el desarrollo de grandes plantas de procesamiento de cítricos, como un sector importante de la industria alimentaria, ya que aproximadamente el 25% de la producción mundial total de cítricos se procesa industrialmente.

La industria de procesamiento de cítricos se ha enfocado durante muchos años en la producción de jugos y aceites esenciales; se ha estimado que el 33% de los cítricos cosechados en el mundo se utiliza en la producción de jugos (Lohrasbi et al., 2010). El proceso de elaboración de jugo de naranja a partir de fruta fresca, consiste básicamente en seleccionar, lavar y exprimir las naranjas para extraer el jugo. Seguidamente se filtra para separar las semillas y sólidos en suspensión y por último se pasteuriza y llena en envases de vidrio, plástico, hojalata o cartón, según el nivel tecnológico que se tenga.

Los productos cítricos procesados y particularmente de jugo de naranja concentrado congelado impulsó el desarrollo de grandes plantas de procesamiento de cítricos, como un sector importante de la industria alimentaria. Al mismo tiempo, los refrescos a base de cítricos como las limonadas y las naranjas se convirtieron en el tipo principal de bebidas con sabor a frutas embotelladas. Durante muchos años, la fabricación de segmentos de cítricos enlatados adquirió una importancia considerable en China (naranjas Satsuma) e Israel (pomelo). En la actualidad, aproximadamente el 25% de la producción mundial total de cítricos se procesa industrialmente.

Subproductos de la naranja

El problema al que se enfrentan los residuos agroindustriales es que no existe una clara conciencia ambiental para su manejo, además de que falta capacidad tecnológica y recursos económicos para darles un destino final, así como una legislación específica para promover la gestión de este tipo de residuos, que asegure un buen manejo desde su generación hasta su disposición final. Aún en nuestros días, esta problemática prevalece a nivel mundial.

El cultivo de cítricos es uno de los más abundantes en el mundo y su fase industrial, en su cadena productiva, comprende productos como jugos, concentrados, néctares, purés, pastas, pulpas, jaleas y mermeladas. Los subproductos en la industria de jugos, constituidos por cáscaras (flavedo y albedo), semillas, membranas y vesículas de jugo, representan aproximadamente el 50% del peso de la fruta entera original. La cáscara de naranja constituye entre 60-65%, tejidos internos 30-35% y semillas 0-10% (Rojas et al., 2008).

Los residuos de cáscaras de naranja derivados de la obtención de jugo son frecuentemente vertidos en un terreno adyacente a los sitios de producción o

directamente en un vertedero. En algunas áreas, esto resulta en grandes extensiones de tierra que contienen cantidades considerables de desechos putrefactos que presentan un riesgo significativo para los cursos de agua locales y conducen a la producción incontrolada de gases de efecto invernadero (Siles et al., 2010).

Por consiguiente, la eliminación de las cáscaras frescas de naranja se está convirtiendo en un problema importante para muchas fábricas, ya que este desperdicio además de causar contaminación se está desperdiciando un material valioso para procesos posteriores de biorefinería. Bajo esa visión de un aprovechamiento integral Siles et al., (2016) evaluaron la viabilidad de la combustión de los residuos de cáscaras de naranja a través de un análisis de la composición de gases emitidos y temperatura de llama para estudiar las condiciones más adecuadas para la biometanización de estos residuos bajo diferentes condiciones de temperatura y después de remover los aceites esenciales, además de determinar la relación de mezclado más adecuada para el co-compostaje de estos residuos con la fracción orgánica de desechos sólidos municipales utilizando digestión anaerobia.

Cáscara

La corteza de naranja constituye aproximadamente del 40-50% del fruto, subproducto que podría aprovecharse para el desarrollo de alimentos con valor agregado, dada su composición química, como se muestra en el Cuadro 4, rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, además de pectina cuyas concentraciones varían entre 12.1-42.5 dependiendo de la parte del fruto.

Cuadro 4. Composición de subproductos de naranja (% en peso seco)

Subproducto	Cenizas	Azúcar	Grasa	Proteína	Pectina	Lignina	Celulosa	Hemicelulosa	Referencias
Cáscara de naranja	2.6	9.6	4.0	9.1	23.0	7.5	37.1	11.0	Marín et al., (2007).
Pulpa de naranja	2.6	6.0	1.5	6.6	12.1	7.5	24.5	7.6	Mamma et al., (2008)
Cáscara de naranja	3.5	16.9	1.95	6.5	42.5	0.84	9.21	10.50	Rivas et al., (2008).
Fibra de naranja	4.52	9.25	4.43	8.97	NR	NR	NR	NR	Fernández et al., (2009).
Cáscara de naranja	3.03	8.7	1.81	8.50	NR	NR	NR	NR	De Moraes et al., (2013).
Fibra de naranja	2.65	7.36	1.05	8.15	42.25	NR	15.95	10.06	Lundberg et al., (2014).

NR. No reportado

Sin embargo, hasta ahora las aplicaciones directas de la utilización de la cáscara de naranja incluyen su uso como alimento para ganado y fertilizante orgánico obtenido mediante compostaje; estas son las aplicaciones más simples para su implementación, ya que se requiere poca infraestructura o inversión, mientras que no se aprovechan los compuestos de alto valor presentes en este residuo y no aumentan el valor material de este residuo (Siles et al., 2010).

Entre los compuestos de alto valor en términos de potencial económico que pueden ser extraídos de la cáscara de naranja se encuentran los aceites esenciales y pectina. La cáscara de naranja contiene más de 5 kg de aceite por 1000 kg de naranjas y aproximadamente el 90% de este es D-limoneno. Los aceites esenciales son empleados en la industria alimentaria como saborizantes además de otras aplicaciones en la industria química, cosméticos y productos domésticos (Siles et al., 2010).

Fibra

La fibra dietética de frutos cítricos es una fuente alternativa a los cereales de alta calidad debido a su relación de fibra dietética soluble y compuestos bioactivos asociados (flavonoides, polifenoles, carotenoides y vitamina C) con propiedades antioxidantes, las cuales proveen quizá efectos adicionales como promotores de la salud (Marín et al., 2007). Las propiedades funcionales de la fibra dietética incluyen el volumen aparente, hidratación, propiedades hidrocoloidales y reológicas, las cuales contribuyen a la aplicación en el diseño y formulación durante la manufactura de los productos alimentarios (Gómez-Ordoñez et al., 2010). De Moraes et al., (2013) caracterizaron la fibra de naranja y su aplicación como reemplazador de grasa en helados, encontrando que las fibras mostraron una alta capacidad de retención de agua y aceite, asimismo un alto contenido de compuestos fenólicos y carotenoides, lo que condujo a la reducción de un 70% de grasa en el helado sin causar cambios significativos en los atributos de estos productos tales como el color, olor y textura.

Grigelmo y Martín (1999) realizaron la caracterización de la fibra dietética proveniente después de la extracción del jugo de 3 variedades de naranja (Valencia, Nabel y Salustiana), concluyendo de acuerdo a sus resultados varias aplicaciones potenciales tales como: agente de opacidad en bebidas, espesante y agente gelificante, así como aglutinante, texturizador y como ingrediente a granel bajo en calorías.

Cuadro 5. Composición de fibra dietética de la naranja

Fibra insoluble	Fibra soluble	Fibra dietética total	Referencias
22.5 ± 0.3	11.3 ± 0.3	36.9 ± 0.3	Grigelmo y Martín (1999)
54.0 ± 0.23	10.28 ± 0.30	64.3 ± 0.30	Figuerola et al., (2005)
48.2 ± 1.6	15.6 ± 1.5	63.7 ± 0.06	De Moraes et al., (2013)
49.53 ± 0.83	13.62 ± 0.12	63.24 ± 1.43	Wang et al., (2015)

En el estudio de Fernández et al., (2009) se evaluó la estabilidad de un polvo alto en fibra dietética a partir de naranja demostrando que este producto es estable basado en sus propiedades químicas, microbiológicas y fisicoquímicas con altas cantidades de fibra dietética y polifenoles. Este es un polvo muy higroscópico que puede ser protegido por material de empaque hasta por 6 meses, después de este tiempo, algunas propiedades funcionales muestran cambios que reducen la calidad del producto, siendo el mejor empaque al vacío y en condiciones de oscuridad durante su almacenamiento.

Aplicaciones biotecnológicas

Subproductos y residuos provenientes de diferentes agroindustrias, conteniendo cantidades importantes de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina, son sustratos atractivos para la producción de enzimas de aplicación industrial, principalmente de aquellas que son inducibles, entre las que destacan: las celulasas, las hemicelulasas, las xilanasas y las pectinasas, las cuales marcaron una época en la historia de la biotecnología (Saval, 2012).

El principal problema ambiental asociado con la cáscara de naranja es su alto contenido de carbohidratos fermentables que aceleran su degradación cuando no es cuidadosamente manejada (Lin et al., 2014). Por tanto, a través de procesos fermentativos, la conversión de lignocelulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) presente en los subproductos de naranja, constituye componentes orgánicos más grandes después de la extracción de productos de mayor valor. En el Cuadro 6 se muestran trabajos de investigación donde se han utilizado los subproductos de la naranja como sustratos para la obtención de productos de alto valor con el fin de maximizar el valor de estos subproductos.

Cuadro 6. Aprovechamiento de subproductos de naranja para el desarrollo de productos mediante vías fermentativas

Sustrato	Productos	Cepa	Nivel	Referencias
Pellets de pulpa de naranja	Pectinasa	<i>Tubercularia vulgaris</i>	Laboratorio	Fonseca y Said (1994).
Cáscara de naranja	Pectina liasa y poligalacturonasa	<i>Penicillium viridicatum RFC3</i>	Laboratorio	Silva et al., (2002).
Cáscara de naranja	Pectinasa	<i>Aspergillus niger</i>	Laboratorio	Dhillon et al., (2004).
Cáscara de naranja, cáscara de piña y cachaza de caña papelera	Dextrano y fructosa	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	Laboratorio	Rodríguez y Hansen (2007).
Residuos de cítricos y lodos resultantes de la industrialización de cítricos	Bioplaguicida	<i>Trichoderma harzianum T-78</i>	Piloto	López et al., (2010).
Cáscara de naranja	Pectinasas	<i>Bacillus spp.</i>	Laboratorio	Arellano et al., (2015).
Mesocarpo de naranja	Endopoligalacturonasa	<i>Kluyveromyces marxianus CCEBI 2011</i>	Laboratorio	Serrat et al., (2016).

A partir de la cáscara de naranja, piña y cachaza de caña papelera utilizadas como sustratos por la cepa *Leuconostoc mesenteroides* se produjo dextrano y fructosa por vía fermentativa a nivel laboratorio, concluyendo que la dextrosa obtenida es grado técnico y puede ser utilizada como espesante en la industria de alimentos o como floculante para el tratamiento de aguas residuales (Rodríguez y Hansen, 2007).

La cáscara de naranja ha demostrado ser una buena fuente para la producción de bioetanol de segunda generación, para ello primero se somete a un pretratamiento, un proceso de hidrólisis ácida o enzimática y la subsecuente fermentación por levaduras, principalmente *Saccharomyces cerevisiae* (Wilkins et al., 2007).

López et al., (2010) obtuvieron a nivel piloto, un bioplaguicida utilizado para el control de *Fusarium oxysporum* en plantaciones de melón utilizando residuos de cítricos y lodos resultantes de la industrialización de cítricos, con la cepa *Trichoderma harzianum T-78*. La cáscara de naranja también es utilizada para la producción de pectinasas que son un grupo heterogéneo de enzimas relacionadas (pectinesterasas, enzimas despolimerizantes y protopectinasa). Estas enzimas son utilizadas en la

extracción de jugos de frutas y su clarificación, limpieza del algodón, desgomado de fibras vegetales, tratamiento de aguas residuales, extracción de aceites vegetales, té y fermentaciones de café, blanqueo de papel, alimentación de aves de corral, en bebidas alcohólicas (Jayani et al., 2005).

Tendencias para el aprovechamiento integral de la naranja

En los últimos años se ha podido observar una tendencia a la baja en la producción de algunos bienes primarios y los procesos para añadir valor agregado a estos productos son escasos. Lo anterior muestra la necesidad de impulsar apoyos estratégicos para potencializar el aprovechamiento óptimo de las ventajas competitivas del rubro.

Para mejorar la citricultura nacional se requiere hacerla más empresarial, aumentando el rendimiento por unidad de superficie y disminuyendo los costos por tonelada de fruta producida; esto permitirá competir más ventajosamente en el mercado internacional, principalmente con Brasil y Florida. Además, un manejo más eficiente alarga la vida productiva de las huertas, al mantener los árboles sanos y vigorosos por más tiempo. Asimismo incrementar el consumo interno de los cítricos a nivel regional, estatal, nacional, ya sea como fruta fresca o como fruta procesada en todas sus variantes (INIFAP, 1995).

Algunas estrategias establecidas por SAGARPA, 2017) para maximizar el desarrollo productivo nacional son: implementar un programa de mejoramiento de infraestructura y equipamiento agrícola básico y especializado, producir y propagar material vegetativo certificado, implementar una estrategia de comercialización nacional así como una campaña para incentivar el consumo, implementar una campaña nacional de protección fitosanitaria y manejo integral de cultivo y consolidar esquemas de capitalización al productor para impulsar su acceso al financiamiento.

A nivel internacional, el consumo de cítricos procesados en los países industrializados está cediendo y los consumidores están prefiriendo productos en fresco, debido a las tendencias por comer sano y sin azúcar añadida. Parámetros como la calidad, apariencia, sabor y frescura son los que determinan su éxito comercial; mientras que en los países en vías de desarrollo que mejoran su ingreso per cápita, existe una tendencia a comprar más productos procesados (Gao et al., 2011).

Uno de los principales retos en el desarrollo de productos alimentarios es el aprovechamiento integral de todos los productos y subproductos que se puedan obtener de las diferentes materias primas agroalimentarias bajo la perspectiva de Sistema Alimentario Sostenible, por lo que en el caso de la naranja, se generan cáscaras y remanentes residuales asociados de membranas resultantes de la extracción de jugo que representan un problema significativo de eliminación, especialmente en

aquellas regiones donde el cultivo de naranja es muy importante como en el caso de Tamaulipas donde estos subproductos representan recursos potencialmente valiosos que pueden aprovecharse de manera integral para el desarrollo de productos de alto valor. Entre los usos que habitualmente se le dan a estos subproductos son: su utilización como sustrato para producir alimentos para animales, fertilizantes, etanol, metano, enzimas industriales y proteínas de células individuales, además de la obtención de compuestos bioactivos, aceites esenciales y pectina.

Bajo un esquema de utilización integral de los productos y subproductos de la naranja, se tomó como referencia la propuesta realizada por Siles et al., (2010) desde una perspectiva de aprovechamiento integral, en la cual se propone realizar los diferentes procesos que se muestran en la Figura 4.

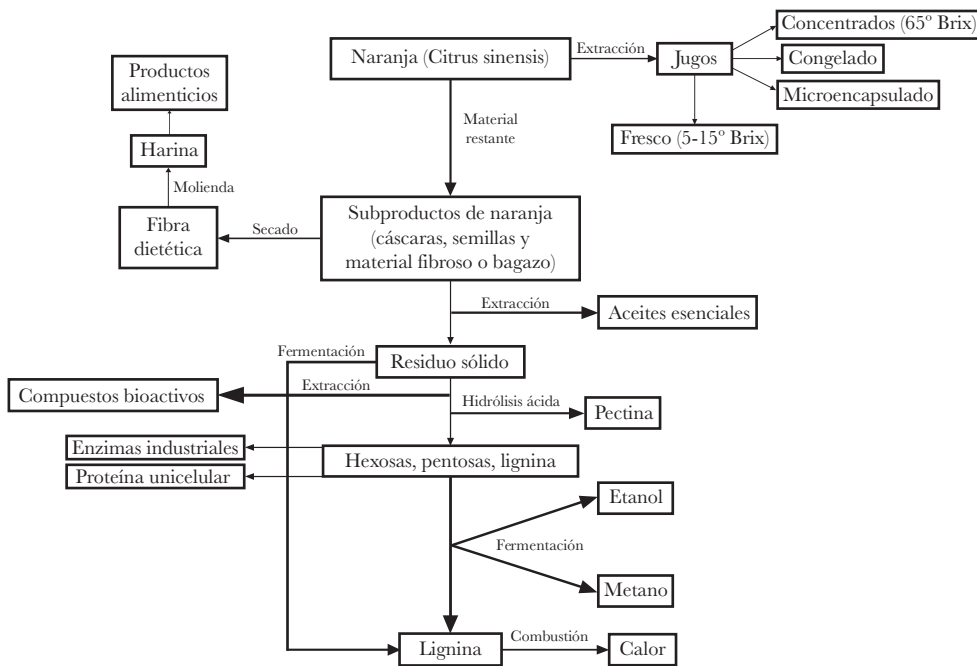


Figura 4. Representación esquemática del aprovechamiento integral de la naranja (Adaptada de Siles et al., 2010)

Mediante el esquema propuesto para el aprovechamiento integral del jugo y los subproductos de la naranja, se obtienen principalmente aceites esenciales de la cáscara cuyos componentes principales son limoneno, hesperidina, naringerina antes de la extracción del jugo y posterior a la extracción del jugo el material sobrante se deshidrata para la obtención de pectinas y ambos productos son de alto valor agregado. Sin embargo, en las jugueras comerciales o lugares donde se produce jugo

para su venta en fresco tales como puestos, cafeterías, restaurantes, estos residuos son desechados directamente a la basura. En algunos casos pasan recolectores que se los llevan para la alimentación del ganado y/o su uso como compostas, por lo que siguen constituyendo al menos en la zona centro de Tamaulipas, un importante residuo. En este esquema se muestran alternativas del uso de la biomasa que queda después de la extracción del jugo, la cual está compuesta, además de pectina, de material lignocelulósico, que es una excelente fuente de azúcares como hexosas y pentosas que son sustratos que pueden ser utilizados para el crecimiento de microorganismos capaces de generar otros productos de alto valor a través de procesos fermentativos como bioetanol, metano, enzimas de interés industrial, proteína unicelular, entre otros. Y el material residual que es la lignina, podría ser utilizada como fuente de polifenoles que son compuestos bioactivos con importantes propiedades biológicas, lacasas o como fuente de energía.

A pesar de que la citricultura en México cuenta con una producción competitiva a nivel internacional, específicamente en Tamaulipas es importante considerar la producción de naranja desde una perspectiva de sistema alimentario sostenible, lo que representa incrementar el rendimiento por unidad de superficie, disminuir los costos por tonelada de fruta producida, realizar un manejo postcosecha adecuado con el fin de reducir pérdidas y establecer parámetros altos de calidad para poder mejorar las perspectivas de mercado y acceder a ellos y por supuesto incentivar a un mayor consumo de este cítrico a nivel regional, estatal, nacional ya sea fresco o procesado aprovechando los avances que hay con respecto a su aprovechamiento integral que contribuirá no solo al desarrollo económico de los agricultores, sino también, al valor nutritivo que esta fruta aporta gracias a todos los nutrimentos y compuestos bioactivos presentes en ella.

Lista de referencias

- Agócs, A., Nagy, V., Szabó, Z., Márk, L., Ohmacht, y R., Deli, J. (2007). Comparative study on the carotenoid composition of the peel and the pulp of different citrus species. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 8, 390-394.
- Andrade, R. D., Blanquicett, K., y Rangel, R. D. (2016). Efecto del pH, Sólidos Solubles y Zumo Adicionado sobre el color y la Vitamina C de Zumo de Naranja Agría Cocrystalizado. *Información Tecnológica*, 27(6), 129-134.
- Aranguren, M., Rodríguez, J., Ojeda, I., y Fagundo, M. (2000). Cambios estacionales en la calidad de los frutos cítricos destinados a la producción industrial de jugos en Jagüey Grande. *Revista CITRIFRUT*, 1-3, 12-12.
- Arellano, J., Ilich, S., Salazar, M., Rodríguez, I., Torres, P., y Alarcón, W. (2015). Producción de pectinasas por *Bacillus spp.* a partir de cáscaras de naranja y de toronja como fuente de carbono. *Revista Rebiol*, 35(1), 62-69.
- Bittar M.R., Capobiango M., Chin S.T., Monteiro M., Marriott P.J. (2015). Identification of odour-active compounds of pasteurised orange juice using multidimensional gas chromatography techniques. *Food Research International* (75), 281-288.
- Cano A., Medina A., Bermejo A. (2008). *Bioactive compounds in different citrus varieties*. de Moraes Crizel, T., Jablonski, A., de Oliveira Rios, A., Rech, R., y Flôres, S. H. (2013). Dietary fiber from orange byproducts as a potential fat replacer. *LWT-Food Science and Technology*, 53(1), 9-14.
- Del Toro, C. L. S., Pérez, V. N., Rodríguez, P. R., Córdova, J. L., y Lugo, E. C. (2015). Compuestos bioactivos de cítricos: extracción, caracterización y actividad antioxidante. *Alimentos funcionales y compuestos bioactivos*. Plaza y Valdés, México, 191-219.
- Dhillon, S. S., Gill, R. K., Gill, S. S., y Singh, M. (2004). Studies on the utilization of citrus peel for pectinase production using fungus *Aspergillus niger*. *International Journal of Environmental Studies*, 61(2), 199-210.
- Discrimination among cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*. (21), 377-381.
- García, F. J. P., Sendra, E., Lario, Y., Fernández-López, J., Sayas-Barberá, E., y Pérez-Álvarez, J. A. (2006). Rheology of orange fiber enriched yogurt. *Milchwissenschaft*, (1), 55-59.
- Fernández, J. L., Sendra, E. N., Navarro, C., Sayas, E., Viuda, M. M., y Álvarez, J. A. P. (2009). Storage stability of a high dietary fibre powder from orange by-products. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(4), 748-756.
- Figuerola, F., Hurtado, M. L., Estévez, A. M., Chiffelle, I., y Asenjo, F. (2005). Fibre concentrates from apple pomace and citrus peel as potential fibre sources for food enrichment. *Food Chemistry*, 91(3), 395-401.

- Fonseca, M. J. V., y Said, S. (1994). The pectinase produced by *Tubercularia vulgaris* in submerged culture using pectin or orange pulp pellets as inducer. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 42, 32–35.
- Gao, Z., House, L. O., Gmitter, F., Valim, M. F., Plotto, A. y Baldwin, E. (2011). Consumer preferences for fresh citrus: Impacts of demographic and behavioral characteristics. *International Food and Agribusiness Management Review*, 14(1), 23-40.
- Gobierno del Estado y Productores hacen sinergia en beneficio de la citricultura. Secretaría de Desarrollo Rural. Gobierno del Estado de Tamaulipas. Consultado diciembre 2017. Publicado el 19 de octubre de 2017. Disponible en: <http://www.tamaulipas.gob.mx/desarrollorural/2017/10/gobierno-del-estado-y-productores-hacen-sinergia-en-beneficio-de-la-citricultura/>
- Gómez-Ordóñez, E., Jiménez-Escrig, A. y Rupérez, P. (2010). Dietary fiber and physicochemical properties of several edible seaweeds from the northwestern Spanish coast. *Food Research International*, 43, 2289–2294.
- Grigelmo, N. M., y Marín, O. B. (1999). Characterization of dietary fiber from orange juice extraction. *Food Research International*, 31(5), 355-361.
- Jayani, R. S., Saxena, S., y Gupta, R. (2005). Microbial pectinolytic enzymes: a review. *Process Biochemistry*, 40, 2931–2944.
- Kato, M., Ikoma, Y., Matsumoto, H., Sugiura, M., Hyodo, H., y Yano, M. (2004). Accumulation of carotenoids and expression of carotenoid biosynthetic genes during maturation in citrus fruit. *Plant Physiology*, 134, 1-14.
- Lauro, M. R., Crasci, L., Carbone, C., Aquino, R. P., Panico, A. M., y Puglisi, G. (2015). Encapsulation of a citrus by-product extract: Development, characterization and stability studies of a nutraceutical with antioxidant and metalloproteinases inhibitory activity. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 169-176.
- Ledesma-Escobar, C. A., y de Castro, M. D. L. (2014). Towards a comprehensive exploitation of citrus. *Trends in Food Science and Technology*, 39(1), 63-75.
- Lin, C. S. K., Koutinas, A. A., Stamatelatos, K., Mubofu, E. B., Matharu, A. S., Kopsahelis, N., Pfaltzgraff, L. A., Clark, J. H., Papanikolaou, S., Kwan, T. H., y Luque, R. (2014). Current and future trends in food waste valorization for the production of chemicals, materials and fuels: a global perspective. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8, 686-715.
- Lohrasbi, M., Pourbafrani, M., Niklasson, C., y Taherzadeh, M. J. (2010). Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products. *Bioresource Technology*, 101(19), 7382-7388.
- López, R. M., Bernal, A. V., Ros, M., Tittarelli, F., Canali, S., Intrigliolo, F., y Pascual, J. A. (2010). Utilisation of citrus compost-based growing media amended with

- Trichoderma harzianum* T-78 in *Cucumis melo* L. seedling production. *Bioresource Technology*, 101(10), 3718-3723.
- Lundberg, B., Pan, X., White, A., Chau, H., y Hotchkiss, A. (2014). Rheology and composition of citrus fiber. *Journal of Food Engineering*, 125, 97-104.
- Mamma, D., Kourtoglou, E., y Christakopoulos, P. (2008). Fungal multienzyme production on industrial byproducts of the citrus-processing industry. *Bioresource Technology*, 99, 2373–2383.
- Manual de producción de naranja para Veracruz y tabasco. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Libro Técnico ISBN. 968-800-457-X. Libro Técnico Núm. 2, División Agrícola. Noviembre 1995.
- Marín, F. R., Soler-Rivas, C., Benavente-García, O., Castillo, J., y Pérez-Álvarez, J. A. (2007). By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres. *Food Chemistry*, 100, 736-741.
- Monografía de la Naranja. Secretaría de Desarrollo Rural. Gobierno del Estado de Tamaulipas, Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (OEIDRUS). Disponible en: http://www.campotamaulipas.gob.mx/oeidruss/monografias/perennes/Naranja_monografias.pdf
- Pérez-Cacho, P. R., y Rouseff, R. L. (2008). Fresh squeezed orange juice odor: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48, 681–695.
- Planeación Agrícola Nacional 2016-2030. Cítricos limón, naranja y toronja mexicanos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) 2017. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257073/Potencial-C_tricos-parte_uno.pdf
- Plaza L., Crespo I., Pascual-Teresa S., Ancos B., Sanchez-Moreno C. (2011). Impact of minimal processing on orange bioactive compounds during refrigerated storage. *Food Chemistry*. (124). 646-651.
- Rapisarda, P., Tomaino, A., Lo Cascio, R., Bonina, F., De Pasquale, A., y Saija, A. (1999). Antioxidant effectiveness as influenced by phenolic content of fresh orange juices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(11), 4718-4723.
- Restrepo, A. M. D., Rodríguez, E. S., y Manjarrés, K. P. (2011). Cortezas de naranja comestibles: una aproximación al desarrollo de productos con valor agregado a partir de residuos agroindustriales. *Producción Más Limpia*, 6(2), 47-57.
- Restrepo, A. M., Arredondo, A., Morales, C., Tamayo, M., Benavides, Y. L., Bedoya, V., y Vélez, C. (2012). Aplicación de la técnica de impregnación a vacío en el desarrollo de cáscaras de naranja mínimamente procesadas fortificadas con potasio, sodio, y vitaminas B₁, B₆ y B₉. *Journal of Engineering and Technology*, 1(1), 8-16.

- Rivas, B., Torrado, A., Torre, P., Converti, A., y Domínguez, J. M. (2008). Submerged citric acid fermentation on orange peel autohydrolysate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 2380–2387.
- Rodríguez, O. V. y Hansen, H. (2007). Obtención de dextrano y fructosa, utilizando residuos agroindustriales con la cepa *Leuconostoc mesenteroides* NRRL B512-F. *Revista de la Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 7, 159-172.
- Rojas, J., Perea, A., y Stansheko, E. (2008). Obtención de aceites esenciales y pectinas a partir de subproductos de jugos cítricos. *Vitae*, 16, 110-115.
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, presente y futuro. *BioTecnología*, 16(2), 14-46.
- Schauss, A. G., Wu, X., Prior, R. L., Ou, B., Huang, D., Owens, J., Agarwal, A., Jensen, G. S., Hart, A. N., & Shanbrom, E. (2006). Antioxidant capacity and other bioactivities of the freeze-dried Amazonian palm berry, *Euterpe oleracea* Mart. (Acai). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 8604–8610.
- Secretaría de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM) y el Instituto Nacional de Estadísticas de Geografía e Informática (INEGI) 2017. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/articulos/mexico-en-cifras-como-vamos-en-el-subsector-agricola-en-2017?idiom=es>
- Sendra, E., Kuri, V., Fernández-López, J., Sayas-Barbera, E., Navarro, C., y Pérez-Álvarez, J. A. (2010). Viscoelastic properties of orange fiber enriched yogurt as a function of fiber dose, size and thermal treatment. *LWT-Food Science and Technology*, 43(4), 708-714.
- Serrat, M. D., Ussemame, C. M., Camacho, M. I. P., Méndez, A. A. H., y Bermúdez, R. C. (2016). Valorización de residuos agroindustriales ricos en pectinas por fermentación. *Tecnología Química*, 36(1), 1-13.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2016. Monografía de la Naranja. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166471/naranja_monograf_a.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2017. Márgenes de comercialización de frutas y hortalizas. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/archivo/documentos?order=DESC&page=1>
- Shen Ch., Bergen V., Chyu M., Jenkins M.R., Mo H., Chen Ch., Kwun I. (2012). Fruits and dietary phytochemicals in bone protection. *Nutrition research* (32). 897-910
- Siles, L. A., Li, Q. J., y Thompson, I. P. (2010). Biorefinery of waste orange peel. *Critical Reviews in Biotechnology*, 30(1), 63-69.

- Siles, J. A., Vargas, F., Gutiérrez, M. C., Chica, A. F., y Martín, M. A. (2016). Integral valorisation of waste orange peel using combustion, biomethanisation and co-composting technologies. *Bioresource Technology*, 211, 173-182.
- Silva, D., Martins, E. D. S., Silva, R. D., y Gomes, E. (2002). Pectinase production by *Penicillium viridicatum* RFC3 by solid state fermentation using agricultural wastes and agro-industrial by-products. *Brazilian Journal of Microbiology*, 33(4), 318-324.
- Titta, L., Trinei, M., Stendardo, M., Berniakovich, I., Petroni, K., Tonelli, C., Riso, P., Porrini, M., Minucci, S., Pelicci, P. G., Rapisarda, P., Reforgiato-Recupero, G., y Giorgio, M. (2010). Blood orange juice inhibits fat accumulation in mice. *International Journal of Obesity*, 34(3), 578-588.
- USDA. (2016). Citrus: World Market and Trade. <https://apps.fas.usda.gov/psonline/circulars/citrus.pdf> (Consultado el 24 de marzo de 2016).
- Wang, L., Xu, H., Yuan, F., Pan, Q., Fan, R., y Gao, Y. (2015). Physicochemical characterization of five types of citrus dietary fibers. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4(2), 250-258.
- Wilkins, M. R., Widmer, W. W., y Grohmann, K. (2007). Simultaneous saccharification and fermentation of citrus peel waste by *Saccharomyces cerevisiae* to produce ethanol. *Process Biochemistry*, 42(12), 1614-1619.
- Willats, W. G. T., Knox, J. P., y Mikkelsen, J. D. (2006). Pectin: new insights into an old polymer are starting to gel. *Trends in Food Science and Technology*, 17, 97-104.
- Yang J., & Hai R. (2009). Induction of phase II enzyme, quinone reductase, in murine hepatoma cells in vitro by grape extracts and selected phytochemicals. *Food Chemistry*. (114). 898-904.

