

Técnicas emergentes de extracción de β -caroteno para la valorización de subproductos agroindustriales de la zanahoria (*Daucus carota* L.): una revisión

Emerging extraction techniques of β -carotene for the valorisation of agroindustry by-products of carrot (*Daucus carota* L.): a review

Daniel Otálora-Orrego¹
D.A. Martin G.²

¹ Hortalizas Boyacá S.A.S. (Colombia). Correo electrónico: daniel.otalora@estudiantes.uamerica.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9092-8050>

² Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC (Colombia). Correo electrónico: dario.martin@uptc.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4629-166X>

Recibido: 27-05-2020 Aceptado: 06-10-2020

Cómo citar: Otálora-Orrego, Daniel; Martin-G, D.A (2020). Técnicas emergentes de extracción de β -caroteno para la valorización de subproductos agroindustriales de la zanahoria (*Daucus carota* L.): una revisión. *Informador Técnico*, 85(1), 83-106.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2857>

Resumen

El objetivo de la presente revisión es reunir, contrastar y analizar algunas de las técnicas convencionales y no convencionales de extracción de β -caroteno a partir de la zanahoria (*Daucus carota* L.), a través de un análisis bibliométrico de estudios e investigaciones recientes, en los que confluyen numerosas técnicas, parámetros y hallazgos. Asimismo, establecer las posibles contribuciones de la extracción con solventes verdes para estos procesos, permitiendo su aplicabilidad a escala industrial para el aprovechamiento de los subproductos agroindustriales de este vegetal. La zanahoria es rica en carotenoides, en especial β -caroteno, fuente de provitamina A, utilizada como colorante natural en la industria de alimentos y farmacéutica. La extracción asistida con microondas (MAE por su sigla en inglés), con enzimas (EAE por su sigla en inglés) y en fluidos supercríticos (SFE por su sigla en inglés), han sido evaluadas en la zanahoria y comparadas con las técnicas convencionales de extracción (CSE por su sigla en inglés), encontrando rendimientos y eficiencias similares e incluso superiores. Sin embargo, la extracción asistida con ultrasonido (UAE por su sigla en inglés), muestra resultados satisfactorios y considerablemente mayores (157,0 mg β -caroteno/100 g base seca). Se requieren estudios posteriores para optimizar las condiciones y los parámetros de extracción, y evaluar las condiciones de conservación de la materia prima y del extracto final que aseguren una mayor estabilidad del producto y, por ende, un rendimiento de extracción superior, al igual que considerar alternativas verdes de extracción para reducir el impacto ambiental.

Palabras clave: extracción; solvente verde; rendimiento; zanahoria; *Daucus carota* L., β -caroteno; colorante natural.

Abstract

The objective of this review was to collect, contrast and analyse the conventional and non-conventional extraction techniques to obtain β -carotene from carrot (*Daucus carota* L.), by conducting a bibliometric analysis of different recent studies and investigations where different approaches, techniques, and findings converge. Similarly, the contribution of green solvents to the extraction process is established to determine its applicability at an industrial scale. Carrots are rich in carotenoids, and especially in β -carotene, a source of provitamin A used as a natural coloring in the food and pharmaceutical industry. Microwave-assisted extraction (MAE), enzyme-assisted extraction (EAE), and Supercritical fluid extraction (SFE) have been evaluated using the carrot and have been compared to conventional solvent extraction techniques (CSE), showing similar and even higher extraction yields and efficiencies. However, ultrasound-assisted extraction (UAE) shows successful and considerably higher results (157.0 mg β -carotene/100 g DB) compared to other non-conventional techniques. Further investigations are required to optimize the extraction conditions and parameters, as well as the evaluation of suitable preservation conditions for both the raw material and the final extract that ensure a higher stability of the end-product, and thus providing a higher extraction yield. Green alternatives should be considered to reduce environmental impact in future extraction processes.

Keywords: carrot; extraction; green solvent; yield; *Daucus carota* L.; β -carotene; natural colorant.

1. Introducción

El crecimiento de la demanda de alimentos por el aumento de la población a nivel mundial ha traído nuevos retos para las industrias de este sector agropecuario y agroindustrial. En Colombia, la producción de zanahoria aumentó un 30 % entre 2007 y 2020, con un rendimiento promedio del 30,54 % (Ministerio de Agricultura, 2017). Esto genera un problema en el manejo de residuos y subproductos remanentes de sus procesos que pueden alcanzar hasta un 30 % de la cosecha (Clementz *et al.*, 2019). A pesar de los diferentes usos que actualmente tienen, como la producción de biogás, compostaje, alimentación animal (Martínez; Quintero, 2017), una gran parte de este volumen aún no tiene ningún tipo de transformación útil, causando un problema económico y ambiental, ya que solo entre el 15 % y 20 % tiene un uso alternativo (Clementz *et al.*, 2019).

El desarrollo de tecnologías extractivas de compuestos bioactivos de fuentes naturales, han permitido conformar nuevas técnicas y procesos que establecen posibles alternativas para aprovechar componentes, como vitaminas, almidones y fibras dietarias, entre otras. Uno de los grupos de compuestos de alto valor nutricional y con un amplio campo de aplicación en diferentes industrias son los carotenoides. Estos compuestos pertenecientes al grupo de los tetraterpenoides, son pigmentos naturales oleosolubles, conformados por una cadena de hidrocarburos de 40 átomos de carbono con dos anillos terminales a los extremos brindándoles un color amarillo - naranja - rojo característico (Cheng; Khoo; Kong; Prasad; Galanakis, 2020).

El consumo global de carotenoides tuvo un crecimiento de 1500 toneladas métricas entre el 2007 (4193 ton) y 2017 (5693,6 ton) y se espera que esta cifra llegue hasta las 622,6 ton para el 2022, lo cual se refleja en el mercado global que tuvo un crecimiento estimado para el 2017 de 1.5 billones de dólares, no obstante, otros estudios pronostican una cifra de US\$2,0 billones de dólares para el 2022 (Bogacz-Radomska; Harasym; Piwowar, 2020).

El β -caroteno natural pertenece al grupo de los compuestos carotenoides que ha tomado fuerza en los últimos años gracias a sus beneficios nutricionales como compuesto antioxidante y sus efectos en la salud, especialmente porque disminuye el riesgo de presentar algunos tipos de cáncer (Clementz *et al.*, 2019) y es útil para la prevención de enfermedades crónicas y degenerativas; lo anterior, sin mencionar sus aplicaciones en la industria de alimentos, como colorante natural, suplemento vitamínico y compuesto activo para medicamentos (Martins; Ferreira, 2017). En el mercado se puede encontrar el β -caroteno en solución oleaginosa, generalmente

en aceite de girasol refinado entre 0.2-1.0 % de concentración, cuya aplicación se centra en los alimentos funcionales (Underwriters, 2020).

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es conocida por su alto contenido de carotenoides especialmente α -y β -caroteno, precursores de la vitamina A, cumpliendo varias funciones relevantes en el cuerpo humano (Bogacz; Harasym, 2018). Diferentes técnicas de extracción sólido-líquido al igual que técnicas de cuantificación y detección han sido investigadas y evaluadas, de manera paralela, procurando su optimización, reducción de solventes de extracción y sustitución de solventes tóxicos para así ajustarse a las nuevas tendencias de los procesos sostenibles, económicos y amigables con el ambiente (Boukroufa; Boutekedjiret; Chemat, 2017). Las técnicas de extracción no convencionales, a diferencia de las técnicas convencionales (CE), se fundamentan en el uso de métodos de alta energía que permiten llegar al compuesto objetivo en una matriz vegetal, brindando una serie de ventajas, como una reducción en el tiempo, el consumo energético, la temperatura y la cantidad de solvente de extracción, al igual que sus altos rendimientos de extracción y sus bajos efectos de termodegradación de compuestos bioactivos (Goula; Ververi; Adamopoulou; Kaderides, 2017). Es por esto que han ganado gran interés en los últimos años y generan gran expectativa en el ámbito científico e industrial.

El presente documento tiene como propósito reunir y discutir los diferentes hallazgos y desarrollos en el proceso de extracción de β -caroteno, a partir de los subproductos de la zanahoria, como la epidermis o pulpa, teniendo en cuenta los conceptos, parámetros y variables fundamentales para definir su metodología y técnica, haciendo énfasis en las ventajas y beneficios potenciales que pueden traer para la valorización de subproductos agroindustriales a escala industrial, considerando los grandes retos que trae el aumento de la producción, consumo y procesamiento de la zanahoria (*Daucus carota* L.) y los desarrollos tecnológicos hacia el consumo de productos procesados con compuestos naturales.

2. Metodología

La información recopilada para el desarrollo de este documento fue consultada en publicaciones indexadas, artículos científicos o de revisión, secciones de libros en bases de datos de diferentes comunidades científicas. El criterio de selección se fundamentó en un análisis bibliométrico estableciendo un intervalo de tiempo de publicación a partir del año 2015 hasta la actualidad y seleccionando estudios que exponen tanto resultado experimental como fundamentos teóricos y metodologías de evaluación, optimización y análisis de los hallazgos que cada uno de estos expone. La búsqueda fue enfocada únicamente a artículos que giraran en torno al proceso de extracción, usando como materia prima la zanahoria variedad chantenay o (*Daucus carota* L.). Una vez realizado el rastreo bibliográfico se encontró que el porcentaje de artículos de investigación con respecto a los artículos de revisión es del 70 % y 30 %, respectivamente. Las palabras clave o tesauros empleados como criterios de búsqueda con ayuda de los operadores de búsqueda más relevantes fueron "*carrot AND β -carotene*", "*carrot AND extraction*", "*carrot AND ultrasound*" y "*Green AND extraction*", encontrando una gran afluencia de investigaciones relacionadas con estas técnicas de extracción entre los años 2013 y 2017, y, específicamente con relación a la zanahoria entre los años 2015 y 2017.

