

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v6i12.0108>

## EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE CURCUMINA DE LA CÚRCUMA (*CURCUMA LONGA*)

### EVALUATION OF CURCUMIN EXTRACTION METHODS FROM TURMERIC (*CURCUMA LONGA*)

Macías-Giler Erick<sup>1\*</sup>; García-Murillo Jean<sup>1</sup>; Cisneros-Pérez Iván<sup>1</sup>; García-Muentes Segundo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Carrera de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, UTM. Portoviejo, Ecuador.

\*Correo: emacias5662@utm.edu.ec

#### Resumen

La industria utiliza la extracción de compuestos activos de productos naturales con el fin de lograr aislar sustancias de interés; en un inicio se utilizaban los llamados métodos tradicionales que emplean sustancias orgánicas tóxicas como solventes, y suponen grandes gastos de energía, por lo que no son amigables con el medio ambiente y la salud de los consumidores; sin embargo en los últimos años han surgido nuevos métodos de extracción más eficientes y ecológicos, que a su vez ofrecen mejores rendimientos. Por otra parte, uno de los compuestos que en la actualidad es altamente consumido por el público es la curcumina, debido a sus innumerables beneficios para la salud, además de sus propiedades como colorante y saborizante alimenticio, por lo que es de interés para la industria química, de alimentos y farmacéutica utilizar un método idóneo para su extracción y que esté a la altura de las exigencias de estos tiempos. En este sentido la presente investigación documental, se enfocó en evaluar y comparar los diferentes métodos usados para la extracción de curcumina de la cúrcuma con el fin de identificar el método más óptimo y eficiente, técnica y ecológicamente; para lo cual se realizó una revisión bibliográfica de diferentes artículos, se organizó la información mediante fichas bibliográficas y se establecieron las respectivas comparaciones y análisis. En este sentido, se obtuvo que los métodos convencionales de extracción de curcumina (remojo y soxhlet) son menos ecológicos al usar solventes tóxicos y al implicar mayores tiempos de extracción y por ende mayores gastos energéticos, además que arrojan rendimientos menores; por su parte los métodos modernos son más eficientes al permitir mayores rendimientos, y son más amigables con el medio ambiente ya que requieren menores tiempos y usan solventes inocuos. Finalmente, se concluyó que el método más eficaz y conveniente para la extracción de curcumina es la extracción con CO<sub>2</sub> supercrítico, ya que es la que ofrece mejores rendimientos de extracción, además de utilizar un solvente con innumerables características favorables tanto económica como ecológicamente.

**Palabras clave:** Curcumina, extracción, soxhlet, ultrasonido, fluidos supercríticos.

#### Abstract

The industry uses the extraction of active compounds from natural products in order to isolate substances of interest; initially, the so-called traditional methods were used that use toxic organic substances as solvents, and involve large energy costs, so they are not friendly to the environment and the health of consumers; however, in recent years new more efficient and ecological extraction methods have emerged, which in turn offer better yields. On the other hand, one of the compounds that is currently highly consumed by the public is curcumin due to its innumerable health benefits, in addition to its properties as a food coloring and flavoring, which is why it is of interest to the industry chemical, food and pharmaceutical use an ideal method for its extraction and that is up to the demands of these times. In this sense, the present documentary research focused on evaluating and comparing the different methods used for the extraction of curcumin from turmeric in order to identify the most optimal and efficient method, technically and ecologically; for which a bibliographic review of different articles was carried out, the information was organized through bibliographic records and the respective comparisons and analyzes were established. In this sense, it was obtained that the conventional methods of curcumin extraction (soaking and soxhlet) are less ecological when using

**Información del manuscrito:**

**Fecha de recepción:** 19 de octubre de 2022.

**Fecha de aceptación:** 28 de noviembre de 2022.

**Fecha de publicación:** 10 de julio de 2023.



toxic solvents and by implying longer extraction times and therefore higher energy costs, in addition to lower yields; on the other hand, modern methods are more efficient as they allow higher yields, and are friendlier to the environment since they require less time and use innocuous solvents. Finally, it was concluded that the most effective and convenient method for the extraction of curcumin is the extraction with supercritical CO<sub>2</sub>, since it is the one that offers the best extraction yields, apart from using a solvent with innumerable favorable characteristics both economically and ecologically.

**Keywords:** Curcumin, extraction, soxhlet, ultrasound, supercritical fluids.

## 1. Introducción

En la industria química se llevan a cabo procesos de extracción que tienen como finalidad separar un compuesto activo de una materia prima, el cual posteriormente es purificado para ser usado con un fin específico en función de sus propiedades. Tal es el caso de la curcumina, el cual es un compuesto presente en el rizoma de la planta *Curcuma longa*, que le confiere su color amarillo característico, y que además de poseer características como colorante natural, también tiene propiedades nutracéuticas y medicinales, ya que es un potente antioxidante y anticancerígeno (Deossa & Ortiz, 2010, pág. 38).

Durante muchos años la industria ha utilizado métodos tradicionales para extraer la curcumina, entre los que están la extracción por remojo aplicada por (Van Nong et al., 2016) con etanol; y la extracción soxhlet usada por (Wakte et al., 2011), (Arango, 2016) y por (López, 2017);

sin embargo, según (Velasquez, 2008) y (Lee et al., 2019) estos procesos emplean largos tiempos de extracción, emplean solventes orgánicos tóxicos y costosos, como son el hexano, acetona, metanol, entre otros, empleados por (López, 2017), (Popuri & Pagala, 2013) y (Wakte et al., 2011) que repercuten en la salud y el medio ambiente, además que debido a que usan altas temperaturas, como lo reporta (López, 2017) quien usó temperaturas entre 85-90 °C; se degrada el compuesto y se obtienen impurezas en el extracto.

A su vez, como lo expone (Arango, 2016) los métodos tradicionales de extracción a nivel industrial, se llevan a cabo en equipos no adecuados como reactores batchs, con baja eficiencia y que consumen altos niveles de energía, debido a los largos períodos de operación que van desde 2 horas hasta días, dependiendo del solvente empleado, como por ejemplo (Wakte et al., 2011) y (Arango, 2016) quienes

emplearon 8 horas en extracción de curcumina con soxhlet. Además, agrega que los solventes tienen baja selectividad con el principio activo debido a que son compuestos orgánicos y su polaridad define su afinidad con el mismo; por otra parte, se obtienen bajos rendimientos, como los reportados por (Wakte et al., 2011), quienes obtuvieron 2.1g/100g de cúrcuma, utilizando acetona, mediante el método soxhlet y (Arango, 2016) quien alcanzó un rendimiento de 10.8 mg/ 100 g de cúrcuma utilizando etanol mediante el mismo método, tomando en cuenta que la cúrcuma contiene de 2 a 5 g de curcumina por cada 100 g. En contraposición a ello, actualmente se han usado otros métodos modernos como son la extracción asistida por microondas empleada por (Van Nong et al., 2016) y por (Arango, 2016), extracción por ultrasonido, utilizada por (Lamdin et al., 2020) y por (Torres, 2014); y la extracción por fluidos supercríticos experimentada por (Arango, 2016), (Martinez et al., 2016), (Kiamahalleh et al., 2016) y (Priyanka, 2018); cuyos procesos son más ecológicos, ya que usan solventes no tóxicos (CO<sub>2</sub>, agua,

etanol), lo que a su vez evita poner en riesgo la salud de los consumidores, y la degradación del medio ambiente causada por el vertido de desechos tóxicos a los cuerpos de agua y a la atmósfera. Además, con estas tecnologías se emplean tiempos de extracción cortos, como lo evidencian (Lamdin et al., 2020) (5 min de extracción con ultrasonido), (Arango, 2016) (30 a 210 segundos con extracción por microondas y 120 minutos con fluidos supercríticos), (Kiamahalleh et al., 2016) (14 minutos con fluidos supercríticos) y (Van Nong et al., 2016) (2-6 minutos con microondas). Aunado a esto, el rendimiento que se obtiene del principio activo aislado es mucho mayor y con mayor pureza, así como lo reflejan los autores (Martinez et al., 2016) (3.3 y 3.9 g /100 g de cúrcuma con fluidos supercríticos), (Lamdin et al., 2020) (3.9 g/ 100 g de cúrcuma con ultrasonido), (Arango, 2016) (70.86% de rendimiento con microondas y 65.3 % con fluidos supercríticos), (Kiamahalleh et al., 2016) (76% de rendimiento con fluidos supercríticos) y (Torres, 2014) (26% de rendimiento) quien obtuvo curcumina de alta pureza, lo

cual corroboró a través de resonancia magnética nuclear.

En este sentido, en la actualidad, cada día existe más interés en usar productos que sean amigables con el medio ambiente, por lo que se requiere que los procesos industriales utilicen energías limpias, con bajo impacto ambiental. Además, es de interés para la industria que sus procesos sean lo más eficiente y óptimos posible, en virtud de generar menores costos de producción y ofrecer productos de calidad.

Por otra parte, es notorio que la demanda de curcumina ha crecido en los últimos años, en función de sus múltiples y beneficiosos usos, tanto en el campo textil en donde se usa como colorante; en la industria de alimentos, en donde destaca su uso como colorante alimenticio natural gracias a su potente color amarillo, además de que posee excelentes características nutraceuticas y en el área de la medicina, ya que se le atribuyen propiedades como anticancerígeno, para combatir el Alzheimer, entre otras.

En este sentido, se tiene que es de suma importancia determinar cuál

sería el método más eficaz y conveniente para la extracción de curcumina, el cual permita obtener los mejores rendimientos, y que a su vez esté a la par de las exigencias de la actualidad, como son que tenga un menor impacto ambiental y en la salud de la humanidad, además de que sea un proceso altamente eficiente tanto económica como técnicamente.

Por todo lo antes expuesto, para esta investigación se ha planteado el siguiente objetivo general: evaluar los métodos de extracción de curcumina de la cúrcuma (*Cúrcuma longa*).