Capítulo II





Aprovechamiento de los residuos de la industrialización de limón persa para la extracción de flavonoides bioactivos

Dra. Anaberta Cardador Martí¹

Dr. José Daniel Padilla de la Rosa²

Resumen

El limón persa (*Citrus latifolia*) es un fruto que carece de semillas, su cultivo se ha incrementado en las últimas décadas, crece en áreas tropicales y subtropicales. El principal uso industrial del limón y otros cítricos es la obtención de jugo y aceites esenciales. Los subproductos de las industrias procesadoras de jugo de cítricos son aproximadamente el 50% del fruto con un contenido de humedad de aproximadamente 80%. Los usos dados a los residuos de cítricos por la industria incluyen la utilización de la cáscara para elaborar aceites esenciales, pectina y bases para bebidas mientras que la pulpa es usada para preparar mermelada; el bagazo y la semilla son usados para preparar aceites y alimento para ganado. Los aceites esenciales y extractos obtenidos a partir de cáscara y semillas de cítricos contienen compuestos activos cuyas propiedades incluyen actividades antiinflamatorias, anticancerígenas, antioxidantes, anti-obesidad, entre otras. Los residuos de la industria de los cítricos son una fuente atractiva para la obtención de compuestos con propiedades activas y potencial aplicación en diversas industrias como la alimentaria, cosmética y farmacéutica.

Palabras clave: residuos de cítricos, aceites esenciales, flavonoides, antioxidantes.

¹ Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Epigmenio González 500. Querétaro, México, Autor de correspondencia: mcardador@itesm.mx

² Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A. C. (CIATEJ), Normalistas 800. Guadalajara, Jalisco. México.

El limón persa

Limón Persa o *Tahiti Lime*, *Persian Lime* o *Bearss Lime* (*Citrus latifolia* Tan.), es un fruto que carece de semillas por ser un triploide. Se considera como un híbrido desarrollado entre *Citrus aurantifolia* y algún otro *Citrus*. Se desarrolla en áreas tropicales y subtropicales. El limón ocupa dentro de los cítricos el segundo lugar en importancia, tanto por su consumo en fresco como por su uso industrial. Se considera que el origen del limón persa es el continente asiático, de donde fue introducido por los árabes al norte de África y a Europa, principalmente a España. Con la colonización española, el limón fue traído a México donde ahora ocupa un lugar importante en la citricultura nacional.

Actualmente, el limón se ubica dentro del grupo de las principales frutas producidas en México, ocupando el quinto lugar mundial en lo que se refiere a superficies cosechadas, cuarto lugar en importancia de volúmenes de producción, sexto sitio en cuanto al valor de su producción, y quinto por lo que a volúmenes exportados se refiere.

Para México, la citricultura es una actividad de gran importancia dentro de la fruticultura nacional y se destina aproximadamente medio millón de hectáreas para este propósito, las cuales se distribuyen en 23 estados con clima tropical y subtropical de la república mexicana. Los estados de mayor importancia en producción son Veracruz, con el 42% y San Luis Potosí y Tamaulipas, que suman más del 53% de la superficie sembrada y cosechada (INFOASERCA, 2010).

Producción y cultivo de limón persa

En México, la producción de limón está destinada principalmente a dos variedades: el limón persa o sin semilla, y el limón mexicano o con semilla. Cifras del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) informan que Veracruz (717 014 toneladas); Michoacán (619 612 t), y Oaxaca (263 448 t) se ubicaron como los mayores productores de limón durante 2016, colocando a México a nivel internacional en segundo lugar de producción. La producción nacional obtenida en ese periodo fue de 2 439 477 toneladas de limón, 4.9% por arriba de lo alcanzado en 2015.

Industrialización de los cítricos

El principal uso industrial del limón y otros cítricos es la obtención de jugo y aceites esenciales. En México existe un número considerable de industrias que producen aceite de limón y que llegan a procesar como mínimo 500 toneladas diarias del fruto fresco, aproximadamente un 45% de jugo, siendo el resto pulpa y cáscara. Los usos dados al limón por la industria incluyen la utilización de la cáscara para elaborar aceites esenciales, pectina y bases para bebidas. La pulpa es usada para

preparar mermelada; el bagazo y la semilla son usados para preparar aceites y alimento para ganado; de la fruta fresca se extrae jugo pasteurizado, concentrado, helado y deshidratado; y con los subproductos del jugo se pueden derivar vinagre, alcohol y ácido cítrico usados por la industria farmacéutica.

Los subproductos de las industrias procesadoras de jugo de cítricos son aproximadamente el 50% del fruto con un contenido de humedad de aproximadamente 80%. Por ejemplo, en España en 2011, se produjeron aproximadamente 500 mil toneladas de desechos cítricos, derivados de la obtención de jugo de naranja (Alvarez et al., 2018). El incremento en la industrialización y el consecuente deterioro del medio ambiente, se hacen patentes en las regiones donde se lleva a cabo el procesamiento para la obtención de bienes de consumo, como el caso de la industrialización del limón, por lo que se deben encontrar soluciones con el fin de que los desechos no sean dañinos y encontrar el equilibrio entre productividad y sustentabilidad, dando un valor agregado a los residuos finales.

Usos de los subproductos de la producción de jugos de cítricos

En el Cuadro 1 se describen algunos de los usos propuestos para aprovechar los residuos de la producción de jugo de cítricos.

Cuadro 1. Diferentes productos obtenidos a partir de los residuos de cítricos

Tipo de producto	Referencias
Pectina	(Pasandide et al., 2017, Pourbafrani et al., 2010)
Pectinasas	(Ahmed et al., 2016)
Bioetanol	(Boluda-Aguilar y López-Gómez 2013, Alvarez et al., 2018, Choi et al., 2013, John et al., 2017, Lohrasbi et al., 2010, Pourbafrani et al., 2010, Taghizadeh-Alisaraci et al., 2017, Wilkins et al., 2007)
Carotenoides	(Boukroufa, Boutekedjiret, y Chemat 2017)
Aceites esenciales	(Bustamante et al., 2016)
Hesperetin	(Céliz, Díaz, y Daz 2018, Wang et al., 2018)
Pigmentos	(Kantifedaki et al., 2018)
Metano	(Lotito et al., 2018, Su, Tan, y Xu, 2016)
Ácido succínico	(Patsalou et al., 2017)
Alimento animal	(Tripodo et al., 2004)
Limoneno	(Lohrasbi et al., 2010)

La cáscara y las semillas son los residuos primarios de la obtención de aceites esenciales. Las cáscaras son fuente de pectinas, aceites y limoneno y pueden utilizarse

como alimento para ganado. Las semillas son ricas en ácidos grasos insaturados, aunque estos no son obtenidos comercialmente. Adicionalmente, las semillas pueden utilizarse para obtener triterpenoides, compuestos con un sabor extremadamente amargo pero que pueden tener diversas actividades biológicas (Breksa et al., 2009).

Uno de los primeros usos que se dio a los residuos de cítricos fue la producción de pectina. La pectina es una familia de heteropolisacáridos que se encuentran en la pared celular de las plantas, constituyen hasta un 3% de la pared celular. El principal polímero de la pectina consiste en unidades de ácido D-galacturónico unidas por enlaces α (1 \rightarrow 4), los grupos ácidos a lo largo de la cadena están esterificadas con metoxilo o acetilo.

La cáscara de *Citrus medica* ha sido utilizada para obtener pectina con un rendimiento de 5.94%, mediante una extracción acuosa (Pasandide et al., 2017). Este rendimiento fue superior al obtenido por Pourbafrani et al., (2010), con sólo 34 kg de pectina por tonelada de cáscara de naranja (3.4%).

Adicional a la pectina, también se han utilizado los residuos de cítricos para obtener pectinasas. La fermentación sumergida de cáscara de naranja por *Aspergillus niger*, produjo $117.1 \pm 3.4 \mu\text{M}/\text{mL}$ de pectinasa después de 5 días de fermentación. Esto hace que la producción de pectinasa a partir de una materia prima barata, sea rentable para su aplicación industrial (Ahmed et al., 2016).

Uno de los usos propuestos para los residuos de cítricos es la obtención de bio-combustibles, con el fin de reducir el uso de combustibles fósiles y por lo tanto las emisiones de gases de invernadero. En este sentido, Álvarez et al., (2018), propusieron utilizar un proceso de pirólisis para obtener bioetanol. Posterior a la aplicación de pirólisis, obtuvieron un líquido cuya composición incluyó alcoholes, aldehídos, ácidos carboxílicos, furanos y fenoles, resultantes de las pectinas, hemicelulosa, celulosa y lignina contenidas en los subproductos de naranja.

Por otra parte Boluda-Aguilar y López-Gómez (2013) utilizaron expansión por vapor e hidrólisis enzimática como pretratamiento de residuos del limón (*Citrus limon L.*) para producir bioetanol, ácido galacturónico y otros subproductos como d-limoneno y pellets de pulpa. El tratamiento de explosión por vapor combinado con hidrólisis enzimática logró un rendimiento de 60 L de etanol por cada 1 000 kg de residuos de limón en peso fresco. Un proceso similar de expansión e hidrólisis se aplicó sobre cáscara de mandarina para producir bioetanol por fermentación en medio líquido por *Saccharomyces cerevisiae*. El rendimiento obtenido fue de 39.8 g de etanol por litro de medio de cultivo (Choi et al., 2013).

John et al., (2017) utilizaron una hidrólisis ácida acoplada con expansión sobre la cáscara de lima dulce, obteniendo una producción de bioetanol de 18%. Procesos similares, utilizando ácido sulfúrico para la hidrólisis de los carbohidratos de la cáscara de cítricos, han sido desarrollados por Pourbafrani et al., (2010).

Adicional a la producción de biocombustibles, los residuos de cítricos han sido utilizados para obtener otros productos como carotenos a partir de cáscara de naranja (Boukroufa, Boutekedjiret, y Chemat, 2017), hesperetina de *Citrus aurantium* (Céliz, Díaz, y Daz, 2018), ácido succínico (Patsalou et al., 2017), limoneno (Lohrasbi et al., 2010) y otros productos utilizados para la alimentación animal como pellets (Tripodo et al., 2004).

Como se ha mencionado anteriormente, los usos de los residuos de cítricos cada vez son más diversos, dando valor agregado a un subproducto y resolviendo un problema de contaminación ambiental.

Las aplicaciones de los residuos de cítricos han ido un paso más allá, abarcando la salud humana. En el Cuadro 2 se describen algunos de los procesos relacionados con salud en los que se han evaluado compuestos obtenidos de residuos cítricos.

Cuadro 2. Aplicaciones en salud de productos obtenidos a partir de los residuos del procesamiento industrial de cítricos

Tipo de producto	Aplicación	Referencias
Aceite esencial	Antiinflamatorio	(Maurya et al., 2018)
	Anti cáncer	(Nair et al., 2017)
	Antioxidante	(Ndayishimiye y Chun, 2017; Ndayishimiye, Lim y Chun, 2018)
	Antimicrobiano	(Ndayishimiye, Lim, y Chun 2018)
Limonoides	Antienvjecimiento	(Minamisawa et al., 2017)
Flavonoides	Antilipogénico	(Nakajima et al., 2016)
Polisacáridos	Inmunomoduladores	(Shin, Park, y Shin, 2018)

El potencial anticancerígeno del aceite esencial obtenido de la cáscara de diversos cítricos ha sido evaluado. Extractos y aceites esenciales de *Citrus medica*, *C. sinensis*, *C. maxima*, *C. limon* y *C. reticulata*, se aplicaron en diversos ensayos para medir su potencial inhibitorio de líneas celulares cancerígenas. El extracto acuoso de *C. reticulata*, indujo arresto del ciclo celular de células ascíticas de linfoma de Dalton seguido por condensación nuclear, ruptura de membrana, formación de cuerpos apoptóticos, daño del ADN y finalmente apoptosis (Nair et al., 2017). La actividad anticancerígena ha sido atribuida a polimetoxiflavonas o limonoides presentes en la cáscara de los cítricos.

El aceite esencial de la cáscara de *C. limeta*, al ser evaluado en un ensayo de macrófagos mostró inhibición de citocinas proinflamatorias (TNF- α , IL-6, IL-1 β); al ser ensayados *in vivo*, en el modelo de irritación de oreja de ratón con 12-O-tetradecanoylphorbol-13-acetato, se observó la inhibición de citocinas

proinflamatorias y el daño histológico en la oreja, indicando el potencial antiinflamatorio del aceite esencial (Maurya et al., 2018).

El potencial antioxidante de extractos de residuos de cítricos ha mostrado estar presente. Los carotenoides extraídos de la cáscara de *Yuzu ichandrin*, inhibieron de manera efectiva a los radicales libres sal diamónica del ácido 2,20-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfónico) (ABTS), y 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) (Ndayishimiye, Lim, y Chun, 2018; Ndayishimiye y Chun, 2017). Los carotenoides y aceite esencial de este fruto también han mostrado inhibición del crecimiento de bacterias Gram negativas (*Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*), así como de Gram positivas tal como *Bacillus cereus* y *Staphylococcus aureus* (Ndayishimiye, Lim, y Chun, 2018).

Generalmente, los extractos de residuos de cítricos se utilizan crudos. Nakajima et al., (2016) diseñaron un proceso en el que los extractos se fermentan para obtener un extracto rico en agliconas de flavanonas. Estas agliconas han mostrado una mejor biodisponibilidad así como incremento en las actividades biológicas como la capacidad para atrapar al radical libre DPPH. Otra actividad biológica importante mostrada por estas agliconas es la capacidad para inhibir la absorción de lípidos por adipocitos, dicha propiedad se demostró utilizando pre-adipocitos de ratón 3T3-L1. Por lo tanto, las agliconas hesperitina y naringenina, tienen potencial para tratar obesidad.

Los extractos de *Citrus unshiu* cuentan con numerosas propiedades biológicas, tales como anti cáncer, antiadipogénicos y antimicrobianos. Estas propiedades se han relacionado no solo con los flavonoides, sino también con polisacáridos. Un polisacárido aislado de la cáscara de *C. unshiu* conteniendo seis diferentes tipos de glucósidos (2-metilfucosa, 2-metilxilosa, apiosa, ácido acérico, ácido 3-deoxy-D-lixoheptulosarico, y ácido 3-deoxi-D-manno-2-octulosónico) inhibió la producción de citocinas proinflamatorias en macrófagos, tales como IL-6, TNF- α y NO, esto hace que el polisacárido de *C. unshiu* sea un promotor inmunomodulador (Shin, Park, y Shin, 2018).

Las semillas de *Citrus junos* contienen numerosos limonoides, cuyas agliconas han mostrado potencial para retardar el envejecimiento. Al ser probados en ratones con alteraciones en el metabolismo de lípidos, el periodo de vida de los ratones se vió extendido entre un 10 y 12%. Adicionalmente, se observó una disminución en los procesos inflamatorios del tejido nervioso central. Otro efecto observado en los ratones, fue la modificación de la flora intestinal, probablemente asociada a la producción de ácidos grasos de cadena corta derivados de los flavonoides (Minamisawa et al., 2017).

El potencial para obtener compuestos activos de los residuos cítricos, se ha mostrado en los últimos años para varias enfermedades y continúan apareciendo

reportes de nuevas aplicaciones (Ashraf et al., 2017; Céliz, Díaz, y Daz, 2018; Fayek et al., 2017, Castro-Vazquez et al., 2016). La cáscara de varios frutos cítricos [mandarina (*Citrus reticulata* Blanco cv. Egyptian), naranja dulce (*C. sinensis* (L.) Osbeck cv. Olinda Valencia), toronja (*C. paradisi* Macfad. cv. Duncan) y lima (*C. aurantiifolia* Swingle cv. Mexican)] se utilizó para preparar extractos acuosos, etanólicos y hexánicos, evaluados en ratones con hipercolesterolemia inducida. A los ratones se les midieron la glucosa sanguínea, triacilglicéridos y colesterol total. Los tres tipos de extractos de toronja mostraron una disminución de los parámetros sanguíneos de los ratones, pero el más efectivo fue el etanólico con un porcentaje de reducción de triacilglicéridos, colesterol y glucosa de hasta un 80% (Fayek et al., 2017; Manners, 2007; Ortuño et al., 2009). La capacidad anti-diabética e hipocolesterolemica de los residuos de cítricos, se atribuye a la presencia del flavonoide nobiletin y otros flavonoides como la hesperetina y naringina (Abeysinghe et al., 2007; Céliz, Díaz, y Daz, 2018; Imada et al., 2008).

Los flavonoides

Los flavonoides son pigmentos naturales en su mayoría hidrosolubles presentes en el citoplasma y las vacuolas de la célula vegetal que protegen al organismo del daño producido por agentes oxidantes como los rayos ultravioleta y la polución ambiental. Los flavonoides confieren los colores de diversas flores y frutos y su nombre viene del latín “flavus”, que significa “amarillo”, ya que los primeros que se lograron aislar eran de este color. Se han identificado más de 5 000 flavonoides diferentes y se estima que el valor medio de ingesta es de aproximadamente 23 mg/día, considerando a la quercetina como el predominante con un valor medio de 16 mg/día (Benavente-García et al., 1997; Chang, 1990; Martínez-Flórez et al., 2002).

Estructura química de los flavonoides

La estructura de los flavonoides se basa en que son compuestos de bajo peso molecular que comparten un esqueleto común de difenilpiranos (C6-C3-C6), compuesto por dos anillos de fenilos ligados a través de un anillo de pirano heterocíclico (Figura 1). La actividad de los flavonoides como antioxidantes depende de las propiedades redox de sus grupos hidroxifenólicos y de la relación estructural entre las diferentes partes de la estructura química, la cual permite diversos patrones de sustitución en el anillo central de pirano.

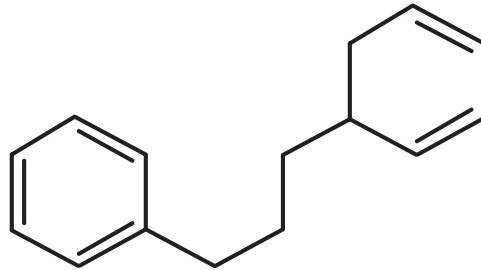


Figura 1. Estructura básica de los flavonoides

Propiedades de los flavonoides

Propiedades anticancerígenas

La genisteína bloquea el desarrollo de tumores al prevenir la formación de nuevos vasos impidiendo con ello la llegada del oxígeno y nutrientes a las células neotumorales, a su vez modula la reacción de los estrógenos ligándose a sus receptores con lo que disminuye el riesgo de cáncer de mama (Martínez-Flórez et al., 2002). Se ha encontrado que todas las prenilchalconas y prenilflavanonas que han sido evaluadas provenientes del lúpulo y cerveza son inductoras de las quinonas reductasas que podrían tener un papel preventivo en la progresión de los hepatomas (Miranda et al., 2000). El xantohumol ha sido caracterizado por ser un agente quimiopreventivo en estudios *in vitro*, mientras que la 8-prenilnaringenina tiene la propiedad de ser el fitoestrógeno más potente conocido, lo cual sugiere que los prenilflavonoides de la flor de lúpulo puedan ser agentes en la prevención del cáncer y la osteoporosis (Stevens y Page, 2004), así como el isoxantohumol y la también prenilflavanona 8-prenilnaringenina, que son potentes inhibidores de la activación metabólica de la quinolina heterocíclica 2-amino-3-metilimidazo [4,5-f] (IQ) y podrían tener un potencial importante para actuar como agentes quimiopreventivos en contra de cáncer inducido por aminas heterocíclicas activadas por CYP1A2 (Miranda et al., 2000). Por otra parte, se han identificado diversos mecanismos de flavonas e isoflavonas en la prevención del cáncer debido a su acción antiproliferativa, prevención de la oxidación y regulación del sistema inmune.

Investigaciones futuras requerirán la clarificación de la naturaleza del impacto y las interacciones entre éstos constituyentes bioactivos y otros compuestos dietarios. Se ha identificado que la quercetina inhibe el crecimiento de células cancerígenas en el tracto gastrointestinal aunado a que bloquea la progresión celular (Yoshida et al., 1990). A su vez, el polimetoxiflavonoide, nobiletina, que se encuentra en los cítricos, es un prometedor agente antitumoral debido a la

investigación *in vitro* de su absorción y metabolismo en comparación con la luteolina (Murakami et al., 2001; Nair et al., 2017). Las cumarinas 8-geraniloxipsolareno, 5-geraniloxipsolareno y la 5-geraniloxi-7-metoxicumarina fueron identificadas mediante un análisis espectroscópico por tener propiedades significativas como inhibidoras del promotor tumoral (TPA) a partir de la cáscara de limón (Miyake et al., 1999; Mahato et al., 2018; Manners, 2007).

Propiedades cardiovasculares

Múltiples investigaciones sugieren que los flavonoides contenidos en la cocoa (epicatequina, catequina y procianidinas) son presuntamente agentes protectores en contra de enfermedades cardiovasculares ya que aproximadamente el consumo de 50 g de chocolate oscuro por día puede reducir en un 10.5% el riesgo de una enfermedad cardiovascular (Ding et al., 2006). *In vitro*, los flavonoides inhiben la oxidación de la lipoproteína de baja densidad y tienen propiedades antitrombóticas debido a sus propiedades antioxidantes. En un ensayo realizado con quercetina, kaemferol, miricetina, apigenina y luteolina, se demostró que el consumo de flavonoides presenta una relación inversa con la incidencia del infarto al miocardio (Hertog et al., 1993; Mahato et al., 2018; Manners, 2007).

Los flavonoides ejercen una acción relajante del músculo liso del sistema cardiovascular, lo que conlleva a una disminución de la presión sanguínea mejorando la circulación. Por su efecto antioxidante pueden evitar la oxidación del colesterol LDL lo que previene la formación de la placa arterioesclerótica, evitan la acumulación excesiva de plaquetas evitando el daño de los vasos sanguíneos y la coagulación de la sangre. Debido a las propiedades antioxidantes de los flavonoles y flavonas contenidas en el té, vegetales, frutas y vino tinto, se ha investigado si el consumo de estos compuestos en la dieta está asociado con un menor riesgo de enfermedad coronaria, sin embargo, los datos experimentales no confirman estadísticamente una estricta relación inversa entre el consumo de flavonoides y la enfermedad coronaria, pero no se excluye la posibilidad de su efecto protector en hombres (Rimm et al., 1996; Rafiq et al., 2016). La rutina presente en la cáscara de los cítricos es utilizada para el tratamiento de la hipertensión y las procianidinas presentes en las uvas tienen uso potencial en isquemias cardíacas (Facinó et al., 1996; Mendes-Junior et al., 2013; Olaleye et al., 2014).

Propiedades antiinflamatorias

Los flavonoides se han estudiado para observar sus efectos en la liberación de histamina en humanos a partir de diferentes estímulos. Los flavonoides más estudiados son flavona, quercetina, taxifolina, chalcona, apigenina, fisetina, rutina, fletina,

tangeretina, hesperetina y naringina. Ante estímulos como anti-IgE, concanavalina A entre otros; se obtuvieron diversos niveles de inhibición dependiendo de la naturaleza del estímulo y la estructura del flavonoide. Los flavonoles, quercetina y fisetina, y la flavona, apigenina, presentaron una buena respuesta al inhibir la liberación de histamina estimulada por ligandos dependientes IgE, sin embargo, los derivados de las flavanonas, taxifolina y hesperetina fueron inactivos, así como los glicósidos rutina y naringina. Por su parte, los congéneres de cadena abierta, chalcona y fletina, tuvieron actividad inhibitoria (García-Lafuente et al., 2009; Middleton Jr y Drzewiecki, 1984).

Un estudio *in vivo* con hesperidina obtenida de la cáscara de la naranja demuestra su acción antiinflamatoria y sus efectos analgésicos significativos (Galati et al., 1994; Tejada et al., 2017; Homayouni et al., 2018). Por otra parte, los flavonoides de cadena abierta, chalcona y fletina, han mostrado actividad antiinflamatoria (Reddy et al., 2017; Chen et al., 2018). Un estudio *in vivo* con la flavanona hesperidina obtenida de la cáscara de la naranja, demostró su acción antiinflamatoria y efectos analgésicos significativos incluso en casos de inflamación crónica (Hughes, Ketheesan, y Haleagrahara, 2017; Haleagrahara et al., 2017).

Propiedades antimicrobianas-antivirales

Diversos estudios han mostrado que los flavonoides provenientes de cítricos tienen actividad antimicrobiana, antifúngica y antiviral. Los flavonoides de cáscara de naranja, tienen actividad inhibitoria del crecimiento de *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* y *Pseudomonas aeruginosa*. El extracto hexánico de *Citrus sinensis* variedad “Valencia”, fue el que mostró mayor actividad contra estos microorganismos (Geraci et al., 2017).

La actividad antibacteriana y antifúngica en contra de 20 bacterias y 10 cepas de levaduras fue examinada a partir del extracto etanólico de las semillas y pulpa de la toronja. Se determinó por espectrometría un contenido de 3.92% de polifenoles totales y un 0.11% de flavonoides con la presencia de naringina y hesperidina, presentando el extracto un fuerte efecto antimicrobiano en contra de *Salmonella enteritidis* (Cvetnic y Vladimir-Knezevic, 2004).

Estudios *in vitro* han revelado que algunos flavonoides extraídos de la naranja y toronja reducen el crecimiento radial de *P. digitatum* en un medio de cultivo. La polimetoxiflavona, nobiletina fue el compuesto más efectivo seguido de las flavanonas hesperidina y naringina, ya que el crecimiento fúngico cien horas después de su inicio se inhibió en un 75%, 38% y 25% respectivamente, comparado con el crecimiento correspondiente al control (Ortuño et al., 2006).

El extracto de diclorometano de las hojas de *Myrica serrata* inhiben el crecimiento de *Cladosporium cucumerinum*, *Bacillus subtilis* y *Escherichia coli*. Los compuestos en el extracto fueron los siguientes: 2,4-dihidroxi-6-metoxi-3,5-dimetil-chalcona, 2,4-dihidroxi-6-metoxi-5-metil-chalcona, 2,6-dihidroxi-4-metoxi-3,5-dimetildihidrochalcona, 2-hidroxi-4,6-dimetoxi-3-metildihidrochalcona, y 2,6-dihidroxi-4-metoxi-3-metildihidrochalcona, así como las flavanonas demetoximateucinol y criptostrobina (Gafner et al., 1996).

Quercetina, naringina, hesperetina y catequina fueron estudiados por el efecto que tienen sobre la infectividad y replicación del herpes simple tipo 1 (HSV-1), poliovirus tipo 1, parainfluenza tipo 3 y virus sincicial respiratorio (RSV). La quercetina causó una reducción en la infectividad de cada uno de los virus, así como en su replicación intracelular; sin embargo, la hesperetina solo redujo la replicación, al contrario de la catequina. Por su parte la naringina no presentó ningún efecto, por lo que se concluye con este estudio que algunos flavonoides naturales poseen acción antiviral en contra de ciertos tipos de virus RNA y DNA (Kaul, Middleton, y Ogra, 1985).

Otros estudios reportan evidencias de la actividad antiviral de los flavonoides (Zakaryan et al., 2017; Ani y Abel, 2018), específicamente de flavonoides cítricos, no solo por actuar contra los virus, sino también para prevenir daños asociados a enfermedades virales. Los flavonoides del jugo de naranja administrados a pacientes, incrementaron la capacidad antioxidante y disminuyeron la inflamación y el colesterol sérico además de mantener el peso corporal y proteger contra el daño causado por el virus de la hepatitis C (Gonçalves et al., 2017).

El hecho de que hay grandes cantidades de residuos resultantes de la obtención de jugos y aceites esenciales de cítricos y que estos residuos contienen componentes con aplicaciones industriales y en salud, llevó a proponer el aprovechamiento de los residuos de limón persa para obtener flavonoides. Se utilizaron residuos de la extracción del jugo de limón persa, cáscara y semillas, los cuales se molieron en licuadora. Para la extracción se utilizó un diseño factorial completo 3x3 con tres niveles: Relación sólido/solvente (1:2, 1:5, 1:10), porcentaje de ácido acético (0.5, 1 y 2%) y tiempo de extracción (1, 2 y 4 h). Se utilizaron como solventes de extracción metanol y etanol, sin embargo, los experimentos se hicieron como bloque para cada solvente. Todos los experimentos se realizaron por duplicado. Los extractos se mantuvieron en agitación por dos horas, al cabo de los cuales se filtraron y el filtrado se guardó a -20 °C hasta su análisis. Las variables de respuesta fueron: contenido de fenoles totales medidos por el método de Folin-Ciocalteu (Singleton y Rossi, 1965) y concentración de flavonoides analizados por el método de tricloruro de aluminio.

La concentración más alta de fenoles totales al realizar la extracción con metanol fue de 7.68 mg equivalentes de ácido gálico por g de residuo en base seca. Este

rendimiento se obtuvo al aplicar la relación sólido solvente de 1:5, 4 h de extracción y un 2% de ácido acético. Bajo estas mismas condiciones, la concentración de flavonoides fue de 4.95 mg equivalentes de rutina por g de residuo en base seca. Las concentraciones de fenoles totales y flavonoides en los extractos realizados con etanol bajo las mismas condiciones fueron menores (7.02 y 4.0 mg/g respectivamente).

Los resultados de la extracción con metanol mostraron que solo la relación sólido solvente tuvo un efecto significativo sobre la concentración de fenoles totales. Los efectos dobles de tiempo de extracción y relación sólido solvente también fueron significativos (Figura 2A). En la gráfica de superficie de respuesta para fenoles totales, se observó una tendencia en su punto más alto al cambiar su pendiente en forma decreciente obteniendo así el punto crítico en el rango definido de niveles dando mejores resultados con un tiempo de extracción largo (4h) y una relación sólido solvente de 1:4 (Figura 2B).

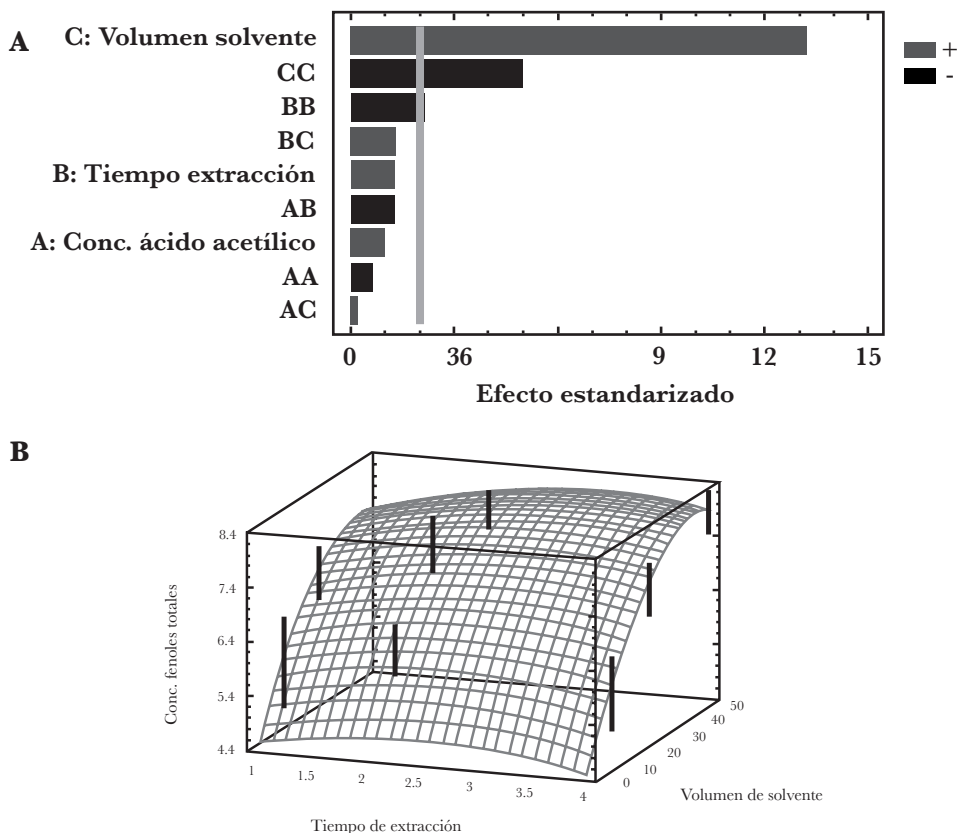


Figura 2. Efecto de los parámetros de extracción sobre la concentración de fenoles totales extraídos con metanol a partir de los residuos de limón persa. A: Diagrama de Pareto. B: Diagrama de Superficie de Respuesta

En cuanto a la concentración de flavonoides extraídos en metanol, tanto la relación sólido solvente como el tiempo de extracción resultaron significativos, así como los efectos dobles de relación sólido solvente x relación sólido solvente y relación sólido solvente x tiempo de extracción (Figura 3A). En cuanto al diagrama de superficie de respuesta presentada en la Figura 3B, mostró que los valores altos de los tres factores son los que proporcionan la mayor concentración de flavonoides (relación sólido solvente de 4, tiempo de extracción 4 h y concentración de ácido acético de 2%).

