

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



INSTITUTO DE INGENIERÍA
Universidad Autónoma de Baja California
EXCELENCIA E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA

Disertación de artículo

Sistema flexible y modular para la extracción de aceites esenciales de residuos cítricos

Presenta:

Edson Eliseo Armenta Gálvez

Director de tesis:

Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega

Codirector de tesis:

Dr. José Ramón Ayala Bautista

Mexicali, Baja California, junio de 2023

Abstract

Essential oils are widely used in medicine, agriculture, and perfumery. Although there are available systems in the market for domestic essential oil extraction, replacing the entire equipment in case of repair or malfunction can be costly. To address this problem, a pilot-scale essential oil extractor system was developed that operates through hydrodistillation. This system was used to process various citrus wastes such as green and yellow lemons, oranges, grapefruits, and *Eucalyptus globulus*. A factorial design was performed, and the best conditions were used to extract other biomass residues. GC-MS analysis revealed that the primary compound for orange, grapefruit, and green lemon essential oils is D-Limonene, with 95.4%, 95.5%, and 49.2%, respectively. For yellow lemon, the primary compound appeared to be D-limonene with 73.0% content, though the GC/MS data were less clear, and for eucalyptus, it is eucalyptol with 71.0%. The estimated production costs were 0.26 \$/mL, 3.96 \$/mL, 7.10 \$/mL, 6.97 \$/mL, and 10.23 \$/mL for orange, grapefruit, green lemon, yellow lemon, and eucalyptus essential oils, respectively. Therefore, the developed system is a competitive option for pilot-scale essential oil extraction.

Resumen

Los aceites esenciales se utilizan en medicina, agricultura y perfumería. Aunque en el mercado existen sistemas para la extracción doméstica de aceites esenciales, sustituir todo el equipo en caso de reparación o mal funcionamiento puede resultar costoso. Para resolver este problema, se desarrolló un sistema extractor de aceite esencial a escala piloto que funciona mediante hidrodestilación. Este sistema se utilizó para procesar diversos residuos de cítricos, como limones verdes y amarillos, naranjas, toronja y *Eucalyptus globulus*. Se realizó un diseño factorial y se utilizaron las mejores condiciones para extraer otros residuos de biomasa. El análisis GC-MS reveló que el compuesto principal de los aceites esenciales de naranja, toronja y limón verde es el D-Limoneno, con un 95.4%, 95.5% y 49.2%, respectivamente. En el caso del limón amarillo, el compuesto principal parece ser el D-limoneno, con un contenido del 73.0%, aunque los datos GC/MS son menos claros, y en el caso del eucalipto, es el eucaliptol, con un 71.0%. Los costos de producción estimados fueron de 0.26 \$/mL, 3.96 \$/mL, 7.10 \$/mL, 6.97 \$/mL, and 10.23 \$/mL para los aceites esenciales de naranja, toronja, limón verde, limón

amarillo y eucalipto, respectivamente. Por lo tanto, el sistema desarrollado es una opción competitiva para la extracción de aceites esenciales a escala piloto.

Introducción

En las últimas décadas los residuos agroindustriales son motivo de diversos estudios, debido a que gran parte de sus componentes pueden ser utilizados como materia prima para la generación de productos de alto valor agregado (Mejías et. al, 2016). El volumen de residuos generados aumenta a medida que la producción agroindustrial se incrementa.

La naranja es el cítrico más cultivado a nivel mundial, con una producción anual de aproximadamente 76 millones de toneladas. Brasil, India, China, México y Estados Unidos son los principales productores de este cítrico, según la FAO.

En México, la naranja es el cítrico más consumido, según datos del INEGI. En 2021, México ocupó el cuarto lugar a nivel mundial en la producción de naranjas, con 4.6 millones de toneladas (FAO, 2021). Además, el país produjo 2,983,802.19 toneladas de limones y limas, ocupando el segundo lugar a nivel mundial en dicho cultivo (FAO, 2021).

Baja California no se encuentra entre los principales estados productores de cítricos en México. En 2021, los cítricos cultivados en este estado fueron naranjas, limones y toronjas, con una producción de 3,050 toneladas, 2,007 toneladas y 177 toneladas, respectivamente (SIAP, 2022).

Los principales componentes de los residuos secos de la cáscara de los cítricos incluyen azúcares (23%), celulosa (22%), pectina (25%), hemicelulosa (11%), flavonoides (4.5%) y hasta un 4% de aceite esencial (AE) (Brahmi et al, 2021). Estos residuos agroindustriales incluyen flavedos, albedos, segmentos de membrana y semillas.

Las cáscaras de cítricos tienen un potencial importante como materias primas para la fabricación de productos comerciales, especialmente los AE de cítricos como mandarina, limón, naranja y lima, que poseen una demanda alta, principalmente en la industria de alimentos, farmacéutica y de cosméticos (Matthaus et al, 2012).

Los AE son sustancias aromáticas que se encuentran en casi todas las plantas y se distribuyen en varios segmentos de la planta, como cáscaras, cortezas, hojas, semillas, raíces, tallos, flores y frutos (Aziz et al, 2018). Los AE son lipofílicos y solubles en solventes orgánicos, debido a su naturaleza hidrofóbica y su densidad menor que la del agua. Los AE son componentes heterogéneos de terpenos, sesquiterpenos, ácidos, ésteres, fenoles, lactonas (Aziz et al., 2018). En la Figura 1 se muestra la localización del AE en una matriz vegetal (cáscara de cítricos), donde se observa que las glándulas de AE son estructuras esféricas justo debajo de la epidermis y, en particular, en flavedo (Nakamura et. al, 2017).

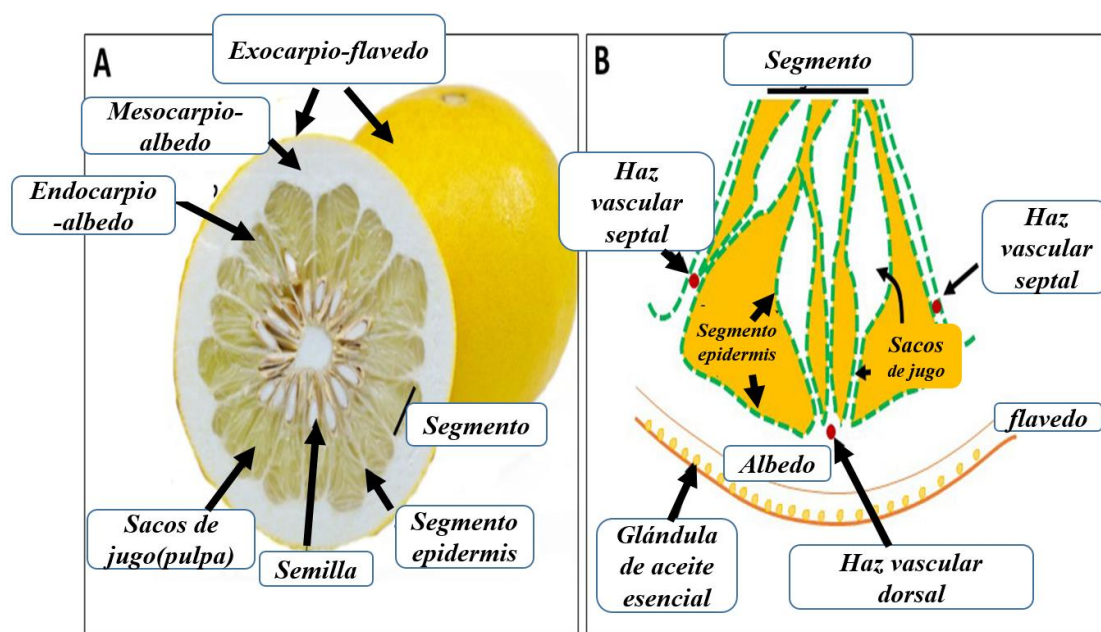


Figura 1. Morfología de frutos cítricos. Corte transversal del fruto (A) y representación esquemática de un segmento, incluidos los tejidos de la piel (B). Adaptado de Nakamura et. al, 2017.

Las plantas se han utilizado en gran medida en medicina, agricultura y perfumes a lo largo de la historia, pero en los últimos años el interés por los AE ha aumentado significativamente, gracias a sus propiedades en donde destacan aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, además, de poseer actividades antioxidantes y biocidas (Maes et. al, 2019).

Los AE se sintetizan en plantas aromáticas como metabolitos secundarios, y están compuestos principalmente de terpenos, pero también contienen otros compuestos químicos. La composición química de los AE es muy compleja y consiste en una mezcla de isoprenoides (monoterpenos y sesquiterpenos) como se muestra en la Figura 2.