## 2. Metodología

La presente es una investigación de tipo documental-bibliográfico ya que se basa en la recolección, análisis e interpretación de información obtenida de fuentes documentales, las cuales son artículos científicos, libros y trabajos de grado, que aporten información valiosa sobre los distintos procesos de extracción de curcumina.

Así mismo, es de nivel descriptivo-explicativo en función de que busca describir las características e implicaciones de los distintos

procesos de extracción de curcumina, para comprenderlos de forma más completa y lograr establecer comparaciones. También, es de carácter no experimental ya que no se manipularán variables, sino que se observará el problema y se analizará la información disponible.

La población objeto de estudio son las investigaciones relacionadas al tema, halladas en los repositorios de revistas científicas, disponibles en los buscadores de internet, que proporcionen datos de relevancia para esta investigación y en mayor proporción las que se hayan elaborado en el periodo 2017-2022. Además, la muestra está conformada por los antecedentes de la investigación, que constituyen los estudios que tienen mayor relación con el tema a desarrollar.

Se utilizará la técnica del análisis documental y como instrumento se emplearán las fichas de contenido, en las cuales se condensarán los datos bibliográficos de cada fuente (autor, año, título, país) así como la información de interés para la investigación, con el fin de extraer los datos de cada estudio y luego poder organizar la información y

estructurarla en el artículo científico por subtemas.

### 3. Estado del arte

#### 3.1. *Curcuma longa*

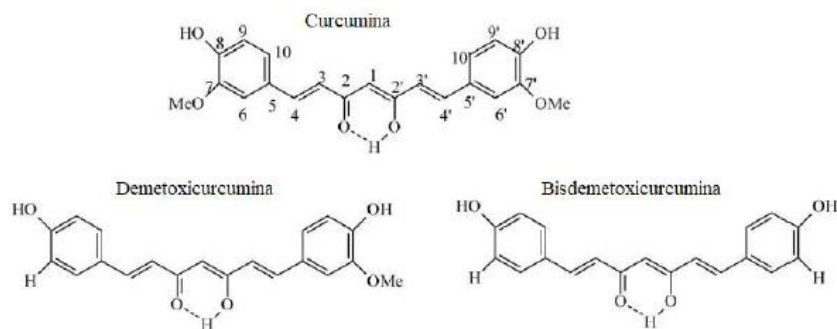
El origen de la cúrcuma radica en la zona sur de Asia, esta es una planta herbácea perenne, que crece hasta una altura entre 50 y 100 cm. Las hojas de la cúrcuma son suaves, grandes y de color verde claro, mientras que las flores son de color blanco amarillento. Respecto al rizoma (raíz), pueden tener un grosor de 5 a 8 centímetros, de color pardo y muy arrugado; este posee un aspecto similar al rizoma del jengibre (*Zingiber officinale*), cuya diferencia radica en la tonalidad del interior, la cual en el caso de la cúrcuma corresponde a un color amarillo anaranjado (Esparza, 2021; Montañó & Montes, 2004).



**Figura 1.** Aspecto y partes de la *Curcuma longa*.

Así mismo, según Chica et al. (2022) y (Esparza, 2021), la *Curcuma longa* L., posee una coloración entre amarillo y naranja que hace que sea atractiva para proporcionar color a los alimentos por la presencia de curcuminoides en su composición, principalmente la curcumina (75 %), la demetoxicurcumina (10-25 %) y la bisdemetoxicurcumina (5 %). Además, según Rafecas et al. (2020)

la cúrcuma está químicamente constituida por agua (13 %), carbohidratos (70 %), proteína (6 %), aceites esenciales (6 %), grasa (5 %), minerales (3 %), curcuminoides (2-9 %) y trazas de vitamina. El contenido en curcuminoides en la cúrcuma varía entre 2-9 % (p/p), dependiendo de la localización geográfica o condiciones de cultivo.



**Figura 2.** Estructura química de los curcuminoides.

La cúrcuma en polvo es obtenida a partir del rizoma limpio, cuyo proceso convencional consiste en un pretratamiento térmico, secado, molienda y tamizado. Además de lo anterior, el rizoma deshidratado (generalmente en polvo) puede ser procesado para obtener oleorresina, aceite de cúrcuma y curcuminoides. Además del rizoma deshidratado en polvo, a partir de la cúrcuma se pueden obtener variados productos,

tales como, oleorresina, aceite y curcuminoides (Esparza, 2021).



**Figura 3.** Principales productos de la cúrcuma. (A) Rizoma entero, B) Cúrcuma en polvo, C) Aceite, D) Oleorresina.

- **Morfología y taxonomía (Lopez & Moya, 2021)**

Reino: Vegetal

Clase: Angiosperma

Familia: Zingiberáceas

Género: Cúrcuma

Especie: longa

Nombre científico: Cúrcuma longa

- **Propiedades de la cúrcuma:**

Dentro de las numerosas especias que existen, la cúrcuma destaca por sus propiedades funcionales, tales como, actividad antiinflamatoria y anticancerígena, por lo que su incorporación en la dieta otorga potenciales beneficios a la salud. La cúrcuma posee un contenido importante de antioxidantes, siendo el principal de ellos la curcumina. Debido a lo anterior la cúrcuma se caracteriza por tener una gran capacidad antioxidante, lo que se traduce en la protección de las células del daño que provocan los radicales libres que se producen en el medio intracelular. Gran parte de las propiedades funcionales de la cúrcuma se deben a la presencia de curcuminoídes, en particular la curcumina, sin embargo, esta planta

posee otros compuestos con actividad biológica como los turmerones (Esparza, 2021).

- **Usos de la cúrcuma:**

La cúrcuma se cultiva por sus rizomas, que se emplean como especia, como materia prima en la producción de colorantes naturales, como medicina, entre otros. Uno de los usos crecientes es el uso del extracto de esta planta como colorante alimentario de dos formas, como cúrcuma y curcumina; denominados ambos estados en general como cúrcuma. Ambos colorantes se encuentran en la lista de aditivos para alimentos permitidos por la FDA. Los usos de la cúrcuma son diversos. Se usa como especia, como harina para procesos en las industrias químicas, farmacéuticas, cosméticas y de alimentos, también es usada en diversas medicinas tradicionales. En la industria de alimentos se usan extractos de cúrcuma como colorante de diferentes productos y los niveles de uso de la curcumina están en el rango de 5 a 500 mg/kg, dependiendo de la categoría de alimentos (Llano, 2016).

- **Curcumina:**

La curcumina es un polvo cristalino de color amarillo anaranjado insoluble en agua y éter pero soluble en etanol y ácido acético glacial. Puede obtenerse con un rendimiento del 0.9 al 6.2% (Marsin, 1993).

La curcumina es estable a temperatura ambiente (25 °C) cuando se encuentra protegida de la luz solar (radiación UV). Cuando la curcumina es expuesta a la luz solar se degrada en compuestos como ácido ferúlico y ácido vanílico (Esparza, 2021).

- **Propiedades de la curcumina:**

La curcumina, posee un alto potencial terapéutico debido a que puede actuar frente a diferentes patologías como enfermedades cardiovasculares, intestinales, neurodegenerativas (Alzheimer, Parkinson), , diabetes, enfermedades metabólicas, SIDA, cálculo biliar, enfermedades de las articulaciones y del hígado, anemia, infecciones bacterianas e infecciones virales, además se ha comprobado que inhibe el crecimiento de células cancerígenas e induce la apoptosis de estas, por lo que tiene el potencial de prevenir

diversos tipos de cáncer. A pesar de los beneficios que tiene la curcumina, su biodisponibilidad y aplicación en la industria está limitada debido a su baja solubilidad en soluciones acuosas y su susceptibilidad a cambios de pH, especialmente a condiciones alcalinas, a la luz, a la oxidación, al calor, humedad e iones de hierro y temperatura, que también limitan su eficacia clínica (Esparza, 2021).

- **Usos de la curcumina:**

En la investigación de Jiang, et al. (2021) se mencionan las siguientes aplicaciones de la curcumina:

- ✓ Con fines medicinales: la curcumina es históricamente valiosa en aplicaciones médicas y se ha utilizado en la medicina tradicional como remedio casero. Su uso en diversos medicamentos se debe principalmente a su amplia gama de actividades biológicas y farmacológicas beneficiosas, es decir, antiinflamatorio, antioxidante, antibacteriano, antidiabético, anticancerígeno y antitumoral. Exhibe efectos terapéuticos contra numerosos tipos de



- cáncer, incluyendo tumor óseo, tumores cerebrales, cabeza y cuello, melanoma, colon, colorrectal, pancreático, mama, próstata, ovario, pulmón y oral (Jiang et al., 2021). Sin embargo, el uso de curcumina en formulaciones de medicamentos aún no está aprobado por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), limitado por varias razones, incluida su baja biodisponibilidad oral causada por su escasa solubilidad en medios acuosos, baja absorción y rápido metabolismo intestinal. Además, la curcumina se degrada con la luz, el calor y el pH alcalino (Lesa et al., 2019).
- ✓ En la industria alimentaria: tradicionalmente, la curcumina se ha empleado como colorante alimentario natural, debido a que exhibe un atractivo color amarillo-naranja brillante y puede servir como sustituto de los colorantes alimentarios sintéticos. Es comúnmente utilizado en arroz, carne, mostaza, pasteles, productos lácteos y pescado enlatado, haciendo que los alimentos se vean mejor. Además, puede actuar como un conservante natural para aumentar la vida útil del alimento ya que tiene una fuerte eficacia antimicrobiana contra muchos microorganismos (Jiang et al., 2021).
  - ✓ En la industria cosmética: la curcumina se ha utilizado durante varias décadas en la industria cosmética debido a sus efectos antioxidantes y antiinflamatorios. Ha mostrado potencial para una amplia variedad de tratamientos de belleza para la piel, la cara, el cabello, cuidado de labios y uñas con acciones beneficiosas contra la luz ultravioleta, el envejecimiento, inflamación, pérdida de cabello, cuidado de los labios y cuidado de las uñas. Además, se puede utilizar en cosméticos para la protección de la piel por propiedades como antienvjecimiento, antiarrugas, protector solar y retención de humedad (Jiang et al., 2021).