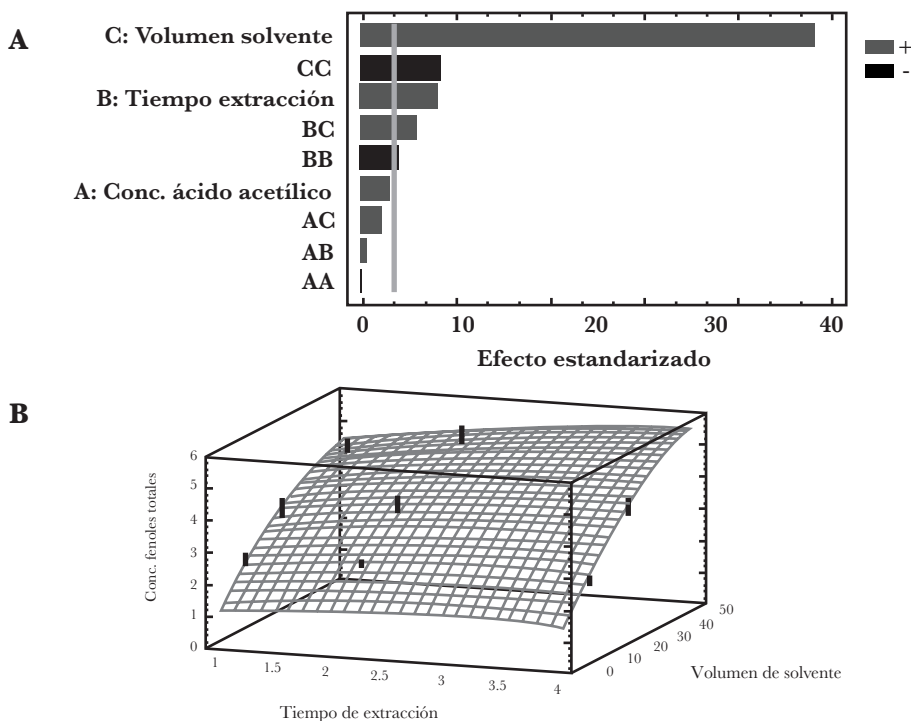


Figura 3. Efecto de los parámetros de extracción sobre la concentración de Flavonoides extraídos con metanol a partir de los residuos de limón persa. A: Diagrama de Pareto. B: Diagrama de Superficie de Respuesta

Cuando se cambió el solvente a etanol, la concentración de fenoles totales se vio modificada significativamente por la relación sólido solvente y el tiempo de extracción. Sin embargo el efecto cuadrático de la relación sólido solvente tuvo un efecto negativo sobre fenoles totales (Figura 4A). El gráfico de superficie de respuesta mostró un máximo para la concentración de fenoles totales. Los factores predichos para obtener este máximo fueron un tiempo de extracción de 3 h, concentración de ácido acético de 2% y una relación sólido solvente de 3 peso/volumen (Figura 3B).

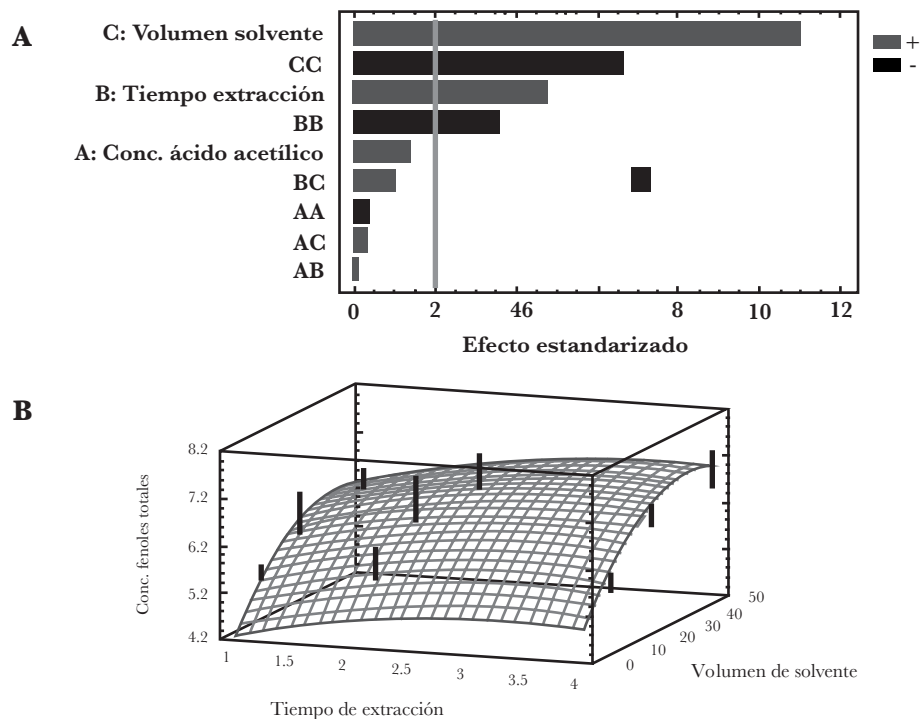


Figura 4. Efecto de los parámetros de extracción sobre la concentración de fenoles totales extraídos con etanol a partir de los residuos de limón persa. A: Diagrama de Pareto. B. Diagrama de Superficie de Respuesta

En el caso de los flavonoides, el cambio de solvente hizo que la concentración se viera fuertemente modificada por la relación sólido solvente ($p < 0.05$), aunque también el tiempo de extracción tuvo un efecto significativo pero menor (Figura 5A). Los valores óptimos predichos en el gráfico de superficie de respuesta para obtener una concentración máxima de flavonoides fueron un tiempo de extracción de 2.92 h, concentración de ácido acético de 2% y una relación de sólido solvente de 1:5.

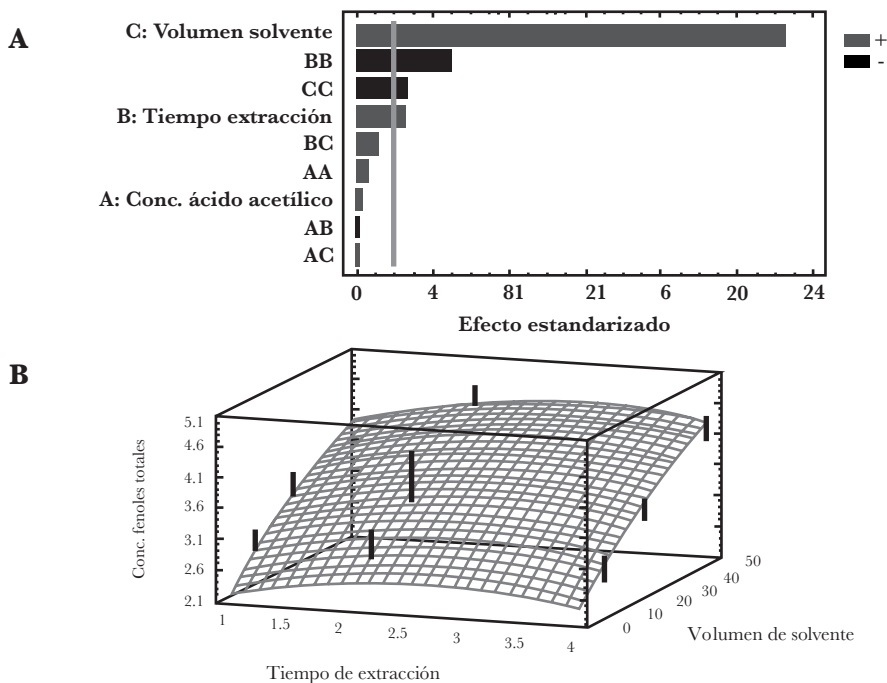


Figura 5. Efecto de los parámetros de extracción sobre la concentración de Flavonoides extraídos con etanol a partir de los residuos de limón persa. A: Diagrama de Pareto. B: Diagrama de Superficie de Respuesta

Ferreira, Silva, y Nunes (2018) obtuvieron concentraciones más altas de fenoles totales hasta de 56 mg/g al realizar extractos acuosos y etanólicos de *Citrus reticulata*. Por otra parte, cuando se aplica ultrasonido, el rendimiento de polifenoles se incrementa, tal es el caso del estudio realizado por Londoño-Londoño et al., (2010), en el que obtuvieron, 74.80, 66.36 y 58.68 mg equivalentes /g para lima, naranja y tangerina, respectivamente.

En la cáscara de naranja, mandarina y limón se han determinado concentraciones de fenoles totales, 178.90, 169.54 y 61.22 mg equivalentes de ácido gálico/100 g (Al-Juhaimi, 2014). En general, la concentración de polifenoles varía dependiendo de la fuente de extracción, el método empleado, pretratamientos como ultrasonido, microondas, etcétera (Rafiq et al., 2016).

En general en este estudio, independientemente del tipo de solvente, fueron los niveles altos los que arrojaron una mejor concentración de fenoles totales y flavonoides. En cuanto al solvente, el metanol arrojó mejores resultados de extracción. Estos resultados mostraron que los residuos de limón persa son una fuente atractiva de flavonoides, los cuales tienen múltiples aplicaciones tanto a nivel industrial como en salud.



—



Lista de referencias

- Abeyasinghe, D. C., Li, X., Sun, C., Zhang, W., Zhou, C., y Chen, K. (2007). Bioactive compounds and antioxidant capacities in different edible tissues of citrus fruit of four species. *Food Chemistry*, 104(4), 1338-1344.
- Ahmed, I., Zia, M. A., Hussain, M. A., Akram, Z., Naveed, M. T., y Nowrouzi, A. (2016). Bioprocessing of citrus waste peel for induced pectinase production by *Aspergillus niger*; its purification and characterization. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9(2), 148-154.
- Al-Juhaimi, F. Y. (2014). Citrus fruits by-products as sources of bioactive compounds with antioxidant potential. *Pakistan Journal of Botany*, 46(4), 1459-1462.
- Alvarez, J., Hooshdaran, B., Cortazar, M., Amutio, M., Lopez, G., Freire, F. B., ... y Olazar, M. (2018). Valorization of citrus wastes by fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 224, 111-120.
- Ani, P. N., y Abel, H. C. (2018). Nutrient, phytochemical, and antinutrient composition of *Citrus maxima* fruit juice and peel extract. *Food Science and Nutrition*, 6(3), 653-658.
- Ashraf, H., Butt, M. S., Iqbal, M. J., y Suleria, H. A. R. (2017). Citrus peel extract and powder attenuate hypercholesterolemia and hyperglycemia using rodent experimental modeling. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 7(10), 870-880.
- Benavente-García, O., Castillo, J., Marin, F. R., Ortuño, A., y Del Río, J. A. (1997). Uses and properties of citrus flavonoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(12), 4505-4515.
- Boluda-Aguilar, M., y López-Gómez, A. (2013). Production of bioethanol by fermentation of lemon (*Citrus limon* L.) peel wastes pretreated with steam explosion. *Industrial Crops and Products*, 41, 188-197.
- Boukroufa, M., Boutekedjiret, C., y Chemat, F. (2017). Development of a green procedure of citrus fruits waste processing to recover carotenoids. *Resource-Efficient Technologies*, 3(3), 252-262.
- Breksa, A.P., Gary D.M., Robert A.J., y Shin, H. (2009). Citrus limonoid bioavailability in humans. *Potential Health Benefits of Citrus*, 95-101.
- Bustamante, J., van Stempvoort, S., García-Gallarreta, M., Houghton, J. A., Briers, H. K., Budarin, V. L., ... y Clark, J. H. (2016). Microwave assisted hydro-distillation of essential oils from wet citrus peel waste. *Journal of Cleaner Production*, 137, 598-605.
- Castro-Vazquez, L., Alañón, M. E., Rodríguez-Robledo, V., Pérez-Coello, M. S., Hermosín-Gutierrez, I., Díaz-Maroto, M. C., y Arroyo-Jiménez, M. D. M. (2016). Bioactive flavonoids, antioxidant behaviour, and cytoprotective effects of dried grapefruit peels (*Citrus paradisi* Macf.). *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 1-12.
- Céliz, G., Díaz, R., y Daz, M. (2018). Obtaining hesperetin 7-O-glucosyl 6"-O-laurate, a high lipophilic flavonoid ester, from Citrus waste. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 13, 25-30.

- Cvetnic, Z. D. E. N. K. A., y Vladimir-Knezevic, S. A. N. D. A. (2004). Antimicrobial activity of grapefruit seed and pulp ethanolic extract. *Acta Pharmaceutica*, 54(3), 243-250.
- Chang, S. H. (1990). Flavonoids, coumarins and acridone alkaloids from the root bark of *Citrus limonia*. *Phytochemistry*, 29(1), 351-353.
- Chen, X., Yu, W., Li, W., Zhang, H., Huang, W., Wang, J., ... y Liang, G. (2018). An anti-inflammatory chalcone derivative prevents heart and kidney from hyperlipidemia-induced injuries by attenuating inflammation. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 338, 43-53.
- Choi, I. S., Kim, J. H., Wi, S. G., Kim, K. H., y Bae, H. J. (2013). Bioethanol production from mandarin (*Citrus unshiu*) peel waste using popping pretreatment. *Applied Energy*, 102, 204-210.
- Ding, E. L., Hutfless, S. M., Ding, X., y Girotra, S. (2006). Chocolate and prevention of cardiovascular disease: a systematic review. *Nutrition and Metabolism*, 3(1), 2.
- Facinó, R. M., Carini, M., Aldini, G., Berti, F., Rossoni, G., Bombardelli, E., y Morazzoni, P. (1996). Procyanidines from *Vitis vinifera* seeds protect rabbit heart from ischemia/reperfusion injury: antioxidant intervention and/or iron and copper sequestering ability. *Planta Medica*, 62(06), 495-502.
- Fayek, N. M., El-Shazly, A. H., Abdel-Monem, A. R., Moussa, M. Y., Abdelwahab, S. M., y El-Tanbouly, N. D. (2017). Comparative study of the hypocholesterolemic, antidiabetic effects of four agro-waste Citrus peels cultivars and their HPLC standardization. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 27(4), 488-494.
- Ferreira, S. S., Silva, A. M., y Nunes, F. M. (2018). *Citrus reticulata* Blanco peels as a source of antioxidant and anti-proliferative phenolic compounds. *Industrial Crops and Products*, 111, 141-148.
- Gafner, S., Wolfender, J. L., Mavi, S., y Hostettmann, K. (1996). Antifungal and antibacterial chalcones from *Myrica serrata*. *Planta Medica*, 62(01), 67-69.
- Galati, E. M., Monforte, M. T., Kirjavainen, S., Forestieri, A. M., Trovato, A., y Tripodo, M. M. (1994). Biological effects of hesperidin, a citrus flavonoid. (Note I): antiinflammatory and analgesic activity. *Farmaco (Societa chimica italiana: 1989)*, 40(11), 709-712.
- García-Lafuente, A., Guillamón, E., Villares, A., Rostagno, M. A., y Martínez, J. A. (2009). Flavonoids as anti-inflammatory agents: implications in cancer and cardiovascular disease. *Inflammation Research*, 58(9), 537-552.
- Geraci, A., Di Stefano, V., Di Martino, E., Schillaci, D., y Schicchi, R. (2017). Essential oil components of orange peels and antimicrobial activity. *Natural Product Research*, 31(6), 653-659.

- Gonçalves, D., Lima, C., Ferreira, P., Costa, P., Costa, A., Figueiredo, W., y Cesar, T. (2017). Orange juice as dietary source of antioxidants for patients with hepatitis C under antiviral therapy. *Food and Nutrition Research*, 61(1), 1296675.
- Haleagrahara, N., Miranda-Hernandez, S., Alim, M. A., Hayes, L., Bird, G., y Ketheesan, N. (2017). Therapeutic effect of quercetin in collagen-induced arthritis. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 90, 38-46.
- Hertog, M. G., Feskens, E. J., Kromhout, D., Hollman, P. C. H., y Katan, M. B. (1993). Dietary antioxidant flavonoids and risk of coronary heart disease: the Zutphen Elderly Study. *The Lancet*, 342(8878), 1007-1011.
- Homayouni, F., Haidari, F., Hedayati, M., Zakerkish, M., y Ahmadi, K. (2018). Blood pressure lowering and anti-inflammatory effects of hesperidin in type 2 diabetes; a randomized double-blind controlled clinical trial. *Phytotherapy Research*, 32, 1073-1079.
- Hughes, S. D., Ketheesan, N., y Haleagrahara, N. (2017). The therapeutic potential of plant flavonoids on rheumatoid arthritis. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(17), 3601-3613.
- Imada, K., Lin, N., Liu, C., Lu, A., Chen, W., Yano, M., ... y Ito, A. (2008). Nobiletin, a citrus polymethoxy flavonoid, suppresses gene expression and production of aggrecanases-1 and-2 in collagen-induced arthritic mice. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 373(2), 181-185.
- INFOSERCA. (2010). Naranja dulce, limón partido. *Claridades Agropecuarias*, 197, 31-39.
- John, I., Yaragarla, P., Muthaiah, P., Ponnusamy, K., y Appusamy, A. (2017). Statistical optimization of acid catalyzed steam pretreatment of citrus peel waste for bioethanol production. *Resource-Efficient Technologies*, 3(4), 429-433.
- Kantifedaki, A., Kachrimanidou, V., Mallouchos, A., Papanikolaou, S., y Koutinas, A. A. (2018). Orange processing waste valorisation for the production of bio-based pigments using the fungal strains *Monascus purpureus* and *Penicillium purpurogenum*. *Journal of Cleaner Production*, 185, 882-890.
- Kaul, T. N., Middleton Jr, E., y Ogra, P. L. (1985). Antiviral effect of flavonoids on human viruses. *Journal of medical virology*, 15(1), 71-79.
- Lohrasbi, M., Pourbafrani, M., Niklasson, C., y Taherzadeh, M. J. (2010). Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products. *Bioresource Technology*, 101(19), 7382-7388.
- Londoño-Londoño, J., de Lima, V. R., Lara, O., Gil, A., Pasa, T. B. C., Arango, G. J., y Pineda, J. R. R. (2010). Clean recovery of antioxidant flavonoids from citrus peel: optimizing an aqueous ultrasound-assisted extraction method. *Food Chemistry*, 119(1), 81-87.

- Lotito, A. M., De Sanctis, M., Pastore, C., y Di Iaconi, C. (2018). Biomethanization of citrus waste: Effect of waste characteristics and of storage on treatability and evaluation of limonene degradation. *Journal of Environmental Management*, 215, 366-376.
- Mahato, N., Sharma, K., Sinha, M., y Cho, M. H. (2018). Citrus waste derived nutra-/pharmaceuticals for health benefits: Current trends and future perspectives. *Journal of Functional Foods*, 40, 307-316.
- Manners, G. D. (2007). Citrus limonoids: analysis, bioactivity, and biomedical prospects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(21), 8285-8294.
- Martínez-Flórez, S., González-Gallego, J., Culebras, J. M., y Tuñón, M. (2002). Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes. *Nutrición Hospitalaria*, 17(6), 271-278.
- Maurya, A. K., Mohanty, S., Pal, A., Chanotiya, C. S., y Bawankule, D. U. (2018). The essential oil from *Citrus limetta* Risso peels alleviates skin inflammation: *In-vitro* and *in-vivo* study. *Journal of Ethnopharmacology*, 212, 86-94.
- Mendes-Junior, L. D. G., Monteiro, M. M. D. O., Carvalho, A. D. S., Queiroz, T. M. D., y Braga, V. D. A. (2013). Oral supplementation with the rutin improves cardiovascular baroreflex sensitivity and vascular reactivity in hypertensive rats. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 38(11), 1099-1106.
- Middleton Jr, E., y Drzewiecki, G. (1984). Flavonoid inhibition of human basophil histamine release stimulated by various agents. *Biochemical Pharmacology*, 33(21), 3333-3338.
- Minamisawa, M., Suzuki, K., Kawai, G., Yamaguchi, A., y Yamanaka, S. (2017). Functional evaluation of yuzu (*Citrus junos*) extracts containing limonoids and polyamine for life extension. *Journal of Functional Foods*, 38, 591-600.
- Miranda, C. L., Aponso, G. L. M., Stevens, J. F., Deinzer, M. L., y Buhler, D. R. (2000). Prenylated chalcones and flavanones as inducers of quinone reductase in mouse Hepa 1c1c7 cells. *Cancer Letters*, 149(1-2), 21-29.
- Miranda, C. L., Yang, Y. H., Henderson, M. C., Stevens, J. F., Santana-Rios, G., Deinzer, M. L., y Buhler, D. R. (2000). Prenylflavonoids from hops inhibit the metabolic activation of the carcinogenic heterocyclic amine 2-amino-3-methylimidazo [4, 5-f] quinoline, mediated by cDNA-expressed human CYP1A2. *Drug Metabolism and Disposition*, 28(11), 1297-1302.
- Miyake, Y., Murakami, A., Sugiyama, Y., Isobe, M., Koshimizu, K., y Ohigashi, H. (1999). Identification of coumarins from lemon fruit (*Citrus limon*) as inhibitors of *in vitro* tumor promotion and superoxide and nitric oxide generation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(8), 3151-3157.

- Murakami, A., Kuwahara, S., Takahashi, Y., Ito, C., Furukawa, H., Ju-ichi, M., ... y Ohigashi, H. (2001). *In vitro* absorption and metabolism of nobiletin, a chemopreventive polymethoxyflavonoid in citrus fruits. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 65(1), 194-197.
- Nair, Ajikumaran, K Rajani, Akhila S. Nair, y Sabulal Baby. (2017). Citrus peels prevent cancer. *Phytomedicine*. doi: 10.1016/j.phymed.2017.08.011.
- Nakajima, V. M., Madeira Jr, J. V., Macedo, G. A., y Macedo, J. A. (2016). Biotransformation effects on anti lipogenic activity of citrus extracts. *Food Chemistry*, 197, 1046-1053.
- Ndayishimiye, J., y Chun, B. S. (2017). Optimization of carotenoids and antioxidant activity of oils obtained from a co-extraction of citrus (*Yuzu ichandrin*) by-products using supercritical carbon dioxide. *Biomass and Bioenergy*, 106, 1-7.
- Ndayishimiye, J., Lim, D. J., y Chun, B. S. (2018). Antioxidant and antimicrobial activity of oils obtained from a mixture of citrus by-products using a modified supercritical carbon dioxide. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 57, 339-348.
- Olaleye, M. T., Crown, O. O., Akinmoladun, A. C., y Akindahunsi, A. A. (2014). Rutin and quercetin show greater efficacy than nifedipin in ameliorating hemodynamic, redox, and metabolite imbalances in sodium chloride-induced hypertensive rats. *Human and Experimental Toxicology*, 33(6), 602-608.
- Ortuño, A., Báidez, A., Gómez, P., Arcas, M. C., Porras, I., García-Lidón, A., y Del Rio, J. A. (2006). *Citrus paradisi* and *Citrus sinensis* flavonoids: Their influence in the defence mechanism against *Penicillium digitatum*. *Food Chemistry*, 98(2), 351-358.
- Ortuño, A., Gómez, P., Baidez, A., Frias, V., y Del Rio, J. A. (2006). *Citrus sp.*: A source of flavonoids of pharmaceutical interest. *Potential Health Benefits of Citrus*, 936, 175-185.
- Pasandide, B., Khodaiyan, F., Mousavi, Z. E., y Hosseini, S. S. (2017). Optimization of aqueous pectin extraction from *Citrus medica* peel. *Carbohydrate Polymers*, 178, 27-33.
- Patsalou, M., Menikea, K. K., Makri, E., Vasquez, M. I., Drouza, C., y Koutinas, M. (2017). Development of a citrus peel-based biorefinery strategy for the production of succinic acid. *Journal of Cleaner Production*, 166, 706-716.
- Pourbafrani, M., Forgács, G., Horváth, I. S., Niklasson, C., y Taherzadeh, M. J. (2010). Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes. *Bioresource Technology*, 101(11), 4246-4250.
- Rafiq, S., Kaul, R., Sofi, S. A., Bashir, N., Nazir, F., y Nayik, G. A. (2016). Citrus peel as a source of functional ingredient: a review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. In Press. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.07.006>

- Reddy, M. V. B., Hung, H. Y., Kuo, P. C., Huang, G. J., Chan, Y. Y., Huang, S. C., ... y Wu, T. S. (2017). Synthesis and biological evaluation of chalcone, dihydrochalcone, and 1, 3-diarylpropane analogs as anti-inflammatory agents. *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 27(7), 1547-1550.
- Rimm, E. B., Katan, M. B., Ascherio, A., Stampfer, M. J., y Willett, W. C. (1996). Relation between intake of flavonoids and risk for coronary heart disease in male health professionals. *Annals of Internal Medicine*, 125(5), 384-389.
- Shin, M. S., Park, S. B., y Shin, K. S. (2018). Molecular mechanisms of immunomodulatory activity by polysaccharide isolated from the peels of *Citrus unshiu*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 112, 576-583.
- Singleton, V. L., y Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.
- Stevens, J. F., y Page, J. E. (2004). Xanthohumol and related prenylflavonoids from hops and beer: to your good health!. *Phytochemistry*, 65(10), 1317-1330.
- Su, H., Tan, F., y Xu, Y. (2016). Enhancement of biogas and methanization of citrus waste via biodegradation pretreatment and subsequent optimized fermentation. *Fuel*, 181, 843-851.
- Taghizadeh-Alisaraci, A., Hosseini, S. H., Ghobadian, B., y Motevali, A. (2017). Biofuel production from citrus wastes: A feasibility study in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 1100-1112.
- Tejada, S., Pinya, S., Martorell, M., Capó, X., Tur, J. A., Pons, A., y Sureda, A. (2017). Potential anti-inflammatory effects of hesperidin from the genus *Citrus*. *Current Medicinal Chemistry*.
- Tripodo, M. M., Lanuzza, F., Micali, G., Coppolino, R., y Nucita, F. (2004). Citrus waste recovery: a new environmentally friendly procedure to obtain animal feed. *Bioresource Technology*, 91(2), 111-115.
- Wang, D. D., Gao, D., Xu, W. J., Li, F., Yin, M. N., Fu, Q. F., y Xia, Z. N. (2018). Magnetic molecularly imprinted polymer for the selective extraction of hesperetin from the dried pericarp of *Citrus reticulata* Blanco. *Talanta*, 184, 307-315.
- Wilkins, M. R., Widmer, W. W., y Grohmann, K. (2007). Simultaneous saccharification and fermentation of citrus peel waste by *Saccharomyces cerevisiae* to produce ethanol. *Process Biochemistry*, 42(12), 1614-1619.
- Yoshida, M., Sakai, T., Hosokawa, N., Marui, N., Matsumoto, K., Fujioka, A., ... y Aoike, A. (1990). The effect of quercetin on cell cycle progression and growth of human gastric cancer cells. *FEBS Letters*, 260(1), 10-13.
- Zakaryan, H., Arabyan, E., Oo, A., y Zandi, K. (2017). Flavonoids: promising natural compounds against viral infections. *Archives of Virology*, 162(9), 2539-2551.

Capítulo III



Propiedades bioactivas en aceites esenciales de limas y limones

Dr. Oscar Andrés del Ángel Coronel¹

Ing. Alba Martínez Castillo²

Ing. Luis Eduardo Colorado Acosta³

Ing. Víctor González Flores⁴

Resumen

El género *Citrus*, que pertenece a la familia *Rutaceae*, es el género de árboles frutales más importante del mundo con una producción anual de aproximadamente 115.5 millones de toneladas. De toda esta producción, la lima (*Citrus limon*) y el limón (*Citrus aurantifolia*) se ubican en la tercera posición con una aportación de 12.9 millones de toneladas. Diversos estudios se han realizado sobre los compuestos bioactivos de estos cítricos, que los destacan como promotores de la salud, ricos en compuestos fenólicos, vitaminas, minerales, fibra dietética, aceites esenciales y carotenoides. Por su importancia comercial para el mercado de productos frescos y la industria alimentaria, se ha evidenciado que las redes productivas generan grandes cantidades de desechos y subproductos que constituyen una importante fuente de ingredientes funcionales con potencial para la manufactura de alimentos, productos farmacológicos y de uso médico, alimentación animal, agentes antimicrobianos y más recientemente en la síntesis de nanopartículas y producción de biocombustibles. En este capítulo se presentan los avances y tendencias de métodos de obtención y usos de los compuestos bioactivos obtenidos de *Citrus limon* y *Citrus aurantifolia*.

Palabras clave: compuestos bioactivos, aceites esenciales, lima, limón.

¹ Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Huatusco. Av. 25 Poniente No. 100 Col. Reserva Territorial, Huatusco, Ver., México. C.P. 94100. Autor para correspondencia: oscarangel.coronel@itshuatusco.edu.mx

² Universidad Politécnica de Huatusco. Calle 9 Sur entre Av. 7 y 9 s/n. Col. Centro, Huatusco, Veracruz, México.

³ Ídem.

⁴ Ídem.

Introducción

Además de la producción de jugo, el aceite esencial es uno de los principales subproductos del procesamiento de cítricos (Vekiari et al., 2002). Este puede describirse como mezcla de hidrocarburos, compuestos oxigenados y/o residuos no volátiles, incluyendo terpenos, sesquiterpenos, aldehídos, alcoholes, ésteres y esteroides (Darjazi, 2013). La producción mundial de aceite esencial de limas y limones, se ha estimado en 11 000 ton/año durante la última década (Lawrence, 2009). El aceite esencial de limón ha sido uno de los aceites aromatizantes más importantes, utilizado ampliamente en todo tipo de bebidas, refrescos; en productos horneados, como pasteles, relleno de pasteles, confitería, caramelos de centro blandos y duros, postres de gelatina y helados; también se ha empleado en perfumes, aguas de tocador, aguas de colonia y en cosméticos a los que imparte una nota superior refrescante (Guenther, 1955).

Composición química

Los aceites esenciales son mezclas complejas de compuestos químicos que pueden ser clasificados en tres grupos principales: monoterpenos, sesquiterpenos y compuestos oxigenados. Los pigmentos naturales, principalmente carotenoides y clorofilas, también están presentes en los aceites esenciales de cítricos (Gamarra et al., 2006).