Las fuentes de información consultadas corresponden a las bases de datos digitales Science direct; Springer link; Scielo y Scopus, además de secciones o capítulos de libros digitales y manuales de equipos o dispositivos relacionados a los métodos de extracción y cuantificación mencionados. La búsqueda inicial arrojó un total de 72 artículos y publicaciones de carácter científico, los cuales fueron posteriormente depurados hasta obtener un total de 60 documentos. Los criterios de descarte aplicados para los artículos de investigación constaban de una serie de requerimientos donde era necesario una descripción de la técnica y metodología especificada, al igual que proporcionaran resultados cuantitativos y preferiblemente soportados por análisis estadísticos. Para los artículos de revisión y capítulos de libros se estableció que las fuentes de los fundamentos teóricos no debían superar el rango temporal establecido.

3. Desarrollo del tema

3.1. La zanahoria como fuente natural de carotenoides

La zanahoria es un vegetal de tipo raíz perteneciente a la familia *Apiaceae* anteriormente conocida como *Umbelliferae*, cuya producción se especializa en el consumo humano centrado en una siembra y cosecha bianual (ideal para regiones tropicales por su cosecha continua durante todo el año) y cuya calidad es dependiente de varios factores como las condiciones climáticas, relación corteza-raíz, su sistema vascular y la calidad del xilema y floema de la raíz (Raees; Prasad, 2015). En la Figura 1 se muestra su morfología, que está compuesta por el cuello y corona (parte más gruesa de la raíz), el fruto o floema, el corazón o xilema y, por último, la base o punta (parte más angosta). En conjunto, la zanahoria puede crecer en longitud desde los 5 hasta los 20 cm (Barzee; El- Mashad; Zhang; Pan, 2019).

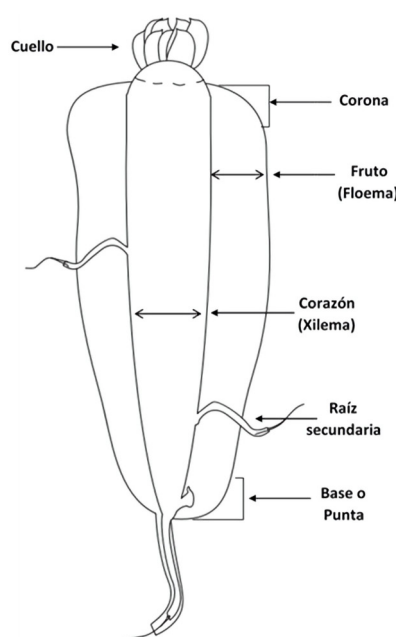


Figura 1. Morfología general de la zanahoria

Fuente: adaptado de Barzee *et al.* (2019).

El consumo mundial de zanahoria es de aproximadamente 37 millones de toneladas anuales, de las cuales un 11 % pertenece a los residuos de su procesamiento compuesto, principalmente, por la epidermis, tubérculos y trozos de fruto adheridos (de Andrade; Charalampopoulos; Chatzifragkou, 2018). En países de América y Europa la generación de desechos es un problema común, ya que entre el 15-20 % de estos son destinados al consumo animal y el restante es descartado hasta su descomposición, generando olores ofensivos y proliferación de insectos y plagas (Clementz *et al.*, 2019). La fuente principal que origina subproductos de zanahoria es la producción de jugo, la cual crea una gran cantidad de pulpa (Barzee *et al.*, 2019). Algunas cifras indican que hasta el 50 % de la pulpa de zanahoria usada para producción de jugo se obtiene como desperdicio. Este volumen es usado posteriormente como alimento animal o, incluso, descartado (Tiwari; Upadhyay; Singh; Meena; Arora, 2019), a pesar de ser rico en contenido de β -caroteno (Purohit; Gogate, 2015). Gracias al gran volumen de producción y procesamiento de la zanahoria y el fácil acceso a sus desperdicios de bajo costo, podría ser una alternativa potencial para obtener pigmentos naturales de alto valor económico y reducir su impacto ambiental (Mirheli; Dinani, 2018). En Latinoamérica el mercado de los compuestos valiosos de la zanahoria, como el β -caroteno, puede llegar hasta un valor de venta de 500 USD por kilogramo (Clementz *et al.*, 2019).

La provitamina A (β -caroteno) está presente en varios alimentos y también es consumido en suplementos dietarios. Como fuente natural, se encuentra en las frutas o verduras de color amarillo o naranja, como el melón, mango, calabaza y patata dulce; no obstante, la zanahoria se considera como una de las mejores fuentes de este pigmento (Kumari; Rajarani; Bansal; Dahuja; Praveen, 2019). Hasta seis especies de carotenoides se han encontrado en la zanahoria: α -, β -, γ -, ζ - caroteno, licopeno y β -zeacaroteno (Figura 2) con una proporción promedio 33:60:1:4:1:1, respectivamente, dependiendo del estado y condiciones de siembra.

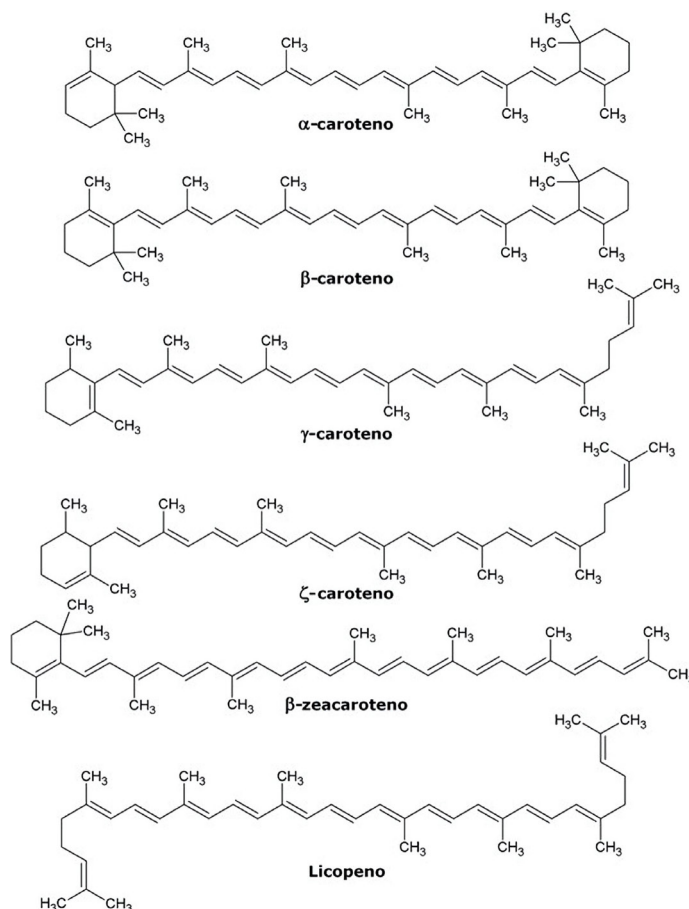


Figura 2. Carotenoides de la zanahoria
Fuente: adaptado de Juliana; Indrawati; Yuliati (2019).

Diferentes estudios concuerdan en que la zanahoria es la mayor fuente natural de carotenoides, en especial β -caroteno, cuyos valores se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1.
Valores reportados de β -caroteno en la zanahoria (*Daucus carota* L.)

Concentración (mg β -caroteno/100 g) base seca	Fuente
6.5 – 8.8	(da Silveira <i>et al.</i> , 2020)
8.0	(Platel; Srinivasan, 2016)
18.0	(Desobry; Netto; Labuza, 1998)
28.0	(Kumari <i>et al.</i> , 2019)
80.0	(Kyriakopoulou; Papadaki; Krokida, 2015)

Fuente: elaboración propia.

En la zanahoria este compuesto existe en forma cristalina como un complejo adherido a una lipoproteína helicoidal rica en alanina, leucina, ácido glutámico y aspártico, la cual se cree posee funciones enzimáticas en la biosíntesis del mismo (Desobry *et al.*, 1998). La presencia de β -caroteno es la responsable del color característico amarillo-naranja de esta raíz (Martins; Ferreira, 2017).

Si bien en la industria de alimentos se utiliza una gran variedad de colorantes minerales y sintéticos, gracias a su rango de colores intensos y su alta estabilidad; según estudios recientes, a algunos de estos se les atribuyen efectos secundarios en la salud desde enfermedades degenerativas hasta problemas de atención e hiperactividad (Ngamwonglumlert; Devahastin; Chiewchan, 2017). Asimismo, solventes como el n-hexano, ampliamente usado en la extracción convencional de carotenoides es considerado reprotóxico y contaminante agudo acuático (Boukroufa *et al.*, 2017). Es por esto que se ha prestado mayor atención a fuentes naturales de colorantes, como las clorofilas, antocianinas y carotenoides, abundantes en la naturaleza y cuyo uso en la industria alimentaria son aprobados por la FDA (Ngamwonglumlert *et al.*, 2017). Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías de obtención de pigmentos a partir de fuentes naturales a escala laboratorio, se ha permitido llevar estas técnicas a una escala mayor mejorando el potencial de estas tendencias de consumo más saludable y de procesos más amigables y sostenibles.