## 3.2. Métodos usados para la extracción de curcumina

### 3.2.1. Métodos tradicionales

#### a) Extracción por remojo

En el método de remojo o extracción por maceración se coloca una cantidad equivalente de muestra del material de la planta molida o triturada, y solvente, dejándose macerar 24 horas a temperatura ambiente y protegida de la luz y luego pasa al proceso de tintóreo por cocción (Alarcón & Lucas, 2020).

Se utilizan solventes polares ya que actúan de mejor manera por el uso de fuerzas iónicas, y la separación del residuo se realizará por filtración a través de elementos filtrantes para la posterior precipitación del colorante (Alarcón & Lucas, 2020).

#### b) Método soxhlet

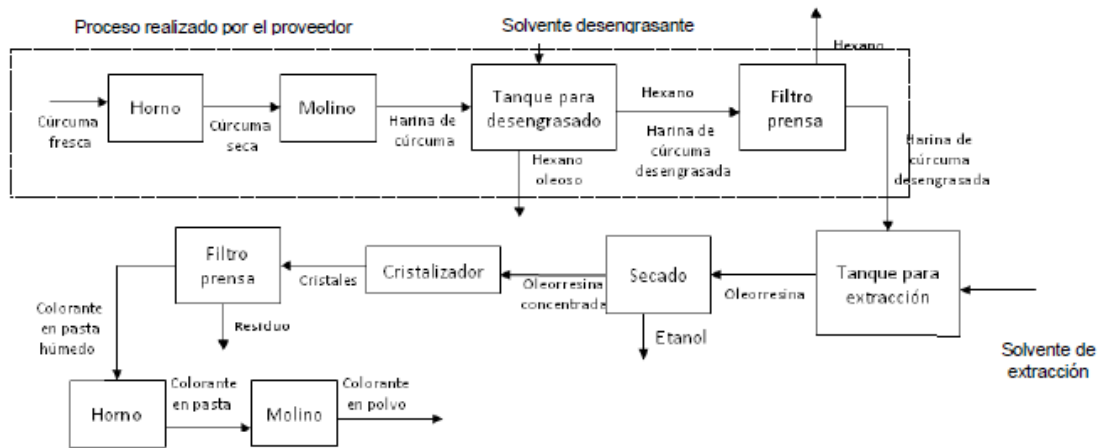
La extracción de curcuminoides con un solvente orgánico empleando equipos soxhlet es un método eficiente, sencillo y de bajo costo para la extracción a nivel laboratorio. Se pueden emplear una gran cantidad solventes orgánicos e inorgánicos en las extracciones tipo soxhlet, sin embargo, muchos de estos solventes no se pueden utilizar

en la obtención de curcuminoides a partir de la *Curcuma longa*, en especial si estos se van a emplear como aditivo colorante alimenticio, los solventes más empleados en este tipo de extracción son la acetona, el etanol y el hexano. El rendimiento y eficiencia de la extracción dependen directamente del tiempo de residencia del proceso y de la relación soluto-solvente, la cual varía considerablemente según el tipo de solvente (Deossa & Ortiz, 2010).

La extracción de curcuminoides y oleorresina por el método soxhlet se realiza en diferentes etapas (figura 4), inicialmente se ubica la muestra en un cartucho poroso cilíndrico que se apoya en la base del extractor, luego el solvente se agrega a un balón de extracción y éste se somete a calentamiento hasta llevarlo a ebullición, el vapor del solvente producido viaja hasta un condensador en donde se enfría y se condensa; el condensado producido cae sobre el recipiente que contiene la muestra en su interior, la muestra es bañada con el solvente generando un ascenso en su nivel, el cual cubre la muestra hasta el punto en que se produce el

reflujo, este lleva el solvente con el material extraído al tanque y se vuelve a producir este proceso la cantidad de veces necesarias para

que la muestra quede agotada. Lo extraído se va concentrando en el tanque del solvente.



**Figura 4.** Diagrama de flujo del proceso del método Soxhlet para extraer curcumina.

Con el fin de obtener un producto de la mayor pureza posible, se realiza un paso adicional denominado cristalización, generalmente se realiza a una temperatura entre 0 y 15 °C, y se realiza en varias etapas donde los cristales se disuelven y se recristalizan empleando solventes adecuados. Esta etapa se repite hasta que el agente colorante producido en la cristalización posee una pureza respecto a los curcuminoides de mínimo 70 % y preferiblemente mayor al 95 %. (Deossa & Ortiz, 2010). Es por esto que el método Soxhlet suele

utilizarse como referencia frente a otros métodos de extracción, ya que con el mismo se obtienen los mayores rendimientos.

### 3.2.2. Métodos modernos

#### a) Extracción por microondas

Esta tecnología de extracción se basa en la irradiación con microondas del medio a extraer. Las microondas son ondas electromagnéticas compuestas por un campo magnético y un campo eléctrico que oscilan perpendicularmente entre sí con frecuencias entre 0.3 y 300 GHz.

Estas ondas tienen la capacidad de penetrar en ciertos materiales e interactuar con los componentes polares, para hacer vibrar sus moléculas generando calor, lo que es selectivo y dirigido a ciertos materiales que pueden calentarse basados en sus constantes dieléctricas.

El calentamiento dado por la energía de las microondas, actúa directamente sobre las moléculas como resultado de las colisiones entre partículas y se produce mediante dos mecanismos, la conducción iónica y la rotación dipolo. La conducción iónica es la migración electroforética de los componentes portadores de carga, iones y electrones, bajo la influencia del campo eléctrico producido por las microondas y la rotación dipolo es el movimiento de las moléculas polares que tratan de alinearse con el campo eléctrico generando colisiones.

Durante la extracción asistida por microondas de componentes naturales, la energía producida por las microondas, es absorbida por algunas sustancias del material vegetal, principalmente el agua y las sustancias polares, por consiguiente la temperatura interna de las células

vegetales aumenta drásticamente, generando un sobrecalentamiento que evapora los líquidos presentes y rompe las paredes celulares y/o las membranas plasmáticas, liberando los componentes a ser extraídos, lo que propicia la transferencia de masa hacia los solventes, permitiendo así la extracción eficaz (Arango, 2016).

La tecnología de radiación por microondas ha sido considerada, un método alternativo para aislar compuestos bioactivos y se caracteriza como una herramienta útil porque acelera el proceso de extracción y reduce el consumo de solventes; además es una tecnología con mayor ventaja sobre aquellas convencionales, cuando se aplica en la obtención de compuestos sensibles a medios ambientes degradativos, principalmente, en la extracción de compuestos bioactivos obtenidos de plantas, frutos, semillas y otros materiales de interés (Espinoza et al., 2016).

### **b) Extracción por ultrasonido**

La radiación ultrasónica consiste en el fenómeno de la cavitación que se da por las burbujas de vapor que se forman, crecen y colapsan, originados por el campo ultrasonoro

al interior de un líquido. La imposición de la burbuja de cavitación genera microturbulencias de alta velocidad y perturbaciones en partículas microporosas de la biomasa, acelerando la difusión interna. Este método hace uso de ondas de una frecuencia determinada que ayuda a extraer los compuestos bioactivos de un material vegetal (Alarcón & Lucas, 2020)

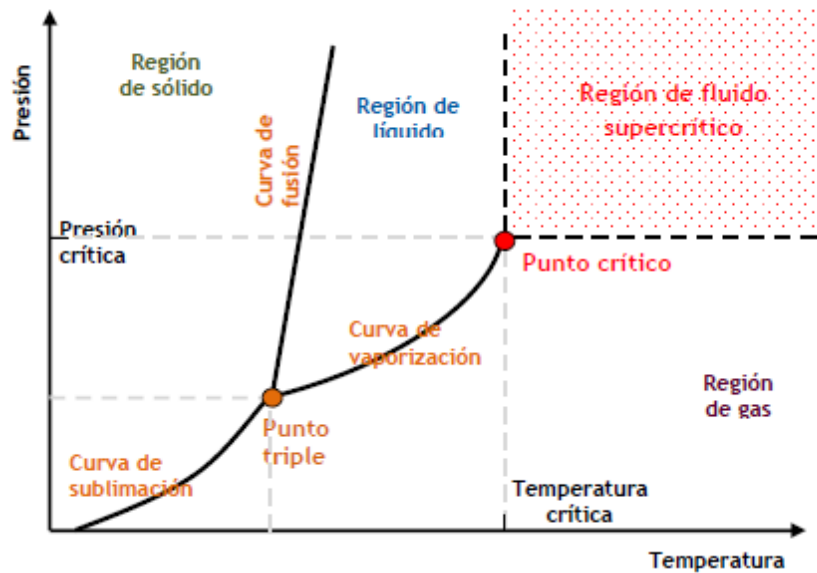
### **c) Extracción con fluidos supercríticos**

La extracción por fluidos supercríticos es similar a la extracción convencional, la diferencia radica en que se usa como agente extractor un fluido supercrítico en lugar de un líquido (Roman et al., 2016).

Un fluido supercrítico es cualquier sustancia a una temperatura y presión por encima de su punto crítico termodinámico. Tiene la propiedad de difundirse a través de los sólidos como un gas, y de disolver los materiales como un

líquido. Adicionalmente, puede cambiar rápidamente la densidad con pequeños cambios en la temperatura o presión. Estas propiedades lo hacen conveniente como un sustituto de los solventes orgánicos en los procesos de extracción (Santos et al., 2020; Velasco et al., 2007).