La composición química de los aceites esenciales de limas y limones presenta variación en el tipo y cantidad relativa de los componentes dependiendo la parte de la planta o fruto del cual ha sido extraído, también tiene influencia el método extracción empleado. Gamarra et al., (2006) demostraron que el tiempo de destilación influye en la calidad del aceite esencial de limón, indicaron que se puede obtener aceite esencial de buena calidad dentro de las 10 h del proceso de destilación al vapor (con equipo industrial) en condiciones normales, además de que la recuperación del aceite esencial del condensador a 35°C evita más reacciones oxidativas y la pérdida de los terpenos en esta etapa. Por encima de las 10 h de proceso, la presencia de compuestos carbonílicos en el aceite más del 3% compromete sus aplicaciones en los alimentos.

Se ha encontrado también que el porcentaje de ingredientes activos en el aceite esencial de muestras naturales, depende de la distribución geográfica y de las condiciones ambientales, como la temperatura, la precipitación, la altitud, las horas de sol, etcétera (Hossain et al., 2014).

Estudios de composición química por cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) de aceites esenciales de limón (*Citrus aurantifolia*), reportaron 5 componentes (92.6% del total analizado) para extracción por hidrodestilación de hojas y semillas (Razzaghi-Abyaneh et al., 2009); mientras que en el de aceite esencial extraído por hidrodestilación de cáscara de limón, se identificaron 40 componentes (99.2% del total analizado) (Fouad y Camara, 2017), los resultados se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Composición del aceite esencial de limón (*Citrus aurantifolia*)

Componente	Hojas, Hidro-destilación		Cáscara, Hidro-destilación	
	RI ¹	%	RI ¹	%
Pineno	542	1.5	-	-
<i>a</i> -Thujeno	-	-	925	0.70
<i>a</i> -Pineno	-	-	933	3.90
Sabineno	681	1.4	-	-
β -Pineno	-	-	982	10.20
Mirceno	761	1.8	992	0.60
Telineno	815	2.4	-	-
Limoneno	980	85.5	1021	38.5
p-Mentha-2,4(8)-dieno	-	-	1070	5.70
Terpineno	-	-	1093	1.30
Linalol	-	-	1103	3.10
exo-Fenchol	-	-	1118	0.20
<i>cis</i> -Óxido de limoneno	-	-	1136	0.50
<i>trans</i> -Óxido de limoneno	-	-	1140	0.70
(E)-Miroxide	-	-	1146	0.50
Borneol	-	-	1168	0.30
Terpin-4-ol	-	-	1177	2.70
<i>a</i> -Terpineol	-	-	1191	5.20
<i>n</i> -Decanal	-	-	1206	0.30
<i>cis</i> -Carveol	-	-	1225	0.20
Nerol	-	-	1234	0.70
Neral	-	-	1246	2.50
Geranial	-	-	1261	0.80
Formato de nerilo	-	-	1276	2.80
Limoneno aldehído	-	-	1326	0.30
δ -Elemeno	-	-	1336	0.20
Acetato de nerilo	-	-	1361	3.40
Acetato de geranilo	-	-	1382	1.20
<i>a</i> -Barbateno	-	-	1409	0.20
<i>a-cis</i> -Bergamoteno	-	-	1414	0.30
(E)-Cariofileno	-	-	1421	1.20
<i>a-trans</i> -Bergamoteno	-	-	1414	0.30
(E)- β -Farneseno	-	-	1453	0.50

Componente	Hojas, Hidrodestilación		Cáscara, Hidrodestilación	
	RI ¹	%	RI ¹	%
β -Santaleno	-	-	1457	0.50
Propanoato de geranilo	-	-	1481	0.40
(Z)-dihidro-apofaresal	-	-	1497	0.40
β -Bisaboleno	-	-	1510	4.30
Óxido de cariofileno	-	-	1583	0.70
Epóxido humuleno II	-	-	1606	0.20
Selin-11-en-4- α -ol	-	-	1653	0.20
epi- β -Bisaboleno	-	-	1666	0.30
epi- α -Bisaboleno	-	-	1682	0.40
Monoterpenos	-	-	-	61.30
Monoterpenos oxidados	-	-	-	25.90
Sesquiterpenos	-	-	-	9.90
Sesquiterpenos oxigenados	-	-	-	1.80
Derivados de ácidos grasos	-	-	-	0.30
Total de componentes identificados	-	92.6	-	99.2

IR: Índice de Retención

Espina y colaboradores (2011), evaluaron la composición química de aceites esenciales comerciales obtenidos de cáscara de frutas frescas por sistema de extracción de prensado en frío, logrando identificar 43 componentes en el aceite esencial de lima, *Citrus limon*, (96% del total). Por otra parte, Djenane (2015) determinó la composición química del aceite esencial obtenido por hidrodestilación de cáscaras frescas de lima de Algeria, identificando 9 componentes (93.55% del total); mientras que Hsouna y colaboradores (2017), caracterizaron químicamente el aceite esencial obtenido de flores frescas de limas por el método de hidrodestilación, encontrando 20 componentes (99.65% de los constituyentes). En todos estos casos el análisis se efectuó por cromatografía de gases acoplado a espectrómetro de masas (GC-MS) y el compendio de resultados se presenta a continuación en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Composición del aceite esencial de lima (*Citrus limon*)

Componente	Cáscara, Prensado en frío		Cáscara, Hidrodestilación		Flores, Hidrodestilación	
	RI ¹	%	RI ²	%	RI ³	%
<i>a</i> -Thujeno	927	0.13	-	-	-	-
<i>a</i> -Pino	936	0.62	935	3.07	939	0.46
Sabineno	975	0.94	-	-	975	0.44
β -Pino	981	5.2	980	17.04	980	24.44
Mirceno	990	0.84	990	2.37	991	0.36
<i>a</i> -Terpineno	1020	0.11	-	-	-	-
<i>\beta</i> -Cimeno	1028	3.29	-	-	-	-
Limoneno	1033	59.1	1033	51.4	1030	39.74
β -Felandreno	1035	0.19	-	-	-	-
1,8-Cineol	1037	0.14	-	-	1033	0.54
(<i>E</i>)- β -Ocimeno	1048	0.14	-	-	-	-
γ -Terpineno	1061	9.66	1060	13.46	-	-
<i>cis</i> -Hidrato de sabineno	1074	0.06	-	-	-	-
<i>cis</i> -Óxido de linalol	-	-	-	-	1074	0.53
<i>trans</i> -Óxido de linalol	-	-	-	-	1075	0.49
Terpinoleno	1089	0.34	-	-	-	-
Linalol	1102	0.34	-	-	-	-
<i>n</i> -Nonanal	1107	0.1	-	-	-	-
<i>cis</i> -Óxido de limoneno	1138	0.1	-	-	-	-
<i>cis</i> - <i>p</i> -Mentha-2,8-dien-1-ol	1142	0.11	-	-	-	-
Citronelal	1155	0.69	-	-	-	-
Terpineol-4-ol	1186	0.07	-	-	1178	0.26
Mirtenal	-	-	-	-	1180	0.43
<i>a</i> -Terpineol	1201	0.36	-	-	1189	7.3
<i>trans</i> -Carveol	1225	0.1	-	-	-	-
Nerol	-	-	1207	1.50	1228	0.99
Geraniol	-	-	1234	2.43	-	-
Citronelol	1235	0.09	-	-	-	-
<i>cis</i> - <i>p</i> -Mentha-1(7),8-dien-2-ol	1243	1.33	-	-	-	-
Carvona	1251	0.06	-	-	-	-
Acetato de linalilo	-	-	-	-	1257	3.01
Geranial	1272	2.11	-	-	1270	0.43
Perillaldehído	1284	0.05	-	-	-	-

Componente	Cáscara, Prensado en frío		Cáscara, Hidrodestilación		Flores, Hidrodestilación	
	RI ¹	%	RI ²	%	RI ³	%
Indol	-	-	-	-	1288	0.45
Timol	1295	0.09	-	-	-	-
Carvacrol	1303	0.21	-	-	-	-
Metil antranilato	-	-	-	-	1337	0.66
Acetato de nerilo	-	-	1365	1.05	1347	1.74
Acetato de geranilo	-	-	-	-	1383	3.03
<i>a-cis</i> -Bergamoteno	1418	0.18	-	-	-	-
β -Cariofileno	1428	0.99	-	-	-	-
<i>cis</i> -Thujopseno	1438	2.38	-	-	-	-
(<i>Z</i>)- β -Farneseno	1455	0.12	-	-	-	-
β -Santaleno	1465	0.2	-	-	-	-
Germacreno D	1490	0.17	-	-	-	-
Valenceno	1500	0.82	-	-	-	-
Biclogermacreno	1502	0.45	-	-	-	-
β -Bisaboleno	1513	3.61	-	-	-	-
Nerolidol	-	-	-	-	1534	6.91
Espatulanol	1589	0.24	-	-	-	-
Óxido de cariofileno	1595	0.12	-	-	-	-
<i>a</i> -Bisabolol	1697	0.19	-	-	-	-
Farnesol	-	-	-	-	1705	4.28
Nutcatona	1826	0.04	-	-	-	-
Isocariofileno	-	-	-	1.23	-	-
Monoterpenos	-	80.56	-	-	-	67.86
Monoterpenos oxigenados	-	5.74	-	-	-	39.68
Sesquiterpenos	-	5.33	-	-	-	-
Sesquiterpenos oxigenados	-	4.2	-	-	-	-
Componentes nitrogenados	-	-	-	-	-	1.11
Otros	-	0.16	-	-	-	-
Total de componentes identificados	-	95.99	-	94.55	-	99.65

RI¹: Índice de retención (Espina et al., 2011).

RI²: Índice de retención (Djenane, 2015).

RI³: Índice de retención (Hsouna et al., 2017).

De acuerdo con los datos mostrados en los Cuadros 1 y 2, se observa que a pesar de las diferencias evidentes debidas al órgano de la planta empleado y al método de extracción, el aceite esencial de lima y limón está constituido por alrededor del 60% de monoterpenos, de un 20-30% aproximadamente de monoterpenos oxigenados, y el resto de sesquiterpenos, sesquiterpenos oxigenados y otros componentes. Simas y colaboradores (2017) evaluaron la composición química, por técnicas GC-MS y HS-SPME (*Headspace-Solid-Phase Microextraction*), de aceites esenciales de cítricos, entre ellos lima y limón, obtenidos por hidrodestilación de cáscara (Cuadro 3). Este estudio permite comparar la composición química del aceite esencial de lima y limón obtenido y analizado bajo condiciones y técnicas iguales, se observa, que el componente más abundante es el Limoneno con 53.9% y 31.1%, seguido por 12.2% y 10.8% de γ -Terpineno, 13.1% y 8.5% de β -Pineno, 2.2% y 9.6% de Geranial, 3.4% y 1.3% de Sabineno, 1.7% y 7.1% de Neral y 2.7% y 1% de Mirceno, como constituyentes principales (respectivamente en lima y limón).

El limoneno es el principal constituyente del aceite de limón y podría usarse como un índice funcional de madurez (Combariza et al., 1994). Además, el Citral, representado por sus isómeros Neral y Geranial, contribuye significativamente a la calidad del sabor y el aroma del limón, y su concentración es, con mucho, el factor más importante para determinar el valor comercial de un aceite de limón (Gamarra et al., 2006); por otro lado, las actividades biológicas y químicas siempre dependen de los ingredientes activos en el aceite (AL-Jabri y Hossain, 2014).

Cuadro 3. Composición del aceite esencial de lima (*Citrus limon*) y limón (*Citrus aurantifolia*)

Componente	RI ¹	C. limon %	C. aurantifolia %
<i>a</i> -Thujene	932	0.7	0.1
<i>a</i> -Pino	939	0.7	0.6
Canfeno	955	0.1	-
Sabineno	978	3.4	1.3
β -Pino	982	13.1	8.5
Mirceno	992	2.7	1
<i>a</i> -Terpineno	1020	0.5	0.3
<i>r</i> -cimen	1028	0.3	0.5
Limoneno	1037	53.9	31.1
γ -Terpineno	1064	12.2	10.8
Terpinoleno	1090	0.8	0.8

Componente	RI ¹	C. limon %	C. aurantifolia %
Linalol	1099	0.3	1.1
Nonanal	1103	0.2	-
Terpin-4-ol	1178	0.5	1.6
<i>a</i> -Terpineol	1190	0.8	1.6
<i>n</i> -Decanal	1204	-	0.9
Nerol	1229	0.2	1.1
Neral	1242	1.7	7.1
Geraniol	1256	0.3	1.8
Geranial	1271	2.2	9.6
δ -Elemeno	1340	-	0.5
β -Cariofileno	1420	0.3	2.4
<i>trans-a</i> -Bergamoteno	1438	0.4	2.1
<i>a</i> -Humuleno	1454	-	0.3
(E)- β -Farneseno	1458	-	0.2
Germacreno D	1481	-	0.8
β -Bisaboleno	1509	0.6	6.8
δ -Cardineno	1522	-	0.6
Germacreno B	1557	-	1.8
Toral de componentes identificados	-	97.2	95.7

¹RI: Índice de retención. Fuente: Simas et al., 2017

Propiedades bioactivas

Actividad antibacteriana

Para prevenir la contaminación durante la producción, venta, distribución o para extender el tiempo de vida de anaquel de los alimentos crudos y/o procesados, generalmente se deben usar aditivos sintéticos. Sin embargo, existe un fuerte debate sobre los aspectos de seguridad de estos conservantes químicos, ya que se les considera responsables de muchos atributos carcinogénicos y teratogénicos, así como de la toxicidad residual (Skandamis et al., 2001). Por tanto, se presta cada vez más atención a los compuestos derivados de plantas y hierbas naturales como una nueva alternativa para prevenir la proliferación de microorganismos y proteger los alimentos de la oxidación (Hsouna et al., 2017).

Teóricamente se acepta que la actividad antimicrobiana de los aceites esenciales está asociada con sus componentes fitoquímicos como los monoterpenos o sesquiterpenos y sus derivados oxigenados, que son los principales componentes de los aceites esenciales y que exhiben actividades antimicrobianas potenciales (Cakir, 2004)

con amplia aplicación en la industria de la condimentación y conservación de alimentos. Sin embargo, por ser una mezcla de varios componentes, no se puede confirmar que su acción antimicrobiana se deba únicamente a uno de ellos (Bajpai et al., 2012), de hecho, la eficacia antimicrobiana de los aceites esenciales vegetales en sistemas *in vivo* contra patógenos transmitidos en alimentos, como la carne, se ha investigado pobremente. Una revisión más amplia sobre los mecanismos de acción antimicrobiana de los aceites esenciales vegetales se puede encontrar en Rivera et al., (2015).

Específicamente para el aceite esencial de limas y limones, Hsouna et al., (2017) evaluaron la actividad del aceite esencial de flores de *C. limón*, con dos componentes dominantes: limonene (39.74%) and β -Pinene (25.44%), frente a bacterias Gram + positivo (*B. cereus*, *E. faecalis*, *S. aureus*, *S. epidermis*, *B. subtilis*, *L. monocytogenes* y *M. luteus*) y Gram-negativo (*P. aeruginosa*, *E. coli*, *S. enteritidis* y *K. pneumoniae*). Los valores de MIC (*Minimum Inhibitory Concentrations*) mostraron efecto positivo antibacterial observando que las bacterias Gram-positivas son más sensibles al aceite investigado, con un rango de 0.039 a 1.25 mg/ml que las bacterias Gram-negativas en el rango de 0.625 a 2.5 mg/ml, consistente con otros estudios (Delaquis et al., 2002; Juliano et al., 2000; Lambert et al., 2001; Smith-Palmer et al., 2001). Además, evaluaron el potencial de conservación de la carne aplicando el aceite esencial de *C. limon* contra *L. monocytogenes*, observando la inhibición exitosa del desarrollo de *L. monocytogenes* en carne de vacuno picada con una aplicación de 0.06 y 0.312 mg/g de aceite esencial. Esto puede abrir nuevas y prometedoras oportunidades para la prevención de la contaminación y el crecimiento de bacterias patógenas, particularmente *L. monocytogenes*, durante el almacenamiento de carne picada de ternera a 4°C.

Con respecto a la aplicación de aceites esenciales de limón y de limas para la extensión de la vida útil de productos marinos, también se dispone de datos limitados. Al respecto, Alfonzo et al., (2017) investigaron los efectos bioconservadores de las microemulsiones de aceite esencial de limón en las sardinas (*Sardina pilchardus*) saladas. Los análisis químicos sobre sardinas saladas inoculadas con microemulsiones de aceite esencial obtenido de cáscara de *C. limon* (los monoterpenos cuantitativamente más relevantes fueron D-limoneno, β -pineno, γ -terpineno y *p*-cimeno. El *a*-terpineol, *a*-citral, β -citral, acetato de nerilo y 4-terpineol representaron la mayor concentración dentro del grupo de monoterpenos oxigenados; los hidrocarburos sesquiterpénicos también se detectaron pero a baja concentración) mostraron claramente una persistencia sustancial de varios compuestos orgánicos volátiles pertenecientes a grupos de monoterpenos, monoterpenos oxigenados y sesquiterpenos derivados del aceite esencial durante todo el período de maduración (las moléculas más representadas fueron limoneno, *p*-cimeno y β -pineno). Inmediatamente después de la adición de las microemulsiones, las concentraciones de todos los grupos microbianos disminuyeron.

La presencia de enterobacterias, estafilococos y bacterias del ácido láctico fue significativamente menor que la registrada para el ensayo del tratamiento control durante todo el período de monitoreo. Además, la adición de las microemulsiones de aceite esencial determinó una menor acumulación de histamina en las sardinas en comparación con el tratamiento control. Las puntuaciones más altas de evaluación sensorial se registraron para el sabor y la aceptabilidad general de los ensayos experimentales en presencia de aceite esencial. Los autores concluyen que con base en el creciente interés hacia los nuevos conservantes de alimentos, el uso de aceites esenciales de lima para producir pescado salado representa una estrategia válida para mejorar la seguridad y las características sensoriales de las sardinas saladas, lo que tiene implicaciones económicas, ya que la mejora de sabor debido a la adición de aceite esencial de lima podría aumentar el consumo de sardinas por parte de consumidores nuevos y regulares.

De manera similar, Djenane (2015) también evaluó el efecto del aceite esencial de cáscara de cítricos (*Citrus limón* y *Citrus aurantium*) contra *Staphylococcus aureus*, inoculada sobre *Sardina pilchardus*; sus resultados demostraron que el aceite de *Citrus limon* tuvo el mayor efecto antibacterial, con un valor MIC de 0.25 a 0.40 µl/ml, sin embargo al aumentar la dosis a 4 x MIC, el aceite esencial de *Citrus aurantium* redujo completamente el crecimiento de *S. aureus* desde el día 2 hasta el final del almacenamiento a 8°C.

Zengin y Baysal, (2014) determinaron la actividad antibacteriana de los compuestos *a*-terpineol, linalol, eucaliptol y *a*-pineno obtenidos a partir de aceites esenciales, frente a bacterias patógenas formadas durante el deterioro. Las actividades antibacterianas de estos compuestos se observaron *in vitro* en cuatro cepas Gram-negativas y tres Gram-positivas. *S. putrefaciens* fue la bacteria más resistente a todos los componentes probados, mientras que *E. coli* O157:H7 fue la cepa más sensible entre las bacterias probadas. Los experimentos de crecimiento celular *in vitro* mostraron que los compuestos probados tenían efectos tóxicos en todas las especies bacterianas con diferente nivel de potencia.

Sandoval et al., (2012), realizaron una extracción con hexano de los compuestos presentes en la cáscara de limón mexicano (*Citrus aurantifolia*) encontrando compuestos que mostraron actividad contra una cepa sensible y tres cepas mono resistentes (isoniacida, streptomycin o etambutol) de *Mycobacterium tuberculosis* H₃₇Rv. En el estudio se encontró que el ácido palmítico y 5,8-dimetoxipsraleno presentaron la mayor actividad antimicrobial.

Zu et al., (2010) evaluaron la actividad *in vitro* de diez aceites esenciales comerciales de diferentes plantas, contra *Propionibacterium acnes*, aunque los aceites esenciales de tomillo, canela y rosa exhibieron las mejores actividades antibacteriales, el

aceite esencial de lima también mostró efectos de inhibición positivos logrando matar a la bacteria dentro de 30 minutos al igual que el aceite esencial de toronja, mientras que el aceite esencial de menta no mató a la bacteria, incluso después de 120 minutos.

Socovic et al., (2010) evaluaron la actividad *in vitro* de diez aceites esenciales de diferentes plantas contra *Bacillus subtilis*, *Enterobacter cloacae*, *Escherichia coli* O157:H7, *Micrococcus flavus*, *Proteus mirabilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella enteritidis*, *S. epidermidis*, *S. typhimurium*, y *Staphylococcus aureus*. Algunos de los aceites esenciales fueron extraídos en laboratorio, mientras que el aceite esencial de *Citrus limon* fue de origen comercial y mostró tener efectos antibacteriales positivos para todas las bacterias evaluadas por el método de microdilución; mientras que por el método de zonas de inhibición no presentó actividad para *P. mirabilis* y *P. aeruginosa*, pero con resultados positivos para las demás cepas. Estos autores concluyen que el carvacrol y tímolo fueron los dos componentes de aceites esenciales con mayor actividad antibacteriana. Estos resultados concuerdan con lo reportado por de Oliveira et al., (2015) quienes determinaron el efecto de una combinación de carvacrol y 1,8-cineol frente a un cultivo mixto de *L. monocytogenes*, *Aeromonas hydrophila* y *P. fluorescens* en vegetales mínimamente procesados. El carvacrol mostró una MIC de 1.25 y 1,8-cineol de 40 µl/ml, mientras que el índice de concentración inhibidora fraccional (FIC) de los compuestos combinados fue de 0,25 contra el inóculo mixto, lo que sugiere una interacción sinérgica.

Contrario a los casos anteriores, AL-Jabri y Hossain (2014) encontraron poco o nulo efecto de aceites esenciales obtenidos de lima de Turquía y de India contra cuatro bacterias patógenas (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Proteus vulgaris*) a diferentes concentraciones, lo que demuestra que los aceites esenciales no siempre tienen efecto antimicrobiano en sistemas *in vitro* contra diferentes bacterias patógenas.

Actividad antifúngica

Las aflatoxinas son un importante grupo de contaminantes alimentarios producidos principalmente por algunos miembros de la sección 'Flavi' de *Aspergillus* en condiciones favorables de temperatura y humedad relativa. Dado que *Aspergillus* es un hongo aflatóxico cosmopolita con conidios transportados por el aire como propágulos infecciosos, habitualmente contamina alimentos, piensos y productos agrícolas como cacahuates, maíz, pistachos y semillas oleaginosas en todo el mundo (Payne, 1998). Se ha reportado ampliamente que la contaminación de los alimentos con aflatoxinas está asociada con algunas características de las micotoxicosis, como el daño hepático principalmente como carcinoma hepatocelular en humanos y varios modelos animales experimentales (Bhatnagar y García, 2001). Por lo tanto, el consumo de

alimentos contaminados con aflatoxinas es un problema grave desde el punto de vista no solo de la salud pública, sino también de los problemas económicos.

Razzaghi-Abyaneh et al., (2009) evaluaron la actividad antifúngica e inhibición de aflatoxinas de 12 aceites esenciales de doce plantas medicinales; demostrando que el aceite esencial obtenido de hojas de *Citrus limon* inhibe el crecimiento de *Aspergillus parasiticus* y la producción de aflatoxinas al igual que el aceite esencial de *Thymus vulgaris*, 5 de los aceites esenciales solo presentaron resultados positivos para una de las evaluaciones y el resto ninguna actividad.

Bosquez-Molina et al., (2010), demostraron el efecto antifúngico del aceite esencial de *Citrus aurantifolia* contra los hongos *C. gloeosporioides* y *R. stolonifer*. Fekrazad et al., (2015) partieron de la hipótesis de que la fotoactivación del aceite esencial de *Citrus aurantifolia* (comercial), fluconazol e indocianina verde pueden tratar dos hongos infecciosos mucocutáneos a fin de encontrar terapias alternativas a la terapia antifúngica tradicional. Sus resultados demostraron que el tratamiento que consistió en suspensiones de *Candida albicans* o *Trichophyton rubrum* (106 células/ml) tratadas con irradiación de láser infrarrojo, en presencia de indocianina verde, aceite esencial de limón, con la exposición secuencial a luz natural y luz de tungsteno, presentó un 99.9% de reducción en el contenido celular de ambos hongos.

Simas et al., (2017) evaluaron el efecto de cuatro aceites esenciales de cáscara de cítricos, entre ellos *Citrus limon* y *Citrus aurantifolia*, contra hongos patógenos postcosecha de frutas: *Penicillium digitatum*, *Trichoderma viride*, *Botrytis cinerea*. Encontraron, de acuerdo a sus valores de concentración mínima inhibitoria (MIC - *Minimum Inhibitory Concentration*) una modesta actividad antifúngica de todos los aceites esenciales probados, con los mejores resultados contra *B. cinerea*. Sin embargo, de acuerdo a un experimento para evaluar la actividad de los compuestos volátiles de los cítricos, citral y otros componentes quirales puros, el aceite esencial y sus componentes volátiles demostraron una influencia diferencial sobre el crecimiento de las tres especies de hongos evaluados. Mientras que todos los aceites inhibieron el crecimiento de *B. cinerea* y *T. viride*, lo opuesto se observó para *P. digitatum*, en el cual el crecimiento del hongo fue estimulado. Una prevalencia del efecto inhibitorio fue observado para los componentes quirales puros cuando se probaron contra *B. cinerea* y *T. viride*. Sin embargo, con excepción al citral, (+)- α -pineno y (+)- β -pineno, todos los componentes volátiles quirales puros estimularon el crecimiento de *P. digitatum*. Lo anterior, demuestra que los aceites esenciales de especies cítricas y sus componentes pueden inhibir o estimular el crecimiento fúngico en frutas.

Actividad antioxidante

El aceite esencial de lima (*Citrus limon*) y de limón (*Citrus aurantifolia*) adicionado a películas a base de gelatina de pescado (Tilapia) y glicerol como agente plastificante mostró actividad antioxidante, según lo reportado por Tounguanchan et al., (2013). Al respecto, Zengin y Baysal (2014), evaluaron la actividad antioxidantes de tres constituyentes de estos aceites esenciales y encontraron que *a*-terpineol tuvo la actividad más fuerte, seguido en orden descendiente por linalol y eucaliptol.

Djenane (2015) evaluaron la actividad antioxidante de aceites esenciales de cáscaras de cítricos, inoculados sobre *Sardina pilchardus* almacenada a 8°C, la presencia de los aceites esenciales extendieron significativamente la estabilidad de los lípidos, aunque *Citrus aurantium* mostró mayor actividad antioxidante que *Citrus limon* con una relación inversamente proporcional a la concentración del aceite esencial. Concluyó que los aceites esenciales de cítricos pueden ser usados como potentes preservativos naturales que contribuyen a la reducción de la oxidación de lípidos en sardinas.

Actividad citotóxica y anticancerígena

Zu et al., (2010) evaluaron la actividad anticancerígena en sistemas *in vitro* de diez aceites esenciales comerciales, entre ellos, aceite esencial de lima (*Citrus limon*) contra tres líneas de células humanas cancerígenas (próstata: PC-3; pulmón: A549 y mama: MCF-7), el aceite esencial de lima mostró resultados positivos, aunque no fue el de mejor actividad, presentó citotoxicidad en todas las concentraciones evaluadas. La citotoxicidad de los diez aceites esenciales evaluados fue significativamente más fuerte en las células de cáncer de próstata que en cáncer de mama y pulmón.

Actividad bioinsecticida

Fouad y da Camara (2017) analizaron los aceites de cáscara de *Citrus aurantifolia* y *C. reticulata* cultivados en el noreste de Brasil. La actividad insecticida de los aceites y ambas formas enantioméricas del constituyente principal limoneno [(R)- (+)-limoneno y (S)- (-)-limoneno] se evaluó frente al gorgojo del maíz (*Sitophilus zeamais*) en condiciones de laboratorio. Los resultados se compararon con Deltametrina^{MR} como control positivo. El análisis cromatográfico de los aceites cítricos demostró que el limoneno es el constituyente principal, representando el 38.9% del aceite de *C. aurantifolia* y el 80.2% del aceite de *C. reticulata*. El aceite de cáscara de *C. reticulata* demostró ser más tóxico para los adultos de *S. zeamais* en las pruebas de contacto, ingestión y fumigación que el aceite de *C. reticulata*. Se encontró una diferencia no significativa entre (R) y (S)-limoneno en las pruebas de contacto y fumigante. Sin embargo, el (R)-limoneno exhibió una mayor toxicidad contra *S. zeamais* que el (S)-limoneno durante

el ensayo de ingestión. La Deltametrina^{MR} fue mucho más tóxica en los bioensayos de contacto e ingestión que los aceites de cítricos y las dos formas enantioméricas de limoneno. El aceite de *C. reticulata* fue más repelente que *C. aurantiifolia*. En la prueba de repelencia, los adultos de *S. zeamais* fueron más susceptibles a (S)-limoneno que (R)-limoneno. Los resultados de este estudio sugieren que estos aceites cítricos y las dos formas enantioméricas de limoneno tienen efectos tóxicos sobre *S. zeamais* de diferentes maneras (es decir, a través de la cutícula, el sistema digestivo y el sistema respiratorio), así como un efecto conductual (repelencia). Chellappandian et al., (2018) incluyeron al aceite esencial de cáscara de *Citrus aurantifolia* en una revisión sobre aceites esenciales de diferentes familias de plantas que poseen actividad en contra de las larvas y mosquitos adultos del dengue.

Aditivo en biopelículas

Los plásticos derivados del petróleo representan un grave problema ambiental, por lo que se deben encontrar soluciones alternativas sostenibles. Las películas comestibles se han utilizado como portadores de aditivos alimentarios, como antioxidantes o agentes antimicrobianos. El aceite esencial de limón (*Citrus aurantifolia*) ha demostrado actuar como un agente antimicrobiano en los sistemas alimentarios que se puede incorporar a una matriz de película. El aceite esencial de lima (*Citrus limon*) y de limón (*Citrus aurantifolia*) ha sido incorporado a películas a base de gelatina de pescado (Tilapia) y glicerol como agente plastificante (Tounguanchan et al., 2013).

Bosquez-Molina et al., (2010) elaboraron una película para la protección post-cosecha de papaya a base de goma de mesquite adicionada con aceite esencial de tomillo y limón mexicano (*Citrus aurantifolia*), los resultados mostraron un 50% y 40% de reducción de descomposición debida a *C. gloeosporioides* y *R. stolonifer*, respectivamente, durante el almacenamiento, mientras que la fruta no tratada reveló 100% de descomposición.

Sánchez-Aldana (2015) evaluaron una película comestible a base de extracto péctico de bagazo y otra a base de extracto péctico de orujo de limón mexicano (*Citrus aurantifolia*) adicionadas con aceite esencial extraído de bagazo, pulpa y semillas del mismo fruto; sus resultados demostraron que los extractos pécticos de películas comestibles incorporadas con aceite esencial de limón mexicano inhibieron el crecimiento de las bacterias patógenas (*Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium*, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus* y *Listeria monocytogenes*) transmitidas por los alimentos y pueden ser útiles en la conservación de los alimentos para aumentar la vida útil. Contrario a otros estudios, ellos encontraron que las bacterias Gram negativas fueron más sensibles a la película comestible adicionada con aceite esencial, que las bacterias Gram positivas.

A pesar de que los recubrimientos de quitosano que contienen aceites esenciales de limón se han reportado como eficaces para controlar la descomposición fúngica de la fruta a 20°C durante 7 días, también se ha reportado que su aplicación en ciertos productos, como la fresa, afecta directamente las rutas metabólicas y el perfil de compuestos volátiles en la misma (Perdones et al., 2016). El quitosano puro promovió la formación de ésteres y dimetil-furfural en muy poco tiempo después del recubrimiento, mientras que los recubrimientos que contenían aceite esencial de limón incorporaron terpenos (limoneno, γ -terpineno, *p*-cimeno y *a*-citral) a los volátiles de la fruta e incrementaron el proceso fermentativo, modificando el aroma típico de la fruta. No se percibió sensorialmente ningún efecto de los recubrimientos de quitosano, se apreciaron notablemente los cambios inducidos por el aceite esencial de limón.