El consumo de frutas y verduras provee al cuerpo humano nutrientes, vitaminas, fibra y compuestos antioxidantes con alto valor nutricional. Estos alimentos son procesados, generalmente, en jugos, purés o concentrados, dejando como subproductos cáscaras, piel y demás residuos que contienen compuestos valiosos bioactivos que pueden utilizarse para producir alimentos funcionales o ingredientes activos en la industria farmacéutica (Sharmin *et al.*, 2016). La búsqueda de un enfoque hacia los procesos de “cero desechos” junto con la economía circular son temas de interés actual, a través del aprovechamiento de los desperdicios de frutas y verduras, y su posterior valorización (Ojha; Aznar; O'Donnell; Tiwari, 2020), permitiendo, incluso, una reducción de los costos de los recursos naturales por medio de la reutilización de estos desechos (Kumari *et al.*, 2019).

3.2. Los carotenoides y el β -caroteno

Los carotenoides pertenecen a la familia de pigmentos naturales sintetizados por diferentes especies de plantas, algas y bacterias. En las plantas han sido posible identificar alrededor de 650 variedades de carotenoides; sin embargo, solo unos 40 pertenecen a las frutas y verduras pertenecientes a la dieta humana, la cual representa la mayor fuente de consumo de carotenoides (Goula *et al.*, 2017). Los carotenoides son compuestos de tipo tetraterpeno o tetraterpenoide, es decir, están constituidos de una cadena principal de 40 carbonos (C_{40}), conformada por ocho unidades de isopreno; son considerados pigmentos naturales que varían en el rango visible entre los colores amarillo claro, pasando por el anaranjado, hasta el rojo intenso. Algunos de los ejemplos más comunes en la naturaleza (Figura 3) son el caroteno, licopeno, la astaxantina, zeaxantina, luteína, bixina, cantaxantina, violaxantina y neoxantina (Vasconcelos *et al.*, 2020).

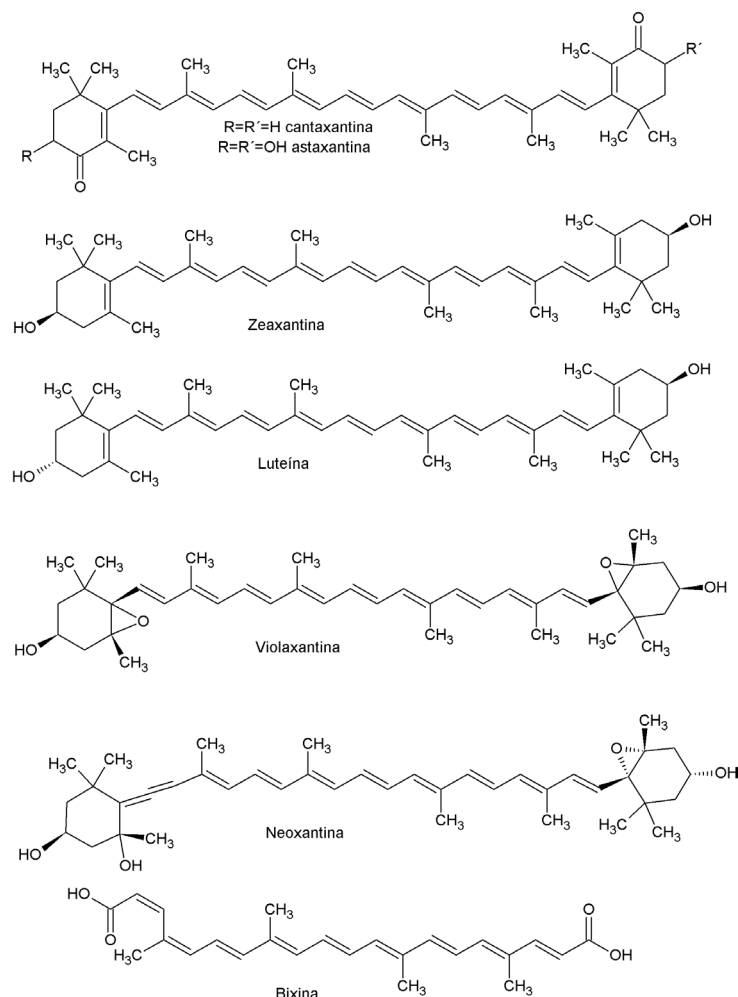


Figura 3. Carotenoides más comunes en la naturaleza
Fuente: Adaptado de (da Silveira *et al.*, 2020).

Los carotenoides son sintetizados por las plantas en los cromoplastos, siguiendo la ruta metileritrol fosfato (MEP) iniciando con la condensación de dos moléculas C₂₀ GGPP formadas a partir de isopentenil difosfato (IPP) y pirofosfato de dimetilalilo (DMAPP). En este primer paso, se obtiene 15-*cis*-fitoeno catalizado por la enzima fitoeno sintasa (PSY); este es luego transformado en licopeno a través de reacciones de isomerización y desaturación, catalizadas por las enzimas fitoeno desaturasa (PDS) y des-caroteno desaturasa (ZDS), respectivamente. Subsecuentemente, para la formación de los demás carotenos y xantofilas, el licopeno pasa a través de reacciones de ciclación (formación de α -, β -, γ -caroteno), hidroxilación (formación de luteína, astaxantina, cantaxantina y zeaxantina) y/o formación de anillos (formación de violaxantina y neoxantina) (Vasconcelos *et al.*, 2020).

Entre algunos de los beneficios más relevantes de los carotenoides se encuentra su acción antioxidante y su capacidad de reducir el riesgo de sufrir enfermedades degenerativas, como el cáncer y problemas cardiovasculares (Miękus; Iqbal; Marszałek; Puchalski; Świergiel, 2019). Por otra parte, sus numerosas aplicaciones en la industria de alimentos, como colorante natural, en la industria farmacéutica como modulador del sistema inmune, protector contra los rayos UV y precursor del pigmento visual retinol o vitamina A (Saini; Keum, 2018).

El β -caroteno es uno de los carotenoides más abundantes en las frutas, verduras y hortalizas. Es una molécula apolar de alto peso (536.85 g/mol) compuesta estructuralmente por una cadena insaturada de hidrocarburos cuyos extremos poseen anillos de ciclohexano. Este pigmento representa entre el 60 – 80 % de los carotenoides presentes en la zanahoria (Vasconcelos *et al.*, 2020) (Figura 4).

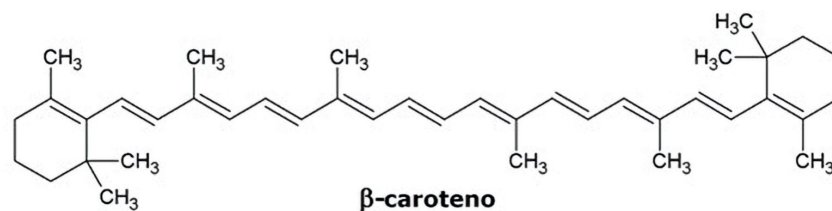


Figura 4. Estructura molecular del β -caroteno
Fuente: adaptado de (Murray y Capelli, 2020).

El β -caroteno junto con el α -caroteno y la β -criptoxantina son los carotenoides que exhiben mayor aporte de vitamina A al cuerpo humano; no obstante, estos últimos dos representan únicamente el 50 % de la actividad de esta vitamina comparado con el β -caroteno. En el espectro visible, este pigmento absorbe longitudes de onda entre los 450 y 460 nm (Murray; Capelli, 2020). Al igual que la mayoría de carotenoides, el β -caroteno es usado como agente colorante en varios tipos de alimentos, bebidas, suplementos alimenticios e incluso medicamentos. De igual forma, sus beneficios en la actividad biológica y, por ende, en la salud humana, son atribuidos a su efecto antioxidante (Martins; Ferreira, 2017).

3.3. Técnicas de extracción de β -caroteno de la zanahoria (*Daucus carota* L.)

Entre los métodos más destacados de extracción de β -caroteno a partir de la zanahoria se encuentran el convencional con solventes (CSE), el cual incluye la extracción convencional Soxhlet (SE), y los métodos de extracción no convencionales, conformados por la extracción asistida con microondas (MAE), la extracción asistida con ultrasonido (UAE), la extracción con fluidos supercríticos (SFE) y la extracción asistida con enzimas (EAE) (Kyriakopoulou *et al.*, 2015). En la Tabla 2 se enlistan las ventajas y desventajas principales de estas técnicas de extracción.

Tabla 2.

Ventajas y desventajas de las técnicas de extracción de β -caroteno de la zanahoria

Técnica de extracción	Ventajas	Desventajas	Fuente
CSE (Convencional)	Altos rendimientos de extracción. No requiere equipos sofisticados.	Grandes cantidades de solvente. Uso de solventes tóxicos. Alto consumo energético.	(Saini; Keum, 2018)
MAE (No convencional)	Altos rendimientos de extracción. Permite uso de solventes verdes. Reducción de gradientes térmico. Tiempos cortos de extracción.	Pérdidas de compuestos volátiles. Degradación térmica probable.	(Selvamuthukumaran; Shi, 2017)

Técnica de extracción	Ventajas	Desventajas	Fuente
UAE (No convencional)	Altos rendimientos de extracción. Bajo consumo energético. Tiempos cortos de extracción. Permite uso de solventes verdes.	Difícil control de variables. Escalado comercial complejo. Requiere optimización específica. Degradación térmica probable.	(Li; Fabiano-Tixier; Tomao; Cravotto; Chemat, 2013) (Wen <i>et al.</i> , 2018)
SFE (No convencional)	Evita la degradación térmica. Bajos volúmenes de solvente. Simple y rápido.	Equipos costosos y sofisticados. Difícil manipulación del proceso. Costos altos de análisis.	(Miękus <i>et al.</i> , 2019)
EAE (No convencional)	Rendimientos de extracción altos. Previene la degradación térmica.	Tiempos largos de extracción. Costos elevados de enzimas.	(Ngamwonglumlert <i>et al.</i> , 2017)

Fuente: elaboración propia.