El punto crítico es donde la presión y la temperatura, hacen que no se distinga entre el gas y el líquido (figura 5); es decir por encima del mismo el fluido presenta características de ambas fases (Domínguez & Parzanese, s.f.). Así los fluidos supercríticos poseen una densidad similar a la de los líquidos, lo que le brinda la característica de poseer un gran poder solvatante, permitiendo extraer con gran cantidad de solutos; además, la viscosidad es similar a la de los gases y la difusividad es superior a la de los líquidos, lo que favorece la capacidad de penetración en los poros de la muestra (Morgan, 2000; Roman et al., 2016).



**Figura 5.** Diagrama de presión-temperatura de una sustancia pura. Representación de región de fluido supercrítico.

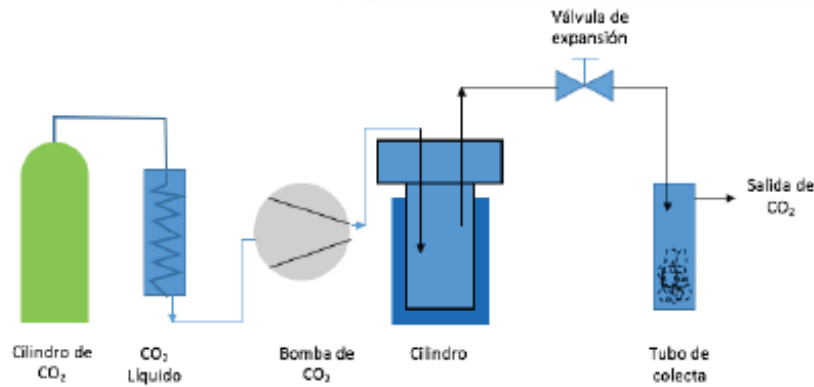
El proceso de extracción por fluidos supercríticos consta de 4 etapas, según (Roman et al., 2016), estas son:

1. Presurización: se eleva la presión, por encima de la presión crítica de la sustancia a emplear como solvente.
2. Ajuste de temperatura: se eleva o disminuye la temperatura, por cualquier medio físico o mecánico, para llevar el solvente a la temperatura adecuada de extracción

(por encima de su temperatura crítica).

3. Extracción: El fluido supercrítico entra en contacto con la muestra que contiene el soluto de interés en el extractor.
4. Separación: el solvente se descomprime a una presión inferior a la crítica, lo que provoca que se libere del soluto.

La extracción mediante fluidos supercríticos puede llevarse a cabo de forma estática o forma dinámica.



**Figura 6.** Diagrama básico de equipos de fluidos supercríticos.

Así mismo, Espinoza et al. (2016) explican el proceso de extracción con fluidos supercríticos de la siguiente manera: el material a extraer se coloca dentro del extractor, después se hace pasar el fluido supercrítico dentro del recipiente de extracción mediante una bomba de solvente. El sistema se presuriza hasta alcanzar la presión y la temperatura de extracción, aquí el solvente solubiliza los componentes afines de la matriz; en ese momento se hace fluir lentamente el solvente fuera del recipiente de extracción hacia el separador, manteniendo la presión y la temperatura en el sistema. Una vez en el recipiente de separación la caída de presión provoca que el fluido cambie de fase y se separe abruptamente de los componentes disueltos para poder ser

recuperados fácilmente, y el solvente pueda ser recirculado al sistema y poderse reutilizar.

### 3.3. Comparación entre métodos

#### • Condiciones de operación

**a) Extracción por remojo:** Van Nong et al. (2016) utilizaron 1 Kg de rizoma de cúrcuma, el cual colocaron en un vaso de precipitados de vidrio ámbar de 3 L y el cual se colocó en remojo a temperatura ambiente con 1 L de etanol absoluto, empapado y agitado (400 rondas/min), durante una semana. El extracto de etanol preparado se transfirió al matraz de fondo redondo de un evaporador rotatorio y fue calentado a una temperatura máxima de 45 °C. Condensado el etanol se recogió a través de un condensador con el propósito de reutilización en extracciones posteriores, y el resto

de la solución extraída, libre de solvente, se eliminó del matraz para precipitación de curcumina con hexano.

Así mismo, Paulucci et al. (2013) lograron la condición optimizada para un tiempo de extracción de 12 h, velocidad de agitación de 30 rpm, relación fármaco a solvente de 1/6, temperatura de extracción de 80 °C y el solvente con fuerza etanólica del 70%.

Por su parte, Gokdemir et al. (2020) establecieron tiempo de 10 a 60 min, temperatura de 25 a 55 °C y volumen de disolvente de 10 a 30 ml, para la extracción por remojo utilizando un solvente verde novedoso, el iónico bis(trifluorometilsulfonil)imida líquida de 1-butil-3-metilimidazolio ([BMIM][Tf2N]).

**b) Método soxhlet:** Wakte et al. (2011) utilizaron las siguientes condiciones: se colocaron veinte gramos de rizomas en polvo en dedal (Borosil, Mumbai, MH, India), que se insertó en un aparato soxhlet y se extrajo con 100 ml de acetona, la extracción se realizó durante 8 h. Por otra parte, López (2017) reporta temperaturas entre 85-90 °C durante la extracción soxhlet.

Además, Arango (2016) indica que se colocaron 5 g de harina de *Curcuma longa* en un dedal y se extrajeron con 200 mL de etanol del 95 % de pureza (relación 1/40 w/v) en un equipo soxhlet, la extracción se realizó durante 8 h. Luego de la extracción, el extracto fue centrifugado a 8000 rpm por 10 minutos, para eliminar los sólidos y el sobrenadante se analizó por HPLC para determinar el contenido de curcuminoides.

Y Pawar, et al. (2018) añadieron un gramo de extracto crudo a 25 ml de hexano y lo mantuvieron en extracción durante 12 horas. Después de 12 horas, la solución con un trozo de extracto crudo se agitó usando un agitador magnético a 600 rpm por 3 horas. Durante la agitación, en un punto, el bulto se rompió en pequeños fragmentos y finalmente reducido a polvo. El polvo en grumos suspendidos se separó por centrifugación y secado en estufa a 40 °C. Al crudo obtenido se le evaluó el contenido total de curcumina en polvo utilizando espectroscopia UV.

**c) Extracción por microondas:** Para Wakte et al. (2011) la primera condición consistió en irradiar 20 g



de cúrcuma longa seca, durante un período de tiempo predefinido (1, 3, 5 o 7 min), la irradiación se realizó a una potencia de microondas de 140 W. Después de la irradiación, el polvo se suspendió en etanol o acetona (relación masa:disolvente 1:3 p/v) y se vierte en un extractor conjunto. La velocidad de agitación de 400 rpm se mantuvo constante durante todo el período de extracción. La extracción se realizó a 90 W (disolvente de extracción: etanol) y potencia de microondas de 60 W (disolvente de extracción: acetona). La segunda condición experimental consistió en colocar 20 g del polvo seco de *C. longa* en agua o etanol (relación masa:disolvente 1:2 p/v) por un período de 24 h a 20 °C. Antes de la irradiación, el exceso se eliminó del contenido de solvente y se irradió el polvo húmedo durante un período de tiempo predefinido como se describe en el primer experimento. El polvo empapado en agua se irradió a 270 W mientras que el polvo empapado en etanol se irradió a 50 W de microondas. El polvo irradiado con microondas se suspendió en disolventes. Las muestras extraídas y recolectadas se analizaron como se describe en la primera condición experimental.

Por su parte, Van Nong et al. (2016) realizaron la extracción asistida por microondas mediante el siguiente procedimiento: colocar 1 kg de las hebras de cúrcuma fresca en un recipiente de vidrio e irradiado durante un período de tiempo predefinido (1, 3, 5 min) a 200 W de potencia de microondas. Después de la irradiación, vierta el etanol absoluto en los hilos largos de cúrcuma (relación masa:disolvente 1:1 p/v). La cúrcuma empapada en etanol se irradia con una potencia de microondas de 800 W durante 2, 4 y 6 min. La extracción se realiza a 700 W potencia de microondas durante 5 min.

Finalmente, Arango (2016) realizó la extracción en un equipo para microondas que opera a una potencia máxima de 700 W y una frecuencia de 2450 MHz. Se utilizó como solvente soluciones de tween 20 a diferentes concentraciones y a diferentes relaciones peso a volumen de harina de Cúrcuma longa y solvente, manteniendo la potencia al 20 % del valor máximo y con intervalos de tiempo entre 30 y 210 s.

**d) Extracción por ultrasonido:** Wakte et al. (2011) realizaron la

extracción asistida por ultrasonido a la potencia fija de 150 W. Bajo la primera condición, 20 g de polvo seco de cúrcuma fueron expuestos a ondas ultrasónicas durante períodos de tiempo predefinidos (1,3, 5 o 7 minutos). El polvo irradiado se suspendió en etanol o acetona (relación masa:disolvente 1:3 p/v) y sonicado durante 5 min a  $21\pm 2$  °C. En la segunda condición experimental, el polvo seco de *C. longa* (20 g) se empapó en agua o etanol (proporción masa:disolvente 1:2 p/v) durante un período de 24 h a 20 °C. Antes de la irradiación, el exceso de disolvente se eliminó y el polvo húmedo se expuso a ondas ultrasónicas, suspendidas en solventes y después de la extracción.

A su vez, Torres (2014) realizó la extracción de los curcuminoides en un baño ultrasónico modelo SB-3200TD de procedencia China, a partir de 16.84 g de rizomas secos y pulverizados, empleando metanol como disolvente. Así mismo, para Lamdin et al. (2020) las variables del proceso fueron el número de etapas de extracción con etanol (1, 3 y 5) y la proporción de disolvente a alimentación (S/F) de 3, 5, 7, 9 (p/p),

además, llevaron a cabo un proceso no térmico, ya que la temperatura solo aumentó 10 °C, llegando a 30 °C, y el tiempo de extracción empleado fue de 5 minutos.