Peretto et al., (2014) prepararon películas comestibles de puré de fresas con carvacrol y cinamato de metilo, que utilizaron en conchas de almeja para proporcionar una liberación controlada de los vapores sin contacto directo con la fruta. Las fresas frescas se empacaron en las conchas de almeja y se mantuvieron a 10°C durante 10 días con un 90% de humedad relativa. Observaron un retraso significativo y una reducción en la severidad de la descomposición visible en la fruta que se empaquetó en las conchas con las películas tratadas y las bayas se mantuvieron más firmes y de color más brillante en comparación con las fresas sin tratar.

La kafirina es una proteína extraída del sorgo que se utiliza ampliamente en recubrimientos y películas alimenticias. Taylor et al., (2015) desarrollaron una película de kafirina que contenía citral y quercetina como agentes antimicrobianos y antioxidantes naturales. Estos autores determinaron que las películas incorporadas con citral tenían una fuerte actividad antimicrobiana contra *C. jejuni*, *L. monocytogenes* y *Pseudomonas fluorescens*. Sin embargo, ambos aceites esenciales impartieron un color amarillento a las películas, y redujeron significativamente la permeabilidad al oxígeno de la película, la tracción y la velocidad de transmisión del vapor de agua.

Micro y nanopartículas

La nano o microencapsulación de aceites esenciales podría ofrecer posibles soluciones para resolver los desafíos que enfrentan sus aplicaciones en los alimentos. Pan et al., (2014) estudiaron el timol encapsulado en caseinato sódico y encontraron que el timol encapsulado era más efectivo que el timol no encapsulado en la inhibición de patógenos alimentarios en la leche, debido a la distribución mejorada y la solubilidad del EO encapsulado.

Chen et al., (2015) coencapsularon eugenol y timol en nanopartículas de zeína/caseína que posteriormente se secaron por pulverización. Los complejos

secados por pulverización se rehidrataron fácilmente y produjeron una dispersión estable. Los aceites esenciales encapsulados mostraron liberación controlada en 24 h, con el eugenol encapsulado mostrando una tasa de liberación más alta que el timol. Se observaron efectos bactericidas y bacteriostáticos en el suero de leche para *E. coli* O157:H7 y *L. monocytogenes* Scott A, respectivamente.

Campelo et al., (2018) analizaron la influencia de la maltodextrina con dextrosa equivalente en las propiedades de reconstitución, almacenamiento, liberación y protección del aceite esencial de limón (*Citrus aurantifolia*). Se estudiaron las propiedades de reconstitución y almacenamiento de las micropartículas (solubilidad, humectabilidad y densidad), cinética de adsorción de agua, isothermas de sorción, propiedades termogravimétricas, liberación controlada y cinética de degradación del aceite esencial de limón encapsulado para medir la calidad de los materiales encapsulados. Los resultados del estudio indicaron que el grado dextrosa equivalente (DE) influye en las características de reconstitución, almacenamiento, liberación controlada y características de degradación de los compuestos bioactivos encapsulados. El aumento en el equivalente de dextrosa mejora la solubilidad, humectabilidad y densidad de las micropartículas, principalmente debido al tamaño de las moléculas de maltodextrina. La cinética de adsorción y las curvas de isothermas de sorción confirmaron el aumento de la higroscopicidad de las maltodextrinas con mayores grados de polimerización. El tamaño de las cadenas de maltodextrina influyó en la liberación y protección del aceite esencial de limón encapsulado. Finalmente, el grado de polimerización de la maltodextrina puede considerarse un parámetro que influirá en las propiedades fisicoquímicas de los alimentos microencapsulados.

Misni et al., (2017) encapsularon aceites esenciales de *Alpina galangal*, *Citrus grandis*, *Citrus aurantifolia* y DEET (*Ethyl Butylacetylaminopropionate*) en microcápsulas poliméricas. Las microcápsulas poliméricas se produjeron mediante el método de precipitación interfacial que contiene un núcleo en el que el repelente activo está implicado por la carboximetilcelulosa. Las microcápsulas se usaron para reducir la volatilización y extender la acción repelente. Las microcápsulas se produjeron e incorporaron en una loción de administración tópica. Los aceites esenciales y DEET en forma libre se incorporaron directamente en la loción que origina las formulaciones de control. La actividad repelente contra el mosquito *Culex quinquefasciatus* se evaluó en todas las formulaciones. En condiciones de laboratorio, las formulaciones que contenían aceites esenciales microencapsulados no presentaron diferencias significativas en relación con la duración del efecto repelente en comparación con el DEET microencapsulado en una concentración mayor del 20%. Todas las formulaciones microencapsuladas que contenían aceites esenciales

o DEET presentaron un efecto repelente superior al 98% con una duración de 4 h. Las formulaciones que contienen aceite esencial microencapsulado tienen un efecto repelente al 100% y duran 2 h. El control de formulaciones sin aceites esenciales y de marcas comerciales que contienen aceite esencial de citronela presentaron un efecto repelente del 100% en solo 1 h. Los hallazgos preliminares mostraron que la microencapsulación promovió un aumento en el efecto repelente de los aceites esenciales y que las formulaciones desarrolladas son mejores alternativas que las formulaciones que contienen aceites esenciales disponibles en el mercado.

Química verde

El limoneno pertenece a un grupo de productos intermedios muy importantes utilizados en la producción de productos químicos finos. Este compuesto monoterpeneo se puede obtener a partir de cáscaras de cítricos como naranja, lima o limón que son un desecho (biomasa) de la industria de cítricos. Por lo tanto, el limoneno es un compuesto renovable, fácil de conseguir y relativamente barato.

Aissou et al., (2016) analizaron la posibilidad de transformar el limoneno en una plataforma agroquímica para la producción de una amplia gama de compuestos de valor agregado para ingredientes farmacéuticos, cosméticos e ingredientes alimentarios. Esta molécula también se evaluó como un solvente alternativo para la extracción de varios compuestos bioactivos en comparación con el *n*-hexano. El limoneno se extrajo de los aceites esenciales de las cáscaras de cítricos mediante una técnica de extracción en microondas sin disolventes. El limoneno se transformó con éxito en productos con interés industrial por oxidación catalítica utilizando tres catalizadores de hierro diferentes. La capacidad del limoneno para usarse como un solvente alternativo se realizó usando dos herramientas de simulación, los parámetros de solubilidad de Hansen (HSP) y el modelo de cribado similar al conductor para solventes reales (COSMO-RS) y mediante experimentación. Los resultados indicaron que el limoneno podría ser un solvente verde prometedor y un componente para la sustitución del petróleo en la extracción o síntesis de compuestos bioactivos.

Wróblewska (2014) presentó estudios preliminares sobre el proceso de epoxidación de limoneno sobre catalizadores de tipo zeolita tales como: TS-1 y Ti-SBA-15. En estos estudios, se usó metanol como disolvente y como agente oxidante se aplicó una solución de peróxido de hidrógeno al 60% en peso. Los resultados obtenidos se compararon y se eligió el catalizador más activo. Estos estudios también han mostrado diferentes formas posibles de transformación del limoneno, no solo en la dirección del 1,2-epoxilimoneno y su diol correspondiente, sino también en la dirección de carveol, carvona y compuestos de alcohol perfílico con muchas aplicaciones. Se propusieron los posibles mecanismos de formación de los productos de oxidación alílica.

Biocombustibles

La presencia de limoneno en los medios de fermentación causa un efecto inhibitor sobre los microorganismos productores de etanol. Este monoterpene está presente como componente principal de cáscaras y bagazo de cítricos, los datos que se presentan a continuación pueden ser aplicados a los residuos obtenidos de otros cítricos como lima y limón, después de la obtención de aceites esenciales.

Las concentraciones umbral inicial y final de D-limoneno para inhibir la producción de etanol por *S. cerevisiae* se informaron en 0.33% y 0.14% (v/v), respectivamente (Wilkins et al., 2007). Una concentración mínima inhibitoria de aceite de cáscara de naranja fue reportada en 0.01% (v/v) para la fermentación etanólica de cáscara de naranja por *Pichia kudriavzevii* KVMP10 (Koutinas et al., 2016). Para la bacteria etanógena *Zymomonas mobilis* (a 37°C), se informaron concentraciones mínimas inhibitorias de aceite de cáscara de naranja para la producción de etanol de 0.05%, 0.10% y 0.20%, después de 24, 48 y 72 h, respectivamente, y no se observó inhibición después de 96 h (Wilkins, 2009). Por otra parte, *Mucor indicus*, un hongo productor de etanol filamentoso, y *Rhizopus sp.*, aislado del tempeh, han mostrado tolerancia al D-limoneno máximo al 2% en medios semisintéticos bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas (Lennartsson et al., 2012). Los dos zigomicetos son capaces de producir etanol a altas concentraciones de los compuestos antimicrobianos disponibles en hidrolizados de cáscara de naranja, que son intolerables para casi todos los microorganismos.

Lista de referencias

- Aissou, M., Chemat-Djenni, Z., Yara-Varón, E., Fabiano-Tixier, A. S., y Chemat, F. (2017). Limonene as an agro-chemical building block for the synthesis and extraction of bioactive compounds. *Comptes Rendus Chimie*, 20(4), 346-358.
- Alfonzo, A., Martorana, A., Guarrasi, V., Barbera, M., Gaglio, R., Santulli, A., ... y Francesca, N. (2017). Effect of the lemon essential oils on the safety and sensory quality of salted sardines (*Sardina pilchardus Walbaum 1792*). *Food Control*, 73, 1265-1274.
- Al-Jabri, N. N., y Hossain, M. A. (2014). Comparative chemical composition and antimicrobial activity study of essential oils from two imported lemon fruits samples against pathogenic bacteria. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 247-253.
- Bajpai, V. K., Baek, K. H., y Kang, S. C. (2012). Control of Salmonella in foods by using essential oils: A review. *Food Research International*, 45(2), 722-734.
- Bhatnagar, D. y García, S., 2001. Aspergillus. En: *Guide to food born pathogens*. New York: John Wiley and Sons Publ., pp. 35-49.
- Bosques-Molina, E., Ronquillo-de Jesús, E., Bautista-Baños, S., Verde-Calvo, J. R., y Morales-López, J. (2010). Inhibitory effect of essential oils against *Colletotrichum gloeosporioides* and *Rhizopus stolonifer* in stored papaya fruit and their possible application in coatings. *Postharvest Biology and Technology*, 57(2), 132-137.
- Bousbia, N., Vian, M. A., Ferhat, M. A., Meklati, B. Y., y Chemat, F. (2009). A new process for extraction of essential oil from Citrus peels: Microwave hydrodiffusion and gravity. *Journal of Food Engineering*, 90(3), 409-413.
- Cakir, A., Kordali, S., Zengin, H., Izumi, S., y Hirata, T. (2004). Composition and antifungal activity of essential oils isolated from *Hypericum hyssopifolium* and *Hypericum heterophyllum*. *Flavour and Fragrance Journal*, 19(1), 62-68.
- Calo, J. R., Crandall, P. G., O'Bryan, C. A., y Ricke, S. C. (2015). Essential oils as antimicrobials in food systems—A review. *Food Control*, 54, 111-119.
- Chellappandian, M., Vasantha-Srinivasan, P., Senthil-Nathan, S., Karthi, S., Thanigaivel, A., Ponsankar, A., ... y Hunter, W. B. (2018). Botanical essential oils and uses as mosquitocides and repellents against dengue. *Environment International*, 113, 214-230.
- Chen, H., Zhang, Y., y Zhong, Q. (2015). Physical and antimicrobial properties of spray-dried zein-casein nanocapsules with co-encapsulated eugenol and thymol. *Journal of Food Engineering*, 144, 93-102.
- Clevenger, J. F. (1928). Apparatus for the determination of volatile oil. *Journal of the American Pharmaceutical Association*, 17(4), 345-349.
- Cocking, T. y Middleton, G., 1935. Improved method for the estimation of the essential oil content of drugs. *Quart. J. Pharm. Pharmacol.*, Issue 8, pp. 435-442.

- Combariza, M. Y., Tirado, C. B., Stashenko, E., y Shibamoto, T. (1994). Limonene concentration in lemon (*Citrus volkameriana*) peel oil as a function of ripeness. *Journal of High Resolution Chromatography*, 17(9), 643-646.
- Darjazi, B. B. (2013). Comparison of peel oil components of grapefruit and lime (*Citrus sp.*). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 6(12), 840.
- de Oliveira, K. Á. R., de Sousa, J. P., da Costa Medeiros, J. A., de Figueiredo, R. C. B. Q., Magnani, M., de Siqueira Júnior, J. P., y de Souza, E. L. (2015). Synergistic inhibition of bacteria associated with minimally processed vegetables in mixed culture by carvacrol and 1, 8-cineole. *Food Control*, 47, 334-339.
- Delaquis, P. J., Stanich, K., Girard, B., y Mazza, G. (2002). Antimicrobial activity of individual and mixed fractions of dill, cilantro, coriander and eucalyptus essential oils. *International Journal of Food Microbiology*, 74(1-2), 101-109.
- Djenane, D. (2015). Chemical profile, antibacterial and antioxidant activity of Algerian citrus essential oils and their application in *Sardina pilchardus*. *Foods*, 4(2), 208-228.
- Eleni, M., Antonios, M., George, K., Alexios-Leandros, S., y Prokopios, M. (2009). High quality bergamot oil from Greece: Chemical analysis using chiral gas chromatography and larvicidal activity against the West Nile virus vector. *Molecules*, 14(2), 839-849.
- Espina, L., Somolinos, M., Lorán, S., Conchello, P., García, D., y Pagán, R. (2011). Chemical composition of commercial citrus fruit essential oils and evaluation of their antimicrobial activity acting alone or in combined processes. *Food Control*, 22(6), 896-902.
- Fekrazad, R., Mir, A. P. B., Barghi, V. G., y Shams-Ghahfarokhi, M. (2015). Eradication of *C. albicans* and *T. rubrum* with photoactivated indocyanine green, *Citrus aurantifolia* essential oil and fluconazole. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 12(2), 289-297.
- Fisher, K., Rowe, C., y Phillips, C. A. (2007). The survival of three strains of *Arcobacter butzleri* in the presence of lemon, orange and bergamot essential oils and their components in vitro and on food. *Letters in Applied Microbiology*, 44(5), 495-499.
- Fouad, H. A., y da Camara, C. A. (2017). Chemical composition and bioactivity of peel oils from *Citrus aurantiifolia* and *Citrus reticulata* and enantiomers of their major constituent against *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products Research*, 73, 30-36.
- Gamarra, F. M. C., Sakanaka, L. S., Tambourgi, E. B., y Cabral, F. A. (2006). Influence on the quality of essential lemon (*Citrus aurantifolia*) oil by distillation process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 23(1), 147-151.

- Guenther, E., 1955. *The essential oils*. New York: Fritzsche Brothers INC.
- Hossain, M. A., Saliha, R. A. H., Afaf, M. W., Qasim, A. R., y Jamal, N. S. (2014). Comparison of chemical constituents and in vitro antimicrobial activities of three brands clove essential oils from Golf region. *Asian Pacific Journal of Tropical Disease*, 4(4), 262-268.
- Hsouna, A. B., Halima, N. B., Smaoui, S., y Hamdi, N. (2017). *Citrus lemon* essential oil: chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities with its preservative effect against *Listeria monocytogenes* inoculated in minced beef meat. *Lipids in Health and Disease*, 16(1), 146.
- Juliano, C., Mattana, A., y Usai, M. (2000). Composition and in vitro antimicrobial activity of the essential oil of *Thymus herba-barona* Loisel growing wild in Sardinia. *Journal of Essential Oil Research*, 12(4), 516-522.
- Kelen, M., y Tepe, B. (2008). Chemical composition, antioxidant and antimicrobial properties of the essential oils of three *Salvia* species from Turkish flora. *Bioresource Technology*, 99(10), 4096-4104.
- Koutinas, M., Patsalou, M., Stavrinou, S., y Vyrides, I. (2016). High temperature alcoholic fermentation of orange peel by the newly isolated thermotolerant *Pichia kudriavzevii* KVMP 10. *Letters in Applied Microbiology*, 62(1), 75-83.
- Kubeczka, K., 2016. Production of essential oils. En: *Handbook of Essential Oils: Science, Technology, and Applications*. Boca Raton(FL): CRC, Press., pp. 5-33.
- Lambert, R. J. W., Skandamis, P. N., Coote, P. J., y Nychas, G. J. (2001). A study of the minimum inhibitory concentration and mode of action of oregano essential oil, thymol and carvacrol. *Journal of Applied Microbiology*, 91(3), 453-462.
- Lawrence, B., 1995. The isolation of aromatic materials from natural plant products. En: *Manual of the Essential Oil Industry*. Viena: Unido, pp. 57-154.
- Lawrence, B. M. (2009). A preliminary report on the world production of some selected essential oils and countries. *Perfumer and Flavorist*, 34(1), 38-44.
- Lennartsson, P. R., Ylittervo, P., Larsson, C., Edebo, L., y Taherzadeh, M. J. (2012). Growth tolerance of Zygomycetes *Mucor indicus* in orange peel hydrolysate without detoxification. *Process Biochemistry*, 47(5), 836-842.
- Misni, N., Nor, Z. M., y Ahmad, R. (2017). Repellent effect of microencapsulated essential oil in lotion formulation against mosquito bites. *Journal of Vector Borne Diseases*, 54(1), 44-53.
- Pan, K., Chen, H., Davidson, P. M., y Zhong, Q. (2014). Thymol nanoencapsulated by sodium caseinate: physical and antilisterial properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(7), 1649-1657.

- Payne, G., 1998. Process of contamination by aflatoxin-producing fungi and their impact on crops. En: *Mycotoxins in Agriculture and Food Safety*. New York: Marcel Dekker, Inc., pp. 729-306.
- Perdones, Á., Escriche, I., Chiralt, A., y Vargas, M. (2016). Effect of chitosan–lemon essential oil coatings on volatile profile of strawberries during storage. *Food Chemistry*, 197, 979-986.
- Peretto, G., Du, W. X., Avena-Bustillos, R. J., Sarreal, S. B. L., Hua, S. S. T., Sambo, P., y McHugh, T. H. (2014). Increasing strawberry shelf-life with carvacrol and methyl cinnamate antimicrobial vapors released from edible films. *Postharvest Biology and Technology*, 89, 11-18.
- Phi, N. T. L., Tu, N. T. M., Nishiyama, C., y Sawamura, M. (2006). Characterisation of the odour volatiles in *Citrus aurantifolia* Persa lime oil from Vietnam. *Developments in Food Science*, 42, 193-196.
- Razzaghi-Abyaneh, M., Shams-Ghahfarokhi, M., Rezaee, M. B., Jaimand, K., Alinezhad, S., Saberi, R., y Yoshinari, T. (2009). Chemical composition and antiaflatoxic activity of *Carum carvi* L., *Thymus vulgaris* and *Citrus aurantifolia* essential oils. *Food Control*, 20(11), 1018-1024.
- Simas, D. L., de Amorim, S. H., Goulart, F. R., Alviano, C. S., Alviano, D. S., y da Silva, A. J. R. (2017). Citrus species essential oils and their components can inhibit or stimulate fungal growth in fruit. *Industrial Crops and Products*, 98, 108-115.
- Skandamis, P., Koutsoumanis, K., Nychas, G. J. E., y Fasseas, K. (2001). Inhibition of oregano essential oil and EDTA on *Escherichia coli* O157: H7. *Italian Journal of Food Science*, 13(1), 65-75.
- Smith-Palmer, A., Stewart, J., y Fyfe, L. (2001). The potential application of plant essential oils as natural food preservatives in soft cheese. *Food Microbiology*, 18(4), 463-470.
- Soković, M., Glamočlija, J., Marin, P. D., Brkić, D., y van Griensven, L. J. (2010). Antibacterial effects of the essential oils of commonly consumed medicinal herbs using an in vitro model. *Molecules*, 15(11), 7532-7546.
- Taylor, J., Taylor, J. R. N., Dutton, M. F., y De Kock, S. (2005). Identification of kafirin film casting solvents. *Food Chemistry*, 90(3), 401-408.
- Tongnuanchan, P., Benjakul, S., y Prodpran, T. (2013). Physico-chemical properties, morphology and antioxidant activity of film from fish skin gelatin incorporated with root essential oils. *Journal of Food Engineering*, 117(3), 350-360.
- Vekiari, S. A., Protopapadakis, E. E., Papadopoulou, P., Papanicolaou, D., Panou, C., y Vamvakias, M. (2002). Composition and seasonal variation of the essential oil from leaves and peel of a Cretan lemon variety. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(1), 147-153.

- Wilkins, M. R. (2009). Effect of orange peel oil on ethanol production by *Zymomonas mobilis*. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 538-541.
- Wilkins, M. R., Widmer, W. W., y Grohmann, K. (2007). Simultaneous saccharification and fermentation of citrus peel waste by *Saccharomyces cerevisiae* to produce ethanol. *Process Biochemistry*, 42(12), 1614-1619.
- Wróblewska, A. (2014). The epoxidation of limonene over the TS-1 and Ti-SBA-15 catalysts. *Molecules*, 19(12), 19907-19922.
- Zengin, H., y Baysal, A. H. (2014). Antibacterial and antioxidant activity of essential oil terpenes against pathogenic and spoilage-forming bacteria and cell structure-activity relationships evaluated by SEM microscopy. *Molecules*, 19(11), 17773-17798.
- Zu, Y., Yu, H., Liang, L., Fu, Y., Efferth, T., Liu, X., y Wu, N. (2010). Activities of ten essential oils towards *Propionibacterium acnes* and PC-3, A-549 and MCF-7 cancer cells. *Molecules*, 15(5), 3200-3210.

Capítulo IV





—



Capítulo IV

Importancia de la pectin metilesterasa en los cítricos y su relevancia tecnológica en la industria alimentaria¹

M.C. Jesús Andrés Salas Tovar

M.C. Saraí Escobedo García

Dr. Adriana Carolina Flores Gallegos

PhD. Raúl Rodríguez Herrera²

Resumen

En este capítulo se describen las características y usos de la pectin metilesterasa (PME), la cual posee múltiples aplicaciones en ciencia y tecnología de alimentos. Asimismo, se discute el rol de la PME en la industria de los cítricos, dando un enfoque de su importancia para influir en la estabilidad de los zumos obtenidos a partir de este tipo de frutos y su relevancia como parámetro de la efectividad de los procesos de pasteurización en los mismos. Adicionalmente, se reportan los usos de la PME más allá de sus efectos en los zumos, en campos como la modificación dirigida de la pectina para su uso como aditivo alimentario, además de su acción como coadyuvante en tratamientos del mejoramiento de textura en frutos y vegetales.

Palabras clave: pectin metilesterasa, cítricos, extracción, tecnología de alimentos.

¹ Todos los autores se encuentran adscritos a la Universidad Autónoma de Coahuila. Facultad de Ciencias Químicas. Depto. de Investigación en Alimentos. Blvd. Venustiano Carranza y José Cárdenas s/n, República Oriente, Saltillo 25280, Coahuila, México.

² Autor para correspondencia: raul.rodriguez@uadec.edu.mx

Pectin metilesterasa

La pectin metilesterasa (PME) (E.C. 3.1.1.11), también referida como pectinesterasa, es una de las enzimas que participa en las modificaciones estructurales de la pectina. La función de la PME es catalizar la hidrólisis de los enlaces metil-éster en los residuos de ácido galacturónico que se encuentran en la región lineal de la pectina (denominada homogalacturonano), produciendo metanol y grupos carboxilo libres (Figura 1) (Jolie et al., 2010). Estas enzimas desempeñan diferentes roles de relevancia en las plantas, algunos de estos en el desarrollo de las mismas especialmente en el proceso de expansión de las paredes celulares, en la germinación de semillas y el crecimiento del tubo de polen, entre otras (Bosch et al., 2005; Müller et al., 2013; Pelloux et al., 2007). Asimismo, cumple con un papel relevante en el reblandecimiento ocurrido durante la maduración de los frutos (Terefe et al., 2014).

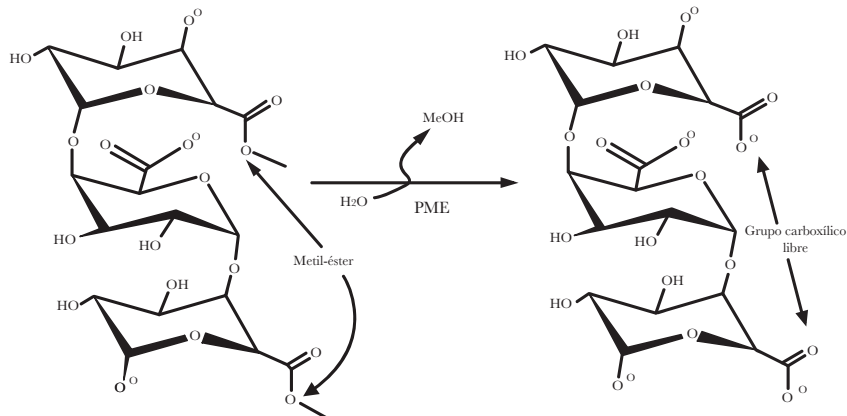


Figura 1. Esquema de reacción de la pectin metilesterasa. Fuente: Jolie et al., 2010; Ochoa-Villarreal et al., 2012

Características de las pectin metilesterasas

Las PME's son catalogadas de diferentes maneras con base en sus características estructurales y fisicoquímicas. Una de estas clasificaciones se refiere a la presencia o ausencia de una extensión en la región N-terminal, la cual comparte similitud con el dominio inhibitorio de la PME (PMEI, Pfam04043, IPR006501). Las PME's del tipo-I cuentan con la extensión en la región N-terminal y son características de plantas superiores, en tanto, las PME del tipo-II no cuentan con dicha extensión y se encuentran presentes en hongos y bacterias (El-Moneim et al., 2014). Otra importante clasificación se encuentra en la capacidad de las PME's para actuar en presencia o ausencia de cationes, denominándose PME's independientes de la sal y dependientes de la sal, respectivamente (Cameron et al., 2003; Savary et al., 2002). Además de esto, las PME's en vegetales poseen propiedades distintivas, las cuales son resumidas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características de las PME's de origen vegetal

Propiedad	Rango *
pH óptimo	6 - 9
Temperatura óptima (°C)	50 - 70
Peso molecular (kDa)	30 - 50
NaCl (M)	0.1 - 0.3

*Los valores son representativos de las diferentes fuentes vegetales de PME. Fuente: Laratta y col., 2008; Özler y col., 2008; Ünal y Şener, 2015; Vasu y col., 2012.

Por otra parte, un importante rasgo de las PME's es el patrón de actividad que desempeñan. De tal modo que se han demostrado diferencias en la manera en que las PME's provenientes de plantas y bacterias desesterifican con respecto a las PME's de hongos; dado el hecho de que las primeras son capaces de generar bloques de residuos de ácido galacturónico de-metilesterificados (mecanismo de cadena simple) (Kim et al., 2005; Kim et al., 2013), variando entre estas la longitud de los bloques generados (Cameron et al., 2011; Remoroza et al., 2015), en tanto, las PME's provenientes de hongos realizan la catálisis de modo aleatorio, la cual es descrita por el mecanismo de cadena múltiple (Duvetter et al., 2006; van Alebeek et al., 2003). No obstante, dependiendo del pH, es posible que las PME's de plantas presenten un mecanismo de reacción más relacionado al de cadena múltiple, al variar el número de hidrolisis por evento catalítico (Cameron et al., 2011; Denès et al., 2000a).

Determinación de la actividad pectin metilesterasa

Múltiples métodos han sido desarrollados para la determinación de la actividad PME, donde los más empleados básicamente se derivan en dos vertientes. Una de estas son los métodos que involucra la titulación de los grupos carboxilo liberados por la enzima, siendo este uno de los más estandarizados y reportados para la determinación de la actividad PME. Durante este ensayo se adiciona una base (comúnmente NaOH) con el objetivo de mantener constante el pH de la reacción, mientras se registra el volumen adicionado de álcali, este proceso es llevado a cabo con un sistema de titulación automática, lo cual incrementa la replicabilidad del ensayo (Kertesz, 1955; Rouse y Atkins, 1955). Finalmente, la actividad es calculada mediante la fórmula:

$$\text{Actividad PME (U mL}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{mL NaOH}) (\text{molaridad del NaOH}) (1000)}{(\text{tiempo}) (\text{mL de muestra})}$$

Donde una unidad de actividad PME es considerada la cantidad de enzima requerida para liberar 1 μmol de grupos carboxilo por minuto (de Assis et al., 2001). Asimismo, es posible determinar la actividad PME mediante el uso de indicadores de pH, dando seguimiento de igual manera a la reacción (Cameron et al., 1992). Por otra parte, se tiene la opción de analizar la actividad PME mediante la cuantificación del metanol (liberado igualmente por la PME). Donde en esencia, se hace uso de la enzima alcohol oxidasa para convertir el metanol producido por la PME en formaldehído, el cual puede luego reaccionar con diversos compuestos, para así poder darle un seguimiento espectrofotométrico a la reacción (Klavons y Bennett, 1986; Salas-Tovar et al., 2017).

Estrategias de extracción y purificación de la pectin metilesterasa

El desarrollo de metodologías para la extracción de la PME ha presentado un desarrollo significativo y ya sea para su estudio, o bien para el aprovechamiento de esta enzima en procesos tecnológicos, las estrategias aplicadas para su obtención cobran relevancia. Durante la extracción de la PME, el empleo de soluciones de alta fuerza iónica en presencia de un amortiguador es frecuentemente el proceso más utilizado, ya que se ha comprobado que en fuentes vegetales esta es una enzima que se encuentra iónicamente ligada a la pared celular (aunque, es posible encontrar una fracción menor no-ligada) (Castro et al., 2008; Castro et al., 2004). Con el propósito de lograr una completa extracción de la PME, la solución amortiguadora (*e.g.* Tris-HCl) es adicionada con cloruro de sodio en altas concentraciones ($\sim 58.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) (Ly Nguyen et al., 2002; Ünal y Bellur, 2009). En tanto, el uso del amortiguador surge de la necesidad de mantener pH del proceso de extracción cercano al óptimo de la enzima (7.5 - 8.0), teniendo en cuenta casos de fuentes vegetales que presentan pH ácidos, como la cáscara de naranja, la cual puede mostrar un pH tan bajo como 3.64 (Ángel Siles López et al., 2010).

El proceso de extracción comprende una etapa inicial de homogenización, la cual puede realizarse utilizando agua destilada a baja temperatura (4°C), con el propósito de reducir las pérdidas de actividad. Durante este proceso, se pretende remover componentes solubles, como algunos pigmentos, proteínas, pectinas, azúcares, entre otros (Ly-Nguyen et al., 2002; Ünal y Şener, 2015). A continuación, el homogenizado es filtrado o centrifugado, obteniéndose de dicho proceso un pellet, que luego es combinado con la solución de extracción. En esta etapa, la enzima es liberada mediante la agitación de dicha mezcla, manteniendo la temperatura constante (4°C). Una vez concluido este proceso, las proteínas en el extracto crudo son precipitadas a través de una solución saturada de sulfato de

amonio. Posteriormente, las sales en el extracto son removidas mediante diálisis, utilizando el mismo amortiguador empleado en la extracción. Del mismo modo, se pueden retirar las sales y concentrar el extracto crudo mediante diafiltración y ultrafiltración, respectivamente (Cameron et al., 1998; Savary et al., 2002).