Partiendo del hecho de que la zanahoria es la fuente vegetal con mayor contenido de carotenoides, específicamente de β -caroteno, diversas investigaciones se han centrado en optimizar las condiciones y parámetros de extracción y de cuantificación con el fin de obtener el máximo rendimiento. Teniendo en cuenta que, en promedio, de 50 kg de zanahoria fresca, se obtienen 2 g de α - y β -caroteno. De igual forma, las propiedades fisicoquímicas del β -caroteno exhiben una baja resistencia a las condiciones externas de luz y temperatura, lo que sugiere que se deben monitorear las condiciones poscosecha para evitar pérdidas de este compuesto (Bogacz; Harasym, 2018).

3.4. Extracción convencional (CSE)

Según Varón *et. al* (2017), un solvente se define como: “un líquido capaz de disolver, diluir o extraer otras sustancias sin causar modificación química a la sustancia o a sí mismo” (p.10). La extracción convencional es conducida a escala laboratorio y tiene como propósito principal evaluar el rendimiento de diferentes solventes a diferentes condiciones. Dentro de esta encontramos tres métodos principales, extracción Soxhlet, maceración e hidrodestilación. El primer método consta de un montaje, en el cual, a través de la ebullición y condensación de un solvente volátil, se provee un contacto directo y continuo de este con la muestra contenida en una cámara de extracción que posee un sifón, que permite la recuperación del solvente líquido. El segundo, que es la maceración, se considera el método más antiguo y consta de un proceso de mezcla del material sólido con un solvente específico y su posterior separación por medio de filtración sencilla o a vacío, donde las variables principales a controlar es el tipo de solvente y el área superficial. El tercer y último método consta del uso de agua para la generación de vapor y su uso como agente de extracción, en donde los compuestos bioactivos o aceites esenciales son recuperados por la volatilización del agua de las muestras (Selvamuthukumaran; Shi, 2017).

En la Tabla 3 se reúnen los principales hallazgos encontrados en diferentes investigaciones para la extracción de β -caroteno a partir de la zanahoria mediante los métodos de extracción convencional.

Tabla 3.

Extracción convencional (CSE) de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.)

β -caroteno extraído (mg/100 g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación	Fuente
31,00	Sólido-solvente 1:10 m/v Maceración t: 1 h Cis-Pineno y n-Hexano	UV-VIS / HPLC	(Varón <i>et al.</i> , 2016)
18,10 – 4,90	Sólido-solvente 1:1 m/v Calentamiento y Filtración t: 5 min Etanol y diclorometano	UV-VIS	(Hasan; Mohamad; Aldaaiek, 2019)
38,05	Sólido-solvente 1:4 m/v Baño térmico (60 °C) t: 240 min Etanol, metanol y éter de petróleo	UV-VIS	(Sharmin <i>et al.</i> , 2016)
65,00	Sólido-solvente 1:5 m/v Agitación (temperatura ambiente) 1000 rpm, 20 Wh Hexano	UV-VIS	(Kyriakopoulou <i>et al.</i> , 2015)
69,60	Sólido-solvente 1:20 m/v Agitación en incubadora (65 °C) t: 270 min Aceite de linaza	UV-VIS	(Elik; Yanık; Göğüş, 2020)

Fuente: elaboración propia.

De los estudios analizados se encontró que las variables y parámetros más relevantes en estas técnicas convencionales son: relación sólido-solvente, polaridad, afinidad y toxicidad del solvente y estabilidad del compuesto bioactivo de interés. De los métodos convencionales expuestos al inicio cabe mencionar que, mediante la hidro-destilación no es utilizada para extraer β -caroteno, pues su estructura química conformada por unidades de carbono e hidrógeno hace que este sea de carácter lipo-soluble, es decir, su solubilidad en solventes polares, como el agua, no es la suficiente como para obtener rendimientos de extracción altos (Murray; Capelli, 2020). Los resultados de rendimiento de extracción obtenidos arrojaron un valor promedio de 37,8 mg β -caroteno/100 g base seca. La variabilidad de resultados de esta técnica de extracción está relacionada con la solubilidad de los carotenoides, que depende de las propiedades físicas y químicas de los mismos y, de igual forma, de la polaridad del solvente usado y las condiciones de temperatura y presión de extracción (Varón *et al.*, 2016). Por otro lado, el procesamiento o tratamiento de las muestras, afectando la integridad estructural de la matriz, produce un efecto tanto negativo (pérdida de carotenoides por oxidación) como positivo (incremento de la biodisponibilidad de carotenoides) (Sharmin *et al.*, 2016). Al comparar los resultados de las diferentes investigaciones, también se observa un posible aumento del rendimiento de extracción de β -caroteno al usar aceites de origen vegetal como en el caso del estudio realizado por Elik *et al.* (2020), quienes usaron aceite de linaza y una temperatura y tiempo de extracción superior a los demás estudios (65 °C y 270 min, respectivamente).

3.5. Extracción asistida con microondas (MAE)

La extracción asistida con microondas consiste en el uso de irradiación electromagnética en frecuencias entre los 0,3 y 300 GHz (Vinatoru; Mason; Calinescu, 2017), lo cual genera una excitación de las moléculas del medio por acción de rotación de dipolos y conducción de iones causando gradientes de calor y masa que logran romper las estructuras por generación de presión en el interior de la matriz biológica y facilitan el acceso a los compuestos bioactivos de la fuente vegetal (Selvamuthukumar; Shi, 2017). A diferencia de los procesos convencionales, la radiación por microondas genera el aumento de la temperatura interna a través del volumen de la célula o matriz vegetal donde se almacena el compuesto de interés, provocando un aumento de presión interno que termina causando una lisis o ruptura del sistema, liberando así la molécula objetivo (Vinatoru *et al.*, 2017). La relación sólido-solvente, potencia, el tiempo de extracción y el tipo de solvente, son las variables más evaluadas en esta técnica (Tabla 4). Además, junto con la extracción asistida con ultrasonido (UAE), son considerados los métodos más prácticos por su aplicabilidad a escala industrial, conveniencia de operación y sus buenos resultados en el rendimiento de extracción (Chuyen; Nguyen; Roach; Golding; Parks; 2018).

Tabla 4.

Extracción de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.) técnica (MAE)

β -caroteno extraído (mg/100 g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación	Fuente
61,98	Sólido-solvente 1:8,06 m/m Potencia 165 W t: 9,39 min Aceite de linaza	HPLC	(Elik <i>et al.</i> , 2020)
112,60 – 110,90	Sólido-solvente 1:37,5 y 1:75 m/v Potencia 180 W – 300 W t: 3,5 y 6,5 min Hexano, acetona y etanol	UV-VIS / HPLC	(Hiranvarachat; Devahastin, 2014)

Fuente: elaboración propia.

Los rendimientos de extracción con microondas (Tabla 4), muestran una diferencia significativa entre cada autor. Una de las posibles causas de esto es el uso de potencias superiores en el estudio de (Hiranvarachat; Devahastin, 2014), quienes afirman que el rendimiento de extracción obedece a un comportamiento directamente proporcional de la potencia de microondas y el volumen de solvente en conjunto, ya que un aumento únicamente del volumen de solvente resulta en un contenido menor de β -caroteno y carotenoides, pues ocurre una mayor disipación de la potencia. No obstante, teniendo en cuenta que en el estudio de Elik *et al.* (2020) se usó un solvente alternativo (aceite de linaza) y se condujo el análisis con una potencia de microondas inferior. Los resultados son prometedores y similares a los que se obtendrían a través de técnicas convencionales de extracción.

3.6. Extracción con fluidos súper críticos (SFE)

A diferencia de los otros métodos de extracción mencionados, la extracción con fluidos supercríticos (SFE) se caracteriza por usar fluidos específicos en estado supercrítico, en el cual, este se comporta como un gas, es decir, adquiere una viscosidad, difusión y tensión superficial de naturaleza de este estado, manteniendo sus propiedades de dilución y densidad en el estado líquido. Esta tecnología usa, principalmente, dióxido de carbono CO_2 en estado supercrítico, pues este no crea residuos tóxicos tras la extracción; además, evita la degradación del compuesto bioactivo y permite su obtención en alta pureza rápidamente luego del proceso sin requerir un tratamiento posterior de purificación o recuperación del extracto (de Andrade *et al.*, 2018). La

revisión bibliográfica arrojó resultados limitados de estudios experimentales con la zanahoria (*Daucus carota* L.), por tal motivo, fue necesario seleccionar el estudio de (Sun; Temelli, 2006). En la zanahoria se han realizado algunas investigaciones (Tabla 5) en las que incluso se han utilizado co-solventes reciclados de naturaleza vegetal, como aceite de canola, para obtener al final este enriquecido con β -caroteno.

Tabla 5.

Extracción de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.) técnica (SFE)

β -caroteno extraído (mg/100 g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación	Fuente
110,0	Presión: 55.1 MPa Temperatura: 70 °C Medio: SC-CO ₂ (2 L/min) Co-solvente: aceite de canola	HPLC	(Sun; Temelli, 2006)
21,0	Presión: 306 bar Temperatura: 58.5 °C Medio: SC-CO ₂ (2 L/min) Co-solvente: etanol	HPLC	(de Andrade <i>et al.</i> , 2018)

Fuente: elaboración propia.

De la Tabla 5 se puede inferir que se puede obtener un rendimiento de extracción superior al aumentar la temperatura y presión de operación, pues esto tiene un efecto positivo significativo en la extracción de carotenoides a excepción de la luteína (Sun; Temelli, 2006). De igual manera, se puede evidenciar un efecto positivo de la sustitución del co-solvente de extracción por uno de origen natural y fuente renovable, como el aceite de canola. El óxido nitroso N₂O también se ha usado como fluido de extracción en estado supercrítico mostrando una solubilidad comparable a las encontradas en el uso de co-solventes sin alterar el proceso en su recuperación, no obstante, este fluido no ha sido investigado de igual forma que el S-CO₂, pues es considerado riesgoso al entrar en contacto con productos orgánicos naturales (de Andrade *et al.*, 2018).