Ponce et al. (2020) variaron la potencia del ultrasonido entre 30 y 50 W, además usaron los siguientes tamaños de partículas 30, 60 y 100 US, para ello tomaron  $2.0 \pm 0.1$  g de las muestras molidas y secas de palillo con 20 ml de disolvente (etanol absoluto 96 %) en matraces de 100 ml.

Así mismo, Chica et al. (2022) usó el procedimiento de Wakte et al. (2011), donde la Cúrcuma deshidratada (6.4 % de humedad) se llevó a microondas (140 W por 1 min), luego se mezcló con solución de etanol:agua (40:60, relación sólido/solvente de 1:15 (g/mL)), y se sometió a extracción asistida por ultrasonido (Amplitud 45 % por 10 min con pulsos on:off (3:1), circulación de agua a 40 °C (Branson Digital Sonifier 450, USA). El extracto se filtró al vacío y se rotoevaporó (IKA RV8-S S99, Suiza) a una temperatura de 53 °C y una velocidad de 30 rpm, posteriormente se liofilizó (Labconco freezezone 6 plus, USA) a una presión de vacío de

0.120 mBar y una temperatura de - 60 °C por 24 horas.

**e) Extracción con fluidos supercríticos:** Con respecto a esto, Priyanka et al. (2021) afirman que tanto la temperatura como la presión afectan la capacidad del solvente debido a su efecto sobre la densidad del solvente. Por ejemplo, la temperatura y presión de extracción de los aceites esenciales oscilan entre 303 y 333 °K y 10 a 25 MPa, respectivamente. Como regla general, si la presión de operación es mayor, entonces el rendimiento de extracción también es mayor.

Según Martínez et al. (2016) las condiciones para el proceso de extracción supercrítico se establecieron en 60 °C y 400 bar con el objetivo de tener un alto rendimiento de extracción. Por otra parte, Kiamahalleh et al. (2016) definieron condiciones óptimas de extracción como presión SWE de 10 bares, temperatura de extracción de 140 °C, tamaño de partícula de 0.71 mm y tiempo de retención de 14 minutos.

Wakte et al. (2011) lograron extraer curcumina del polvo de Cúrcuma. Longa, mediante fluidos supercríticos, usando las siguientes

condiciones óptimas de extracción: presión – 30 Mpa, temperatura – 50 °C, caudal de CO<sub>2</sub> – 5 ml/min, modificador – 10% etanol, tiempo estático – 60 min y tiempo dinámico – 300 min.

Así mismo, Priyanka (2018) empleó un diseño compuesto central de cara completa para optimizar los parámetros operativos del proceso. Estos parámetros fueron presión, temperatura, caudal de disolvente, tamaño de partícula y adición de codisolvente (etanol) que varió entre 20-40 MPa, 40-60 °C, 5-15 g/min, 0-0.8 mm y 0-15% de la tasa de disolvente, respectivamente.

Por su parte, Marsin & Ahmad (1993) realizaron la extracción de curcumina de la cúrcuma por fluidos supercríticos utilizando dióxido de carbono como principal extractante, seguido de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y análisis de cromatografía de gases (GC) de los extractos, para ello usaron presiones de 250 y 280 bares, un caudal de CO<sub>2</sub> de 20 ml/min y porcentaje de metanol de 15 y 20%.

Arango (2016) empleó la extracción mediante fluidos supercríticos, bajo condiciones de presión entre 400 y 500 bares, temperaturas de 70 a 90

°C; además se realizó durante 120 minutos utilizando 10% de etanol como cosolvente y usando CO<sub>2</sub> supercrítico.

Nagavekar & Singhal (2019) optimizaron las condiciones de extracción con dióxido de carbono supercrítico para oleorresina, curcuminoides y volátiles totales de *Cúrcuma Longa* a 350 bar / 65 ° C / 150 min.

Santana et al. (2017) para la extracción con fluido supercrítico implementaron las condiciones de 333 °K y 25 MPa, usando como fluido dióxido de carbono, durante 20 min (tiempo estático). El tiempo de extracción fue de 31 min (tiempo dinámico).

Finalmente, Momenkiaei & Raofie (2021) realizaron la extracción de curcumina al añadir 160 ml de EtOH como modificador, el cual se llevó a cabo mediante extracción SC-CO<sub>2</sub> a 40 °C, 34 MPa, 30 y 70 min de tiempos de extracción estáticos y dinámicos, respectivamente, mientras que la velocidad de flujo de SC-CO<sub>2</sub> fue de aproximadamente 0.30 ± 0.05 ml/min durante el tiempo de extracción dinámica.

- **Solventes usados:**

El solvente más ampliamente utilizado para extraer aceites comestibles de las plantas es el hexano. El hexano tiene un rango en el punto de ebullición bastante estrecho, de aproximadamente 63–69 °C y es un excelente solvente de los aceites en lo que se refiere a su solubilidad y facilidad de recuperación. Sin embargo, el n-hexano, el elemento principal del hexano comercial, está ubicado como el número uno en la lista de los 189 contaminantes del aire más riesgosos por la Agencia Americana de Protección del ambiente. El uso de solventes alternativos tales como: isopropanol, etanol, hidrocarburos, e incluso el agua, se ha incrementado debido a asuntos del medioambiente, la salud, y a preocupaciones de seguridad (Velasco et al., 2007).

En la literatura se reporta una gran cantidad de solventes orgánicos e inorgánicos en las extracciones tipo soxhlet, sin embargo, muchos de estos solventes no se pueden utilizar en la obtención de curcuminoides a partir de la *Cúrcuma longa*, en especial si estos se van a emplear como aditivo colorante alimentario.

Los solventes más empleados en este tipo de extracción son la acetona, el etanol y el hexano (Wakte et al., 2011), el rendimiento y eficiencia de la extracción dependen directamente del tiempo de residencia del proceso y de la relación soluto/solvente, la cual varía considerablemente según el tipo de solvente (Arango, 2016).

El CO<sub>2</sub> es el fluido supercrítico más utilizado debido a que es no tóxico, no inflamable, no corrosivo, incoloro, no es costoso, se elimina fácilmente, no deja residuos, es barato y fácilmente disponible, sus condiciones críticas son relativamente fáciles de alcanzar, se consigue con diferentes grados de pureza y es gas a temperatura ambiente, propiedad que es muy importante ya que permite obtener un extracto libre de disolvente al final de la extracción (Sanchez, 2017). La temperatura y la presión críticas para el dióxido de carbono son bajas (31.1 °C y 72.8 bar), lo que le permite extraer compuestos termolábiles, y también preservar su calidad, se puede obtener a partir de procesos de fermentación alcohólica y ayuda a prevenir la degradación térmica de ciertos componentes químicos del

alimento cuando son extraídos (Morgan, 2000). Adicionalmente existen estudios que demuestran que el uso de CO<sub>2</sub> supercrítico conlleva a disminuir el consumo de energía con respecto a procesos de separación convencionales como destilación y lixiviación, entre otros. También brinda una calidad superior de extractos al extraer solo los componentes deseados a través de la optimización de las condiciones de extracción, mejorando la pureza y la calidad general del producto en comparación con solventes orgánicos tradicionales (Nagavekar & Singhal, 2019; Velasco et al., 2007).

Por otra parte, Kiamahalleh et al. (2016), utilizaron agua subcrítica para extracción de curcumina, estos autores afirman que el agua, debido a su solvencia única bajo la temperatura en diferentes condiciones, puede usarse como un solvente efectivo, ya que se pueden manipular sus propiedades fisicoquímicas en un sistema sellado ajustando simultáneamente la temperatura y la presión del sistema, manteniéndola en la fase líquida mientras la temperatura se eleva significativamente por encima del

punto de ebullición de 100 °C. El agua se puede mantener en fase líquida en puntos críticos, temperatura hasta 374 °C y una presión de 221 bares. Bajo tal condición, denotaba agua "subcrítica" o "caliente / líquida" con la polaridad, viscosidad, tensión superficial y disociación constante sustancialmente menor que la del agua en condiciones ambientales, exhibiendo así propiedades químicas similares a las de los solventes orgánicos. Por lo tanto, el agua presurizada con baja polaridad y en condiciones subcríticas podría solubilizar los compuestos orgánicos polares (a baja temperatura) o no polares (a alta temperatura), como los fitoquímicos que normalmente son insolubles en agua ambiental.

El uso de agua subcrítica aborda todos los problemas ambientales y además reduce el tiempo de manipulación y el consumo de solventes, reduce la pérdida de compuestos sensibles al calor y, en consecuencia, elimina el uso de cualquier solvente orgánico tóxico, en última instancia con la misma eficiencia de extracción que la de los solventes orgánicos. La técnica podría ajustarse para extraer

selectivamente casi todo tipo de orgánicos polares, moderadamente polares y no polares variando únicamente los parámetros de extracción, como la temperatura, la presión y el codisolvente (en caso de que sea necesario) (Kiamahalleh et al., 2016).

A su vez Arango (2016), sostiene que en la extracción con fluidos supercríticos se usan diferentes sustancias químicas como solventes en estado supercrítico, entre las que se encuentran el dióxido de carbono, etano, propano, benceno, tolueno, amonio y agua. El dióxido de carbono es el solvente supercrítico más ampliamente usado, dado a su bajo costo, no es tóxico ni inflamable y está disponible en abundancia con un alto grado de pureza. Por otro lado, su temperatura crítica moderada (31.2 °C), permite la preservación de compuestos bioactivos en los extractos.

Sin embargo, como la polaridad del dióxido de carbono supercrítico es baja, es menos eficaz en la extracción de compuestos más polares. Para superar este problema, se utilizan algunas sustancias, como modificadoras de la polaridad, llamadas cosolventes. Los

modificadores son compuestos altamente polares que, adicionados en pequeñas cantidades, pueden producir cambios importantes en las propiedades disolventes de dióxido de carbono supercrítico (Arango, 2016).