Para proseguir con el proceso de purificación de la PME, diversas técnicas cromatográficas han sido reportadas con este objetivo, ejemplos de ellas son: filtración en gel, intercambio iónico, además de diferentes técnicas cromatográficas por afinidad (Cameron y Grohmann, 1996; de Assis et al., 2002; Dixit et al., 2013; Kant y Gupta, 2012; Vasu et al., 2012). Sin embargo, un proceso estandarizado para la obtención de PME de alta calidad a través de la cromatografía por afinidad ha sido descrito por Denès et al., (2000b), del cual es posible obtener PME pura, utilizando la columna CNBr-Sefarosa 4B-PMEI. Esta columna es preparada utilizando el inhibidor proteico de la PME purificado a partir de kiwi, que se une en una proporción estequiométrica de 1:1 con la enzima. Dicho inhibidor, a su vez es purificado del extracto crudo de kiwi mediante la columna PME-cítrica-Sefarosa. Este método produce una enzima de alta pureza, dentro de la cual es posible localizar isoenzimas mediante técnicas electroforéticas y diversas separaciones cromatográficas.

Pectin metilesterasa en cítricos

En la mayoría de las especies de cítricos se ha identificado la presencia de al menos 12 isoformas, las cuales varían en sus patrones de expresión, así como en sus características físicas y bioquímicas (Ingallinera et al., 2005; Pilnik y Voragen, 1993). De tal modo que la actividad PME puede encontrarse en los distintos tejidos de diferentes especies de cítricos (Cameron et al., 2005), presentando además niveles de actividad muy variables (Cuadro 2). De acuerdo con Cameron et al., (1997), se pueden encontrar diversas formas de la PME en diferentes secciones de la naranja Valencia. Del mismo modo, las múltiples formas de la PME presentes en los tejidos de naranja, son capaces de desestabilizar la turbidez del jugo de naranja en diferentes proporciones, siendo la fracción termo-estable de la cáscara (albedo y flavedo) la que provoca la más rápida clarificación del zumo (7 días/4°C).

Dado su efecto en la estabilidad de la turbidez en el jugo de naranja, Cameron et al., (1998) profundizaron en el estudio de la PME presente en la cáscara de naranja. En el proceso de purificación descrito por este autor, el sobrenadante obtenido tras el proceso de diálisis se purificaba mediante cromatografías de intercambio aniónico y afinidad (Heparina y Concavalina-A). Tras la cromatografía de afinidad con Heparina es posible elucidar cuatro picos con actividad PME, presentando cada uno de ellos propiedades distintivas. Entre las isoformas presentes en la cáscara de naranja, una de ellas se caracterizaba por ser termoestable y parcialmente

independiente de la sal, además de ser una proteína N-glicosilada (Cameron et al., 2005). Igualmente, es posible encontrar tres isoenzimas termolábiles, dentro de las cuales una poseía el rasgo de ser dependiente de la sal, en tanto otra de ellas mostró ser independiente de la sal (Cameron et al., 2003; Savary et al., 2002).

Todas eran capaces de formar bloques de residuos de ácido galacturónico de-metilesterificados, a través de un mecanismo de cadena múltiple, con un grado de procesamiento de alrededor de 10 hidrólisis por evento catalítico (Cameron et al., 2008; Cameron et al., 2011). Siendo el mecanismo de acción de las PME's un factor relevante, ya que este determina la propiedades funcionales que la pectina modificada con dicha enzima puede llegar a tener (Luzio y Cameron, 2008).

Cuadro 2. Actividad PME en diferentes tipos de cítricos

Especie	Variedad	Sección	Actividad PME	Referencias
<i>C. sinensis</i> (L.) Osb.	Tarocco	Pulpa	13.88	(Spagna et al., 2003)
	Moro	Zumo y pulpa	14.9	(Ingallinera et al., 2005)
	Sanguinello		10.9	
	Valencia	Pulpa	12.12*	(Lee et al., 2008)
	Valencia Late	--	7.05	(Espachs-Barroso et al., 2006)
	Navel	Fruto entero	47.9	(Nielsen y Christensen, 2002)
	Pera-Río	Zumo	4.51*	(Do Amaral et al., 2005)
<i>C. paradisi</i> Macf.	--	Fruto entero	10.9	(Nielsen y Christensen, 2002)
	Marsh	Pulpa	3.8*	(Corredig y Wicker, 2002)
	--	Segmentos de carpelos	2.64	(Guiavarc'h et al., 2005)
<i>C. limon</i>	--	Fruto entero	2.8	(Nielsen y Christensen, 2002)
	--	Pulpa	2.5*	(Kuldiloke et al., 2007)
<i>C. aurantium</i> L.	--	Zumo	0.44*	(Aghajanzadeh et al., 2016b)
<i>C. aurantifolia</i>	--	Fruto entero	6.6	(Nielsen y Christensen, 2002)
<i>C. reticulata</i>	--		8.5	
<i>C. bergamia</i> R.	--	Endocarpio	0.4*	(Laratta et al., 2008)

Los datos con * en la columna de "Actividad PME" son reportados en U mL⁻¹ de zumo o extracto crudo, el resto de los mismos son representados en U g⁻¹ de fruto fresco.

-- Dato no reportado.

Fuente: elaboración propia

Importancia de la pectin metilesterasa en la industria de los cítricos

Para la elaboración de zumos, se llevan a cabo diversos pasos durante la producción, que incluyen la limpieza, clasificación, pelado, extracción de jugo, filtración y tratamiento térmico o no térmico (pasteurización o esterilización), llenado, sellado y enfriamiento. Mediante el tratamiento térmico se logra la inactivación de microorganismos y enzimas, para así garantizar la seguridad alimentaria y aumentar la vida de anaquel del jugo (Aghajanzadeh et al., 2016a). Los jugos de frutas y vegetales son un sistema bifásico coloidal, que consiste en una fase líquida, llamada “suero” y una fase sólida denominada turbidez (Terefe et al., 2014). Durante la pasteurización de los jugos, la inactivación de la PME es considerada un parámetro de calidad, ya que la pérdida de la turbidez está estrechamente ligada a esta enzima. Además, de influir en la estabilidad, la viscosidad, el color, la sensación en la boca y el sabor de los jugos (Tiwari et al., 2009).

Cuando la pulpa es molida para la obtención de jugos, la pectina se encuentra solubilizada causando un aumento en la viscosidad y en las partículas de la pulpa dispersa en el jugo. Durante este proceso la PME y otras moléculas de alto peso molecular (proteínas, hesperidina, celulosa, hemicelulosa y pectina) son liberadas por la ruptura de las células endocarpiales debido a la extracción mecánica del jugo. Mientras tanto otras moléculas de pectina permanecen unidas a las fibrillas de celulosa por medio de las cadenas laterales de hemicelulosa, por lo cual se facilita la retención de agua (Kimball, 1999). La pectina constituye a una pequeña porción de las moléculas que causan la turbidez en el jugo (~5%) (Kimball, 1991), sin embargo, juega un papel importante en la estabilidad del mismo. La estructura de la pectina posee grupos carboxilo, muchos de los cuales están esterificados con metanol para formar grupos metoxilo. Estos grupos metoxilo evitan las reacciones de polimerización y gelatinización en la pectina. La desesterificación de la pectina es provocada por la actividad de la PME, donde el calcio puede reaccionar fácilmente con pectina desmetilada para producir pectatos insolubles (Fig. 2) (Aghajanzadeh y Ziaifar, 2018).

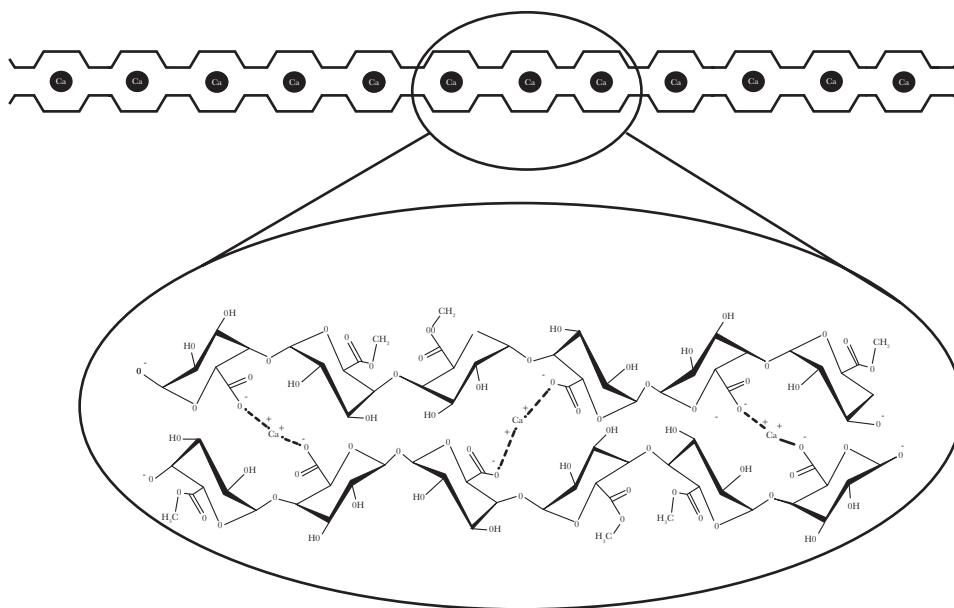


Figura 2. Entrecruzamiento mediado por calcio de moléculas de pectina desesterificadas por PME. Fuente: Elaboración propia

El tratamiento térmico es el método más comúnmente utilizado para garantizar la inactivación de los microorganismos y las enzimas y de este modo prolongar la vida de anaquel de los jugos. Generalmente, los jugos con pH alto (> 4.6) son calentados a temperaturas por encima de 100°C (esterilización); mientras que los jugos con pH bajo (< 4.6) requieren un tratamiento térmico con temperaturas por debajo de 100°C (pasteurización) (Terefé et al., 2014). La determinación de la actividad PME como índices de la efectividad de la pasteurización en jugos de cítricos es debido a su elevada resistencia a altas temperaturas, incluso mayor que la de algunos microorganismos (Polydera et al., 2004).

La inactivación de los microorganismos y enzimas como la PME ocurre durante la fase de calentamiento o *Come up time* (CUT) y la fase de mantenimiento. Tajchakavit y Ramaswamy (1997), calcularon que el porcentaje de efectividad de la inactivación de la PME de jugo de naranja en la fase de calentamiento se encuentra entre 46 y 58% a $70\text{-}90^{\circ}\text{C}$. No obstante, para lograr una mayor aceptación de los consumidores es necesario evitar el sobrecalentamiento del producto, debido a que puede causar pérdidas en las propiedades organolépticas y nutricionales (Ling et al., 2015). Asimismo, es posible aplicar tratamientos alternativos para la inactivación

de la PME, algunos ejemplos son el calentamiento óhmico, microondas, pulsos eléctricos, altas presiones hidrostáticas y el dióxido de carbono a altas presiones.

Inactivación de la pectin metilesterasa por tratamientos térmicos

La pasteurización térmica convencional consiste en el calentamiento del jugo hasta que este alcance la temperatura deseada (90-98°C) manteniéndola por un tiempo específico (10-60 s), basado en la resistencia térmica de la enzima (Vervoort et al., 2011). Aghajanzadeh et al., (2016b), encontraron tres isoformas de la PME en jugo de naranja agria (*Citrus aurantium* L.) tratado a 60°C, mientras que a mayores temperaturas (70, 80 y 90°C) solo fueron identificadas 2 isoformas. Resultados similares se encontraron en jugo de limón (*Citrus aurantifolia*) donde se encontraron 2 isoformas de la enzima bajo las mismas condiciones (Aghajanzadeh et al., 2016a). En general, para que el tratamiento térmico convencional sea eficiente se requiere un tiempo prolongado de calentamiento que conduce a un deterioro de la calidad del jugo, afectando el color, el contenido de vitaminas y las características reológicas (Ling et al., 2015).

Otra alternativa es el uso de las microondas, las cuales, en el espectro electromagnético, se encuentran en el rango de 300 MHz y 300 GHz. Durante la pasteurización mediante microondas, el jugo es colocado entre los electrodos donde las moléculas polares (como el agua) y los compuestos iónicos (como las sales) se reorientan continuamente para alinearse con el campo eléctrico (Aghajanzadeh y Ziaifar, 2018). Demirdöven y Baysal (2016), utilizaron un sistema de calentamiento con microondas (900 W, 2450 MHz) para procesar jugo de naranja Navel, donde encontraron una reducción del 95.36 y 93.04% en la actividad de PME usando condiciones de tratamiento de 40 mL min⁻¹/83°C y 50 mL min⁻¹/75°C, respectivamente. En la literatura no se han reportado estudios acerca de la variación de la actividad PME durante el almacenamiento de jugos de cítricos, sin embargo, en un estudio realizado en jugo de guayaba se reportó que no se detectó actividad PME durante el almacenamiento (Salazar-González et al., 2014).

También se ha utilizado el calentamiento óhmico para la inactivación de la PME. Este método consiste en el paso de una corriente eléctrica a través de los alimentos, los cuales oponen una resistencia eléctrica y esto provoca el aumento de la temperatura interna de los mismos (Kaur y Singh, 2016). Leizeron y Shimoni (2005), observaron una reducción en la actividad PME del 90-98% durante el calentamiento óhmico de zumo de naranja Shamouti (50 Hz, 20 cm distancia entre electrodos, 8 kV voltaje máximo). Además, encontraron que la actividad PME no se alteró significativamente durante el almacenamiento del jugo durante 100 días, lo que refleja la inactivación irreversible de la enzima mediante este tratamiento.

Igualmente, Demirdöven y Baysal (2014) obtuvieron una reducción del 96% de la actividad PME después de un tratamiento de calentamiento óhmico (69°C, 50 Hz, 42 V · cm⁻¹) de jugo de naranja Navel.

Inactivación de la pectin metilesterasa por tratamientos no-térmicos

Las principales desventajas de los tratamientos térmicos son la pérdida de las propiedades nutricionales, organolépticas y sensoriales del jugo. Por lo cual, para producir jugos con mejor calidad, los investigadores han optado por el empleo de tratamientos no-térmicos como los campos eléctricos pulsantes, el ultrasonido y las altas presiones hidrostáticas (Swamy et al., 2018).

Los campos eléctricos pulsantes son una tecnología eficiente, aplicada en el procesamiento de diversos alimentos, principalmente en la producción de zumos. En este proceso los jugos se someten a pulsos eléctricos controlados de alto voltaje (hasta 70 kV · cm⁻¹) por algunos microsegundos, para desactivar microorganismos y enzimas (Buckow et al., 2011). Debido a los cambios en la estructura conformacional de las proteínas, la PME se inactiva durante este tratamiento (Samaranayake y Sastry, 2016). Utilizando esta tecnología, Elez-Martínez et al., (2007) lograron reducir hasta en un 80% la actividad PME en jugo de naranja Navelina (35 kV · cm⁻¹ por 1 500 μs). Asimismo, Agcam y col. (2014) redujeron hasta en un 93.8% la actividad PME con pulsos eléctricos (25.3 kV · cm⁻¹ por 1 206 μs) y observaron que no había detección de la actividad durante 180 días de almacenamiento a 4°C.

Otro de los tratamientos utilizados para la inactivación de la PME es el ultrasonido. Durante este tratamiento en los jugos se generan micro-burbujas que estallan violentamente, se forman cuando las ondas sónicas pasan a través de los líquidos (Swamy et al., 2018). Al aplicar el tratamiento con ultrasonido, Tiwari et al., (2009) obtuvieron una reducción del 62% en la actividad PME con una frecuencia de 20 kHz y una potencia acústica de 1.05 W mL⁻¹.

Igualmente, se ha estudiado la inactivación de la PME con altas presiones hidrostáticas, donde se han empleado presiones entre 100 y 800 MPa para garantizar la efectividad del tratamiento. Mediante estas presiones se logran alterar las estructuras secundarias y terciarias de las proteínas, provocando una inestabilidad y pérdida de la actividad enzimática (Augusto et al., 2018). Torres et al., (2016), lograron reducir hasta un 90.05% la actividad PME mediante el uso de este procesamiento, al aplicar 500 MPa de presión durante 15 min a 50°C en jugo de naranja.

Indiscutiblemente, la inactivación de la PME es una necesidad básica en la industria de los jugos de cítricos para mantener su estabilidad y así lograr una mayor aceptación por los consumidores. Debido a esto se presentan una gran variedad

de tratamientos térmicos y no-térmicos, no obstante, los elevados costos de los tratamientos no-térmicos dificulta que estos sean escalados a la industria de los zumos, por lo cual la opción más viable hasta ahora continúa siendo el uso de los tratamientos térmicos y ocasionalmente una combinación de los últimos con los no-térmicos.

Aplicaciones tecnológicas de la pectin metilesterasa en la industria alimentaria

Más allá del alto impacto que la PME cobra en la industria de los cítricos, esta es una enzima capaz de influir en múltiples campos de la ciencia y tecnología de alimentos. Sus aplicaciones se encuentran estrechamente relacionadas a su capacidad para modificar las propiedades estructurales de la pectina. Dicho polisacárido encuentra vastas aplicaciones en la industria alimentaria al ser aplicado como espesante, estabilizante y gelificante (Buchweitz et al., 2013; Garrido et al., 2015; Gómez et al., 2013). De tal modo que el rol desempeñado por la PME se ubica en su mecanismo específico de acción, el cual produce bloques de residuos de ácido galacturónico demetilesterificados (Kim et al., 2005; Kim et al., 2013). Dicho patrón de acción ha demostrado promover el entrecruzamiento de las moléculas de pectina en mayor proporción que la hidrólisis aleatoria (característica de bases y PME's fúngicas) (Slavov et al., 2009). Adicionalmente, se ha demostrado que la reacción catalizada por la PME a diferencia de la desesterificación generada por bases, no depolimeriza la pectina (Hotchkiss et al., 2002), siendo el peso molecular otra característica estructural relevante en este polisacárido, ya que las cadenas de alto peso molecular brindan un mayor número de sitios de interacción para la asociación de moléculas de pectina (Yoo et al., 2009).

Uno de los principales usos de la pectina en alimentos se encuentra en la formación de geles, que posteriormente pueden ser empleados en la formulación de jaleas y mermeladas (May, 1990). El proceso de gelificación puede inducirse en pectinas de bajo metoxilo (grado de esterificación <50%) a pH ácido con la adición o no de azúcares, o bien por el entrecruzamiento de las cadenas con calcio (Figura 2) (Han et al., 2017; Yuliarti et al., 2017). No obstante, es posible generar la gelificación de pectinas de alto metoxilo (grado de esterificación >50%) debido a la formación de bloques desesterificados (producidos por la PME), con la adición de calcio (Cameron et al., 2005). Las pectinas modificadas por catálisis de la PME poseen un valor agregado en la producción de jaleas, dado que su gelificación no requiere la adición de azúcares, favoreciendo la formulación de un producto con reducción en el contenido de azúcar (Wang et al., 2013).

Mejoramiento de textura por tratamientos con pectin metilesterasa

Para evitar la degradación de las propiedades de los frutos, específicamente textura, se han propuesto varios procedimientos, entre estos los tratamientos centrados en la activación de la PME, la cual puede promover la mejora de la textura de frutas y verduras mediante la formación de pectinas de bajo metoxilo (Sanjuán et al., 2005). Considerando que las pectinas son uno de los principales componentes de las paredes celulares vegetales, el entrecruzamiento de sus cadenas por medio de iones divalentes, genera una mayor firmeza en el tejido vegetal (Fig. 2) (Jolie et al., 2010; Ochoa-Villarreal et al., 2012). Este tipo de tratamiento es comúnmente realizado mediante la activación de la PME endógena por métodos de escaldado a bajas temperaturas por tiempos prolongados (Abu-Ghannam y Crowley, 2006). No obstante, en casos donde la actividad endógena de esta enzima es demasiado baja, se opta por la alternativa de la infusión al vacío de una PME exógena de alta actividad (*e.g.* PME cítrica), este tipo de procedimiento ha mostrado buenos resultados cuando ha sido probado en frutas como fresas y mangos (Duvetter et al., 2005; Sirijariyawat et al., 2012).

La participación de la PME en las modificaciones estructurales de la pectina presente en frutas y los vegetales la vuelve una enzima importante. En los cítricos el estudio de esta enzima tiene peso específico debido a las diversas aplicaciones que posee en la industria alimentaria, principalmente en el mejoramiento de la textura y estabilidad de zumos, además de su participación en la síntesis de pectina empleada como aditivo alimentario para la gelificación. Al mismo tiempo, cabe destacar que un importante número de estudios relacionados con la PME se enfocan a la obtenida de naranja, volviendo a este y otros cítricos una importante fuente de esta enzima, al contarse con una importante fuente de datos sobre sus características.

Lista de referencias

- Abu-Ghannam, N., y Crowley, H. (2006). The effect of low temperature blanching on the texture of whole processed new potatoes. *Journal of Food Engineering*, 74(3), 335-344.
- Agcam, E., Akyildiz, A., y Evrendilek, G. A. (2014). Effects of PEF and heat pasteurization on PME activity in orange juice with regard to a new inactivation kinetic model. *Food Chemistry*, 165, 70-76.
- Aghajanzadeh, S., Kashaninejad, M., y Ziaifar, A. M. (2016a). Effect of infrared heating on degradation kinetics of key lime juice physicochemical properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38, 139-148.
- Aghajanzadeh, S., Ziaifar, A. M., Kashaninejad, M., Maghsoudlou, Y., y Esmailzadeh, E. (2016b). Thermal inactivation kinetic of pectin methylesterase and cloud stability in sour orange juice. *Journal of Food Engineering*, 185, 72-77.
- Aghajanzadeh, S., y Ziaifar, A. M. (2018). A review of pectin methylesterase inactivation in citrus juice during pasteurization. *Trends in Food Science and Technology*, 71, 1-12.
- Ángel Siles López, J., Li, Q., y Thompson, I. P. (2010). Biorefinery of waste orange peel. *Critical Reviews in Biotechnology*, 30(1), 63-69.
- Augusto, P. E. D., Tribst, A. A. L., y Cristianini, M. (2018). Chapter 20 - High Hydrostatic Pressure and High-Pressure Homogenization Processing of Fruit Juices A2 - Rajauria, Gaurav. In B. K. Tiwari (Ed.), *Fruit Juices* (pp. 393-421). San Diego: Academic Press.
- Bosch, M., Cheung, A. Y., y Hepler, P. K. (2005). Pectin Methylesterase, a Regulator of Pollen Tube Growth. *Plant Physiology*, 138(3), 1334-1346.
- Buckow, R., Baumann, P., Schroeder, S., y Knoerzer, K. (2011). Effect of dimensions and geometry of co-field and co-linear pulsed electric field treatment chambers on electric field strength and energy utilisation. *Journal of Food Engineering*, 105(3), 545-556.
- Buchweitz, M., Speth, M., Kammerer, D. R., y Carle, R. (2013). Stabilisation of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) anthocyanins by different pectins. *Food Chemistry*, 141(3), 2998-3006.
- Cameron, R. G., Baker, R. A., y Grohmann, K. (1997). Citrus Tissue Extracts Affect Juice Cloud Stability. *Journal of Food Science*, 62(2), 242-245.
- Cameron, R. G., Baker, R. A., y Grohmann, K. (1998). Multiple Forms of Pectinmethylesterase from Citrus Peel and Their Effects on Juice Cloud Stability. *Journal of Food Science*, 63(2), 253-256.
- Cameron, R. G., Buslig, B. S., y Shaw, P. E. (1992). Adaptation of a Spectrophotometric Assay for Pectinmethylesterase to a Kinetic Microplate Reader. *Journal of Food Science*, 57(4), 1006-1008.

- Cameron, R. G., y Grohmann, K. (1996). Purification and Characterization of a Thermally Tolerant Pectin Methyltransferase from a Commercial Valencia Fresh Frozen Orange Juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(2), 458-462.
- Cameron, R. G., Luzio, G. A., Goodner, K., y Williams, M. A. K. (2008). Demethylation of a model homogalacturonan with a salt-independent pectin methyltransferase from citrus: I. Effect of pH on demethylated block size, block number and enzyme mode of action. *Carbohydrate Polymers*, 71(2), 287-299.
- Cameron, R. G., Luzio, G. A., Vasu, P., Savary, B. J., y Williams, M. A. K. (2011). Enzymatic Modification of a Model Homogalacturonan with the Thermally Tolerant Pectin Methyltransferase from Citrus: I. Nanostructural Characterization, Enzyme Mode of Action, and Effect of pH. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(6), 2717-2724.
- Cameron, R. G., Savary, B. J., Hotchkiss, A. T., y Fishman, M. L. (2005). Isolation, Characterization, and Pectin-Modifying Properties of a Thermally Tolerant Pectin Methyltransferase from *Citrus sinensis* Var. Valencia. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(6), 2255-2260.
- Cameron, R. G., Savary, B. J., Hotchkiss, A. T., Fishman, M. L., Chau, H. K., Baker, R. A., y Grohmann, K. (2003). Separation and Characterization of a Salt-Dependent Pectin Methyltransferase from *Citrus sinensis* Var. Valencia Fruit Tissue. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(7), 2070-2075.
- Castro, S. M., Saraiva, J. A., Lopes-da-Silva, J. A., Delgadillo, I., Loey, A. V., Smout, C., y Hendrickx, M. (2008). Effect of thermal blanching and of high pressure treatments on sweet green and red bell pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry*, 107(4), 1436-1449.
- Castro, S. M., Van Loey, A., Saraiva, J. A., Smout, C., y Hendrickx, M. (2004). Activity and process stability of purified green pepper (*Capsicum annuum*) pectin methyltransferase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(18), 5724-5729.
- Corredig, M., y Wicker, L. (2002). Juice clarification by thermostable fractions of Marsh grapefruit pectinmethyltransferase. *Journal of Food Science*, 67(5), 1668-1671.
- de Assis, S. A., Lima, D. C., y de Faria Oliveira, O. M. M. (2001). Activity of pectinmethyltransferase, pectin content and vitamin C in acerola fruit at various stages of fruit development. *Food Chemistry*, 74(2), 133-137.
- de Assis, S. A., Martins, A. B. G., Guaglianoni, D. G., y de Faria Oliveira, O. M. M. (2002). Partial purification and characterization of pectin methyltransferase from acerola (*Malpighia glabra* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(14), 4103-4107.

- Demirdöven, A., y Baysal, T. (2014). Optimization of ohmic heating applications for pectin methylesterase inactivation in orange juice. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 1817-1826.
- Demirdöven, A., y Baysal, T. (2016). Inactivation effect of microwave heating on pectin methylesterase in orange juice. *Ukrainian Food Journal*, 5(2), 248-261.
- Denès, J.-M., Baron, A., Renard, C. M. G. C., Péan, C., y Drilleau, J.-F. (2000a). Different action patterns for apple pectin methylesterase at pH 7.0 and 4.5. *Carbohydrate Research*, 327(4), 385-393.
- Denès, J. M., Baron, A., y Drilleau, J. F. (2000b). Purification, properties and heat inactivation of pectin methylesterase from apple (*cv Golden Delicious*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(10), 1503-1509.
- Dixit, S., Upadhyay, S., Singh, H., Pandey, B., Chandrashekar, K., y Verma, P. (2013). Pectin Methylesterase of *Datura* species, purification, and characterization from *Datura stramonium* and its application. *Plant Signaling and Behavior*, 8(10), e25681.
- Do Amaral, S. H., De Assis, S. A., y De Faria Oliveira, O. M. M. (2005). Partial purification and characterization of pectin methylesterase from orange (*Citrus sinensis*) cv. Pera-Rio. *Journal of Food Biochemistry*, 29(4), 367-380.
- Duvetter, T., Fraeye, I., Hoang, T. V., Buggenhout, S. V., Verlent, I., Smout, C., . . . Hendrickx, M. (2005). Effect of pectinmethylesterase infusion methods and processing techniques on strawberry firmness. *Journal of Food Science*, 70(6), s383-s388.
- Duvetter, T., Fraeye, I., Sila, D. N., Verlent, I., Smout, C., Hendrickx, M., y Van Loey, A. (2006). Mode of de-esterification of alkaline and acidic pectin methyl esterases at different pH conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(20), 7825-7831.
- El-Moneim, D. A., Contreras, R., Silva-Navas, J., Gallego, F. J., Figueiras, A. M., y Benito, C. (2014). Pectin methylesterase gene and aluminum tolerance in *Secale cereale*. *Environmental and Experimental Botany*, 107, 125-133.
- Elez-Martínez, P., Suárez-Recio, M., y Martín-Belloso, O. (2007). Modeling the reduction of pectin methyl esterase activity in orange juice by high intensity pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 184-193.
- Espachs-Barroso, A., Van Loey, A., Hendrickx, M., y Martín-Belloso, O. (2006). Inactivation of plant pectin methylesterase by thermal or high intensity pulsed electric field treatments. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 7(1), 40-48.

- Garrido, J. I., Lozano, J. E., y Genovese, D. B. (2015). Effect of formulation variables on rheology, texture, colour, and acceptability of apple jelly: Modelling and optimization. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1, Part 1), 325-332.
- Gómez, F., Igual, M., Camacho, M. M., y Pagán, M. J. (2013). Effect of the addition of plant extracts on the microbiota of minimally processed strawberry jam and its physicochemical and sensorial properties. *CyTA - Journal of Food*, 11(2), 171-178.
- Guiavarc'h, Y., Segovia, O., Hendrickx, M., y Van Loey, A. (2005). Purification, characterization, thermal and high-pressure inactivation of a pectin methylesterase from white grapefruit (*Citrus paradisi*). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6(4), 363-371.
- Han, W., Meng, Y., Hu, C., Dong, G., Qu, Y., Deng, H., y Guo, Y. (2017). Mathematical model of Ca²⁺ concentration, pH, pectin concentration and soluble solids (sucrose) on the gelation of low methoxyl pectin. *Food Hydrocolloids*, 66, 37-48.
- Hotchkiss, A. T., Savary, B. J., Cameron, R. G., Chau, H. K., Brouillette, J., Luzio, G. A., y Fishman, M. L. (2002). Enzymatic modification of pectin to increase its calcium sensitivity while preserving its molecular weight. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 2931-2937.
- Ingallinera, B., Barbagallo, R. N., Spagna, G., Palmeri, R., y Todaro, A. (2005). Effects of thermal treatments on pectinesterase activity determined in blood oranges juices. *Enzyme and Microbial Technology*, 36(2), 258-263.
- Jolie, R. P., Duvetter, T., Van Loey, A. M., y Hendrickx, M. E. (2010). Pectin methylesterase and its proteinaceous inhibitor: a review. *Carbohydrate Research*, 345(18), 2583-2595.
- Kant, S., y Gupta, R. (2012). Purification of Pectin Methylesterase from *Lycopersicon esculentum* and its Application. *Protein and Peptide Letters*, 19(11), 1205-1211.
- Kaur, N., y Singh, A. K. (2016). Ohmic Heating: Concept and Applications-A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(14), 2338-2351.
- Kertesz, Z. I. (1955). [18] Pectic enzymes. In S. P. Colowick & N. O. Kaplan (Eds.), *Methods in Enzymology* (Vol. 1, pp. 158-166). New York, USA: Academic Press.
- Kim, Y., Teng, Q., y Wicker, L. (2005). Action pattern of Valencia orange PME de-esterification of high methoxyl pectin and characterization of modified pectins. *Carbohydrate Research*, 340(17), 2620-2629.
- Kim, Y., Williams, M. A. K., Galant, A. L., Luzio, G. A., Savary, B. J., Vasu, P., y Cameron, R. G. (2013). Nanostructural modification of a model homogalacturonan with a novel pectin methylesterase: Effects of pH on nanostructure, enzyme mode of action and substrate functionality. *Food Hydrocolloids*, 33(1), 132-141.