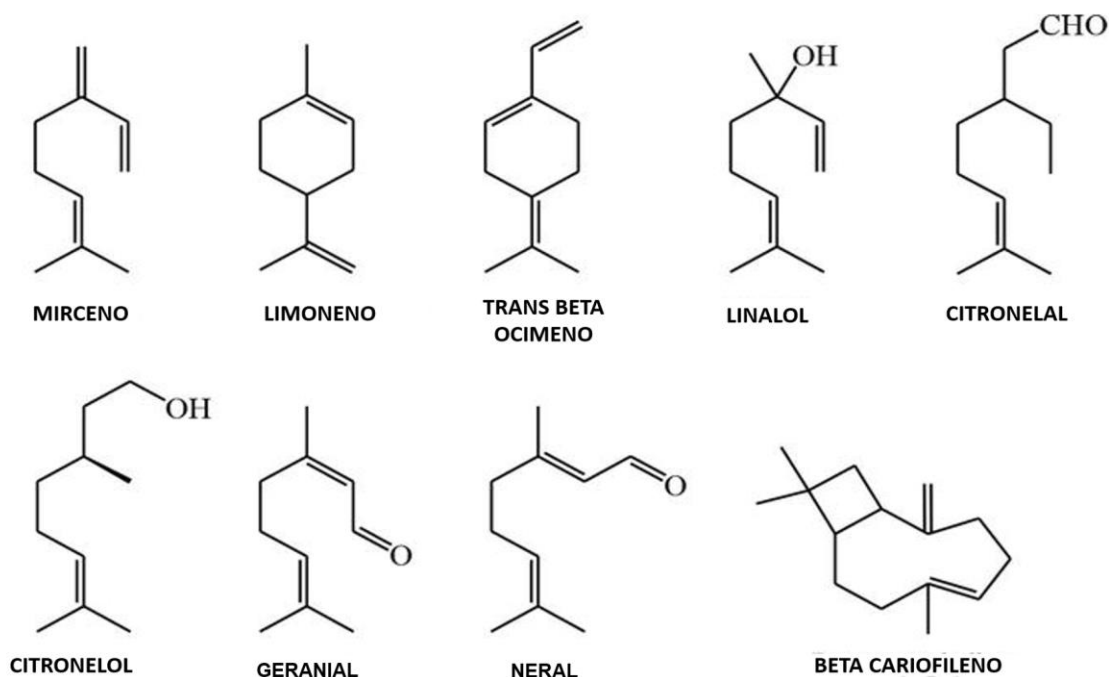
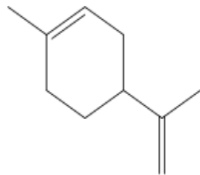
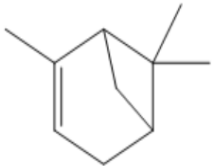
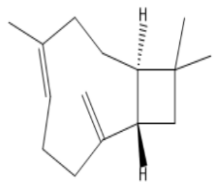
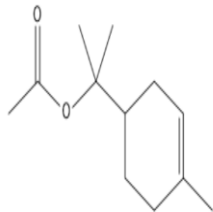
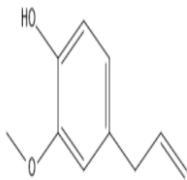


Figura 2. Estructuras químicas de algunos compuestos importantes de los aceites esenciales de cítricos.

La composición de los AE varía notablemente según la variedad, la temporada y la ubicación geográfica, así como la etapa de maduración de la fruta. Los AE contienen una amplia variedad de compuestos, que van de 20 a 60 compuestos. De estos, los compuestos volátiles componen el 85%-99. Los componentes principales son los monoterpenos, que constan de dos unidades de isopreno (C_5H_8) y representan alrededor del 97% de los AE, mientras que los alcoholes, aldehídos y ésteres representan del 1.8% al 2.2%. La Tabla 1 muestra diferentes materiales vegetales con la molécula más representativa de su AE.

Table 1. Vegetal materials with EO of interest.

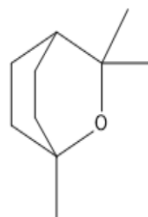
Main source	Compound	Formula	Chemical specie	Chemical structure	Composition (%)	Reference
Citrus peel	Limonene	C ₁₀ H ₁₆	Hydrocarbon monoterpene		74-95 %	Bourgou et al., 2012
Rosemary	α-pinene	C ₁₀ H ₁₆	Hydrocarbon monoterpene		25.33%	Bulbul et al., 2012
Ginger	β-caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	Sesquiterpene hydrocarbon		13%	Noshirvani et al., 2017
Laurel	α-terpinyl acetate	C ₁₀ H ₁₆	Hydrocarbon monoterpene		22.60%	Stefanova et al., 2020
Clove	Eugenol	C ₁₀ H ₁₆ O	Oxygenated monoterpene		89%	Cortés Rojas et al., 2014

Eucalyptus

1,8 cineole

$C_{10}H_{18}O$

Hydrocarbon
monoterpene



49-84%

Sebei et al.,
2015

El limoneno es la molécula más representativa y abundante en los aceites esenciales cítricos (AEC). La concentración de limoneno depende de la variedad de cítricos, la región de sembradío y del método de extracción y va desde 32% a 98% en p/p (Negro et al., 2016). Esta molécula actúa como disolvente, insecticida, antioxidante, antimicrobiano y tiene aplicaciones médicas, alimentarias y cosméticas, además, de ser el olor característico del limón (John et. al, 2017).

Importación y exportación de aceites esenciales en México en 2015

Con información del INEGI en su publicación de la Balanza comercial de mercancías de México (BCMM), durante el periodo de enero-junio de 2015, se demuestra que en México hubo exportación de 185.8 millones de dólares contra una importación de 251.8 millones de dólares de AE y resinoides. Esto indica que el mercado en México busca AE de otros países con la necesidad de encontrar productos con mayor calidad, un mejor precio y/o una mejor relación calidad/precio. Estos datos resaltan que México es un país consumidor de AE y existe una oportunidad para producir internamente estos productos y así satisfacer las necesidades mencionadas anteriormente del mercado mexicano, además, de aumentar las exportaciones.

En 2021, los principales exportadores de AE fueron Estados Unidos de América, India Francia, China y Brasil. Entre los principales países importadores de AE destacan Estados Unidos de América, Francia, China, Alemania y Holanda. En este mismo año, Brasil, Estados Unidos de América, Alemania México y Holanda aparecen como los mayores exportadores de aceite esencial de naranja (AEN). Los países con más importaciones de AEN fueron Estados Unidos de América, Holanda, Alemania, China e Reino Unido (OEC, 2023).

Métodos de extracción de aceite esencial

Destilación por arrastre de vapor

Cuando se utiliza vapor saturado o sobrecalentado, generado fuera del equipo principal, ya sea por una caldera, una olla de presión o un matraz adecuado, esta técnica recibe el nombre de destilación por arrastre con vapor tal como se muestra en la Figura 3. Se lleva a cabo la vaporización selectiva del componente volátil de una mezcla formada por este y otros no volátiles. Lo anterior se logra por medio de la inyección de vapor de agua directamente en el seno de la mezcla denominándose vapor de arrastre. En realidad, su función no es la de arrastrar el componente volátil, sino condensarse formando otra fase inmiscible que cederá su calor latente a la mezcla a destilar para lograr su evaporación (Moreno et. al, 2010).

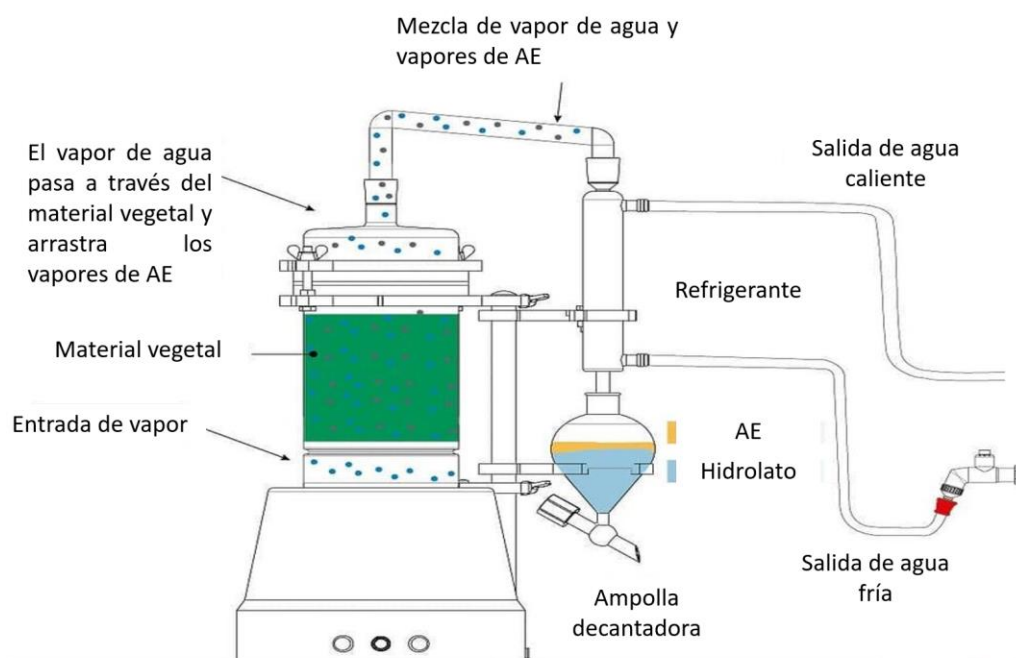


Figura 3. Diagrama del proceso del método de destilación por arrastre de vapor. Adaptado de Pornpunyapat et. al. (2011).

Extracción con disolventes

La muestra seca y molida se pone en contacto con disolventes orgánicos tales como alcohol, acetona, cloroformo, entre otros. Estos disolventes solubilizan y extraen otras sustancias como grasas y ceras, obteniéndose al final una oleorresina o un extracto impuro, el proceso se ilustra en la Figura 4. Se utiliza a escala de laboratorio porque a

nivel industrial resulta costoso por el valor comercial de los disolventes, además, por el riesgo de explosión e incendio característico de muchos disolventes orgánicos volátiles y porque se obtienen esencias contaminadas con otras sustancias, esto conlleva a un pos-tratamiento de purificación (Tesfaye, B. y Tefera, T., 2017).



Figura 4. Diagrama del proceso del método de extracción por solvente. Adaptado de Rassem, H. H., Nour, A. H., y Yunus, R. M. (2016).

Hidrodestilación

La extracción de AE por hidrodestilación se realiza en las mismas condiciones que la destilación al vapor. La única diferencia es que en este caso el material vegetal se coloca en el matraz que contiene agua y la unidad se lleva a ebullición. La mezcla de vapor de agua y AE producida en el matraz pasa al condensador, donde cambia de fase como se observa en la Figura 5. El AE se recupera después de la decantación.