Los cosolventes más empleados para la extracción con FSC en matrices vegetales son: etanol, metanol, agua, diclorometano, n-hexano y aceites vegetales. El empleo de estos ubica al etanol como el preferido, con un porcentaje de uso según las investigaciones revisadas del 53%, seguido por el metanol (21%), agua (5%) (Roman et al., 2016).

- **Rendimientos alcanzados**

**a) Extracción por remojo:** En la investigación de Torres (2014), se hace referencia a que con el método de remojo se logran rendimientos de alrededor de 4% sin purificar. Por otra parte, González et al. (2016) menciona investigaciones anteriores como la de Janaki N. y Bose J. L. en 1967, quienes extrajeron los rizomas molidos y secos con hexano. Posteriormente, utilizaron benceno separando los curcuminoides de los aceites y grasas presentes en la

planta, obteniendo un rendimiento del 1.1 %; también acota que cuando la extracción por remojo se realiza con otros disolventes orgánicos se obtienen rendimientos entre el 2% y el 5% (hexano-metanol, por ejemplo) y que, en caliente, los rendimientos incrementan moderadamente.

Así mismo, Paulucci et al. (2013), obtuvieron rendimientos de curcumina que oscilan entre el 2.1 y el 62.6 % usando extracción por maceración (remojo) dinámica. El mayor rendimiento de curcumina se obtuvo con un tiempo de extracción de 24 h, velocidad de agitación de 70 rpm, relación fármaco a solvente de 1/6, temperatura de extracción de 80 °C y fuerza etanólica de 96 %.

Por su parte, Gokdemir et al. (2020) lograron un 2.94% como rendimiento máximo de curcumina extraída de la cúrcuma, usando el nivel óptimo en condiciones que fueron un intervalo de tiempo de extracción igual a 60 min, temperatura de 55 °C y volumen de disolvente de 30 ml.

**b) Método soxhlet:** Wakte et al. (2011) obtuvieron 2.1g/100g de cúrcuma, utilizando acetona, mediante el método soxhlet y por otro lado Arango (2016) alcanzó un rendimiento de 10.8 mg/ 100 g de

cúrcuma utilizando etanol mediante el mismo método.

Además, para los autores Pawar et al. (2018), el contenido total de curcumina del polvo curcuminoide crudo resultó ser 76.82% p/p, mientras que en polvo recristalizado la pureza se incrementó a 99,45% p/p.

### **c) Extracción por microondas:**

Wakte et al. (2011) reportan que el porcentaje de curcumina en el extracto aumentó proporcionalmente con períodos más largos de exposición a la radiación de microondas. Las exposiciones de 1, 3 y 5 minutos de radiación de microondas dieron como resultado 9.71, 29.14 y 48.57% de recuperación de curcumina, respectivamente, mientras se usa etanol como disolvente de extracción. Cuando se usó acetona como solvente de extracción, la concentración de curcumina en el extracto fue 13.71, 41.14 y 68.57% para períodos de irradiación de microondas de 1, 3 y 5 min, respectivamente. Al usar etanol como solvente de remojo y extracción, el contenido de curcumina obtenido fue mayor en 15.54–57.14% en comparación con

el tratamiento de irradiación de microondas con exposición a períodos de 1 a 5 min. El polvo empapado en agua, cuando se extrae con etanol, mostró un contenido de curcumina de hasta 67.01% después de 5 minutos bajo irradiación de microondas. El extracto de acetona del polvo empapado en agua demostró un aumento en el contenido de curcumina con el aumento del período de exposición a la radiación de microondas. El contenido neto de curcumina en extracto resultante se mejoró de 37.49 a 90.69 %, el cual fue constante incluso después de 7 minutos de irradiación de microondas.

Además, Arango (2016) afirma que el mayor porcentaje de extracción se obtuvo con tween del 10% (v/v) y relación harina-solvente de 1% (w/v) logrando una extracción de 70.86 %, en un tiempo de 210 segundos.

### **d) Extracción por ultrasonido:**

En la investigación de Lamdin et al. (2020), alcanzaron un rendimiento de curcumina de 3.9 g/ 100 g de cúrcuma con ultrasonido, mientras que Torres (2014) obtuvo un 26 % de rendimiento de curcumina utilizando extracción asistida por ultrasonido



combinada con cromatografía de columna.

Así mismo, para Wakte et al. (2011) el extracto de etanol mostró 6.57–32.85% contenido de curcumina después del período de exposición a la radiación ultrasónica de 1 a 5 min. El extracto de acetona mostró un aumento en la concentración de curcumina, de 8 a 40%, después del período de irradiación ultrasónica de 1 a 5 min. Por otra parte, cuando se usó etanol como remojo y extracción solvente, la exposición a la radiación ultrasónica de 1 a 5 minutos resultó en 17.55–61.90% de extracción de curcumina, que demostró ser constante incluso después de un período de irradiación de 7 minutos. Después de la irradiación ultrasónica durante un período de 1 a 5 min, el polvo empapado en agua se extrajo con etanol y acetona. El extracto de etanol y acetona mostró 19.70–66.66 % y 22.15–71.42 % de contenido de curcumina, respectivamente.

Chica et al. (2022) obtuvieron un rendimiento de 20.303 %, lo que equivale a un contenido de curcumina de 0.062 mg/mg de oleorresina y que a su vez representa un 1.259% de curcumina y por su parte Ponce et al. (2020)

realizó varias extracciones con ultrasonido y logró como mayor rendimiento de extracción de curcumina un 27.20 %.

**e) Extracción con fluidos supercríticos:** Martínez et al. (2016) obtuvieron un rendimiento de curcumina de 56.4 %, utilizando un proceso de 2 pasos, donde se realizó primero la extracción con CO<sub>2</sub> supercrítico seguido de extracción con etanol, lo que representa una extracción de 3.9 g de curcumina/100 g de cúrcuma, además Kiamahalleh et al. (2016) consiguieron un 76% de rendimiento de curcumina.

De igual forma, Wakte et al. (2011) lograron un 69.37% de rendimiento de curcumina luego de 300 min de extracción, Priyanka (2018) obtuvo un rendimiento de aceite de cúrcuma que varió entre el 2 al 5.3% en peso y Arango (2016) logró un porcentaje máximo de extracción de curcumina de 65.3%, para las condiciones de 90 °C, presión de 500 bar, flujo de 200 g/min, 10% de etanol como cosolvente, durante 120 min de operación.

Por su parte, Marsin & Ahmad (1993) lograron separar un 5.34% de contenido de curcumina, bajo las

condiciones de 280 bar y metanol al 20 %. Esto representa el 95.7% de la curcumina que podría extraerse con metanol.

Finalmente, Momenkiaei & Raofie (2021) obtuvieron un contenido de curcumina de 4.53 %, 6.84 % y 6.89 % para el polvo vegetal, el extracto y las nanopartículas, respectivamente.

- **Ventajas y desventajas**

**a) Extracción por remojo:** El método por remojo es de uso frecuente debido a sus características de fácil puesta en práctica y replicación. Sin embargo, a escala industrial este método se complica por la alta demanda de colorantes, ya que implica grandes volúmenes de solventes y largos tiempos de extracción. Además, este método no proporciona un efectivo rendimiento del color extraído a diferencia de los métodos modernos (Alarcón & Lucas, 2020)

En la extracción convencional o por remojo de curcumina se emplean solventes orgánicos tóxicos como metanol, acetato de etilo y acetona como disolventes; se necesitan varios días de reflujo o agitación, obteniéndose en la fase orgánica solo un 4 % de curcuminoides sin

purificar, mientras que por los métodos modernos se logran rendimientos mayores (Torres, 2014).

**b) Método soxhlet:** La extracción con soxhlet es una técnica bien establecida. Entre sus ventajas, por encima de otros nuevos métodos como la extracción con ultrasonido, la extracción con microondas y la extracción con fluidos supercríticos se encuentra el amplio número de aplicaciones industriales, buena reproducibilidad y eficacia, y menor manipulación del extracto. Sin embargo, comparada con CO<sub>2</sub> super crítico, el método soxhlet es una técnica anticuada y consumidora de tiempo y de solvente (Velasco et al., 2007).

Los inconvenientes del proceso de extracción soxhlet son los altos requerimientos de tiempo, además son demasiado laboriosos y utilizan una gran cantidad de disolventes orgánicos. Además, esta idea de utilizar disolventes orgánicos podría ir seguida de impactos indeseables sobre el medio ambiente y los componentes de los alimentos (Kiamahalleh et al., 2016).

**c) Extracción por microondas:** Entre las ventajas de la extracción

por microondas podemos encontrar principalmente las siguientes (Arango, 2016):

- ✓ Disminuye el tiempo de extracción, con el consecuente ahorro de energía.
- ✓ El uso de menos solventes o disolventes más seguros, lo que reduce la generación de residuos evitando la contaminación.
- ✓ Disminuye los costos con el aumento de la productividad.
- ✓ Prevé la posibilidad de acoplamiento en línea con otros pasos analíticos.
- ✓ Permite la automatización parcial o total del proceso, reduce el tiempo de análisis, disminuye la pérdida de analito, y aumenta la seguridad personal.
- ✓ Así mismo, la reducción de tiempo de extracción con la tecnología de microondas asistida, permite reducir los efectos adversos: oxidación, deterioración de color, sabor y textura, sin modificar en mayor medida sus propiedades (Espinoza et al., 2016).

**d) Extracción por ultrasonido:**

Lamdin et al. (2020) concluyeron que el método de ultrasonido de alta intensidad (HIUS) es más eficiente

para recuperar la curcumina de la cúrcuma, con un tiempo de procesamiento más corto, por una manera no térmica, utilizando temperatura suave, lo que resultó en el mantenimiento de las características de color del colorante. Aunque el rendimiento y el contenido de curcumina obtenido por el proceso HIUS fueron los mismos obtenidos por extracción a baja presión (PLE), el tiempo de procesamiento del HIUS fue 12 veces más corto que el del PLE.