3.7. Extracción asistida con enzimas (EAE)

En realidad, la extracción asistida con enzimas no está dirigida directamente a la etapa de extracción, en cambio, utiliza enzimas hidrolíticas para romper la estructura o matriz que encubre los compuestos bioactivos de interés, es decir, centrándose en la etapa de separación de micro- y macro-moléculas. Las enzimas más usadas en la extracción de β -caroteno de la zanahoria reportadas en investigaciones (Tabla 6), son la celulasa y pectinasa. La primera se encarga de romper o hidrolizar la celulosa presente en la pared celular principal de las células vegetales, degradando las uniones 1,4- β -d-glicosídicos. La segunda degrada la pectina presente en la interface de la pared celular (Saini; Keum, 2018).

El motivo principal que llevó el desarrollo de esta técnica para la extracción de carotenoides radica en el hecho de que estos compuestos bioactivos son termosensibles y propensos a degradarse (isomerización) en condiciones alcalinas. El uso de enzimas provee una mayor estabilidad, pues posteriormente a este tratamiento, la extracción no requerirá de técnicas elaboradas para obtener altos rendimientos de extracción. Sin embargo, algunos estudios combinan esta técnica junto con otras no convencionales para obtener el mayor rendimiento posible.

Tabla 6.

Extracción de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.) técnica (EAE)

β -caroteno extraído (mg/100 g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación	Fuente
42,96	Tiempo: 3 h Temperatura: 45 °C Enzimas empleadas: Celulasa (0,8 U/mg) Pectinasa (1,15 U/mg) pH Buffer: (7) Relación: 0,35 / 0,5 % Fuente: (<i>Aspergillus niger</i>)	HPLC	(<i>Tiwari et al.</i> , 2019)
7,0	Tiempo: 120 min Temperatura: 40 °C Surfactantes empleados: Tween 20, 60 y 80 Span 20, 40 y 60 Relación: 1,5 / 0,4 g	UV-VIS	(Zhao; Zhang; Wu; Ouyang, 2015)

Fuente: elaboración propia.

La ventaja principal de implementar una hidrólisis enzimática es disminuir la energía de activación de la reacción química y proveer al sistema de condiciones ideales en lo posible para llevar a cabo el proceso extractivo posterior (Ghosh; Biswas, 2016).

3.8. Extracción asistida con ultrasonido (UAE)

Esta técnica de extracción no convencional se basa en el uso de ondas ultrasónicas, comprendidas entre las frecuencias de 20 kHz y los 10 MHz y se divide en sonicación de baja y alta intensidad. La fuerza que genera el proceso de extracción se conoce como la cavitación acústica, en la cual microburbujas se generan por la diferencia de presión localizada en diferentes puntos del medio extractivo, las cuales posteriormente colapsan y generan focos de calor y energía que permiten el rompimiento de la matriz vegetal, facilitando el ingreso del solvente o agente de extracción al compuesto de interés (Vernès; Vian; Chemat, 2020). Los tratamientos con ultrasonido de baja frecuencia también han sido evaluados en procesos de tratamiento de la materia vegetal, encontrando efectos que promueven una migración de humedad mayor y, por ende, un proceso de secado más efectivo por causa del rompimiento de la estructura interna de la matriz vegetal (Wang; Xu; Wei; Zeng, 2018).

La efectividad de este método depende de las siguientes variables: amplitud, intensidad, potencia y frecuencia ultrasónica, temperatura y tiempo de extracción, naturaleza y propiedades fisicoquímicas del solvente y, por último, la naturaleza de la matriz. Esta técnica ha demostrado un futuro muy prometedor gracias a su flexibilidad en lo que concierne al diseño de procesos continuos y por lotes a escala industrial, siempre y cuando se realicen procesos de intensificación, para asegurar un consumo energético lo suficientemente sostenible y amigable con el ambiente y condiciones seguras (Tiwari, 2015).

En la Tabla 7 se reúnen los hallazgos y parámetros usados de los numerosos estudios encontrados, relacionados con la extracción de β -caroteno de la zanahoria publicados en la última década.

Tabla 7.

Extracción de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.) técnica (UAE)

β -caroteno extraído (mg/100g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación / Detección	Fuente
104,5	Sólido-solvente 1:30 m/v Potencia y frecuencia: 165 W/25kHz Temperatura: 55 °C t: 60 min Aceite de girasol	UV-VIS	(da Silva <i>et al.</i> , 2020)
31,69	Frecuencia: 20 kHz Temperatura: 35 °C t: 20 min Etanol 55 %	UV-VIS	(Barzee <i>et al.</i> , 2019)
53,88	Sólido-solvente: 1.5:100 Potencia / frecuencia: 20 kHz Temperatura/tiempo UAE: 50 °C / 80 min Temperatura/tiempo agitación: 30 °C/ 120 min Etanol	UV-VIS	(Mirheli; Dinani, 2018)
83,32	Equipo: sonda ultrasónica Sólido-solvente: 0.3:20 m/v Potencia: 100 W Temperatura / tiempo: 50 °C / 50 min Etanol	UV-VIS	(Purohit; Gogate, 2015)
64,66	Equipo: baño ultrasónico Sólido-solvente: 0.3:20 m/v Potencia / frecuencia: 180 W / 40 kHz Temperatura / tiempo: 50 °C / 50 min Etanol	UV-VIS	(Purohit; Gogate, 2015)
46,10	Equipo: sonda ultrasónica y Ultra Turrax Sólido-solvente: 1:1 m/v Potencia: 750 W Centrifugación: 20000 rpm / 12 min Temperatura / tiempo: ambiente/12 min Aceite de linaza	HPLC	(Tiwari <i>et al.</i> , 2019)

β-caroteno extraído (mg/100g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación / Detección	Fuente
11,10	Equipo: Sonda ultrasónica Sólido-solvente: 1:2 m/v Potencia / frecuencia: 1000 W / 20 kHz Tiempo: 40 min Solución de surfactantes	UV-VIS	(Zhao <i>et al.</i> , 2015)
157,00	Equipo: Baño ultrasónico Sólido-solvente: 0.2:15 m/v Potencia / frecuencia: 1000 W / 20 kHz Temperatura / tiempo: 25°C / 30 min Hexano/acetona/etanol (50:25:25) v/v	UV-VIS / HPLC	(Lau; Van; Vuong, 2018)

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7 se puede observar una gran cantidad de estudios asociados a la extracción de β -caroteno a partir de la zanahoria, cada uno presenta una alternativa diferente para esta técnica, utilizando diferentes parámetros y evaluando diferentes variables. El rendimiento de extracción promedio de los estudios es de 69,03 mg β -caroteno/100g base seca. Las condiciones y parámetro de extracción tienen un efecto específico en la efectividad de esta técnica. Entre algunos de los efectos más importantes para destacar, según los resultados reunidos en la Tabla 7 son:

Solvente: la viscosidad y tensión superficial del solvente son inversamente proporcionales a la efectividad del fenómeno de cavitación (Vernès *et al.*, 2020). En los valores de la Tabla 7 se puede observar que la sustitución de solventes por aceites vegetales no muestra un efecto significativo en la degradación del extracto, pues la degradación ultrasónica del β -caroteno es típicamente lenta en comparación con otros solventes aromáticos más volátiles (Varón *et al.*, 2017).

Temperatura de extracción: causa una variación en las propiedades del solvente como su viscosidad, mejorando la solubilidad y promoviendo el fenómeno de cavitación y, por otro lado, facilita la difusión y la transferencia de masa (Vernès *et al.*, 2020). Sin embargo, se observa en los resultados de la revisión, que una temperatura superior a los 50 °C puede disminuir el rendimiento de extracción, lo cual, puede estar relacionado con la termo-sensibilidad del β -caroteno que puede generar la isomerización o degradación de la molécula (Juliana *et al.*, 2019).

Tiempo de extracción: es directamente proporcional al rendimiento de extracción, sin embargo, este comportamiento ocurre hasta cierto punto, donde el rendimiento alcanza un valor constante y máximo para la extracción a ciertas condiciones (Purohit; Gogate, 2015). Por otra parte, se debe tener precaución, ya que una exposición prolongada del β -caroteno a altas temperaturas puede tener un efecto negativo en la estabilidad del pigmento.

Frecuencia ultrasónica: los rangos comunes de frecuencia ultrasónica utilizados en extracción de carotenoides varían entre los 20 y 40 kHz, pues un aumento significativo de la frecuencia fuera de este rango dificulta la formación de microburbujas para que se dé la cavitación en el medio (Vernès *et al.*, 2020). Por otra parte, en el estudio de (Purohit; Gogate, 2015), se encontró una relación directa entre el rendimiento de extracción

y la frecuencia ultrasónica, como efecto de la disipación energética de las ondas ultrasónicas en el medio. Sin embargo, un aumento considerado en la frecuencia tiene un efecto inhibitor del proceso de cavitación al reducir la formación de microburbujas en el medio (Wen *et al.*, 2018).

Tipo de equipo: el equipo tipo baño ultrasónico permite una distribución uniforme de las ondas ultrasónicas, sin embargo, este opera a potencias ultrasónicas bajas. Mientras que en el equipo tipo sonda ultrasónica, la sonda se encuentra en contacto directo con el medio y opera a potencias superiores, no obstante, hay una mayor probabilidad de pérdida de energía por difusión en el medio (Tiwari, 2015). En estudios analizados se puede observar un rendimiento promedio mayor para los ensayos realizados en equipos tipo sonda ultrasónica que en los de baños ultrasónicos.