El principio de extracción se basa en la destilación azeotrópica. A presión atmosférica y durante el proceso de extracción, el agua y las moléculas de AE forman una mezcla heterogénea que alcanza su temperatura de ebullición en un punto inferior cercano a los 100 °C. La mezcla de AE/agua se destila como si fuera un solo compuesto. Esto se conoce como co-destilación en presencia de vapores de agua como unidad de disolvente. La ventaja del agua es que es inmisible con la mayoría de las moléculas terpénicas de los AE (Dangkulwanich, M. y Charaslertrangsi, T., 2020).



Figura 5. Diagrama de proceso del método de hidrodestilación. Adaptado de Dangkulwanich, M. y Charaslertrangi, T. (2020).

Extracción por fluidos supercríticos

La extracción por fluidos supercríticos potencializa el poder disolvente de fluidos supercríticos en condiciones por arriba de su temperatura y presión críticas. Es posible obtener extractos libres de disolvente y la extracción es más rápida que con la utilización de disolventes orgánicos convencionales. Estas ventajas son debido a la alta volatilidad de los fluidos supercríticos y a la propiedad de transporte mejoradas como la alta difusividad y la baja viscosidad. Entre las ventajas de la extracción por fluidos supercríticos se encuentran los tiempos de extracción reducidos, mayores rendimientos, selección de sustancias, composición de extractos y el requerimiento de menor energía (Obregon, 2018).

El CO_2 es considerado el disolvente que al estado supercrítico podría decirse es ideal ya que no es tóxico ni inflamable, es económico y posee una temperatura crítica baja. El principio se basa en el uso y reciclaje de fluido en repetidos pasos de compresión/depresión. Al comprimir y calentar, el CO_2 alcanza el estado supercrítico. Pasa a través de la materia prima vegetal. A esto le sigue un paso de depresión: el extracto se dirige a uno o más separadores, donde el CO_2 se descomprime gradualmente, perdiendo así su poder disolvente y así separar el extracto obtenido del fluido. Este último podría convertirse en un gas liberado y luego podría reciclarse

(Asbahani, et. al, 2015). El uso de esta técnica para la extracción de AE se ha incrementado en las últimas dos décadas. El único obstáculo para su implementación es el alto costo de los equipos, la instalación y sus operaciones de mantenimiento (Capuzzo et al., 2013). En la Figura 6 se observa la descripción del proceso.

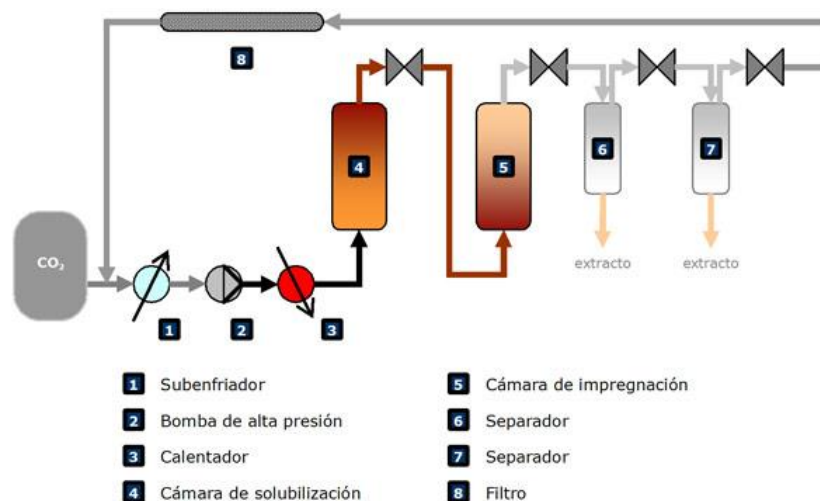


Figura 6. Diagrama del proceso del método de extracción por fluidos supercríticos. Adaptado de Fornari, et. al. (2012).

Extracción asistida por microondas

Se combina el calentamiento por microondas y la destilación por arrastre de vapor o hidrodestilación. Los equipos para llevar a cabo esta técnica se pueden adaptar modificando un horno de microondas convencional, haciendo un orificio en la parte superior que conecte un matraz de fondo plano con un condensador y sellando la conexión con el horno para evitar la fuga de microondas (Bayramoglu et. al, 2008).

El equipo de microondas transfiere energía al disolvente calentado. A diferencia de los métodos convencionales el microondas calienta la muestra simultáneamente con el solvente. De esta forma, los vapores de disolvente penetran a través de la muestra y se condensan al llegar al condensador, como se muestra en la Figura 7.

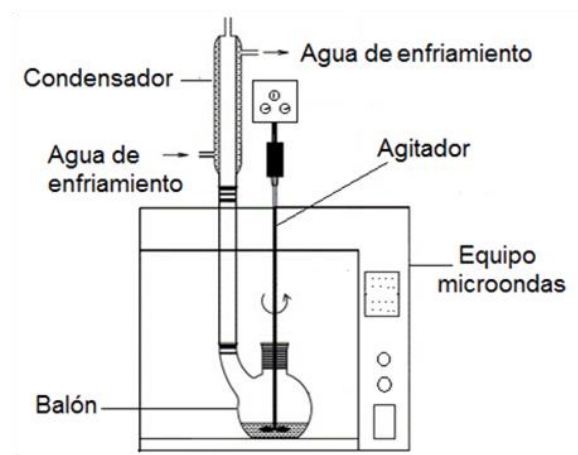


Figura 7. Representación gráfica de extracción por microondas a escala laboratorio. Adaptado de Urango et al, 2018

Método de extracción del AE de cítricos por prensado

Se basa fundamentalmente en el hecho de que cuando la fruta está fresca, el AE contenido en las glándulas del flavedo, se mantiene bajo una cierta presión, y cuando se rompen las paredes de estas glándulas, el AE es expulsado con la fuerza y a una distancia considerable en forma de chorro. El AE obtenido es colectado por medio de una lluvia de agua que mantiene húmeda a la superficie de la corteza evitando que esta vuelva a reabsorber el aceite. El agua también cumple otras funciones muy importantes como formar la emulsión con el AE, evitar que se pierda el AE al salpicar y aumentar la presión de las glándulas. En la Figura 8 se muestra un diagrama del proceso de extracción de AEC por prensado en frío.



Figura 8. Representación gráfica del método de prensado en frío. Modificado de Brada P. et al, 2021.

Escalas de producción

En la actualidad se han desarrollado múltiples investigaciones sobre la AEN mediante hidrodestilación asistida por microondas y por fluidos super críticos. Sin embargo, dichas técnicas se aplican a nivel laboratorio y su escalonamiento implica un gran desafío. Las principales desventajas de estos métodos son el alto costo de inversión y que se requieren operadores profesionales en comparación con los otros métodos convencionales (Gavahian, 2019).

La hidrodestilación es un método común para la extracción de AEC, donde se puede encontrar escalas desde laboratorio, piloto e industrial.

A escala de laboratorio su fácil instalación y uso intuitivo hacen de este equipo la mejor opción para fines didácticos, actividades recreativas y de iniciación, además, permite el procesamiento de pequeños lotes de producción. A esta escala, el Clevenger es el dispositivo más utilizado. Tiene capacidad de procesamiento de 100 a 2000 mL.

A escala piloto poseen capacidades que van desde los 20 a 500 litros de alimentación, suelen estar contruidos en acero comercial, inoxidable o cobre. Su objetivo principal es alcanzar los parámetros óptimos de destilación y determinar la factibilidad técnica y económica de producción de AE y agua floral. Esta escala de procesamiento permite producir cantidades significativas de AE con fines comerciales (Kant y Kumar, 2022).

La escala industrial suele estar orientada a procesos de destilación con capacidades de alimentación superiores a 500 L. Su objetivo principal es la obtención de AE y agua floral de alto valor, máxima calidad y eficientes lotes de producción (Sánchez et al. 2022).

Etapas del proceso de extracción

Reducción de tamaño

Las operaciones previas a la destilación a la que se somete la materia prima son importantes para obtener mejores resultados y una de ellas es la reducción de tamaño del material cítrico, donde se puede llevar a cabo por trituración con molinos de corte. Esta es ideal para la trituración primaria de materiales blandos, elásticos y fibrosos (Ruiz, 2019).

Fuente de calentamiento

En el método de hidrodestilación se requiere de una fuente de calentamiento que suministre calor a la cámara de extracción donde estará el material cítrico sumergido en agua. Comúnmente el calor se transfiere a través de una resistencia eléctrica o por combustión de gas.

Operación de condensación

En la etapa de condensación, la mezcla de vapor de AE y agua entrará en contacto con una superficie fría para que la mezcla de vapor pase a estado líquido. La condición inicial del condensador debe tomar en cuenta que el vapor proveniente del extractor se encuentra en un rango de 100-120 °C y 1 atm, de modo que está saturado, por lo tanto, se necesitará un equipo que consiga condensar la mezcla a un estado líquido para posteriormente separar el AE del agua. Para ello la opción inicial es un condensador de carcasa y tubos, debido a que proporciona gran área de transferencia en muy poco espacio. Además, es importante la consideración de los fluidos por el intercambiador.

Decantación

La etapa de decantación permite separar las fases líquido-líquido del AE y el agua floral por su diferencia de densidades y por su inmiscibilidad. Por lo general, se usan decantadores cilíndricos y de embudo, este último, favorece el proceso de separación por su forma geométrica. Una centrífuga puede hacer que la tasa de separación sea más rápida al simular un gran aumento en la fuerza de la gravedad.

Rendimiento de los aceites esenciales

El rendimiento de una extracción se declara comúnmente como la relación que existe entre el AE obtenido (masa o volumen) y la masa del material utilizado para la extracción, como se indica en las Ec. (1) y Ec. (2). También se puede declarar al rendimiento con respecto al tiempo o energía utilizada durante el proceso.