De la misma manera, Torres (2014), concluyó que el método de extracción por ultrasonido resultó ser más eficiente que los reportados, porque permite ahorrar tiempo, emplear disolventes accesibles, disminuir el consumo energético de los largos tiempos de reflujos o agitación, es menos agresivo para el medioambiente y permite disponer de un producto natural de gran interés farmacológico y sintético.

Por su parte, Esparza (2021) afirma que la tecnología de ultrasonido utilizada como pretratamiento de secado tiene la ventaja de disminuir el tiempo de procesamiento. Además, en procesos de extracción, el ultrasonido mejora los

rendimientos y reduce la emisión de CO<sub>2</sub>.

**e) Fluidos supercríticos:** Según Velasco et al. (2007) y Domínguez & Parzanese (s.f.), las principales ventajas de los fluidos supercríticos son:

1. Poseen alto coeficiente de difusión y viscosidad más baja que los líquidos.
2. Ausencia de tensión superficial, la cual aumenta la operación de extracción dada la rápida penetración de estos al interior de los poros de la matriz heterogénea.
3. La selectividad durante la extracción puede ser manipulada dada la variación de las diferentes condiciones de operación (temperatura y presión), afectando la solubilidad de varios componentes en el fluido supercrítico.
4. La extracción con fluidos supercríticos no deja residuos químicos.
5. La extracción con CO<sub>2</sub> supercrítico permite su fácil recuperación por procesos de reciclaje.
6. La extracción se realiza sin cambios de fase.

7. Se usan temperaturas medias, lo que evita la descomposición de los compuestos.

Por otra parte, Roman et al. (2016) y Domínguez & Parzanese (s.f.), mencionan que algunas limitaciones de la extracción por fluidos supercríticos son las siguientes:

1. El equilibrio de fases entre soluto y solvente puede ser complicado.
2. Cuando se emplean cosolventes con el propósito de alterar la polaridad del fluido, estos pueden quedar en el extracto, requiriendo una operación de separación posterior.
3. Las altas presiones dificultan la adición continua de sólidos al extracto.
4. Costos de operación elevados, por lo que la inversión inicial es alta.
5. Costos de mantenimiento elevados.
6. Baja disponibilidad de equipos con esta tecnología.

A continuación, en la tabla 1 se resumen los métodos revisados.

**Tabla 1.**  
 Comparación entre los métodos estudiados.

Método	Autores	Condiciones de operación	Rendimientos o contenido de curcumina
Remojo	(Paulucci et al., 2013)	T=45°C, Etanol, 400 rpm, t=1 semana	54%
	(Van Nong et al., 2016)	T=80°C, Etanol, 30 rpm, t=12 horas	62.6% (mayor rendimiento)
	(Gokdemir et al., 2020)	t= 10 a 60 min, T=25 a 55°C, nuevo solvente	2.94% (mayor rendimiento)
Soxhlet	(Wakte et al., 2011)	t= 8 horas, acetona	2.1 g/100 g cúrcuma
	(Arango, 2016)	t=8 horas, etanol	10.8 mg/100 g cúrcuma
	(Pawar et al., 2018)	t=15 horas, hexano	76.82% en polvo crudo 99.45% en polvo recristalizado
Microondas	(Wakte et al., 2011)	t= 1, 3, 5 y 7 min, P=140W, 400 rpm 1) Acetona, 60W 2) Etanol, 90W t= 24 horas, T=20°C 1) 1) Etanol 2) 2) Agua-etanol	68.57% 48.57% 57.145% 67.01%
	(Van Nong et al., 2016)	1) t= 1, 3, 5 min 200W 2) etanol, 800W, t= 2, 4, 6min	56.1% (mayor rendimiento)
	(Arango, 2016)	700W, 2450MHz, tween 20, t= 30 y 210s	70.86%
	(Wakte et al., 2011)	1) Etanol o acetona,	1)Etanol: 32.85% Acetona: 40%

<b>Ultrasonido</b>		t=5min, T=21°C 2) Agua o etanol, t=24 horas, T= 20°C	2) Agua: 71.42% Etanol: 66.66%
	(Torres, 2014)	Metanol	26%
	(Lamdin et al., 2020)	T=30°C, t=5min, etanol	3.9g/100g cúrcuma
	(Ponce et al., 2020)	P=30 y 50W, etanol	27.20% (mayor rendimiento)
	(Chica et al., 2022)	Pretratamiento en microondas: P=140W, t=1min Ultrasonido: t=10min, T=40°C	20.303%= 0.062 mg/mg cúrcuma= 1.259% de curcumina
<b>Fluidos supercríticos</b>	(Marsin & Ahmad, 1993)	P=250 y 280bares, CO <sub>2</sub> y metanol	95.7%= 5.34%en peso de curcumina
	(Wakte et al., 2011)	P=30MPA, 50°C, t=300min, CO <sub>2</sub>	69.37%
<b>Fluidos supercríticos</b>	(Martinez et al., 2016)	T=60°C, P=400bar, CO <sub>2</sub> -etanol	56.4%= 3.9g/100g de cúrcuma
	(Kiamahalleh et al., 2016)	P=10 bares, T=140°C, t=140 min	76%
	(Arango, 2016)	P=400-500bares, T070 a 90°C, t=120 min, CO <sub>2</sub> -etanol	65.3%
	(Priyanka, 2018)	P=20-40MPA, T=40- 60°C, CO <sub>2</sub> -etanol	2 al 5.2% en peso de curcumina
	(Nagavekar & Singhal, 2019)	P=350 bares, T=65°C, t=150 min, CO <sub>2</sub> -etanol (óptimas)	1667.83µg/g
	(Momenkiaei & Raofie, 2021)	T=40°C, P=34MPa, t=30-70min	6.89% en peso de curcumina (mayor rendimiento)

### 3. Conclusión

En la actualidad, los métodos usados para la extracción de curcumina son los tradicionales, entre los que están el remojo o maceración y el método soxhlet, y los modernos como son la extracción por microondas, por ultrasonido y por fluidos supercríticos.

Al comparar los métodos se corroboró que los métodos convencionales de extracción de curcumina (remojo y soxhlet) son menos ecológicos al usar solventes tóxicos y al implicar mayores tiempos de extracción y por ende mayores gastos energéticos, además que arrojan rendimientos menores; por su parte los métodos modernos son más eficientes al permitir mayores rendimientos, y son más amigables con el medio ambiente, ya que requieren menores tiempos y usan solventes inocuos.

El método más eficaz y conveniente para la extracción de curcumina es la extracción con CO<sub>2</sub> supercrítico, ya que es la que ofrece mejores rendimientos de extracción, aparte de usar un solvente con innumerables características favorables tanto económica como ecológicamente.

### Bibliografía

- Alarcón, G., & Lucas, J. (2020). Extracción de colorantes naturales a partir de plantas endémicas del Perú y su aprovechamiento en la industria textil, revisión bibliográfica. Perú. Recuperado el 19 de Agosto de 2021, de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/53155>
- Arango, A. (2016). Desarrollo de un proceso de extracción limpia de colorantes a base de curcumina. Medellín, Antioquia, Colombia. Recuperado el 08 de Julio de 2021, de <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2844/Tesis%20Doctorado%20en%20Ingenier%c3%ada-%c3%81LVARO%20ARANGO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chica, V., Martínez, H., & Pérez, A. (2022). Obtención de nanoemulsiones de cúrcuma longa, y su aplicación en bebida acuosa. 20. (R. B. y, Ed.) Recuperado el 02 de Agosto de 2022, de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v20n1/1692-3561-bsaa-20-01-136.pdf>
- Deossa, L., & Ortiz, A. (2010). Prefactibilidad del proyecto: diseño de una planta de extracción a escala de colorantes naturales.

- Antioquia, Colombia. Recuperado el 15 de Julio de 2021, de <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2989>
- Domínguez, L., & Parzanese, M. (s.f.). *Tecnologías para la Industria Alimentaria, Fluidos Supercríticos*. Argentina. Obtenido de [https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha\\_01\\_Fluidos.pdf](https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_01_Fluidos.pdf)
- Esparza, I. (2021). *Cúrcuma (Cúrcuma longa): una revisión bibliográfica del procesamiento, propiedades funcionales y capacidad antimicrobiana*. Santiago de Chile, Chile. Recuperado el 2 de Agosto de 2022, de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181556>
- Espinoza, H., García, E., & Gastélum, E. (2016). *Los compuestos bioactivos y tecnologías de extracción*. Recuperado el 03 de agosto de 2022, de [https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion\\_5a43b85320f15.pdf#page=126](https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b85320f15.pdf#page=126)
- Gokdemir, B., Baylan, N., & Cehreli, S. (2020). *Aplicación de un novedoso líquido iónico como verde alternativo Disolvente para la Extracción de Curcumina a partir de Cúrcuma con Metodología de Superficie de Respuesta: Determinación y Estudio de Optimización*. Estambul, Turquía. Recuperado el 3 de agosto de 2022, de <https://scihub.se/https://doi.org/10.1080/00032719.2020.1730394>
- González, J., Sanz, D., Claramunt, R. M., Lavandera, J. L., & Alkorta, I. (2016). *Curcumina y curcuminoides: química, estudios estructurales y propiedades biológicas*. España. Recuperado el 19 de agosto de 2021, de <https://www.researchgate.net/publication/298834950>
- Jiang, T., Ghosh, R., & Charcosset, C. (2021). *Extracción, purificación y aplicaciones de curcumina a partir de materiales vegetales: una revisión exhaustiva*. Francia. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.015>
- Kiamahalleh, M. V., Darzi, G. N., Rahimnejad, M., Moghadamnia, A. A., & Valizadeh Kiamahalleh, M. M. (2016). *High performance curcumin subcritical water extraction*. Adelaide, Australia. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2016.04.021>
- Lamdin, M., Strieder, M., Vardanega, R., Silva, E., & Meireles, A. (2020). *Biorrefinería de cúrcuma (Curcuma longa L.) utilizando Tecnologías emergentes limpias y no térmicas: una actualización sobre el paso de recuperación de curcumina*.