- Kimball, D. (1991). Juice Cloud *Citrus Processing: Quality Control and Technology* (pp. 117-125). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Kimball, D. A. (1999). Analyses of other citrus juice characteristics *Citrus Processing: A Complete Guide* (pp. 247-295). Boston, MA: Springer US.
- Klavons, J. A., y Bennett, R. D. (1986). Determination of methanol using alcohol oxidase and its application to methyl ester content of pectins. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 34(4), 597-599.
- Kuldiloke, J., Eshtiaghi, M., Zenker, M., y Knorr, D. (2007). Inactivation of lemon pectinesterase by thermosonication. *International Journal of Food Engineering*, 3(2), 1-9.
- Laratta, B., Masi, L. D., Minasi, P., y Giovane, A. (2008). Pectin methylesterase in *Citrus bergamia* R.: purification, biochemical characterisation and sequence of the exon related to the enzyme active site. *Food Chemistry*, 110(4), 829-837.
- Lee, H., Rivner, J., Urbauer, J. L., Garti, N., y Wicker, L. (2008). De-esterification pattern of Valencia orange pectinmethylesterases and characterization of modified pectins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(12), 2102-2110.
- Leizeron, S., y Shimoni, E. (2005). Stability and sensory shelf life of orange juice pasteurized by continuous ohmic heating. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(10), 4012-4018.
- Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E. J., y Wang, S. (2015). Kinetics of food quality changes during thermal processing: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 8(2), 343-358.
- Luzio, G. A., y Cameron, R. G. (2008). Demethylation of a model homogalacturonan with the salt-independent pectin methylesterase from citrus: Part II. Structure–function analysis. *Carbohydrate Polymers*, 71(2), 300-309.
- Ly-Nguyen, B., Van Loey, A. M., Fachin, D., Verlent, I., Indrawati, y Hendrickx, M. E. (2002). Partial Purification, Characterization, and Thermal and High-Pressure Inactivation of Pectin Methylesterase from Carrots (*Daucus carota* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(19), 5437-5444.
- Ly Nguyen, B., Van Loey, A., Fachin, D., Verlent, I., y Hendrickx, I. M. (2002). Purification, characterization, thermal, and high-pressure inactivation of pectin methylesterase from bananas (cv Cavendish). *Biotechnology and Bioengineering*, 78(6), 683-691.
- May, C. D. (1990). Industrial pectins: Sources, production and applications. *Carbohydrate Polymers*, 12(1), 79-99.
- Müller, K., Levesque-Tremblay, G., Bartels, S., Weitbrecht, K., Wormit, A., Usadel, B., . . . Kermode, A. R. (2013). Demethylesterification of Cell Wall Pectins in *Arabidopsis* Plays a Role in Seed Germination. *Plant Physiology*, 161(1), 305-316.

- Nielsen, J. E., y Christensen, T. M. I. E. (2002). Distribution of pectin methyl esterase and acetylerase in the genus *Citrus* visualized by tissue prints and chromatography. *Plant Science*, 162(5), 799-807.
- Ochoa-Villarreal, M., Aispuro-Hernández, E., Vargas-Arispuro, I., y Martínez-Téllez, M. Á. (2012). Plant Cell Wall Polymers: Function, Structure and Biological Activity of Their Derivatives. In A. De Souza-Gomes (Ed.), *Polymerization* (pp. 63-86). Rijeka, Croatia: InTech Prepress.
- Özler, A., Karakuş, E., y Pekiyardimci, Ş. (2008). Purification and Biochemical Characteristics of Pectinesterase from Malatya Apricot (*Prunus armeniaca* L.). *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 38(4), 358-375.
- Pelloux, J., Rustérucchi, C., y Mellerowicz, E. J. (2007). New insights into pectin methylesterase structure and function. *Trends in Plant Science*, 12(6), 267-277.
- Pilnik, W., y Voragen, A. G. J. (1993). Chapter 14 - Pectic Enzymes in Fruit and Vegetable Juice Manufacture. In T. Nagodawithana & G. Reed (Eds.), *Enzymes in Food Processing (Third Edition)* (pp. 363-399). London: Academic Press.
- Polydera, A. C., Galanou, E., Stoforos, N. G., y Taoukis, P. S. (2004). Inactivation kinetics of pectin methylesterase of greek Navel orange juice as a function of high hydrostatic pressure and temperature process conditions. *Journal of Food Engineering*, 62(3), 291-298.
- Remoroza, C., Wagenknecht, M., Buchholt, H. C., Moerschbacher, B. M., Gruppen, H., y Schols, H. A. (2015). Mode of action of *Bacillus licheniformis* pectin methylesterase on highly methylesterified and acetylated pectins. *Carbohydrate Polymers*, 115, 540-550.
- Rouse, A. H., y Atkins, C. D. (1955). Pectinesterase and pectin in commercial citrus juices as determined by methods use at the citrus experiment station. *Florida Agricultural Experimental Stations Bulletin*, 570, 1-19.
- Salas-Tovar, J. A., Flores-Gallegos, A. C., Contreras-Esquivel, J. C., Escobedo-García, S., Morlett-Chávez, J. A., y Rodríguez-Herrera, R. (2017). Analytical methods for pectin methylesterase activity determination: a review. *Food Analytical Methods*, 10, 3634-3646.
- Salazar-González, C., San Martín-González, M., Vergara-Balderas, F., López-Malo, A., y Sosa-Morales, M. (2014). Physical-chemical and microbiological stability during refrigerated storage of microwave-pasteurized guava nectar. *Focusing on Modern Food Industry*, 3, 43-51.
- Samaranayake, C. P., y Sastry, S. K. (2016). Effects of controlled-frequency moderate electric fields on pectin methylesterase and polygalacturonase activities in tomato homogenate. *Food Chemistry*, 199, 265-272.

- Sanjuán, N., Hernando, I., Lluch, M. A., y Mulet, A. (2005). Effects of low temperature blanching on texture, microstructure and rehydration capacity of carrots. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(12), 2071-2076.
- Savary, B. J., Hotchkiss, A. T., y Cameron, R. G. (2002). Characterization of a salt-independent pectin methylesterase purified from Valencia orange peel. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(12), 3553-3558.
- Sirijariyawat, A., Charoenrein, S., y Barrett, D. M. (2012). Texture improvement of fresh and frozen mangoes with pectin methylesterase and calcium infusion. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(13), 2581-2586.
- Slavov, A., Garnier, C., Crépeau, M.J., Durand, S., Thibault, J.F., y Bonnin, E. (2009). Gelation of high methoxy pectin in the presence of pectin methylesterases and calcium. *Carbohydrate Polymers*, 77(4), 876-884.
- Spagna, G., Barbagallo, R. N., y Ingallinera, B. (2003). A specific method for determination of pectin esterase in blood oranges. *Enzyme and Microbial Technology*, 32(1), 174-177.
- Swamy, G. J., Muthukumarappan, K., y Asokapandian, S. (2018). Chapter 23 - Ultrasound for Fruit Juice Preservation A2 - Rajauria, Gaurav. In B. K. Tiwari (Ed.), *Fruit Juices* (pp. 451-462). San Diego: Academic Press.
- Tajchakavit, S., y Ramaswamy, H. S. (1997). Thermal vs. Microwave inactivation kinetics of pectin methylesterase in orange juice under batch mode heating conditions. *LWT - Food Science and Technology*, 30(1), 85-93.
- Terefe, N. S., Buckow, R., y Versteeg, C. (2014). Quality-Related enzymes in fruit and vegetable products: effects of novel food processing technologies, Part 1: High-Pressure Processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(1), 24-63.
- Tiwari, B. K., Muthukumarappan, K., O'Donnell, C. P., y Cullen, P. J. (2009). Inactivation kinetics of pectin methylesterase and cloud retention in sonicated orange juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10(2), 166-171.
- Torres, E. F., Gonzalez, M. G., Klotz, B., y Rodrigo, D. (2016). Effects of high hydrostatic pressure and temperature increase on *Escherichia coli* spp. and pectin methyl esterase inactivation in orange juice. *Food Science and Technology International*, 22(2), 173-180.
- Ünal, M. Ü., y Bellur, E. (2009). Extraction and characterisation of pectin methylesterase from black carrot (*Daucus carota* L.). *Food Chemistry*, 116(4), 836-840.
- Ünal, M. Ü., y Şener, A. (2015). Extraction and characterization of pectin methylesterase from Alyanak apricot (*Prunus armeniaca* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 52(2), 1194-1199.
- van Alebeek, G.-J. W. M., van Scherpenzeel, K., Beldman, G., Schols, H. A., y Voragen, A. G. J. (2003). Partially esterified oligogalacturonides are the

- preferred substrates for pectin methylesterase of *Aspergillus niger*. *Biochemical Journal*, 372(1), 211.
- Vasu, P., Savary, B. J., y Cameron, R. G. (2012). Purification and characterization of a papaya (*Carica papaya* L.) pectin methylesterase isolated from a commercial papain preparation. *Food Chemistry*, 133(2), 366-372.
- Vervoort, L., Van der Plancken, I., Grauwet, T., Timmermans, R. A. H., Mastwijk, H. C., Matser, A. M., . . . Van Loey, A. (2011). Comparing equivalent thermal, high pressure and pulsed electric field processes for mild pasteurization of orange juice: Part II: Impact on specific chemical and biochemical quality parameters. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12(4), 466-477.
- Wang, Y.-T., Lien, L.-L., Chang, Y.-C., y Wu, J. S.-B. (2013). Pectin methyl esterase treatment on high-methoxy pectin for making fruit jam with reduced sugar content. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(2), 382-388.
- Yoo, Y.-H., Lee, S., Kim, Y., Kim, K.-O., Kim, Y.-S., y Yoo, S.-H. (2009). Functional characterization of the gels prepared with pectin methylesterase (PME)-treated pectins. *International Journal of Biological Macromolecules*, 45(3), 226-230.
- Yuliarti, O., Hoon, A. L. S., & Chong, S. Y. (2017). Influence of pH, pectin and Ca concentration on gelation properties of low-methoxyl pectin extracted from *Cyclea barbata* Miers. *Food Structure*, 11, 16-23.

Capítulo V



Uso de la cáscara de naranja para la obtención de polimetoxiflavonas (PMF), como compuestos bioactivos antiinflamatorios

Dra. Rocío Margarita Uresti Marín¹

M.S.P. Melissa Daniela González Hinojosa²

Dra. Frida Carmina Caballero Rico³

Resumen

Los cítricos son frutas económicamente importantes y dentro de ese grupo, las naranjas son las más procesadas a nivel industrial, siendo el jugo el principal producto. El procesamiento de cítricos genera enormes cantidades de residuos orgánicos cada año, que representan una preocupación económica y ambiental, para las cuales se requieren estrategias de valorización. Los residuos cítricos que se obtienen después de extraer el jugo, constan de cáscara (60 - 65%), tejidos internos (30 - 35%) y semillas (0 - 10%), con altos niveles de azúcares solubles, pectina, proteínas, hemicelulosas y celulosa. Adicionalmente, pueden extraerse compuestos bioactivos para ser utilizados como suplementos que permiten disminuir la incidencia de síntomas o procesos de respuesta inmunitaria, como la inflamación.

La inflamación crónica es reconocida como una de las principales causas subyacentes de diversas enfermedades degenerativas, entre las que se incluyen las cardiovasculares, la enfermedad de Alzheimer, la diabetes mellitus (DM), y el cáncer (CA). La limitación de las terapias antiinflamatorias actuales es ampliamente identificada y evidente en los esfuerzos continuos de la industria farmacéutica para desarrollar medicamentos que se dirigen a pasos específicos en la cascada inflamatoria. Los productos naturales tienen el potencial de llenar este vacío terapéutico, al abordar la complejidad de la cascada inflamatoria, lo que reduce los efectos secundarios y las reacciones compensatorias que requieren tratamiento complementario.

Las polimetoxiflavonas (PMF), son un grupo único de flavonoides polimetilados y han demostrado tener muchos efectos beneficiosos para la salud. La evidencia científica indica que los PMF exhiben diversas actividades biológicas, tales

¹ Universidad Autónoma de Tamaulipas, UATSCDH, Centro Universitario, CP. 87120 Cd. Victoria, Tamps. Autor para correspondencia: ruresti@docentes.uat.edu.mx

² Universidad Autónoma de Tamaulipas, UATSCDH, Centro Universitario, CP. 87120 Cd. Victoria, Tamps.

³ Universidad Autónoma de Tamaulipas, FCAV, Centro Universitario, CP. 87120 Cd. Victoria, Tamps.

como propiedades anticancerígenas, antiinflamatorias, antivirales, antiaterogénicas y antidiabéticas. La cáscara de naranja es rica en PMF. Las PMF exhiben fuertes efectos antiinflamatorios, tanto a nivel de expresión génica como de actividad enzimática. Las PMF se encuentran exclusivamente en las cáscaras del género *Citrus*, particularmente en las cáscaras de naranjas dulces (*Citrus sinensis*) y mandarinas (*Citrus reticulata*). La nobiletina y la tangeretina son derivados de las PFM y son considerados compuestos bioactivos con propiedades antiinflamatorias, porque podrían suprimir la expresión de mediadores proinflamatorios. Las PMF solas o en combinación con otros medicamentos, representan candidatos prometedores para desarrollar nuevas terapias o mejorar las existentes. La excelente bioactividad y biodisponibilidad *in vitro* e *in vivo* de las PMF está atrayendo a más y más científicos nutricionales y medicinales a realizar estudios clínicos para beneficio de los humanos en la prevención y el tratamiento de enfermedades.

Palabras clave: Cáscara de naranja, polimetoxiflavonas, inflamación, antiinflamatorios.

Introducción

El término cítrico se originó de la palabra griega *kedros*, que denota árboles como el cedro, el pino y el ciprés. Como el olor de las hojas y frutos de los cítricos recuerda al del cedro, el nombre de cítrico se ha aplicado a la cidra, que es uno de los frutos originales a partir de los cuales todos los demás tipos de cítricos se desarrollaron, la cidra se usa ampliamente en la cocina asiática, en medicinas tradicionales y perfumes. Carlos Linneo agrupó todas las especies de cítricos que conocía en el género *Citrus*. Al fruto de los cítricos se les llama en forma general hespérides, por la manzana dorada que se producía solo en el jardín de Hera y que cuidaban las ninfas Hespérides, de la mitología griega. El origen de los cítricos es el sudeste asiático, incluido el sur de China, el noreste de India y Birmania. Ninguna especie de cítricos es originaria de América. La toronja, en la actualidad asumida como un híbrido del pomelo con la naranja, se originó en Barbados. Viajeros y misioneros ayudaron mucho a la propagación de los cítricos. Como se supo que las frutas frescas son el mejor remedio contra el escorbuto, la Armada británica obligó a los marineros a tomar jugo de limón diariamente. Se ha documentado que Colón tomó de las islas Canarias semillas de naranjas, limones y cítricos en su segundo viaje (1483), que desembarcó en Hispaniola (Haití). La primera mención de cítricos en el continente de América se encuentra en un manuscrito escrito en 1568, descubierto en los archivos de Guatemala. Las semillas fueron traídas de Cuba a Veracruz en 1518 (Spiegel y Goldschmidt, 1996).

En los últimos años, se ha observado un consumo creciente de frutas y verduras, debido a que la población tiene mayor conocimiento e interés en los beneficios para la salud que aportan sus nutrientes y compuestos bioactivos. Los cítricos solo son superados por la uva (mayormente utilizada para vino) en la superficie plantada y volumen de producción entre los árboles frutales. Las frutas cítricas se encuentran entre las frutas más cultivadas en las regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo, con una producción mundial de más de 88 millones de toneladas por año. La naranja dulce (*Citrus sinensis*) es la fruta principal, constituye aproximadamente el 70% de la producción y el consumo total de cítricos. Otras frutas cítricas, como mandarina (*Citrus reticulata*), toronja (*Citrus vitis*), lima (*Citrus aurantifolia*) y el limón (*Citrus limonum*) también se cultivan y consumen en gran medida. La caracterización química muestra que, aproximadamente el 87% de los cítricos es agua, mientras que el 13% restante consta de varios constituyentes (10% minerales, 5% aceites esenciales, 3% grasas, 9% proteínas, 11% fibra, 16% ácido cítrico, 21% pectinas, 10% glucósidos y 15% pentosanos). La pulpa y el jugo son las partes comestibles, mientras que las paredes segmentadas, los residuos de la cáscara y las semillas se consideran subproductos del procesamiento. De los sólidos

solubles que predomina en las frutas cítricas, los carbohidratos simples representan el 70% en los jugos, mientras que en la pulpa el 40% son carbohidratos simples y el 50% son polisacáridos (Zema et al., 2018).

El consumo de fibra dietética proveniente de frutas y hortalizas desempeña un papel importante en la prevención, reducción y tratamiento de enfermedades crónicas, trastornos gastrointestinales, obesidad, DM, CV y CA; también promueve funciones fisiológicas, como la reducción de los triglicéridos y el control de la glucosa en la sangre. Los subproductos de frutas, hortalizas y granos enteros son fuentes abundantes de fibras dietéticas y compuestos funcionales (Rafiq et al., 2018). El ácido cítrico es el ácido orgánico dominante en los cítricos, y el jugo de limón tiene la mayor acidez con más de 48 g/L de ácido cítrico. El sabor del jugo se ve afectado principalmente por los azúcares y los ácidos orgánicos, mientras que los compuestos orgánicos volátiles están asociados con el aroma, el cual se debe principalmente al ácido cítrico y al ácido málico, además de algunos compuestos aromáticos específicos. Los monosacáridos presentes son la glucosa y la fructosa, con presencia del disacárido sacarosa. La hemicelulosa cítrica está compuesta de xilano, arabinosa y galactanos, mientras que las sustancias pécticas básicamente son galacturonanos (Sharma et al., 2017). Las naranjas son las más procesadas de todas las frutas cítricas, seguidas de los limones y limas, las toronjas y las mandarinas. Los países con procesamiento más alto de naranjas son Brasil, Estados Unidos, la Unión Europea, México y China. Las mandarinas se procesan principalmente en China, la Unión Europea, Estados Unidos, Argentina y Corea del Sur; la toronja se cultiva principalmente para el consumo en fresco, y los principales países procesadores son Estados Unidos, Sudáfrica, Israel, México y la Unión Europea. Los principales países que procesan limones son Argentina, México, Estados Unidos, la Unión Europea y Sudáfrica. El principal producto de la industria de procesamiento de cítricos es el jugo, que se utiliza en muchas bebidas (por ejemplo, jugos congelados, concentrados, frescos, etcétera) y le siguen los aceites esenciales (Figura 1). Sin embargo, son diferentes los productos que se obtienen de los cítricos (Figura 2) (Zema et al., 2018).

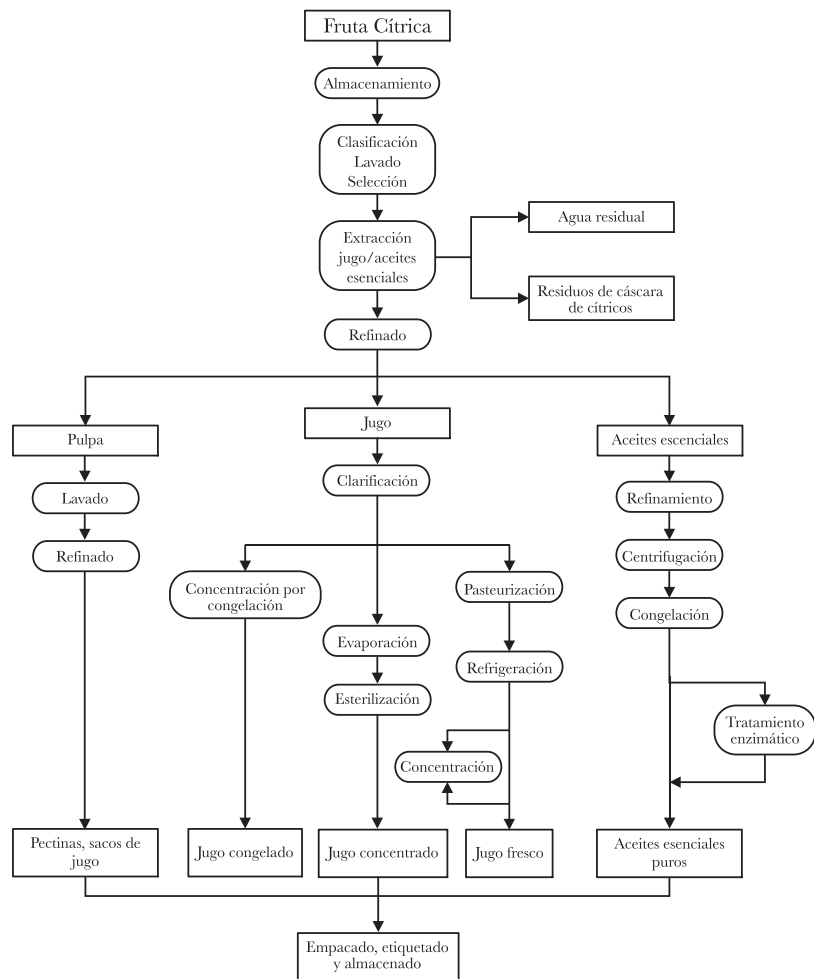


Figura 1. Esquema de la cadena procesadora de cítricos (Zema et al., 2018)

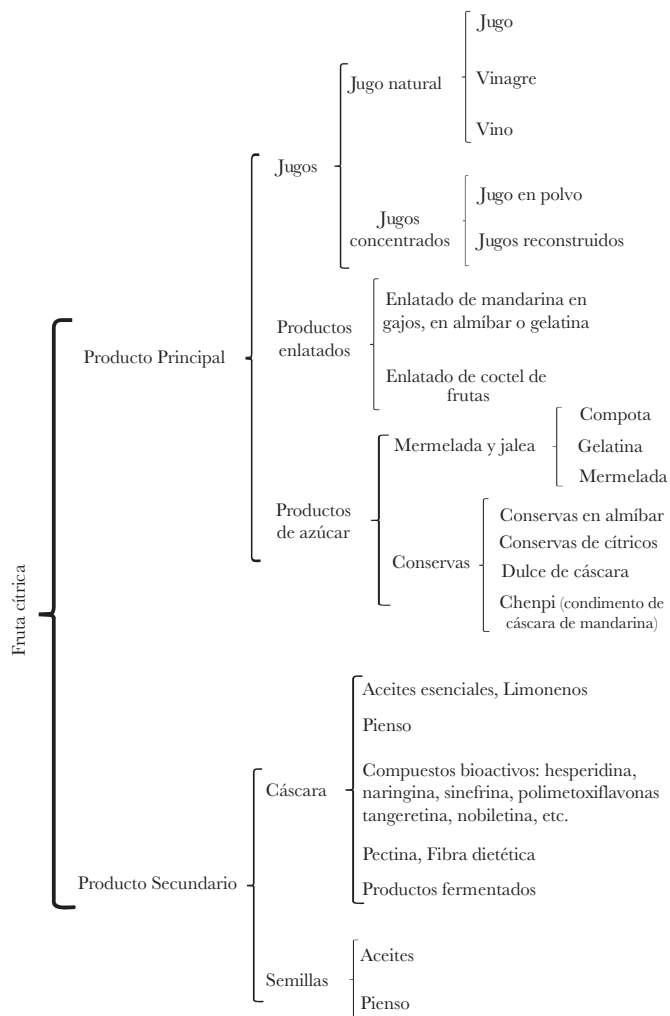


Figura 2. Utilización de cítricos y sus productos (Ye, 2018)

Subproductos de cítricos

La industrialización es un importante promotor de la economía de cualquier nación, sin embargo, durante el procesamiento de alimentos se obtiene una gran cantidad de residuos orgánicos, que son vertidos en el medio ambiente. La búsqueda de un medio ambiente limpio y sostenible ha estimulado innumerables investigaciones sobre la utilización ventajosa de la biomasa residual para diferentes productos. Del mismo modo, se han buscado diferentes estrategias para utilizar los residuos

orgánicos como fuentes de compuestos bioactivos, con diferentes aplicaciones medicinales. La economía considera la reutilización y el reciclaje de cualquier tipo de residuos en procesos biotecnológicos para obtener subproductos y contribuir al desarrollo de una economía basada en la biotransformación. La valorización de los residuos orgánicos abre la puerta al desarrollo de estrategias innovadoras para la extracción de compuestos orgánicos (Cuadro 1) (Pleissner et al., 2016).

Cuadro 1. Residuos orgánicos y sus aplicaciones (Pleissner et al., 2016)

Residuos orgánicos	Aplicación
Frutas y vegetales	Antioxidantes, flavonoides, fenoles, carotenoides, lípidos, fitoquímicos, fuente de carbono
Desperdicio animal	Carne y derivados, proteínas, enzimas, colágeno, gelatina, fuente de nitrógeno, minerales traza
Productos lácteos	Fuentes de carbono y nitrógeno
Residuos de aceite	Ésteres metílicos de ácidos grasos, glicerol, ácido erúico
Biomasa celulósica	Fitosteroles, polipropileno, ácido acrílico, isobutanol, tioéster, ésteres
Lignina	Polihidroxialcanoatos, ácido adípico

Las industrias de procesamiento de cítricos generan enormes cantidades de residuos orgánicos de cítricos (ROC), que pueden tener un inmenso valor económico, al transformarlos en subproductos, para ser fuentes seguras de fibras dietéticas y compuestos bioactivos. Los ROC consisten en: (1) cáscara y pulpa, (2) fruta que no ha sido procesada porque se dañó y/o no se ajustó a los estándares de calidad y (3) productos excedentes devueltos. Después de la producción de jugo de naranja, los desechos se componen de 60 a 65% p/p de cáscaras, 30 a 35% p/p de tejido interno y el resto de las semillas (Negro et al., 2016). Los ROC tiene un nivel de pH bajo (3 - 4) y se caracterizan por tener un alto contenido de materia orgánica (95% del total de sólidos) y un alto contenido de agua (alrededor del 80 - 90%). El cuadro 2 resume la composición proximal de los principales ROC, producidos en las industrias de procesamiento de cítricos (Satari y Karimi, 2018).

Cuadro 2. Composición proximal de algunos de los principales subproductos de los cítricos (% de base seca) (Satari y Karimi, 2018)

Residuos	Azúcares	Lípidos	Flavonoides	Pectinas	Celulosa	Hemicelulosa
Cáscara de limón	6.52	1.51	12.54	13.00	23.06	8.09

Residuos	Azúcares	Lípidos	Flavonoides	Pectinas	Celulosa	Hemicelulosa
Cáscara de naranja dulce	9.57	4.00	4.50	23.02	37.08	11.04
Residuos de cítricos*	22.9	3.78	-	25.00	22.00	11.09

*Mezcla de cáscaras de naranja y pomelo, semillas y residuos de hojas después de la extracción del jugo.

La composición de los ROC incluye algunos lípidos, azúcares libres (glucosa, fructosa y sacarosa), ácidos orgánicos, polímeros de carbohidratos (celulosa, hemicelulosa y pectina), enzimas (pectinesterasa, fosfatasa y peroxidasa), flavonoides (polimetoxiflavonas, aceites esenciales (principalmente limoneno) y pigmentos (Boukroufa et al., 2015). Los ácidos orgánicos forman aproximadamente el 1% del peso seco. Cabe destacar que, cuando se obtiene ROC de una fábrica de producción de jugo, también contiene semillas de cítricos, que se caracterizan por tener un alto contenido de aceite, con un perfil predominante de ácidos grasos C16 y C18 (Anwar et al., 2008). Con respecto a los impactos negativos de la producción de una cantidad tan enorme de ROC para el medio ambiente y también la contribución de los productos derivados de ROC a la bioeconomía, la valorización de ROC a alimentos, piensos y combustibles es una necesidad apremiante. En la figura 3 se muestran algunos de los subproductos que pueden extraerse de los ROC, dándoles valor agregado (Satari y Karami, 2018).

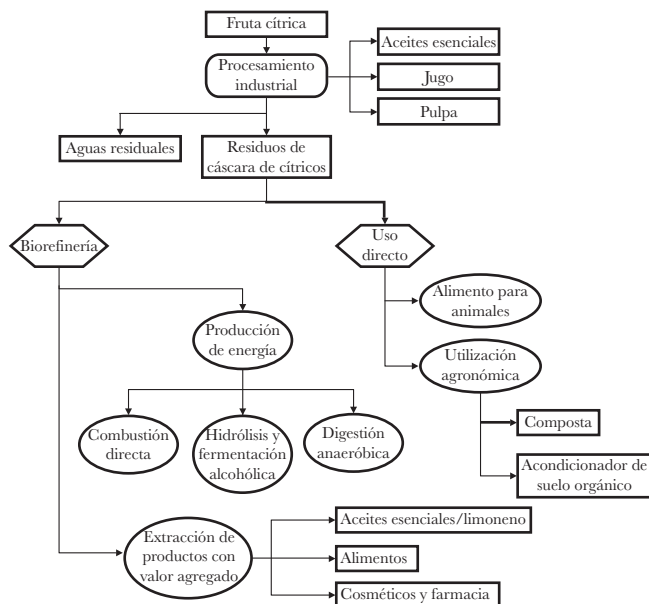


Figura 3. Esquema de la cadena de procesamiento de residuos de cáscara de cítricos (Zema et al., 2018)

Las grandes cantidades de subproductos y las características peculiares de los residuos del procesamiento de los cítricos implican restricciones considerables para su manejo, debido a requisitos legales internacionales relacionados con el cuidado del medio ambiente. Todas las opciones de tratamiento/valorización para residuos de cáscara de los cítricos dependen de un gran número de factores que afectan la viabilidad económica. Actualmente, hay más conciencia e investigación para cambiar las actitudes tradicionales, que consideran los residuos del procesamiento de los cítricos como un desperdicio que debe eliminarse en los vertederos, en lugar de verlos como un recurso valioso para reutilizarlo (Zema et al., 2018). Desde el punto de vista económico, los residuos orgánicos son un problema importante, porque el costo de su manejo influye en el precio final del producto, que aumenta significativamente debido a esa actividad. En la actualidad, los productores y la industria alimentaria están buscando formas innovadoras de utilizar estos residuos orgánicos como subproductos para una mayor explotación en la producción de aditivos o suplementos con alto valor nutricional y funcional (De Ancos et al., 2015).

Compuestos bioactivos presentes en cítricos

Los compuestos bioactivos presentes en frutas, hortalizas y granos enteros son fitoquímicos capaces de modular los procesos metabólicos y dar como resultado la promoción de una mejor salud (Gil-Chávez et al., 2013). Exhiben efectos beneficiosos como la actividad antioxidante, la inhibición o la inducción de enzimas, la inhibición de las actividades de los receptores y la inducción e inhibición de la expresión génica (Correia et al., 2012). Abarcan una mezcla extremadamente heterogénea de sustancias orgánicas (compuestos polifenólicos, carotenoides, tocoferoles, fitoesteroles y compuestos organosulfurados), con diferentes estructuras químicas (hidrófilas o lipófilas), distribución en la naturaleza (específica para especies vegetales o ubicua), rango de concentraciones, tanto en los alimentos y en el cuerpo humano, posible sitio de acción, efectividad contra especies oxidativas y especificidad y acción biológica (Galanakis, 2017). El potencial de los componentes bioactivos, dentro de los alimentos, para ejercer sus efectos en el cuerpo, depende de su liberación de la matriz, los cambios durante la digestión, la absorción, el metabolismo y la biodistribución, incluso antes de considerar los factores relacionados con la dosis y el huésped; es decir, estos compuestos deben estar biodisponibles antes de ejercer su bioactividad. Una de las líneas de investigación innovadoras ha revelado que los residuos orgánicos son una fuente importante de fitoquímicos, que pueden utilizarse como aditivos naturales e ingredientes funcionales en la formulación de nuevos alimentos. Por lo tanto, la recuperación y el reciclaje de

estos subproductos se vuelven cada vez más atractivos, económicamente, para las industrias de procesamiento de cítricos (Bohn et al., 2015).