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{\text{masa de AE obtenido (g)}}{\text{masa de material de extracción(g)}} (100) \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{\text{volumen de AE obtenido (mL)}}{\text{masa de material de extracción(g)}} (100) \quad \text{Ec. (2)}$$

El término eficiencia en los procesos de extracción no es utilizado comúnmente por la complejidad de agregar un análisis al proceso para determinar la cantidad de AE inicial presente en la materia prima. Se calcula con la relación de AE obtenido y el AE inicial en el material vegetal, descrita algebraicamente en la Ec. (3).

$$\% \text{Eficiencia} = \frac{\text{AE obtenido(g)}}{\text{AE inicial(g)}} (100) \quad \text{Ec. (3)}$$

La Tabla 2 resume algunos resultados obtenidos por diferentes autores que utilizaron la técnica de hidrodestilación con la cáscara de naranja. En estas investigaciones la escala de extracción fue a nivel laboratorio.

Tabla 2. Extracciones en la literatura de extracciones de los AEN mediante hidrodestilación.

Autor	Tiempo de extracción	Fuente de calentamiento	Rendimiento(v/m)
Gonzales et al, 2016	76 min	Asistida por microondas	1.56 %
Bustamante et al, 2016	45 min	Asistida por microondas	1.82 %
Strano et al., 2014	3 h	Parrilla eléctrica	2.10 %
Bourgou et al., 2012	2 h	Parrilla eléctrica	0.46 %
López, 2019	4 h	Parrilla eléctrica	0.83 %

Factores que afectan el rendimiento en la extracción de aceites esenciales cítricos

Se ha demostrado que la deshidratación es un paso fundamental para la obtención de extractos ricos en compuestos bioactivos o AE para reducir los niveles de agua minimizando la degradación microbiana y enzimática de la naranja. La cáscara de naranja se caracteriza por tener alta humedad (superior al 50%) y alto contenido en azúcares, siendo un sustrato favorable para el crecimiento de microorganismos. Por lo tanto, el secado es necesario para asegurar la estabilidad y proporcionar una larga vida de almacenamiento, sin embargo, el método de secado es responsable de la pérdida de compuestos bioactivos como los AE (del Carmen et al., 2021), por ello, es importante elegir el método de secado adecuado.

Los AE difieren entre sí, dependiendo de la materia prima, especie y dentro de la familia de cada vegetal. La materia prima es afectada por el origen de la planta, el lugar y época de producción, como también la madurez y cuidados que ha tenido (Ovares, 2016).

Cuando se reduce el tamaño de partícula, se mejora la capacidad de extracción porque aumenta el contacto sólido-líquido de la cáscara de naranja y el solvente, lo que conduce a una menor resistencia a la difusión. A medida que se obtenga un tamaño de partícula más bajo, se alcanzaría un mejor rendimiento (Jablaoui et al., 2019).

Algunos métodos de extracción obtendrán mayor rendimiento que los demás y el tiempo será una variable del proceso directamente proporcional al rendimiento, entre más tiempo de extracción se obtendrá mayor cantidad de AE. En la Figura 9 se muestra el comportamiento del rendimiento de extracción de AE de eucalipto por hidrodestilación asistida por microondas e hidrodestilación convencional con respecto al tiempo, en 25 y 80 minutos respectivamente de cada método el rendimiento crece considerablemente, y a partir de ahí, actúa de manera asintótica aproximándose al rendimiento máximo de extracción.

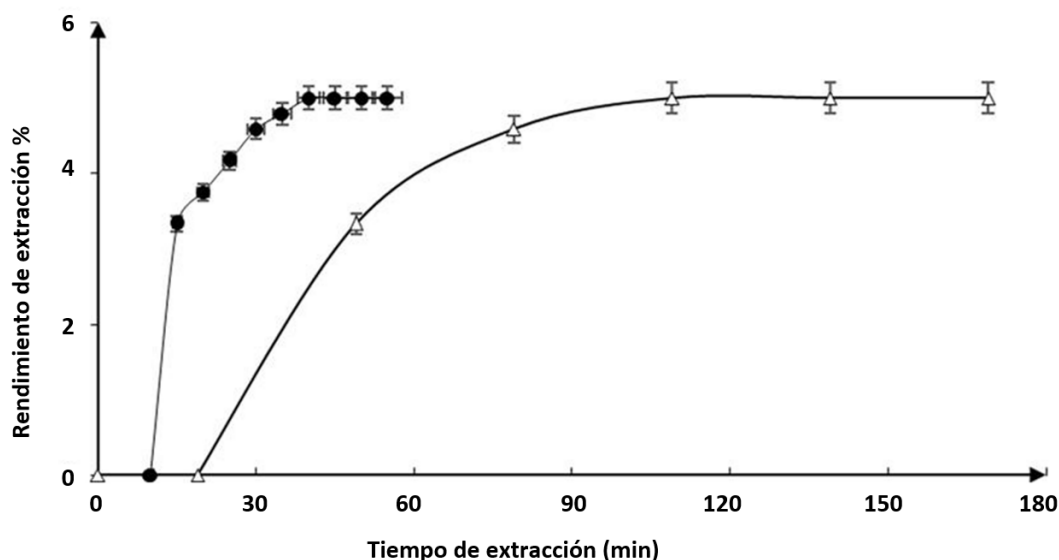


Figura 9. Comportamiento del rendimiento con respecto al tiempo. Círculos rellenos (Hidrodestilación asistida por microondas), barras triangulares (Hidrodestilación convencional).

Modificado de Romdhane M et. al. 2019.

El material, el tamaño del equipo de extracción, la integración de los equipos pertenecientes al sistema de extracción, la cantidad de materia prima, la pureza del solvente, temperatura y presión de los flujos empleados son otros factores que impactan el rendimiento de extracción de AE.

Calidad de los aceites esenciales

La calidad del AE tiene como objetivo garantizar que la esencia posee ciertas características analíticas que están determinadas principalmente por su composición química, contenido de las sustancias de interés, propiedades fisicoquímicas y organolépticas, además, del grado de satisfacción del cliente al adquirir el AE.

La calidad puede variar considerablemente dependiendo de su origen geográfico, variedad de la planta, método de obtención, condiciones de procesado, almacenamiento, envejecimiento, entre otros (Ovares, 2016).

Parámetros utilizados para el control de calidad de los aceites esenciales

La calidad del AE se puede determinar mediante el análisis de ciertos parámetros, clasificándose en seis tipos (Obregon, 2018):

- 1) Características organolépticas: considera el olor, el color y la apariencia.
- 2) Determinaciones físicas: densidad, índice de refracción, miscibilidad en etanol, punto de congelación, punto de inflamación, rango de destilación.
- 3) Índices químicos: índice de acidez, índice de éster e índice de saponificación.
- 4) Características cromatográficas: se utiliza para cuantificar los componentes de los AE.
- 5) Características espectroscópicas: se utiliza con el fin de obtener el perfil de espectro IR de esencia.
- 6) Otras determinaciones donde destacan la presencia de contaminantes en el AE.

Metodología

El sistema de extracción de AE se desarrolló para operarse mediante la técnica de hidrodestilación. El proceso de extracción involucró etapas de reducción de tamaño, calentamiento, cuerpo extractor, tubería de gas y vapor, condensador y decantador. El equipo fue diseñado específicamente para procesar cáscaras de cítricos, pero no se limita solo a este tipo de material vegetal. Durante el desarrollo del sistema se priorizó la modularidad, la portabilidad, la flexibilidad y el fácil mantenimiento.

Algunos de los equipos que integran este sistema se compraron y otros se tomaron del Instituto de Ingeniería de UABC Mexicali y se modificaron y adaptaron para su integración en el sistema de extracción.

Además de desarrollar el sistema extractor, las corridas experimentales y el diseño de experimentos permitió crear un método de extracción para los distintos AE. Por último, se determinaron y analizaron los siguientes parámetros: costo por mL de AE, requerimiento energético, rendimientos de extracción y cantidad de AE obtenido.

Adquisición de equipos y materiales

La adquisición de equipos para el sistema de extracción consistió en adaptar equipos del laboratorio de Biomasa y Bioenergéticos y del Instituto de Ingeniería Campus Mexicali UABC, además de comprar algunos equipos. La balanza granataria, el molino, intercambiador de calor, florentino, decantador, la estructura móvil, el tanque de almacenamiento de agua del sistema de recirculación y las líneas de tubería del tanque se tomaron del laboratorio de Biomasa y Bioenergéticos. El cuerpo extractor, tanque de gas, línea de gas, tubería para la mezcla de vapor y AE saliente del cuerpo de extracción, bomba de agua para el sistema de recirculación, y conectores para tuberías se compraron. Por último, la parrilla de gas fue donada por un académico.

Modificaciones a los componentes adquiridos del sistema de extracción

A varios componentes del sistema de extracción se le hicieron modificaciones y adaptaciones con el fin de integrarlos. El cuerpo de extracción que se adquirió era totalmente hermético, por lo que se realizó un orificio de 2/3 pulgadas en un taller de maquinado en la tapa superior para permitir que el vapor escapara.

Se le adaptó al orificio un niple galvanizado de 2/3 de pulgada con ambas puntas macho. Por el interior del cuerpo de extracción se le agregó una rosca hembra para ajustar este niple a la tapa del cuerpo de extracción. Por el exterior se le agregó un empaque y una arandela, para asegurar la hermeticidad del sistema.

Se integró una manguera resistente a fluidos de alta temperatura y con calidad de grado alimenticio que conectará de la salida del cuerpo de extracción con el intercambiador de calor. Se le añadió un aislante a la manguera, para evitar que el vapor condensara antes de llegar al intercambiador de calor. Estas modificaciones se muestran en la Figura 10.