3.9. Extracción verde como alternativa

Una gran parte de las experimentaciones de extracción de β -caroteno, a partir de fuentes naturales reportadas por diferentes autores, muestran el uso de solventes provenientes de fuentes no renovables, como el hexano, etanol, benceno, cloroformo y la acetona. A pesar de ello, hoy en día estos son considerados como altamente inflamables, tóxicos y perjudiciales para la salud y el ambiente. Así mismo, las nuevas necesidades y tendencias a escala industrial buscan reducir su consumo y sustituirlos con solventes alternativos de fuentes renovables y naturales (Saini; Keum, 2018). Estudios recientes han evaluado y comparado el efecto del rendimiento de extracción a través de una sustitución parcial o total de los solventes convencionales con otros más amigables. En la Tabla 8 se presentan algunos de estos ejemplos donde se evidencia también el solvente convencional comparado y el resultado en el rendimiento final de extracción.

Tabla 8.

Comparación rendimientos de extracción con solventes verdes

Solvente	Técnica de extracción	Rendimiento	Solvente convencional comparado	Fuente
Pineno	CSE	17,3 % mayor	n-Hexano	(Varón <i>et al.</i> , 2016)
Limoneno	CSE	16,7 % mayor	n-Hexano	(Aissou; Chemat-Djenni; Yara-Varón; Fabiano-Tixier; Chemat, 2017)
Limoneno	UAE / CSE	Similares	n-Hexano	(Boukroufa <i>et al.</i> , 2017)

Fuente: elaboración propia.

Entre algunos de los solventes considerados como verdes, usados para la extracción de compuestos bioactivos, cabe destacar el acetato de etilo, alcohol isopropílico, el ciclopentil etil éter, como solventes de menor impacto ambiental. Por otra parte, se destacan los solventes naturales, como el pineno, limoneno y los aceites vegetales de canola, girasol y oliva (Saini; Keum, 2018). El uso de aceites vegetales en extracciones de carotenoides ha arrojado resultados satisfactorios con altos porcentajes de retención, disminuyendo la degradación de los mismos, en especial cuando estos se encuentran de forma refinada y no natural. Pese al reemplazo de los solventes convencionales con aceites vegetales, la difusividad de los carotenoides continúa siendo una de los mayores riesgos e inconvenientes que se presentan por afectos viscosos durante la extracción; por otra parte, no existen los suficientes estudios que sustenten una reducción considerable de los costos a condiciones óptimas de extracción (Saini; Keum, 2018). Existe un potencial considerable gracias al fortalecimiento de las leyes y la demanda por parte de la sociedad actual para migrar a procesos más sostenibles que empleen fuentes renovables, lo cual va acorde con las cifras del mercado global de compuestos químicos estimado en 3000 billones de dólares

para el 2025, de los cuales se estima un crecimiento en la participación de compuestos renovables del 3 % al 15 % comparado con el 2009 (Varón *et al.*, 2017). Si bien existe una reducción en el impacto ambiental al usar solventes amigables con el ambiente, algunas de las técnicas no convencionales requieren una replicabilidad considerable para llegar a un análisis cuantitativo confiable, requiriéndose un consumo energético mayor en la operación de los equipos, lo cual puede aumentar en cierta medida los costos y el impacto neto ambiental (Armenta; Garrigues; Esteve-Turrillas; de la Guardia, 2019).

De este modo, el objetivo principal que se busca al momento de seleccionar un solvente considerado como verde es cumplir con los siguientes requisitos: no debe emitir compuestos orgánicos volátiles, baja toxicidad para los humanos, impacto ambiental limitado, proveniente de fuentes renovables, alto poder como disolvente, fácil recuperación y ajustable a procesos existentes (Armenta; Garrigues; de la Guardia, 2015).

4. Discusión de resultados

En primera instancia, se observa un crecimiento en la producción anual de la zanahoria (*Daucus carota* L.) en Colombia en la última década, como consecuencia del crecimiento de la demanda por el incremento en la población. Para el 2017 la cifra anual de producción de zanahoria en el país fue de 306.746 toneladas, con una participación liderada por los departamentos de Cundinamarca (30 %), Boyacá (26 %), Antioquia (26 %) y Nariño (14 %) (Ministerio de Agricultura, 2017). Esto indica un crecimiento paralelo de los residuos agroindustriales en el cultivo, cosecha y procesamiento. En Colombia se pierden aproximadamente el 22 % de los alimentos al año o 6,22 millones de toneladas (Martínez; Quintero, 2017). La principal causa de generación de subproductos agroindustriales en Colombia tiene que ver con su estética o imperfecciones y con las condiciones de manipulación o almacenamiento equívocas (Palacio, 2020). Las centrales de abasto generan una gran cantidad de desperdicios de alimentos, siendo para el caso de las verduras u hortalizas un 50 % del total de residuos (Gonzalez; Gómez; Abad, 2017).

Lo anterior crea un problema significativo en cuanto al manejo, manipulación y disposición de estos subproductos de carácter ambiental, por contaminación de suelos por residuos sólidos, y de carácter económico para las industrias que pierden esta materia prima, pues no tienen la capacidad de valorizarla. Los residuos agroindustriales no solo representan una pérdida de la materia prima en sí, sino que también involucra pérdidas en el uso del suelo, fertilizantes, agua, energía y mano de obra. Además, crean un problema ambiental grande por su descomposición en los suelos, emanando gases de invernadero dañinos (Sagar; Pareek; Sharma; Yahia; Lobo, 2018).

El β -caroteno es un compuesto carotenoide presente en la zanahoria (*Daucus carota* L.) con alto valor comercial y presenta un crecimiento en el mercado global por sus numerosas aplicaciones en la industria farmacéutica, alimentaria y cosmética, de igual forma, por sus beneficios en la salud. El β -caroteno juega un rol muy importante en la prevención de enfermedades del sistema inmune y otras enfermedades, como el cáncer de mama, próstata, colorectal y de pulmón; asimismo, para el tratamiento de la osteoporosis, desórdenes cardiovasculares, salud visual y problemas de sensibilidad en la piel (Singh; Ahmad; Ahmad, 2015).

La revisión del desarrollo de las técnicas de extracción de β -caroteno a partir de la zanahoria, permiten establecer un horizonte amplio de posibilidades y alternativas potenciales para el aprovechamiento de esta fuente natural y sus subproductos industriales. En primera instancia, las características fisicoquímicas de la zanahoria y sus volúmenes de disponibilidad en forma de subproducto industrial. En la presente revisión fue posible evidenciar que existen diferentes técnicas de extracción aplicadas a la obtención de β -caroteno de la zanahoria, demostrando el surgimiento de tecnologías de extracción con miras a la aplicación en la industria de alimentos, farmacéutica, química y cosmética (Tsiaka; Sinanoglou; Zoumpoulakis, 2017). Cada una de estas técnicas presentan ventajas y desventajas, y de igual forma, diferentes rendimientos de extracción, encontrando numerosas investigaciones en la extracción asistida con ultrasonido (UAE). Esta técnica, al parecer, es la más efectiva para esta materia prima, encontrándose un rendimiento de extracción máximo reportado en el estudio

conducido por (Lau *et al.*, 2018), con un valor de rendimiento de extracción de 157 mg β -caroteno/100 g base seca. Estudios recientes que emplearon técnicas analíticas de extracción de β -caroteno de la zanahoria (*Daucus carota* L.) reportados en la literatura, arrojaron un valor de concentración de 7,75 mg β -caroteno/100 g zanahoria base seca (Owolade *et al.*, 2017), indicando un rendimiento de extracción considerable para la técnica no convencional asistida con ondas ultrasónicas.

Un análisis de contraste realizado con el modelo de la Mínima Diferencia Significativa (LSD) para un diseño no balanceado, para un valor de $\alpha = 0,5$ a través de un modelo tipo *t* de Student, permitió establecer que en los rendimientos de extracción para las técnicas convencionales y no convencionales seleccionados no existe una diferencia significativa entre ninguno de los tratamientos o técnicas, es decir, dicho análisis sugiere que estadísticamente la técnica de extracción comparada, ya sea entre métodos convencionales y no convencionales, o entre métodos no convencionales, no tiene un efecto significativo en el rendimiento de extracción. No obstante, este hallazgo no determina la efectividad final del método, pues se deben tener en cuenta las demás variables, como equipos, tipo de solvente, consumo energético, relación sólido - solvente, temperatura y tiempo de extracción, entre otros, para establecer la diferencia real entre cada una de las técnicas.

Para la extracción asistida con ultrasonido (UAE) es correcto afirmar que se observa una serie de resultados en los hallazgos de las diferentes investigaciones, cuyo motivo principal es el tipo de equipo ultrasónico usado, pues, generalmente, la sonda ultrasónica puede generar intensidades ultrasónicas hasta 100 veces mayores que las instaladas en baños ultrasónicos (Rutkowska; Namieśnik; Konieczka, 2017). De igual forma, las condiciones de operación y parámetros seleccionados fueron diferentes. La frecuencia ultrasónica es un parámetro relevante que puede mejorar el rendimiento de extracción al permitir la formación de microcanales dentro de la matriz vegetal, causando un cambio en la microestructura que hace más accesible el contacto con el β -caroteno (Nowacka; Wedzik, 2016).

La posibilidad de emplear aceites vegetales en esta técnica, hace más amigable ecológicamente este proceso y satisface las necesidades que posibilitan su aplicación a escala industrial (da Silva *et al.*, 2020). Para la extracción asistida con ultrasonido (UAE) se puede constatar que, temperaturas inferiores a los 40 °C disminuyen el rendimiento de extracción. A pesar de ello, temperaturas muy superiores pueden generar degradación por isomerización de la molécula como consecuencia de su termo sensibilidad afectando, de igual manera, la eficiencia de extracción. La singularidad de cada técnica además conlleva a la necesidad de controlar y establecer parámetros específicos, con el propósito principal de buscar sus valores óptimos que permitan maximizar los rendimientos de extracción dentro de rangos de operación controlables, seguros y energéticamente sostenibles.