La preparación de alimentos enriquecidos con compuestos bioactivos requiere la integración de diversos aspectos bajo evaluación. Estos incluyen seleccionar la fuente apropiada, detectar los compuestos bioactivos, aplicar técnicas de separación y recuperación, realizar evaluaciones toxicológicas y, finalmente, tomar mediciones de estabilidad, actividad y bioaccesibilidad. En este punto, es importante definir con cuidado los términos biodisponibilidad, bioaccesibilidad y bioactividad, que a menudo se usan indistintamente para expresar funciones similares. Es más importante conocer la cantidad de compuestos bioactivos biodisponibles. Las características químicas de los compuestos bioactivos, incluida la solubilidad, hidrofobicidad, peso molecular y configuración del isómero, se encuentran entre los factores que afectan su bioaccesibilidad y biodisponibilidad (Galanakis, 2017).

La *biodisponibilidad* es la porción de los nutrientes o fitoquímicos digeridos, que pueden ser absorbidos y metabolizados por vías normales de ingesta y usualmente se mide utilizando métodos *in vivo* (Srini, 2001).

La *bioaccesibilidad* se define como la cantidad de un componente que se libera de la matriz alimentaria al tracto gastrointestinal (GI) y, por lo tanto, está disponible para la absorción (Heaney, 2001).

Se pueden usar varias metodologías para evaluar la *bioaccesibilidad* y la *biodisponibilidad* de los compuestos bioactivos: i) Modelos *in vitro* (digestión con GI simulada, membranas artificiales, células Caco-2, membranas celulares, etcétera); ii) Modelos *ex vivo* (órganos GI en condiciones de laboratorio); iii) Modelos *in situ* (perfusión intestinal en animales); y iv) Modelos *in vivo* (estudios en animales y humanos) (Carbonell-Capella, et al., 2014).

La *bioactividad* es el efecto específico obtenido por la exposición a una sustancia determinada. Incluye la captación de la misma en los tejidos y la consecuente respuesta fisiológica (por ejemplo, efecto antioxidante o antiinflamatorio). También incluye información sobre cómo se transportan los compuestos bioactivos y cómo llegan al tejido objetivo, cómo interactúan con las biomoléculas, el metabolismo y las características de biotransformación, así como la generación de biomarcadores y las consiguientes respuestas fisiológicas. La medición de la bioactividad (*in vivo*, *ex vivo* e *in vitro*), se basa en los eventos que tienen lugar durante el tiempo en que los componentes bioactivos interactúan con las biomoléculas. Esta interacción genera un metabolito, una señal o una respuesta que debe continuar, modular o amplificar, hasta que se produzca la respuesta fisiológica sistemática (beneficio para la salud). Los procedimientos experimentales utilizados para medir la bioactividad deben ajustarse a cada reclamo de beneficios de salud por separado. El respaldo científico

de las afirmaciones de lo que puede hacer un alimento (propiedades saludables o riesgo reducido de enfermedad) se basa en datos de bioactividad (Galanakis, 2017).

Varios estudios han reconocido a las frutas cítricas como remedios terapéuticos, por ejemplo: naranjas para curar el escorbuto (Magiorkinis et al., 2011), jugos de naranja, lima y limón como remedios para la prevención de la formación de cálculos renales (Pak, 2004), los pomelos como agentes capaces de disminuir la presión arterial e interferir con los bloqueadores de los canales de calcio, los flavonoides cítricos con propiedades capaces de modular el metabolismo de los lípidos hepáticos (Cha et al., 2001), el jugo de naranja para prevenir y modular los procesos inflamatorios (Assis et al., 2013), polifenoles de cáscara de kumquat como agentes antioxidantes eficaces (Sadek et al., 2009), jugo de toronja, que tiene efectos antigénicos (Álvarez-Gonzales et al., 2010). Existe una creciente aceptación de que los fenoles, aminoácidos, aceites esenciales, pectina, carotenoides, flavonoides y vitamina C, presentes en los cítricos, ejercen efectos benéficos en la prevención de enfermedades degenerativas (Yi y Ren, 2017).

Se han publicado diferentes revisiones científicas, que resumen los estudios relacionados con la obtención de compuestos bioactivos a partir de residuos orgánicos y su aplicación en el diseño de nuevos alimentos funcionales. Así, Schieber et al., (2001), realizaron una de las primeras revisiones sobre la utilidad del procesamiento de productos de frutas y hortalizas, como materia prima de bajo costo, para la producción de compuestos bioactivos, entre los que destacan los compuestos fenólicos, con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Yu y Ahmedna, 2013). Los cítricos han sido examinados en busca de compuestos bioactivos (Cuadro 3), como los flavonoides, limonoides, cumarinas, aceites volátiles y carotenoides, que pueden ayudar a reducir el riesgo de muchas enfermedades crónicas. La actividad biológica de estos compuestos se ha estudiado mediante intervención *in vitro*, *in vivo* y en humanos. De los cítricos, la pulpa, la cáscara, e incluso las frutas jóvenes, caídas de los huertos, se utilizan como materia prima para la extracción de compuestos bioactivos (Rafiq et al., 2018). En la actualidad, las demandas de los compuestos bioactivos se han incrementado drásticamente (Sharma et al., 2017).

Cuadro 3. Propiedades biológicas de compuestos bioactivos en residuos cítricos (Sharma et al., 2017)

Compuesto bioactivo	Función	Mecanismo de acción
Aceite esencial	Efecto antibacteriano	Los componentes activos influyen en ciertas funciones metabólicas de las células microbianas
Hesperidina y narigina	Actividad antiplaquetaria	Inhibe la formación de tromboxano A2
Hesperidina	Antiinflamatorio	Inhibe la síntesis de eicosanoides y promueve la actividad del eliminador de radicales libres antioxidantes
Flavonoides (naringenina y rutina)	Efecto antimutagénico	Protege el ADN al interactuar directamente con los agentes tumorales
Flavonas polifenoles	Efecto antiproliferativo	Inhibe la proliferación de células MDA-MB-435, MCF-7 y cáncer de mama humano
Flavonoides	Enfermedades cardiovasculares	Mejora la vasodilatación coronaria, disminuye la actividad de las plaquetas para coagular la sangre y evita que las lipoproteínas de baja densidad se oxiden
Flavonoides	Efecto neuroprotector	Protege las neuronas corticales contra el estrés oxidativo
Polimetoxiflavonas	Efecto antiinflamatorio	Inhibe la expresión de genes y las enzimas involucradas en la inflamación
Nobiletina y la tangeretina	Efecto antiinflamatorio	Suprimir la expresión de mediadores proinflamatorios

Los compuestos bioactivos extraídos de los cítricos tienen propiedades antioxidantes, anticancerígenos, antitumoral, antiinflamatorios y antivirales. También eliminan especies reactivas de oxígeno, rejuvenecen las enzimas antioxidantes del cuerpo, inhiben varias vías de señalización, actúan sobre las vías apoptóticas intrínsecas y extrínsecas, suprimen los mediadores inflamatorios y detienen el ciclo celular (Kaur y Kaur, 2015). También se ha investigado que, algunos de estos compuestos bioactivos forman enzimas protectoras en el hígado y bloquean el daño de los materiales genéticos en las células (Sharma et al., 2017). El pericarpio de mandarina seco y madurado es una de las hierbas medicinales chinas más famosas que figuran oficialmente en la Farmacopea China. Se ha utilizado ampliamente para tratar la indigestión y las enfermedades respiratorias inflamatorias, como la bronquitis y el asma, es eficaz para resolver la tos y la flema, estimular el apetito y mejorar las funciones del sistema inmunológico (Xu et al., 2007). La cáscara de cítricos es usada para aliviar el malestar estomacal, la tos, la inflamación de la piel, el dolor muscular y las infecciones por tña, así como para disminuir la presión sanguínea (Li et al., 2009).

El proceso de la inflamación en el desarrollo de las enfermedades

La inflamación es la expresión patente del sistema defensivo del organismo, en respuesta a una agresión. Las enfermedades, cuya respuesta es la inflamación, son causa importante de mortalidad y morbilidad en los humanos. La inflamación es una cascada de respuestas inmunitarias que intervienen en la defensa del huésped contra los patógenos invasores, así como en la patogénesis de diversas enfermedades crónicas. La inflamación puede ocurrir en ausencia de patógenos, contribuyendo al daño tisular y conduciendo a la enfermedad. El inicio de la respuesta inflamatoria se caracteriza principalmente por cambios en el flujo sanguíneo, un aumento en la permeabilidad de los vasos sanguíneos y la migración de fluidos, proteínas y glóbulos blancos. La finalización de la respuesta inflamatoria, también conocida como resolución, está menos caracterizada, pero estudios recientes indican que no es un proceso pasivo, sino un programa altamente orquestado, coordinado por una compleja red reguladora de células y mediadores que cesan la inflamación de una manera específica, por tiempo limitado (Titos y Clària, 2013).

Las respuestas inflamatorias pueden tornarse excesivas o persistentes, debido a la acumulación de células activadas y sus productos de secreción. Los macrófagos son uno de los principales tipos celulares involucrados en la inflamación, ya que su capacidad de reconocer, fagocitar y destruir patógenos los hace parte esencial de la denominada inmunidad innata. Sin embargo, la presencia y proliferación excesiva de los macrófagos en la inflamación crónica, puede ser perjudicial, y en particular su participación en un diverso número de alteraciones, como el síndrome inflamatorio sistémico (Ripoll et al., 2005). Comprender cómo las células inmunitarias coordinan sus actividades para iniciar, modular y terminar la inflamación, es clave para desarrollar intervenciones efectivas que permitan preservar la salud y combatir enfermedades (Chen et al., 2017). El sistema inmunológico protege de los microorganismos. Cuando los microbios ingresan al cuerpo, provocan reacciones bioquímicas y celulares que eliminan a los intrusos y restablecen la esterilidad de los tejidos. Estas reacciones se conocen colectivamente como 'inflamación aguda' y son vitales para la protección temprana contra los microbios. La inflamación aguda se basa principalmente en reacciones bioquímicas y en células inmunes innatas, como los neutrófilos y los monocitos/macrófagos para aislar los microbios de los tejidos normales, evitando así que los microbios establezcan un nicho dentro del cuerpo y, finalmente, neutralicen a los intrusos. La inflamación aguda se inicia mediante la activación de una variedad de genes inflamatorios que codifican moléculas de adhesión. Cuando las infecciones no se resuelven durante la respuesta inflamatoria aguda, se produce una inflamación crónica (Radi et al., 2001).

La inflamación crónica involucra entidades bioquímicas y una amplia gama de células inmunes innatas y adaptativas más complejas que la inflamación aguda, incluidos varios tipos de linfocitos. Por lo tanto, la inflamación crónica tiene mayores capacidades para combatir una gama más amplia de microorganismos. La inflamación crónica también corre un mayor riesgo de daño colateral a los tejidos sanos. El daño tisular puede, a su vez, convertirse en un nuevo desencadenante de la inflamación, prolongando y exacerbando la inflamación crónica. La inflamación crónica es ampliamente reconocida como una de las principales causas subyacentes de diversas enfermedades degenerativas (Figura 4). La inflamación crónica se caracteriza por la duración prolongada de infecciones persistentes, enfermedades inflamatorias mediadas por el sistema inmunitario o la exposición prolongada a reactivos tóxicos. Se cree que, durante la inflamación crónica grave, la acumulación de destrucción tisular causada por especies electrofílicas, junto con el daño inducido por las metaloproteinasas proteolíticas, conduce a afecciones patológicas de diversas enfermedades, como la cardiovascular, la enfermedad de Alzheimer, la DM y el CA (Coussens y Werb, 2002).

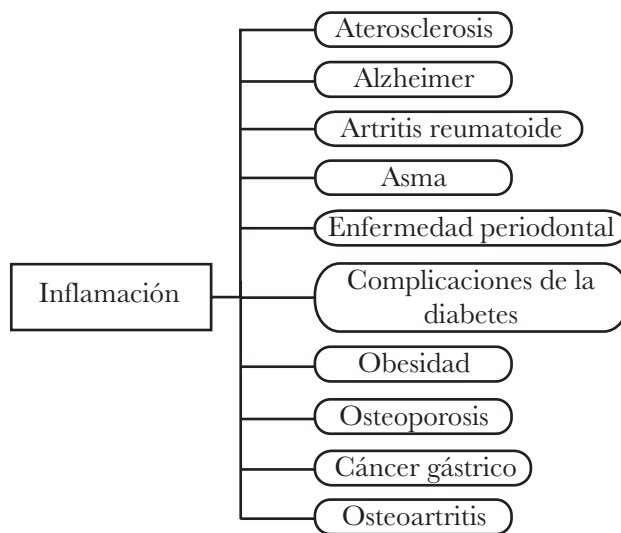


Figura 4. Enfermedades relacionadas con la inflamación

Los estudios epidemiológicos y estudios moleculares han demostrado que las condiciones inflamatorias aumentan el riesgo de malignidad. La inflamación crónica tiene efectos promotores de tumores por varios mecanismos, que incluyen la proliferación de células malignas, la angiogénesis y metástasis de tumores y la alteración de la respuesta tumoral a los fármacos quimioterapéuticos (Mantovani et al., 2008). Una mejor comprensión de los procesos que inician, impulsan y

terminan la inflamación, tanto aguda como crónica, podría ayudar a descubrir nuevos tratamientos, con impacto en la curación de heridas, alergias y la salud de la población que envejece (Irimia y Wang, 2018). La limitación de las terapias antiinflamatorias actuales es ampliamente reconocida y evidente en los esfuerzos continuos en la industria farmacéutica, para desarrollar medicamentos que se dirigen a pasos específicos en la cascada inflamatoria. Los productos naturales tienen el potencial de llenar este vacío terapéutico, al abordar la complejidad de la cascada inflamatoria, lo que reduce los efectos secundarios y las reacciones compensatorias que requieren tratamiento secundario (Gosslau et al., 2014). La inflamación dirigida ha sido reconocida como una estrategia prometedora, basada en la dieta, para la prevención de enfermedades crónicas impulsadas por la inflamación. La identificación de varios compuestos proinflamatorios, como endotoxinas, citoquinas, productos del metabolismo del ácido araquidónico, junto con la demostración de que se podría producir un síndrome clínico impulsó a la ciencia, la misión de identificar mediadores antiinflamatorios, para inhibir, bloquear, neutralizar o limitar los posibles efectos destructivos de estos compuestos proinflamatorios. La mayoría de los investigadores en el campo reconocieron la importancia de interrumpir estas vías inflamatorias lo antes posible (Guo et al., 2012).

Polimetoxiflavonas (PMF) en cáscara de naranja

La cáscara de cítricos, aunque no se consume habitualmente, contiene una amplia variedad de componentes secundarios con una actividad antioxidante sustancial, en comparación con otras partes de la fruta (Manthey y Grohmann, 2001). Los flavonoides cítricos son compuestos polifenólicos derivados específicamente de frutas cítricas o plantas, tales como naranjas, mandarinas, toronjas, limones y limas, que desempeñan un papel importante en la regulación de la salud física. Los flavonoides cítricos se clasifican en tres tipos principales (flavanona, flavona y flavonol) (Nogata et al., 2006). Los PMF a veces se consideran como un tipo individual de flavonoides, debido a su estructura especial (polimetoxilada) y su alta actividad biológica (Li et al., 2009).

Se ha demostrado que las PMF exhiben fuertes efectos antiinflamatorios, tanto a nivel de expresión génica como de actividad enzimática (Manthey et al., 1999). Los flavonoides se encuentran típicamente en toda la fruta, mientras que los PMF se encuentran exclusivamente en las cáscaras del género *Citrus*, particularmente en las cáscaras de naranjas dulces (*Citrus sinensis*) y mandarinas (*Citrus reticulata*) (Gosslau et al., 2014). Las PMF llevan dos o más grupos metoxi (R-O-CH₃) en su esqueleto básico de benzo- γ -pirona (15-carbono, C6-C3-C6) con un grupo carbonilo en la posición C₄, que tienen regularidad en la estructura básica. El número máximo de grupos metoxilo puede ser de hasta siete, y sus anillos A, B y C a veces están

sustituidos con un grupo hidroxilo (OH). En general, las PMF de los flavonoides con grupos hidroxilo son responsables de la actividad antioxidante, citotóxica, y otras, mientras que los grupos metoxilo están asociados con la interacción con proteínas, membranas celulares y enzimas. Las PMF están directamente asociadas con la inhibición de las enzimas involucradas en la inflamación. Sin embargo, las actividades todavía dependen del número y la posición de los grupos hidroxilo y metoxilo. Teniendo en cuenta las propiedades anteriores del grupo metoxilo y el grupo hidroxilo, las PMF hidroxilados pueden combinar la mayoría de las ventajas de ambos grupos funcionales (Ho y Kuo, 2014).

La infiltración y la sobreproducción de mediadores inflamatorios, como los radicales libres, las citoquinas y las quimiocinas, causarán la destrucción de la función celular y tisular. Las prostaglandinas realizan tanto funciones relacionadas con la homeostasis de diversos órganos como con el dolor, la inflamación y el desarrollo de neoplasias. Las prostaglandinas desempeñan un papel clave en la generación de la respuesta inflamatoria. Su biosíntesis aumenta significativamente en el tejido inflamado y contribuye al desarrollo de los signos cardinales de la inflamación aguda. La prostaglandina E_2 se une a cuatro formas de receptores acoplados a proteína G (EP_1 - EP_4), dando lugar a diferentes efectos, como la inflamación. La dinoprostona es una forma natural de la prostaglandina E_2 (PGE_2) y funciona enlazándose al receptor de la prostaglandina E_2 y activándolo. Se sintetiza a partir de la prostaglandina H_2 mediante la enzima prostaglandina G/H sintetasa. La ciclooxigenasa (COX) es la enzima clave en la síntesis de las prostaglandinas. Las PMF ejercen un potencial antiinflamatorio al inhibir la expresión de genes y las enzimas involucradas en la inflamación. La nobiletina podría interferir con la producción de PGE_2 inducida por lipopolisacáridos (LPS) y citoquinas proinflamatorias, y podría regular de manera selectiva la expresión del gen COX-2, la tangeretina también podría limitar la expresión de COX-2. A nivel molecular, la tangeretina redujo significativamente el nivel de TNF- α proinflamatorio y aumentó la citoquina antiinflamatoria IL-1 α (Ricciotti y FitzGerald, 2010).

Con la aplicación de tecnología avanzada, en la separación y la identificación de estructuras de los fitoquímicos, se han reportado muchos tipos de PMF cítricos desde que se cristalizó la primera tangeretina de PMF a partir de aceite de mandarina en 1934. Se han producido 135 PMF, incluidas 81 polimetoxiflavonas y 54 polimetoxiflavanonas o polimetoxioxaconas, caracterizadas por la aplicación de la adquisición de exclusión dinámica de lista de iones de exploración completa (Gao, 2017).

Las PMF solas o en combinación con otros medicamentos pueden ser candidatas prometedoras para desarrollar nuevas terapias o mejorar las existentes. Un estudio sugirió que la nobiletina y la tangeretina podrían considerarse como compuestos bioactivos antiinflamatorios, porque podrían suprimir la expresión de

mediadores proinflamatorios. La nobiletina mostró efectos inhibitorios más fuertes que la tangeretina. Recientemente, se han llevado a cabo estudios farmacológicos y mecánicos intensivos sobre PMF de cítricos, para explorar su potencial terapéutico (Hagenlocher y col., 2016).

En conclusión, el contenido de compuestos bioactivos en frutas cítricas es responsable de los efectos beneficiosos para la salud humana. La obtención de compuestos bioactivos, con propiedades antiinflamatorias, de subproductos es una forma inteligente de reducir el desperdicio industrial, el costo y el impacto ambiental generado por la destrucción habitual de los subproductos, con el valor agregado de obtener fitoquímicos con propiedades beneficiosas para la salud. Desde el punto de vista del consumidor, el uso general de compuestos naturales para reemplazar los sintéticos es una ventaja saludable, ya que perciben los compuestos de los subproductos de procesamiento de vegetales como un ingrediente más natural. Los flavonoides cítricos son los principales fitoquímicos presentes en los frutos cítricos y han demostrado tener una amplia gama de actividades biológicas en diversos estudios *in vitro* e *in vivo*. Tomar antiinflamatorios farmacológicos no es la única forma de abordar terapéuticamente las enfermedades que cursan con inflamación. Para la medicina convencional, la inflamación es considerada como una característica de la presencia de enfermedad, por lo que debe inhibirse por cualquier medio para restablecer la salud. Las PMF de los subproductos como la cáscara de naranja, sirven como mediadores antiinflamatorios, para inhibir, bloquear, neutralizar o limitar los posibles efectos destructivos de compuestos proinflamatorios, por lo que contribuyen a la salud de quien los consume. Un número considerable de líneas de evidencia bien establecidas han confirmado que los flavonoides en la cáscara de los cítricos exhiben un notable espectro de actividades biológicas benéficas.

Lista de referencias

- Álvarez-Gonzales, I., Madrigal-Bujaidar, E., y Sánchez-García, V. Y. (2010). Inhibitory effect of grapefruit juice on the genotoxic damage induced by ifosfamide in mouse. *Plant Foods for Human Nutrition*, (65), 369–373.
- Anwar, F., Naseer, R., Bhanger, M. I., Ashraf, S., Talpur, F. N., y Aladedunye, F. A. (2008). Physico-Chemical characteristics of citrus seeds and seed oils from Pakistan. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, (85), 321–330.
- Assis, C. R., Hermsdorff, H. M., y Bressan, J. (2013). Anti-inflammatory properties of orange juice: possible favorable molecular and metabolic effects. *Plant Foods for Human Nutrition*, (68), 1–10.
- Bohn, T., McDougall G. J., Alegría A., Alminger M., Arrigoni E., Aura A. M., Brito C., Cilla A., El S. N., Karakaya S., Martínez-Cuesta M. C., Santos C. N. (2015). Mind the gap – deficits in our knowledge of aspects impacting the bioavailability of phytochemicals and their metabolites –a position paper focusing on carotenoids and polyphenols. *Molecular Nutrition and Food Research*, (59), 1307-1323.
- Boukroufa, M., Boutekedjiret, C., Petigny, L., Rakotomanomana, N., y Chemat, F. (2015). Biorefinery of orange peels waste: a new concept based on integrated green and solvent free extraction processes using ultrasound and microwave techniques to obtain essential oil, polyphenols and pectin. *Ultrasonic Sonochemistry*, 24, 72–79.
- Carbonell-Capella, J. M., Buniowska M., Barba, F. J., Esteve M. J., y Frígola A. (2014). Analytical methods for determining bioavailability and bioaccessibility of bioactive compounds from fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13 (2):155-171.
- Chen X., Tait A. R., y Kitts D. D. (2017). Flavonoid composition of orange peel and its association with antioxidant and anti-inflammatory activities. *Food Chemistry*, (218), 15-21.
- Correia R. T. P., Borges K., Medeiros M. F., y Genovese M.I. (2012). Bioactive compounds and phenolic-linked functionality of powdered tropical fruit residues. *Food Science and Technology International*, 18(6), 539-547.
- Coussens, L. M., y Werb, Z. (2002). Inflammation and cancer. *Nature*, (420), 860–867.
- Cha, J. Y., Cho, Y. S., Kim, I., Anno, T., Rahman, S. M., y Yanagita, T. (2001). Effect of hesperedin, a citrus flavonoid, on the liver triacylglycerol content and phosphatidatephosphohydrolase activity in rats. *Plant Foods for Human Nutrition*, 56, 349–358.
- De Ancos, B., Colina C. C., González P. D., Sanchez M. C. (2015). Bioactive compounds from diverse plant, microbial, and marine sources. *Biotechnology of Bioactive Compounds: Sources and Applications*, 3-19.

- Gao Z., Gao, W., Zeng S., Li, P., y Lio E. (2017). Chemical structures, bioactivities and molecular mechanisms of citrus polymethoxyflavones. *Journal of Functional Foods*, (40), 489-509.
- Galanakis, Ch. M. (2017). Bioactive compounds. Nutraceuticals and functional food components effects of innovative processing techniques. Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Gil-Chavez, G., Villa, J., Ayala, J. F., Heredia, J., Sepulveda, D., Yahia, E., y Gonzalez, G. (2013). Technologies for extraction and production of bioactive compounds to be used as nutraceuticals and food ingredients: An Overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, (12), 5-23.
- Gossiau, A., Yu, CH. K., Ho, Ch., y Li, S. (2014). Anti-inflammatory effects of characterized orange peel extracts enriched with bioactive polymethoxyflavones. *Food Science and Human Wellness*, (3), 26-35.
- Guo, S., Qiu, P., Xu, G., Wu, X., Dong, P., Yang, G., Zheng, J., McClements, D. J., y Xiao, H. (2012). Synergistic anti-inflammatory effects of nobiletin and sulforaphane in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(9), 2157–2164.
- Hagenlocher, Y., Feilhauer, K., Schäffer, M., Bischoff, S. C., y Lorentz, A. (2016). Citrus peel polymethoxyflavones nobiletin and tangeretin suppress LPS- and IgE-mediated activation of human intestinal mast cells. *European Journal of Nutrition*, 1–12.
- Heaney, R. P. (2001). Factors influencing the measurement of bioavailability, taking calcium as a model. *Journal of Nutrition*, 131(4), 1344-1348.
- Ho, S., y Kuo, C. (2014). Hesperidin, nobiletin, and tangeretin are collectively responsible for the anti-neuroinflammatory capacity of tangerine peel (*Citri reticulatae pericarpium*). *Food and Chemical Toxicology*, (71), 176–182.
- Irimia, D., y Wang, X. (2018). Inflammation-on-a-Chip: Probing the Immune System Ex Vivo. Review. *Trends in Biotechnology*, (36), 923-937.
- Kaur, J., y Kaur, G. (2015). An insight into the role of citrus bioactives in modulation of colon cancer. *Journal of Functional Foods*, (13), 239-261.
- Li, S., Pan, M. H., Lo, C. Y., Tan, D., Wang, Y., Shahidi, F., y Ho, C.T. (2009). Chemistry and health effects of polymethoxyflavones and hydroxylated polymethoxyflavones. *Journal of Functional Foods*, 1(1), 2–12.
- Mantovani, A., Allavena, P., Sica, A., y Balkwill, F. (2008). Cancer-related inflammation. *Nature*, 454(7203), 436–444.
- Manthey, J. A., y Grohmann, K. (2001). Phenols in citrus peel byproducts. Concentrations of hydroxycinnamates and polymethoxylated flavones in citrus peel molasses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(7), 3268– 3273.

- Manthey, J. A., Grohmann, K., Montanari, A., Ash, K., y Manthey, C. L. (1999). Polymethoxylated flavones derived from citrus suppress tumor necrosis factor- α expression by human monocytes. *Journal of Natural Products*, (62), 441–444.
- Magiorkinis, E., Beloukas, A., y Diamantis, A. (2001). Scurvy: past, present and future. *European Journal of Internal Medicine*, (22), 147–152.
- Negro, V., Mancini, G., Ruggeri, B., y Fino, D. (2016). Citrus waste as feedstock for bio-based products recovery: Review on limonene case study and energy valorization. *Bioresource Technology*, (214), 806-815.
- Nogata, Y. Sakamoto, K., Shiratsuchi, H., Ishii, T., Yano, M., y Ohta, H. (2006). Flavonoid composition of fruit tissues of Citrus species. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, (70), 178–192.
- Pak, C. Y. (2004). Medical management of urinary stone disease. *Nephron Clinical Practice*, (98), 49–53.
- Pleissner, D., Qi, Q., Gao, C., Perez, R. C., Webb, C., Ki, L. C. S., y Venus J. (2016). Valorization of organic residues for the production of added value chemicals: A contribution to the bio-based economy. *Biochemical Engineering Journal*, (116), 3-16.
- Radi, Z. A. Kehrl M. E. Jr., y Ackermann, M. R. (2001). Cell adhesion molecules, leukocyte trafficking, and strategies to reduce leukocyte infiltration. *Journal of Veterinary Internal Medicine*, (15), 516–529.
- Rafiq, S., Kaul, R., Sofi, S. A., Bashir, N., Nazir, F., y Nayik, G. A. (2018). Citrus peel as a source of functional ingredient: A review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, (17), 351-358.
- Ricciotti, E., y FitzGerald G. A. (2011). Prostaglandins and inflammation. *ATVB in Focus Inflammation. Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 986-1000.
- Ripoll, V. M., Hume, D., y Fontanilla, M. R. (2005). Expresión específica de los genes de la respuesta inflamatoria en subpoblaciones de macrófagos. *Biomédica*, (25), 61-70.
- Sadek, E. S., Makris, D. P., y Kefalas, P. (2009). Polyphenolic composition and antioxidant characteristics of kumquat (*Fortunella margarita*) peel fractions. *Plant Foods for Human Nutrition*, (64), 297–302.
- Satari, B., y Karimi, K. (2018). Citrus processing wastes: Environmental impacts, recent advances, and future perspectives in total valorization. *Resource, Conservation and Recycling*, (129), 153-167.
- Schieber, A., Stinzing, F. C., y Carle, R. (2001). By-products of plant food processing as a source of functional compounds: recent developments. *Trends in Food Science and Technology*, 12(11), 401–413.

- Sharma, K., Mahato, N., y Cho, M. H. (2017). Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmently friendly approaches. *Nutrition*, 34, 29– 46.
- Sharma, K., Mahato, N., Hwan, Ch. M., y Lee, Y. R. (2017). Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmently friendly approaches. *Nutrition*, (34): 29-46.
- Spiegel, R. P., y Goldschmidt, E. E. (1996). History of citrus. *Biology of Citrus*, Cambridge University Press. pp. 4-8.
- Srini, V. S. (2001). Bioavailability of nutrients: A practical approach to in vitro demonstration of the availability of nutrients in multivitamin-mineral combination products. *Journal of Nutrition*, 131(4), 1349S-1350S.
- Titos, E., y Clària, J. (2013). Omega-3-derived mediators counteract obesity-induced adipose tissue inflammation. *Prostaglandins and Other Lipid Mediators*, (107), 77-84.
- Ye, X. (2018). Citrus Fruits, varieties, chemical properties, and products in the proPhytochemicals in Citrus. *Applications in Functional Foods*. CRC Press. pp 35.
- Yi, Lunzhao, Ma. S., y Ren, D. (2017). Phytochemistry and bioactivity of Citrus flavonoids: a focus on antioxidant, anti-inflammatory, anticancer and cardiovascular protection activities. *Phytochemistry Reviews*, (16), 479-511.
- Yu, J. y Ahmedna, M. (2013). Functional components of grape pomace: their composition, biological properties and potential applications. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(2), 221–237.
- Xu, G., Ye, X., Chen, J., y Liu, D. (2007). Effect of heat treatment on the phenolic compounds and antioxidant capacity of citrus peel extract. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(2), 330–335.
- Zema, D. A., Calabrò, P. S., Folino, A., Tamburino, V., Zappia, G., y Zimbone, S.M. (2018). Valorisation of citrus processing waste: A review. *Waste Management*, (80), 252-273.

Perspectivas actuales y tendencias en la producción y aprovechamiento integral de cítricos en México, de Juan Francisco Castañón Rodríguez, publicado por la Universidad Autónoma de Tamaulipas y Colofón, se terminó de imprimir en marzo de 2020 en los talleres de Ultradigital Press S.A. de C.V. Centeno 195, Col. Valle del Sur, C.P. 09819, Ciudad de México. El tiraje consta de 300 ejemplares impresos de forma digital en papel Cultural de 75 gramos. El cuidado editorial estuvo a cargo del Consejo de Publicaciones UAT.