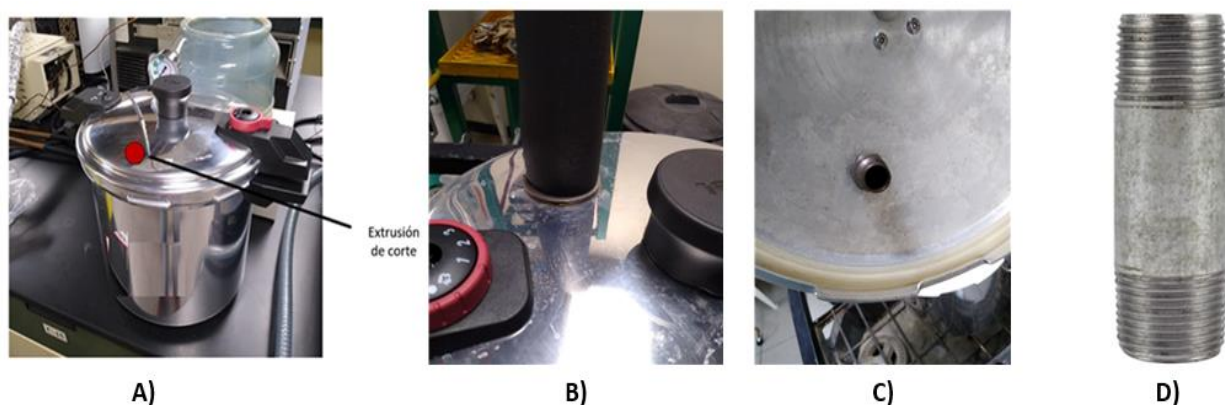


Figura 10. Modificaciones en el cuerpo de extracción. **A)** Extrusión de corte. **B)** Integración de la manguera. **C)** Rosca hembra en el interior del cuerpo de extracción. **D)** Niple para acoplar la rosca hembra por el interior de la tapa y la manguera por el exterior de la tapa.

La fuente de calor consiste en un tanque de gas y una parrilla de gas. Se conectaron con una línea de gas de más de 1 m, esto para tener mayor seguridad en las operaciones. La parrilla de gas tenía 3 quemadores de doble aro y se eliminó un quemador en un taller de maquinado para disminuir la longitud de esta y así tener mejor manejo y distribución de espacio en la estructura móvil en el que se monta. Estos cambios se observan en la Figura 11.

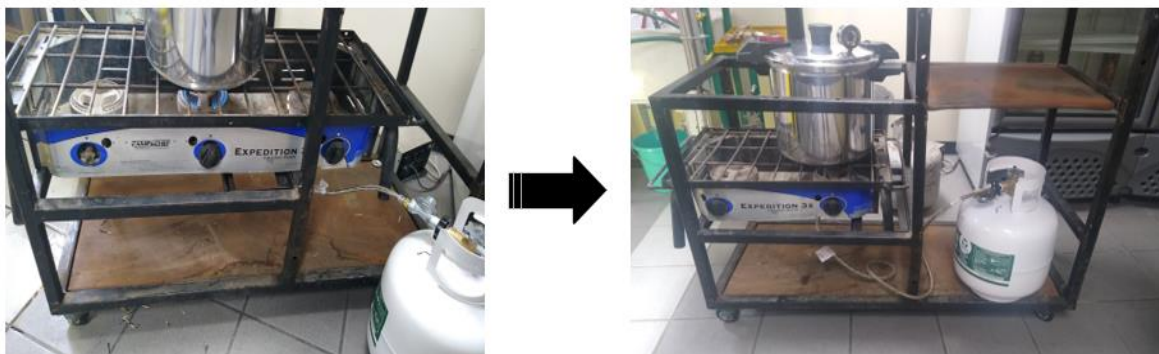


Figura 11. Modificaciones a la fuente de calor.

El intercambiador de calor contaba con líneas de flujo de entrada y salida. La línea de entrada del agua de enfriamiento presentaba un par de goteras, por lo que se reestructuró y se cambió por completo. Se le integraron 3 adaptadores y se conectó la entrada de agua de enfriamiento con conexión hembra de 3/8 pulgadas del intercambiador de calor a una manguera de jardín la cual estaba conectada al agua de la red pública. El conector del intercambiador de calor de la entrada del fluido caliente es de hembra de 3/8 de pulgadas y de la línea de vapor es de 1/2 pulgadas por lo que se agregaron 2 adaptadores para conectarlos. Los adaptadores que se integraron se muestran en la Figura 12.

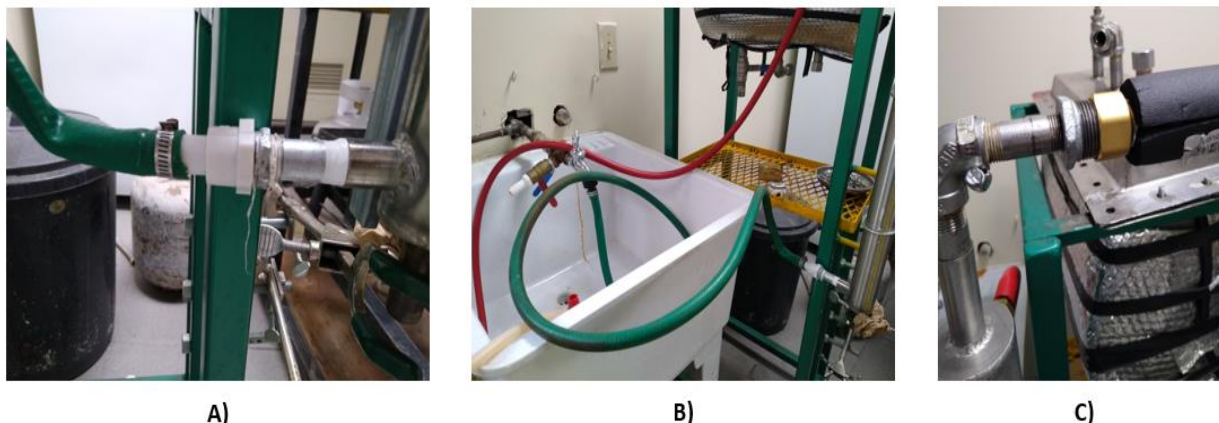


Figura 12. **A)** Adaptadores para conectar la manguera de jardín a la entrada del refrigerante del intercambiador de calor. **B)** Entrada y salida del refrigerante en el intercambiador de calor. **C)** Adaptadores para conectar la manguera de la salida del vapor del cuerpo de extracción con la entrada del intercambiador de calor.

Para integrar el decantador en el sistema, se utilizaron soportes de laboratorio para atrapar la mezcla líquida de AE y agua que sale del intercambiador de calor. Esta integración se observa en la Figura 13.



Figura 13. Integración del decantador al sistema de extracción.

La integración del sistema de recirculación de agua se dio con base en las oportunidades de mejora que se analizaron en el diseño de experimentos. La mayor oportunidad radicaba en el costo del agua de enfriamiento, por lo que, se buscaron bombas en el mercado local capaces de recircular el agua a una velocidad mayor que 113.7 mL/s, la cual es la velocidad de flujo de agua de la red pública. Se adquirió una bomba periférica de ½ hp, marca Trupper, con caudal de 42 L/min.

Además, se tomó del laboratorio de Biomasa y Bioenergéticos un tanque de 208 L, se lavó el interior de este con jabón, antioxidantes y agua para eliminar la suciedad y residuos que contenía. El tanque incluía mangueras, por lo que, solo se adquirieron e integraron nuevos adaptadores para crear el circuito de recirculación de agua.

Corridas experimentales de los distintos materiales vegetales a escala piloto

Con el fin de realizar las primeras actividades exploratorias del sistema se hicieron extracciones de AE de cáscara de naranja, toronja, limón verde y amarillo, eucalipto *globulus* y de hoja redonda. En el caso de los cítricos se manejaron residuos de

establecimientos de jugos, taquerías y pescaderías y en el caso del eucalipto, se tomaron residuos de poda de UABC central Campus Mexicali. Las condiciones de operación para estas extracciones se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones de operación de las corridas experimentales.

Corrida	Material vegetal	Masa (kg)	Relación agua:material	Tiempo de molienda (s)	Tiempo de extracción (min)
1	Naranja	2.76	1.62	60	74
2	Naranja	2.46	0.93	60	60
3	Naranja	2.58	1.53	25	62
4	Naranja	2.62	0.95	25	60
5	Naranja	4.65	1.52	20	55
6	Naranja	5	1.18	20	67
7	Limón amarillo	1.36	1.54	20	60
8	Limón amarillo	2.03	1.99	20	60
9	Limón verde	3.66	1.46	20	60
10	Toronja	4	1.4	20	60
11	Eucalipto globulus	1.51	5.1	0	60
12	Eucalipto globulus	1	5.2	0	60

Diseño de experimentos

Por la disponibilidad de residuo, la viabilidad de recolección y por ser el material vegetal con mayor rendimiento de extracción en las actividades exploratorias se realizó un diseño de experimentos de la cáscara de naranja.

Se desarrolló un diseño factorial 2^3 para determinar sus niveles operativos óptimos. El residuo de naranja incluyó cáscara de naranja, pulpa y semillas. El uso del residuo de naranja y no solo de la cáscara de naranja permite una gestión más sencilla a escala piloto e industrial, aprovecha el contenido de humedad de la pulpa, reduce los costos y tiempos de pretratamiento. Las condiciones operativas clave identificadas en el diseño factorial del residuo de naranja se pueden aplicar a otros residuos cítricos.

Estos factores son claves para reconocer las condiciones de operación en las que se obtendrá la mayor cantidad de volumen de AE. Cada experimento se realizó por duplicado para aumentar su fiabilidad.

El factor 1 es la relación de volumen de agua y residuo de naranja con valores de 1.7 y 1.9 L por kg de residuo. Este factor en el proceso de extracción afecta principalmente en la transferencia de masas entre el AEN y el agua. Al incrementar el solvente también aumenta el volumen de AE producido, hasta llegar a un valor óptimo, es decir, aunque se adicione más solvente el volumen de AE ya no aumenta (Ayala et al., 2017). Con las corridas exploratorias se identificó que al agregar valores inferiores de agua a la relación 1.7 se forma una costra de cáscara quemada en la parte inferior del cuerpo de extracción, que es difícil de remover y el AE adquiere un aroma a quemado. También se identificó que al adicionar una cantidad superior de solvente y someterse al proceso de extracción, se encontraron residuos de cáscara de naranja y pulpa en el AE, afectando la pureza del producto.