La eficiencia y efectividad no solo depende de las condiciones de extracción, por el contrario, las condiciones de la poscosecha y de la etapa de recuperación y generación de producto repercuten en la estabilidad del extracto de β -caroteno final obtenido posteriormente a la extracción, depende de su manipulación y condiciones de almacenamiento, como pH, temperatura y tiempo de almacenamiento (Juliana *et al.*, 2019).

Otro aspecto relevante hallado son las técnicas de detección y cuantificación de β -caroteno, donde la espectrofotometría UV-VIS parece ser la preferida por su flexibilidad para diferentes solventes de extracción y facilidad de determinar el contenido total de carotenoides en una muestra. No obstante, la cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC también es un método muy utilizado para detectar, de manera específica, los tipos de carotenoides presentes en muestras y su concentración, gracias a su detector ultravioleta acoplable (Sarungallo; Hariyadi; Andarwulan; Purnomo; Wada, 2015).

Dadas las dificultades y limitantes que aún se evidencian en las técnicas estudiadas, es necesario llevar a cabo investigaciones a mayor profundidad, que permitan conformar procesos más estandarizados y, por ende, llevar el concepto de la biorrefinería a la práctica (Moreno; Ballesteros; Negro, 2020). Lo anterior, con el fin de poder alcanzar un nivel de aplicabilidad más amplio en el cual sea posible fusionar todos los aspectos característicos de esta tendencia, como la economía circular, uso de solventes verdes y reducción del consumo energético.

5. Conclusiones

La creciente demanda en el consumo de zanahoria (*Daucus carota* L.) se encuentra en constante aumento acorde con el crecimiento poblacional en Colombia, siendo un gran reto para la manipulación y aprovechamiento de los subproductos luego de su procesamiento. Diversos autores concuerdan con el gran potencial de esta como fuente natural de carotenoides, especialmente β -caroteno, cuya obtención es posible por medio de diferentes técnicas de extracción no convencionales, como la extracción asistida por microondas (MAE), la extracción con fluidos supercríticos (SFE), la extracción asistida con enzimas (EAE) y, en especial, la extracción asistida con ultrasonido (UAE). Esta última técnica promete ser simple, económica, rápida y segura. Además, permite el uso de solventes naturales de origen renovable que satisface las nuevas necesidades ecoamigables de los procesos industriales y crea un horizonte prometedor para el uso del β -caroteno natural altamente benéfico para la salud en la industria de alimentos, farmacéutica y química. El éxito de esta técnica en la industria en el futuro dependerá de investigaciones enfocadas en la optimización, tanto de las condiciones y parámetros extractivos como de los controles de estabilidad poscosecha y posextracción, para asegurar un rendimiento y eficiencia máxima del extracto de este compuesto valioso.

Referencias

- Aissou, Mohamed; Chemat-Djenni, Zoubida; Yara-Varón, Edinson; Fabiano-Tixier, Anne; Chemat, Farid (2017). Limonene as an agro-chemical building block for the synthesis and extraction of bioactive compounds. Utilisation du limonène comme synthon agrochimique pour la synthèse et l'extraction de produits naturels. *Comptes Rendus Chimie*, 20 (4), 346-358.
<https://doi.org/10.1016/j.crci.2016.05.018>
- Armenta, Sergio; Garrigues, Salvador; de la Guardia, Miguel (2015). The role of green extraction techniques in Green Analytical Chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 71, 2-8.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.12.011>
- Armenta, Sergio; Garrigues, Salvador; Esteve-Turrillas, Francesc; de la Guardia, Miguel (2019). Green extraction techniques in green analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 116, 248-253.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.03.016>
- Barzee, Tyler; El- Mashad, Hamed; Zhang, Ruihong; Pan, Zhongli (2019). Chapter 12 - Carrots. In: Z. Pan; R. Zhang; S. Zicari (Eds.), *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products* (pp. 297-330). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00012-5>
- Bogacz-Radomska, Ludmila; Harasym, Joanna; Piwowar, Arkadiusz (2020). 10 - Commercialization aspects of carotenoids. In: *Carotenoids: Properties, Processing and Applications* (pp. 327-357). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817067-0.00010-5>
- Bogacz, Ludmila; Harasym, Joanna (2018). β -Carotene—properties and production methods. *Food Quality and Safety*, 2(2), 69-74.
<https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy004>
- Boukroufa, Meryem; Boutekedjiret, Chahrazed; Chemat, Farid (2017). Development of a green procedure of citrus fruits waste processing to recover carotenoids. *Resource-Efficient Technologies*, 3(3), 252-262.
<https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.08.007>
- Clementz, Adriana; Torresi, Pablo; Molli, José; Cardell, Daniel; Mammarella, Enrique; Yori, Juan (2019). Novel method for valorization of by-products from carrot discards. *LWT*, 100, 374-380.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.085>

- Cheng, Shi; Khoo, Hock; Kong, Kin; Prasad, Krishnamurthy; Galanakis, Charis (2020). 8- Extraction of carotenoids and applications. In: C. M. Galanakis (Ed.), *Carotenoids: Properties, Processing and Applications* (pp. 259-288). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817067-0.00008-7>
- Chuyen, Hoang; Nguyen, Minh; Roach, Paul; Golding, John; Parks, Sophie (2018). Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction for recovering carotenoids from Gac peel and their effects on antioxidant capacity of the extracts. *Food science y nutrition*, 6(1), 189-196.
<https://doi.org/10.1002/fsn3.546>
- da Silva, Heloísa; Iwassa, Isabela; Marques, Janaina; Postau, Najla; Stevanato, Natália; da Silva, Camila (2020). Enrichment of sunflower oil with β -carotene from carrots: Maximization and thermodynamic parameters of the β -carotene extraction and oil characterization. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(4), e14399.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.14399>
- da Silveira, Mirele; de Oliveira, Luciana; Nunes-Pinheiro, Diana; da Silva, Francisco; de Sousa, Felipe; de Siqueira, Luciana; Cardoso, Andréia; Goebel, Tamiris; Sanches, Ana; Nabavi, Seyed; de Melo; Dirce (2020). Chapter 12 - Analysis of tetraterpenes and tetraterpenoids (carotenoids). In: A. Sanches; S. Nabavi; M. Saeedi; S. Nabavi (Eds.), *Recent Advances in Natural Products Analysis* (pp. 427-456). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00012-3>
- de Andrade, Micael; Charalampopoulos, Dimitris; Chatzifragkou, Afroditi (2018). Optimisation and modelling of supercritical CO₂ extraction process of carotenoids from carrot peels. *The Journal of supercritical fluids*, 133(1), 94-102.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.09.028>
- Desobry, Stephane; Netto, Flavia; Labuza, Theodore (1998). Preservation of β -carotene from carrots. *Critical reviews in food science and nutrition*, 38(5), 381-396.
<https://doi.org/10.1080/10408699891274255>
- Elik, Aysel; Yanık, Derya; Göğüş, Fahrettin (2020). Microwave-assisted extraction of carotenoids from carrot juice processing waste using flaxseed oil as a solvent. *LWT*, 123, 109100.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109100>
- Ghosh, Debasree; Biswas, Prasanta (2016). Enzyme-aided extraction of carotenoids from pumpkin tissues. *Indian Chemical Engineer*, 58(1), 1-11.
<https://doi.org/10.1080/00194506.2015.1046697>
- Gonzalez, Laura; Gómez, Sandra; Abad, Paula (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *RIAA*, 8 (2), 141-150.
- Goula, Athanasia; Ververi, Maria; Adamopoulou, Anna; Kaderides, Kyriakos (2017). Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids from pomegranate wastes using vegetable oils. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 821-830.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.07.022>
- Hasan, Hamade; Mohamad, Abdelrazin; Aldaai, Gebreel (2019). Extraction and Determination the of Beta carotene content in carrots and tomato samples Collected from some markets at El-Beida City, Libya. *EPH-International Journal of Applied Science*, 1(1), 105-110.
<https://ephjournal.org/index.php/as/article/view/1327>
- Hiranvarachat, Bhudsawan; Devahastin, Sakamon (2014). Enhancement of microwave-assisted extraction via intermittent radiation: Extraction of carotenoids from carrot peels. *Journal of Food Engineering*, 126, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.024>