- <https://doi.org/10.1039/c9ra08265d>
- Lee, W.-J., Suleiman, N., Hadzuin, N., Hadzir, N., & Chong, G.-H. (2019). Supercritical fluids for the extraction of oleoresins and plant phenolics. Malasia. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817388-6.00012-X>
- Lesá, R., Lu, T., Prosapio, V., McConville, C., Leeke, G., & Ingram, A. (2019). Coprecipitación de curcumina / PVP con propiedades de disolución mejoradas mediante el proceso antidisolvente supercrítico. Reino Unido. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.01.005>
- Llano, S. (2016). Establecimiento de los protocolos de poscosecha para la obtención de una harina de Cúrcuma Longa con estándares de calidad internacional. Caldas, Antioquia, Colombia. Recuperado el 03 de agosto de 2022, de [http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1688/1/Establecimiento\\_protocolos\\_poscosecha\\_harina\\_CurcumaLonga.pdf](http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1688/1/Establecimiento_protocolos_poscosecha_harina_CurcumaLonga.pdf)
- Lopez, O., & Moya, E. (2021). Incremento de la solubilidad de la curcumina extraída de la *Curcuma Longa L.*, con mecanismos físicos y mecánicos. Ambato, Ecuador. Recuperado el 03 de Agosto de 2022, de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/33205>
- López, P. (2017). Química e industria de la curcumina. Lima, Perú. Recuperado el 15 de Julio de 2021.
- Marsin, M., & Ahmad, U. (1993). Aplicación de la extracción de fluidos supercríticos y la cromatografía al análisis de la cúrcuma. Malasia, Reino Unido. Recuperado el 2021
- Martinez, H., Paula, J., Kayano, A., Queiroga, C., Magalhaes, P., Costa, F., & Cabral, F. (2016). Composición y actividad antipalúdica de extractos de *Curcuma longa L.* obtenidos mediante una combinación de procesos de extracción utilizando CO<sub>2</sub> supercrítico, etanol y agua como disolventes. Palmira, Colombia. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.08.017>
- Momenkiaei, F., & Raofie, F. (2021). Preparación de nanopartículas de extracto de *Curcuma Longa L.* mediante expansión de solución supercrítica. Teham, Irán. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2018.11.010>
- Montaño, C., & Montes, L. (2004). Evaluación sistémica de las potencialidades empresariales a partir de la cúrcuma longa en el departamento de Caldas. Colombia. Recuperado el 08

- de Octubre de 2021, de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2722>
- Morgan, E. (2000). Supercritical Fluid Extraction. Reino Unido. Obtenido de [https://www.thevespiary.org/library/Files\\_Uploaded\\_by\\_Users/Sedit/Chemical%20Analysis/Crystalization,%20Purification,%20Separation/Encyclopedia%20of%20Separation%20Science/Level%20III%20-%20Practical%20Applications/NATURAL%20PRODUCTS%20-%20Supercritical%20](https://www.thevespiary.org/library/Files_Uploaded_by_Users/Sedit/Chemical%20Analysis/Crystalization,%20Purification,%20Separation/Encyclopedia%20of%20Separation%20Science/Level%20III%20-%20Practical%20Applications/NATURAL%20PRODUCTS%20-%20Supercritical%20)
- Nagavekar, N., & Singhal, R. (2019). Extracción de fluido supercrítico de oleorresina de *Curcuma longa* y *Curcuma amada*: Optimización de las condiciones de extracción, perfilado de extractos y comparación de bioactividades. Mumbai, India. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.061>
- Nandiyanto, A., W. A., Rusli, A., Purnamasari, A., Abdullah, W. A., & Hurriyati, R. (2017). Extraction of Curcumin Pigment from Indonesian Local Turmeric with Its Infrared Spectra and Thermal Decomposition Properties. Indonesia. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/180/1/012136>
- Paulucci, V., Couto, R., Teixeira, C., & Freitas, L. (2013). Optimización de la extracción de curcumina a partir de rizomas de *Curcuma longa*. Sao Paulo, Brasil. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2012005000117>
- Pawar, H., Gavasane, A., & Choudhar, P. (2018). Un enfoque novedoso y sencillo para la extracción y aislamiento de. India. <https://doi.org/10.4172/2329-6836.1000300>
- Ponce, J., Taype, G., & Huamatinco, M. (2020). Efecto del ultrasonido y tamaño de partículas en la extracción de la oleorresina a partir de cúrcuma (*Curcuma longa* L.). Lima, Perú. Recuperado el 03 de agosto de 2022, de <https://revistas.unjfsc.edu.pe/index.php/PeruvianAgriculturaIResearch/article/view/622>
- Popuri, A., & Pagala, B. (2013). Extraction of curcumin from turmeric roots. India. Obtenido de <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=54246744d5a3f2ab2f8b469e&assetKey=AS:273559857893418@1442233160841>
- Priyanka, K. (2018). Influencia de los parámetros operativos en la extracción con fluido supercrítico de aceite esencial de raíz de cúrcuma. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.052>
- Priyanka, S., Sayantanmi, D., Jeyan, A., & Anandharamakrishnan,

- C. (2021). Avances en la extracción supercrítica de nutracéuticos a partir de hierbas y especias. India. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/345384273\\_Progress\\_in\\_Supercritical\\_Extraction\\_of\\_Nutraceuticals\\_From\\_Herbs\\_and\\_Spices](https://www.researchgate.net/publication/345384273_Progress_in_Supercritical_Extraction_of_Nutraceuticals_From_Herbs_and_Spices)
- Rafecas, M., Cámara, M., Daschner, A., Giner, R., Morales, F., Portillo, M., . . . Talens, P. (2020). Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) sobre el riesgo asociado al consumo de complementos alimenticios que contienen curcumina como ingrediente. España. Recuperado el 08 de Octubre de 2021, de [https://www.aesan.gob.es/AE\\_COSAN/docs/documentos/seguridad\\_alimentaria/evaluacion\\_riesgos/informes\\_comite/URCUMINA.pdf](https://www.aesan.gob.es/AE_COSAN/docs/documentos/seguridad_alimentaria/evaluacion_riesgos/informes_comite/URCUMINA.pdf)
- Roman, M. R., Cardona, L., Muñoz, L., Gomez, D., Passaro, C., & Quiceno, J. (2016). Guía de extracción por fluidos supercriticos: Fundamentos y aplicaciones. Rionegro, Antioquia, Colombia. Recuperado el 8 de Julio de 2021, de [https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/4698/guia\\_extraccion\\_fluidos\\_supercriticos.pdf;jsessionid=095E7EBF18727C38A63530330A3E5777?sequence=1](https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/4698/guia_extraccion_fluidos_supercriticos.pdf;jsessionid=095E7EBF18727C38A63530330A3E5777?sequence=1)
- Sanchez, A. (2017). Desarrollo de nuevas estrategias de extracción para la obtención de compuestos bioactivos. Madrid, España. Recuperado el 08 de Octubre de 2021, de <https://repositorio.uam.es/handle/10486/679026>
- Santana, A., Zobot, G., Osorio, J., Johner, J., Coelho, A., Schmiele, M., . . . M, M. (2017). Recuperación de almidón de residuos de cúrcuma mediante tecnología supercrítica. Sao Paulo, Brasil. Recuperado el 16 de agosto de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877417303011>
- Santos, D., Santana, Á., Meireles, A., Gomes, T. D., Abarelli, J., Bakatselou, A., . . . Maréchal, F. (2020). Supercritical fluids biorefining. Fundamentals, Applications and perspectives. Suiza. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47055-5>
- Torres, E. G. (2014). Empleo de ultrasonido en la extracción de curcumina a partir de su fuente natural. Recuperado el 20 de Julio de 2021, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid)
- Van Nong, H., Hung, L., Thang, P., Chinh, V., Vu, L., Dung, P., . . . Nga, P. (2016). Fabricación y

- vibración, caracterización de curcumina extraída de rizomas de cúrcuma (*Curcuma longa*) del norte de Vietnam. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2812-2>
- Velasco, R., Villada, H., & Carrera, J. (2007). Aplicaciones de los fluidos supercríticos en la agroindustria. Colombia. Recuperado el 29 de Julio de 2021, de [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642007000100009&script=sci\\_arttext#:~:text=Algunas%20aplicaciones%20comerciales%20de%20la,de%20alcaloides%2C%20aromas%20y%20especias.](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642007000100009&script=sci_arttext#:~:text=Algunas%20aplicaciones%20comerciales%20de%20la,de%20alcaloides%2C%20aromas%20y%20especias.)
- Velasquez, A. M. (2008). La tecnología de fluidos supercríticos, un proceso limpio para el sector industrial. Recuperado el 27 de Julio de 2021, de [https://www.researchgate.net/publication/277208201\\_La\\_tecnologia\\_de\\_fluidos\\_supercriticos\\_un\\_proceso\\_limpio\\_para\\_el\\_sector\\_industrial](https://www.researchgate.net/publication/277208201_La_tecnologia_de_fluidos_supercriticos_un_proceso_limpio_para_el_sector_industrial)
- Wakte, P. S., Sachin, B. S., Patil, A. A., Mohato, D. M., Band, T. H., & Shinde, D. B. (2011). Optimization of microwave, ultra-sonic and supercritical carbon dioxide assisted extraction techniques for curcumin from *Curcuma longa*. Separation and Purification Technology, India. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.03.010>