El factor 2 es la reducción de tamaño de la cáscara de naranja. La reducción de tamaño genera más área de contacto entre el material vegetal y el solvente, lo que facilita la extracción de AEN. En extracciones pasadas, con un tiempo de molienda mayor a 10 s se obtuvieron buenos resultados. Sin embargo, es necesario mejorar la relación entre la producción de AEN y el costo energético. Por lo que se determinaron los valores en 5 s y 10 s de molienda. El desecho después de la molienda debe tener una apariencia uniforme y fina para permitir el paso de las burbujas.

El factor 3 es la cantidad de material vegetal, definida como 3.5 kg y 4.0 kg. La masa de entrada es directamente proporcional a la cantidad de presión en el sistema de extracción. A través de este factor es posible aumentar o disminuir el punto de ebullición de la mezcla, lo cual es importante para el rendimiento de extracción

La variable de respuesta es el volumen de AEN obtenido en el proceso de extracción. La cáscara debe ser fresca, es necesario adquirir la cáscara del día, del mismo proveedor y a la misma hora, de lo contrario el AE se volatiliza y pierde volumen hasta en un 32% por día de almacenamiento. Este dato de pérdida de AE por día de almacenamiento se obtuvo en las corridas exploratorias. Una vez extraído el AE se debe separar del agua

floral con un decantador tipo embudo. El volumen se mide inmediatamente después de su extracción y separación del agua floral para evitar que se pierda volumen al volatilizarse e hidrolizarse. El material que se utiliza para medir el volumen es una probeta graduada de 50 mL. El diseño de experimentos se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz del diseño de experimentos

Cantidad de masa (kg)	Tiempo de molienda			
	t= 5 s		t=10 s	
	Relación cáscara/ agua 1.7	Relación cáscara/ agua 1.9	Relación cáscara/ agua 1.7	Relación cáscara/ agua 1.9
	V _{AE}	V _{AE}	V _{AE}	V _{AE}
3.5	Corrida 1	Corrida 3	Corrida 9	Corrida 13
	Corrida 2	Corrida 4	Corrida 10	Corrida 14
4	Corrida 5	Corrida 7	Corrida 11	Corrida 15
	Corrida 6	Corrida 8	Corrida 12	Corrida 16

El método de extracción se mantiene constante en los parámetros de las otras etapas del proceso. Estos parámetros se describen y muestran en la Figura 14.

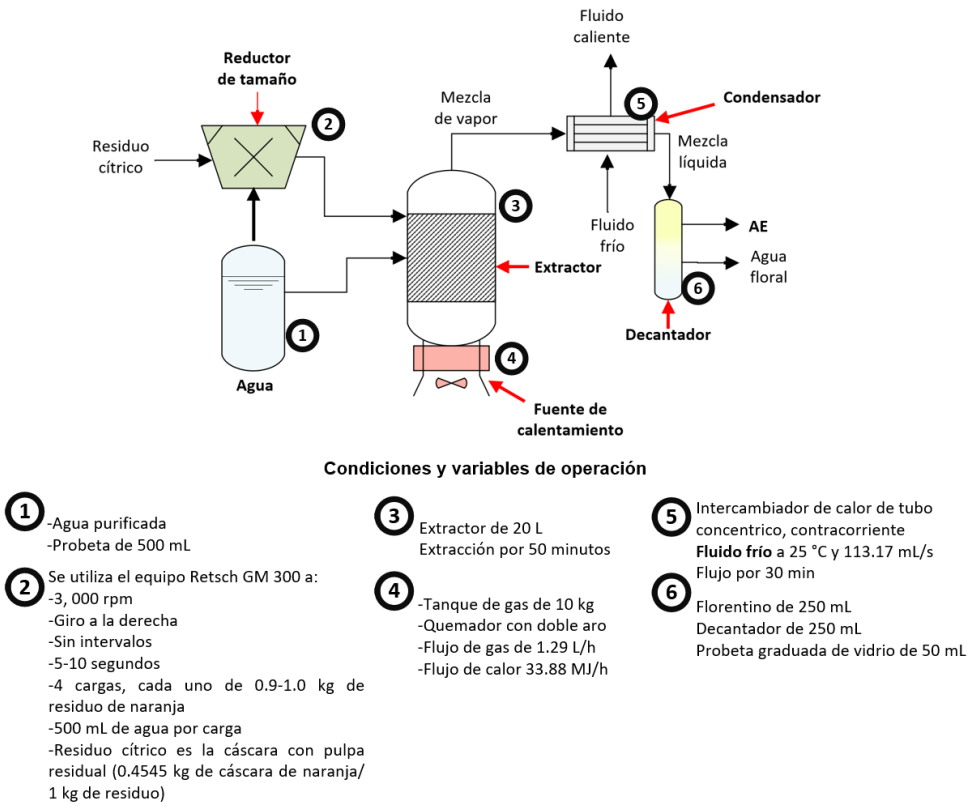


Figura 14. Etapas y parámetros de operación en el proceso de extracción de AEN.

Composición química

La composición química de los aceites esenciales de cáscara de naranja, limón amarillo, limón verde, toronja y eucalipto *globulus* se realizó con cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas en la Universidad de Cartagena, Colombia.

El AE se analizó utilizando un sistema GC-MS de Agilent Technologies modelo 7890A Network GC acoplado a un detector selectivo de masas modelo 5975 equipado con un puerto de inyección dividido/sin división (230 °C, relación de división 20:1). Los espectros de masas se obtuvieron por ionización por impacto de electrones a 70 eV de energía. Los elementos de GC fueron una columna capilar HP-5MS (30 m × 0,25 mm id × 0,25 µm df) con 5% de fenil-poli (metil siloxano), y se utilizó una fase estacionaria para la separación de mezclas. El horno arrancó a 50°C durante 2 min, y su temperatura aumentó a razón de 5°C/min, hasta 250°C. El gas portador fue helio, con una presión de entrada en la cabeza de la columna de 12.667 psi a una velocidad de 1.172 mL/min a 50°C 18.

Costo por mL de AE

Los costos de operación se determinaron considerando los insumos necesarios para las corridas experimentales, que incluyeron agua y energía. El material vegetal fue donado de diversas fuentes, por lo que no tuvo ningún costo asociado.

El costo de los insumos energéticos se calculó con base en los requerimientos energéticos de las etapas del proceso de extracción. La etapa de reducción de tamaño requería energía y la etapa de extracción necesitaba calor. El equipo para reducción de tamaño Retsch GM300 tiene un rango de potencia de 1.1-3 kW y 13 A y se utiliza de 5 a 10 s. La fuente de calor operaba con gas LP a un caudal de 1.29 L/h.

El costo del agua se determinó con base en el precio por m³ de agua comercial. Se consideraron dos escenarios: antes y después de la instalación del sistema de recirculación de agua. Se utilizó agua potable para alimentar el equipo de extracción, y la cantidad de agua requerida varió de 5.95 a 7.6 L dependiendo de la cantidad de material vegetal utilizado. La ecuación utilizada para calcular los costos de producción se describe en Ec (4) y el requerimiento energético en Ec. (5).

$$C_{TP} = C_{BP} + C_M + C_G + C_A \quad \text{Ec. (4)}$$

$$E_{TP} = E_M + E_{BP} + E_{FCG} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde: C_T = Costo total de operación; C_{BP} =Bomba piloto; C_M = Molino C_G =Gas C_A = Agua; E_T = Energía requerida; E_M = Molino; E_{BP} = Bomba; E_{FCG} = Flujo de calor del gas.

Resultados

El sistema extractor desarrollado se presenta en la Figura 15.



Figura 15. Sistema extractor de aceites esenciales de cítricos.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de las corridas experimentales de las extracciones con distintos materiales vegetales.

Tabla 5. Corridas experimentales.

Corrida	Material vegetal	Volumen de AE (mL)	Rendimiento (mL AE/ kg material vegetal)	Costo por mL de AE	Requerimiento energético (kW)
1	Naranja	20	18.41	\$ 5.58	7.87
2	Naranja	6	5.46	\$ 17.54	7.87
3	Naranja	42	36.47	\$ 2.53	7.87
4	Naranja	44	37.62	\$ 2.48	7.86
5	Naranja	64.5	31.07	\$ 1.78	7.86

6	Naranja	47	23.93	\$ 2.32	7.85
7	Limón amarillo	11	18.12	\$ 9.06	7.85
8	Limón amarillo	15	16.55	\$ 6.97	7.85
9	Limón verde	15	18.16	\$ 7.10	7.85
10	Toronja	27	10.13	\$ 3.96	7.84
11	Eucalipto globulus	4.1	4.61	\$ 25.97	7.84
12	Eucalipto globulus	10.5	10.50	\$ 10.13	7.84

Diseño de experimentos

La Tabla 6 muestra los resultados de las extracciones de aceite esencial de residuo de naranja para cada una de las ejecuciones de diseño factorial. Las variables de respuesta fueron el volumen de aceite esencial y el rendimiento de extracción.

Table 6. Diseño factorial para extracción de AE de residuo de naranja.