- Juliana, Juliana; Indrawati, Renny; Yuliati, Leny (2019). Effects of pH and Storage Time on the Stability of Papaya and Carrot Extracts. *Indonesian Journal of Natural Pigments*, 1(1), 25-25.
<https://doi.org/10.33479/ijnp.2019.01.1.25>
- Kumari, Suresh; Rajarani, A.; Bansal, N.; Dahuja, A.; Praveen, Shelly (2019). Extraction and estimation of provitamin A carotenoids from carrot. In: V. Krishnan; S. Kumar; S. Praveen (Eds.). *Omics meet Plant Biochemistry: Applications in nutritional enhancement with one health perspective* (pp. 56-55). New Delhi: Head, Division of Biochemistry ICAR-Indian Agricultural Research Institute.
- Kyriakopoulou, Konstantina; Papadaki, Sofia; Krokida, Magdalini (2015). Life cycle analysis of β -carotene extraction techniques. *Journal of Food Engineering*, 167, 51-58.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.03.008>
- Lau, Wai; Van, Hoang; Vuong, Quan (2018). Physical properties, carotenoids and antioxidant capacity of carrot (*Daucus carota* L.) peel as influenced by different drying treatments. *International Journal of Food Engineering*, 14(3).
<https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0042>
- Li, Ying; Fabiano-Tixier, Anne; Tomao, Valérie; Cravotto, Giancarlo; Chemat, Farid (2013). Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 12-18.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.005>
- Martínez, Maritza; Quintero, Jelen (2017). *Estado actual de los desperdicios de frutas y verduras en Colombia*. Recuperado de:
<http://rida2.utp.ac.pa/handle/123456789/2887>
- Martins, Natália; Ferreira, Isabel (2017). Wastes and by-products: Upcoming sources of carotenoids for biotechnological purposes and health-related applications. *Trends in Food Science y Technology*, 62, 33-48. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.014>
- Miękus, Natalia; Iqbal, Aamir; Marszałek, Krystian; Puchalski, Czesław; Świergiel, Artur (2019). Green Chemistry Extractions of Carotenoids from *Daucus carota* L.—Supercritical Carbon Dioxide and Enzyme-Assisted Methods. *Molecules*, 24(23), 4339.
<https://doi.org/10.3390/molecules24234339>
- Ministerio de Agricultura (2017). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales - Zanahoria*. Recuperado de:
https://www.agronet.gov.co/Lists/Boletin/Attachments/2535/TERCER%20INFORME%20COSTOS%20DE%20PRODUCCION%20MADR_V4.pdf
- Mirheli, Maryam; Dinani, Somayeh (2018). Extraction of β -carotene pigment from carrot processing waste using ultrasonic-shaking incubation method. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(3), 1818-1828.
- Moreno, Antonio; Ballesteros, Mercedes; Negro, María (2020). 5 - Biorefineries for the valorization of food processing waste. *The Interaction of Food Industry and Environment* (pp. 155-190). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816449-5.00005-9>
- Murray, Michael; Capelli, Bob (2020). 57 - Beta-Carotene and Other Carotenoids. In: J. Pizzorno; M. Murray (Eds.), *Textbook of Natural Medicine (5ta Edition)* (pp. 443-450). Churchill Livingstone.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-43044-9.00057-1>
- Ngamwonglumlert, Luxsika; Devahastin, Sakamon; Chiewchan, Naphaporn (2017). Natural colorants: Pigment stability and extraction yield enhancement via utilization of appropriate pretreatment and extraction methods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(15), 3243-3259.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1109498>

- Nowacka, MMalgorzata; Wedzik, Malgorzata (2016). Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. *Applied Acoustics*, 103, 163-171.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.06.011>
- Ojha, Shikha; Aznar, Ramón; O'Donnell, Colm; Tiwari, Brijesh (2020). Ultrasound technology for the extraction of biologically active molecules from plant, animal and marine sources. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 122, 115663.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115663>
- Owolade, S.; Akinrinola, A.; Popoola, F.; Aderibigbe, O.; Ademoyegun, O.; Olabode, I. (2017). Study on physico-chemical properties, antioxidant activity and shelf stability of carrot (*Daucus carota*) and pineapple (*Ananas comosus*) juice blend. *International Food Research Journal*, 24(2), 534-540.
<http://agris.upm.edu.my:8080/dspace/handle/0/15903>
- Palacio, Natalia (2020). *Cadena de valor sostenible para zanahorias (Daucus carota) imperfectas en Cundinamarca, Colombia*. Recuperado de:
<http://hdl.handle.net/10726/2512>
- Platel, Kalpana; Srinivasan, Krishnapura (2016). Bioavailability of micronutrients from plant foods: an update. *Critical reviews in food science and nutrition*, 56(10), 1608-1619.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2013.781011>
- Purohit, Ashwini; Gogate, Parag (2015). Ultrasound-assisted extraction of β -carotene from waste carrot residue: effect of operating parameters and type of ultrasonic irradiation. *Separation Science and Technology*, 50(10), 1507-1517.
<https://doi.org/10.1080/01496395.2014.978472>
- Raees, Haq; Prasad, K. (2015). Nutritional and processing aspects of carrot (*Daucus carota*)-A review. *South Asian Journal of Food Technology and Environment*, 1(1), 1-14.
- Rutkowska, Małgorzata; Namieśnik, Jacek; Konieczka, Piotr (2017). Chapter 10 - Ultrasound-Assisted Extraction. In: F. Pena; M. Tobiszewski (Eds.), *The Application of Green Solvents in Separation Processes* (pp. 301-324). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805297-6.00010-3>
- Sagar, Narashans; Pareek, Sunil; Sharma, Sunil; Yahia, Elhadi; Lobo, Maria (2018). Fruit and vegetable waste: bioactive compounds, their extraction, and possible utilization. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(3), 512-531.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>
- Saini, Ramesh; Keum, Young (2018). Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. *Food Chemistry*, 240, 90-103.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.099>
- Sarungallo, Zita; Hariyadi, Purwiyatno; Andarwulan, Nuri; Purnomo, Eko; Wada, Mitsuhiro (2015). Analysis of α -Cryptoxanthin, β -Cryptoxanthin, α -Carotene, and β -Carotene of Pandanus Conoideus Oil by High-performance Liquid Chromatography (HPLC). *Procedia Food Science*, 3, 231-243.
<https://doi.org/10.1016/j.profoo.2015.01.026>
- Selvamuthukumaran, M.; Shi, John (2017). Recent advances in extraction of antioxidants from plant by-products processing industries. *Food Quality and Safety*, 1(1), 61-81.
<https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx004>
- Sharmin, Tajnuba; Ahmed, Neaj; Hossain, Abul; Hosain, Mojaffor; Mondal, Shakti; Haque, Raihanul; Almas, Mohammed; Siddik, Abu (2016). Extraction of bioactive compound from some fruits and vegetables (pomegranate peel, carrot and tomato). *American Journal of Food and Nutrition*, 4(1), 8-19.

- Singh, Aasti; Ahmad, Sayeed; Ahmad, Anees (2015). Green extraction methods and environmental applications of carotenoids-a review. *RSC advances*, 5 (77), 62358-62393.
<https://doi.org/10.1039/C5RA10243J>
- Sun, Mei; Temelli, Feral (2006). Supercritical carbon dioxide extraction of carotenoids from carrot using canola oil as a continuous co-solvent. *The Journal of supercritical fluids*, 37(3), 397-408.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.01.008>
- Tiwari, Brijesh (2015). Ultrasound: A clean, green extraction technology. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 71, 100-109.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.04.013>
- Tiwari, Swati; Upadhyay, Neelam; Singh, Ashish; Meena, Ganga; Arora, Sumit (2019). Organic solvent-free extraction of carotenoids from carrot bio-waste and its physico-chemical properties. *Journal of food science and technology*, 56(10), 4678-4687.
- Tsiaka, Thalia; Sinanoglou, Vassilia; Zoumpoulakis, Panagiotis (2017). Chapter 8 - Extracting Bioactive Compounds From Natural Sources Using Green High-Energy Approaches: Trends and Opportunities in Lab- and Large-Scale Applications. In: A. Grumezescu; A. Holban (Eds.), *Ingredients Extraction by Physicochemical Methods in Food*, 307-365. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811521-3.00008-9>
- Underwriters, L. (2020). *Beta-Carotene Oil Solutions*. Recuperado de: from ulprospector.com
- Varón, Edinson; Li, Ying; Balcells, Merce; Canela-Garayoa, Ramon; Fabiano-Tixier, Anne; Chemat, Farid (2017). Vegetable oils as alternative solvents for green oleo-extraction, purification and formulation of food and natural products. *Molecules*, 22(9), 1474.
<https://doi.org/10.3390/molecules22091474>
- Varón, Edinson; Selka, A.; Fabiano-Tixier, Anne; Balcells, Merce; Canela-Garayoa, Ramon; Bily, Antoine; Touaibia, M.; Chemat, Farid (2016). Solvent from forestry biomass. Pinane a stable terpene derived from pine tree byproducts to substitute n-hexane for the extraction of bioactive compounds. *Green Chemistry*, 18(24), 6596-6608.
<https://doi.org/10.1039/C6GC02191C>
- Vasconcelos, Mirele; de Oliveira, Luciana; Nunes-Pinheiro, Diana; da Silva, Francisco; de Sousa, Felipe; de Siqueira, Luciana; Cardoso, Andréia; Goebel, Tamiris; Sanches, Ana; Nabavi, Seyed; de Melo, Dirce (2020). Chapter 12 - Analysis of tetraterpenes and tetraterpenoids (carotenoids). In: A. Sanches; S. Nabavi; M. Saeedi; S. Nabavi (Eds.), *Recent Advances in Natural Products Analysis* (pp. 427-456). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00012-3>
- Vernès, Léa; Vian, Maryline; Chemat, Farid (2020). Chapter 12 - Ultrasound and Microwave as Green Tools for Solid-Liquid Extraction. In: C. Poole (Ed.), *Liquid-Phase Extraction* (pp. 355-374). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816911-7.00012-8>
- Vinatoru, M.; Mason, T.; Calinescu, I. (2017). Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 97, 159-178.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.09.002>
- Wang, Lin; Xu, Baoguo; Wei, Benxi; Zeng, Rong (2018). Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 619-628.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.005>

- Wen, Chaoting; Zhang, Jixian; Zhang, Haihui; Dzah, Courage; Zandile, Manyakara; Duan, Yuqing; Ma, Haile; Luo, Xiaoping (2018). Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops—A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 538-549.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.018>
- Zhao, Qiaojiao; Zhang, Weiwei; Wu, Yanwen; Ouyang, Jie (2015). Extraction Techniques and Stability of Carotenoprotein from Carrot (*Daucus carota* L.) Root. *Journal of Food Process Engineering*, 38(3), 290-298.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.12134>