Corrida	Residuo de naranja (kg)	Tiempo de molienda (s)	Agua/residuo Relación	Voliumen AE (mL)	Rendimiento (mL/kg)
1	3.5	5	1.7	30	8.6
2	3.5	5	1.7	30	8.6
3	3.5	5	1.9	65	18.6
4	3.5	5	1.9	58	16.6
5	3.5	10	1.7	32	9.1
6	3.5	10	1.7	27	7.7
7	3.5	10	1.9	64	18.3
8	3.5	10	1.9	58	16.6
9	4	5	1.7	33	8.3
10	4	5	1.7	38	9.5
11	4	5	1.9	65	16.3
12	4	5	1.9	69	17.3
13	4	10	1.7	30	7.5
14	4	10	1.7	30	7.5
15	4	10	1.9	67	16.8
16	4	10	1.9	68	17.0

Los volúmenes fueron bajos para un tiempo de molienda de 5 s, poco menos del 50% de los obtenidos con 10 s de molienda. Adicionalmente, en los tratamientos de molienda de

5 segundos, el aceite presentaba un aspecto amarillento, a diferencia del AE obtenido en los tratamientos de 10 segundos, que presentaba un aspecto incoloro.

Las condiciones para obtener la mayor cantidad de AE fueron un tiempo de molienda de 10 s, una relación agua-residuo de 1.9 L por kg y 4 kg de residuos procesados. Por el contrario, la menor cantidad de AE se obtuvo con una relación de 1.9 L de agua por kg de desecho de naranja, 5 s de molienda y 3.5 kg de desecho. El mayor rendimiento se logró procesando 3.5 kg de residuos con 5 s de molienda y una relación agua-residuos de 1.9. Por otro lado, el menor rendimiento se obtuvo procesando 4 kg de residuo de naranja con 10 s de molienda y una relación de 1.7. En general, los rendimientos obtenidos con 10 s de molienda fueron comparables a los rendimientos más altos reportados en la literatura. El resultado de ANOVA para la extracción AEN se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados del análisis ANOVA de la extracción de AEN.

Fuente	Volumen AE					Rendimiento AE				
	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Modelo	7	4,477	639.57	67.32	0	7	313.728	44.818	61.79	0
Residuo de Naranja A	1	81	81	8.53	0.019	1	1	1	1.38	0.274
Tiempo de molienda B	1	9	9	0.95	0.359	1	0.59	0.59	0.81	0.394
Agua/ Residuo Relación C	1	4,356	4,356	458.53	0	1	310.641	310.641	428.3	0
AB	1	4	4	0.42	0.535	1	0.232	0.232	0.32	0.587
AC	1	9	9	0.95	0.359	1	0.141	0.141	0.19	0.671
BC	1	9	9	0.95	0.359	1	0.562	0.562	0.78	0.404
ABC	1	9	9	0.95	0.359	1	0.563	0.563	0.78	0.404
Error	8	76	9.5			8	5.802	0.725		
Total	15	4,553				15	319.531			

De acuerdo con la Tabla 2, solo los factores A y C son significativos al evaluar el volumen de AE obtenido como variable respuesta. Solo el factor C se analiza con el rendimiento como variable de respuesta en el diseño factorial. En ambos casos, ninguna de las interacciones resultó en un valor $P < 0.05$. La Figura 16 muestra el análisis simultáneo de las variables de respuesta.

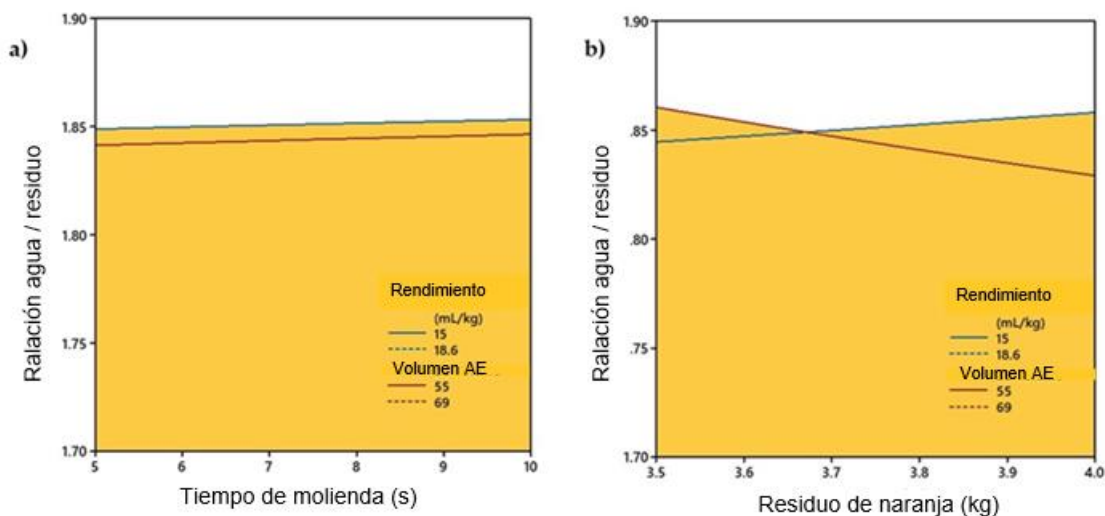


Figure 16. Análisis de variables de respuesta simultánea, a) factor A constante, b) factor B constante.

Las Figuras 16a y 16b se crearon para identificar el rango operativo en el que se puede obtener un volumen de más de 55 mL de AE con un rendimiento superior a 15 mL/kg. Esta región se representa en blanco en las Figuras 16a) y 16b), lo que permite flexibilidad en las condiciones de operación. Además, el punto de optimización para estas condiciones se da utilizando 4 kg de residuo de naranja, con 10 s de molienda y una relación de 1.9. Estas condiciones aseguran el máximo volumen de AE con el mayor rendimiento, según los datos del diseño factorial.

Costos de producción y consumo energético

De los costos de producción según la Ec. (4), el mejor costo fue de \$ 0.26 por mL de AEN, el cual se obtuvo de la corrida 16 del diseño factorial. El consumo energético para las corridas experimentales de 5 y 10 segundos, fueron de 7.85 y 7.86 kW.

Resultados de cromatografía de gases-espectrofotometría de masas de AE

La Tabla 8 muestra los compuestos identificados por GC-MS para los aceites esenciales de naranja, toronja, limón verde, limón amarillo y residuos de hojas de eucalipto. Los aceites esenciales de naranja, pomelo y limón verde están compuestos principalmente de limoneno. Se informó que el compuesto más representativo en el aceite esencial de limón amarillo es el 1,5-dimetil-1,5-ciclooctadieno, aunque por su tiempo de retención similar al de D-limoneno, este compuesto se asignó tentativamente como D-limoneno. El eucaliptol se encontró como el componente principal en el aceite esencial de hoja de

eucalipto. Estos compuestos representativos se detectaron con un tiempo de retención entre 10.9 y 11.1 minutos. Los valores obtenidos en los cromatogramas coinciden y se encuentran dentro del rango de la literatura publicada. El contenido de D-limoneno en el AEN varía desde 71.26% hasta más del 90% (Moemenbellah-Fard et al.2020; Li Yan et al.2022).

Table 8. GC-MS para distintos aceites esenciales.

# Pico	TR (min)	Componente	CAS	% Composition de AE				
				Naranja	Toronja	L.Verde	L.Amarillo	Eucalipto
1	3.1773	Glyodin acetate	000556-22-9	-	-	0.3405	-	-
2	3.2074	(Z)-9-Hydroxy-2,4-dimethyl-non-7-enoic acid lactone	1000144-65-1	-	-	0.1353	-	-
3	3.3204	Desmethyldoxepin	001225-56-5	-	-	1.2602	-	-
4	6.9374	β -Thujene	028634-89-1	-	-	0.6088	0.3495	-
5	7.1333	L- α -Pinene	007785-26-4	-	-	2.6444	-	1.2372
6	7.1485	D-(+)- α -pinene	007785-70-8	0.7994	0.7494	-	1.8689	-
7	7.6382	Camphene	000079-92-5	-	-	0.1714	0.0684	0.0551
8	8.6330	Sabinene	003387-41-5	0.2292	0.1491	-	-	-
9	8.7008	β -Pinene	000127-91-3	-	0.0174	18.7433	7.9132	-
10	9.3035	2,3-Dehydro-1,8-cineole	092760-25-3	-	-	0.0411	-	-
11	9.4166	β -Myrcene	000123-35-3	2.1961	1.9881	1.0515	1.6305	0.0609
12	9.8309	α -Phellandrene	000099-83-2	0.0681	-	0.0616	-	-
13	9.8536	α -Thujene	002867-05-2	-	0.0454	-	0.0909	-
14	9.9215	Octanal	000124-13-0	0.1294	0.1239	-	-	-
15	10.0797	(+)-3-Carene	000498-15-7	0.2155	-	-	-	-
16	10.3509	α -Terpinene	000099-86-5	-	-	0.0997	0.391	-
17	10.3736	4-(2-Methylamino)ethylpyridine	055496-55-4	0.0217	-	-	-	-
18	10.7126	o-Cymene	000527-84-4	-	-	6.254	-	-
19	10.7278	p-Cymene	000099-87-6	-	0.0668	-	0.583	-
20	10.7352	4-Ethyl-m-xylene	000874-41-9	-	-	-	-	18.9446
21	10.9689	1,5-dimethyl-1,5-Cyclooctadiene*	003760-14-3	-	-	-	73.0405	-
22	11.0216	D-Limonene	005989-27-5	95.4047	95.5393	49.1568	-	-
23	11.0140	Eucalyptol	000470-82-6	-	-	-	-	71.0404
24	11.3983	trans- β -Ocimene	003779-61-1	-	-	0.1177	0.0665	0.204

25	11.8203	β -Ocimene	013877-91-3	-	0.1307	0.2572	-	-
26	11.8355	cis-Ocimene	003338-55-4	-	-	-	0.0799	0.0992
27	12.205	γ -Terpinene	000099-85-4	-	0.0542	4.8014	10.3351	2.7201
28	13.493	Terpinolene	000586-62-9	0.0429	-	0.5317	0.604	-
29	14.1713	Linalool	000078-70-6	-	-	0.2871	-	-
30	14.1789	cyclofenchene	000488-97-1	0.3714	-	-	0.0857	-
31	15.505	cis-Limonene oxide	013837-75-7	-	-	0.1175	-	-
32	15.716	trans-Limonene oxide	004959-35-7	-	-	0.0946	-	-
33	15.7236	trans-Pinocarveol	000547-61-5	-	-	-	-	0.2662
34	16.0928	2-Methyl-1-nonene-3-yne	070058-00-3	-	-	0.0794	-	-
35	16.7936	Pinocarvone	030460-92-5	-	-	-	-	0.0956
36	17.0045	endo-Borneol	000507-70-0	-	-	0.0827	-	-
37	17.517	Terpinen-4-ol	000562-74-3	0.0306	0.0385	1.4375	0.5517	0.9139
38	18.0218	m-Cymen-8-ol	005208-37-7	-	-	0.1183	-	-
39	18.0897	trans-p-mentha-1(7),8-dien-2-ol	1000374-16-7	-	-	-	-	0.2575
40	18.1801	Terpineol	1000411-59-6	0.0463	-	1.4712	-	0.5491
41	18.1877	α -Terpineol	000098-55-5	-	-	-	0.5622	-
42	18.210	L- α -Terpineol	010482-56-1	-	0.0458	-	-	-
43	18.964	Decanal	000112-31-2	0.0749	0.1468	0.169	-	-
44	19.2727	3-Carene	013466-78-9	-	-	0.0835	-	-
45	19.3028	Sabinol	003310-02-9	-	-	-	-	0.1567
46	19.9358	cis-p-mentha-1(7),8-dien-2-ol	1000374-16-8	-	-	-	-	0.2401
47	20.4859	3,7-dimethyl-2,6-Octadienal	000106-26-3	-	-	0.8086	-	-
48	21.2469	(+/-)-Lavandulol	000498-16-8	-	-	0.1067	-	-
49	21.8498	Citral	005392-40-5	-	-	1.0754	0.0857	-
50	22.9725	Thymol	000089-83-8	-	-	-	-	0.418
51	23.3343	3-Methyl-4-isopropylphenol	003228-02-2	-	-	-	-	0.1753
52	23.6206	3-Methyl-4-isopropylphenol	003228-02-2	-	-	-	-	0.1806
53	24.9167	2-Acetoxy-1,8-cineole	057709-95-2	-	-	-	-	0.1057
54	25.1653	Hexestrol	000084-16-2	-	-	0.0661	-	-
55	26.0092	Neryl acetate	000141-12-8	-	-	0.1058	0.5865	-
56	26.243	α -Copaene	1000360-33-0	-	0.1053	-	-	-
57	26.8381	Lavandulyl acetate	025905-14-0	-	-	0.2227	-	-

58	26.899	β -Copaene	018252-44-3	-	0.0714	-	-	-
59	28.021	Phenylephrine	000059-42-7	0.0198	-	-	-	-
60	28.036	Caryophyllene	000087-44-5	-	0.3109	1.0245	0.1673	-
61	28.8199	trans- α -Bergamotene	013474-59-4	-	-	1.2988	-	-
62	28.8276	cis- α -Bergamotene	018252-46-5	-	-	-	0.2739	-
63	29.4303	1,4,7,-Cycloundecatriene, 1,5,9,9-tetramethyl-, Z,Z,Z-	1000062-61-9	-	-	0.1472	-	-
64	29.807	(-)- β -Santalene	025532-78-9	-	-	0.118	-	-
65	30.7791	α -Selinene	000473-13-2	-	-	0.3892	-	-
66	31.6155	cis- α -Bisabolene	029837-07-8	-	-	0.124	-	-
67	31.8416	β -Bisabolene	000495-61-4	-	-	2.4758	-	-
68	32.377	δ -Cadinene	000483-76-1	-	0.116	-	-	-
69	33.5521	Germacrene B	015423-57-1	-	-	0.3288	-	-
70	34.5694	Caryophyllene oxide	001139-30-6	-	-	0.1771	-	-
71	34.6523	(-)-Globulol	000489-41-8	-	-	-	-	0.727
72	34.9462	γ -Selinene	000515-17-3	-	-	-	-	0.147
73	36.4456	Isospathulenol	088395-46-4	-	-	0.1271	-	-
		Others		0.35	0.301	1.1868	0.6656	1.4058

*Posible D-Limoneno debido a un tiempo de retención similar.

La Tabla 9 presenta una comparación de algunos sistemas para la extracción de aceites esenciales y su nivel de operación.

Tabla 9. Comparativo del sistema de extracción con la literatura.

Aceite esencial	Presente trabajo			Literatura		
	Componente principal en el AE (%)	Rendimiento (mL/kg)	Componente principal en el AE (%)	Rendimiento (mL/kg)	Condiciones de operación	Referencia
Naranja	D-Limoneno (95.40)	16.8	Limoneno (75.3)	8.35	Escala laboratorio, destilación de vapor	Manyako et. al., 2022
			Decanal (12)	5.9	Escala piloto, destilación de vapor	Manyako et. al., 2022

Yellow Lemon	1,5-dimetil-1,5-Ciclo octadieno (73.04)	7.74	NA	3.39	Escala piloto, 60 minutos de operación, 4 kg de cáscara de limón amarillo, hidrodestilación	León et. al., 2020
			NA	5.13-5.15	Escala piloto, 100 minutos de operación, 8 kg y 12 kg cáscara de limón amarillo, hidrodestilación	León et. al., 2020
Green Lemon	D-Limoneno (49.15)	8.11	Citronelol (10.67)	7.7	Escala laboratorio, 4 h, 0.5 kg de limón verde, hidrodestilación.	Suresh, A. et al., 2020
Grapefruit	D-Limoneno (95.53)	6.75	NA	5.42	Escala piloto, 60 minutos de operación, 16.636 kg de cáscara de toronja, arrastre de vapor.	Justiniano-Medina et. al., 2022
			Limoneno (92-96)	2.56	Escala piloto, 0.5 kg de cascara de toronja, Prensado.	Trujillo-Juárez et. al., 2021
			Limoneno (88.6)	4.4	Escala laboratorio, 180 minutos de operación, 0.25 kg de toronja, hidrodestilación.	Uysal et. al., 2011
Eucalyptus	Eucaliptol (71.04)	7.55	Eucaliptol (85.4)	0.72	Escala laboratorio, 180 minutos de operación, 0.5 kg de hojas de eucalipto, hidrodestilación	Torrenegra et. al., 2019
			Eucaliptol (89.9)	1.21	Escala laboratorio, 180 minutos de operación, 0.5 kg de hojas de eucalipto, hidrodestilación asistida por microondas.	Torrenegra et. al., 2019

En el AE de toronja, se ha registrado un contenido de D-Limoneno que va desde el 81.86% hasta el 96% (Uysal et al.2011; Trujillo-Juárez et al.2021; Li Yan et al.2022). Para el AE de limón verde, se ha registrado un contenido de D-Limoneno entre el 47.24% y el 61.8% (Ashmawy et al.2019; Moemenbellah-Fard et al.2020). El compuesto más abundante en el AE de limón amarillo resultó ser el 1,5-dimetil-1,5-ciclooctadieno, que representa el 73.04% de la composición del aceite. Otros estudios han identificado al Geranial y al D-Limoneno como los compuestos principales en el AE de limón amarillo, con concentraciones que van desde el 29% hasta el 44.3% para el Geranial (Marongiu et al. 2006) y desde el 48.28% hasta el 71% para el D-Limoneno. Ni el Geranial ni el D-Limoneno se informaron en los resultados presentados en la Tabla 8. Sin embargo, cabe destacar que el tiempo de retención del 1,5-dimetil-1,5-ciclooctadieno es muy similar al del D-Limoneno (10.9689 min y 11.0216 min, respectivamente), lo que sugiere que la concentración informada del 73.04% podría atribuirse al D-Limoneno según la literatura previa (Khang et al.2022). Los valores de eucaliptol en el AE de hoja de eucalipto varían del 15.1% al 89.9% (Torrenegra et al.2019; Moemenbellah-Fard et al.2020; Khedhri et al.2022). Las variaciones encontradas en este AE se atribuyen al método de extracción, la escala del proceso y la variedad del árbol de eucalipto.

Al escalar un proceso de laboratorio a piloto, se producen ciertos cambios en las condiciones de operación. Estos cambios pueden afectar las concentraciones de los aceites esenciales. La Tabla 9 presenta una comparación de algunos sistemas para la extracción de aceites esenciales y su nivel de operación. Las composiciones de los aceites esenciales obtenidos en el sistema de extracción se encuentran dentro del rango reportado en la literatura para escalas de laboratorio y piloto. Cabe señalar que se requiere un tiempo más largo para obtener el AE en equipos a escala piloto. El aumento observado en el tiempo de procesamiento puede atribuirse a diferencias en ciertos parámetros del proceso al escalar desde el laboratorio hasta la escala piloto. A nivel de laboratorio, el proceso de hidrodestilación suele operar a temperaturas entre 100-110°C. Si bien esta temperatura de operación se logró a escala piloto, la cantidad de energía suministrada por unidad de residuo no era equivalente a la utilizada a escala de laboratorio. Como resultado, el calor neto aplicado durante el procesamiento a escala

piloto fue menor que el utilizado a nivel laboratorio, lo que resultó en un aumento en el tiempo de operación.

Conclusiones

La mayor parte del sistema de extracción de aceite esencial a escala piloto se construyó utilizando elementos comerciales existentes, solo el condensador y la estructura de soporte se diseñaron y se fabricaron en un taller mecánico. Esto hace que el sistema sea fácil de replicar sin agregar complejidad innecesaria. Además, el sistema se puede adaptar a las necesidades específicas de cualquier región donde se pueda utilizar.

De acuerdo con el diseño experimental, las mejores condiciones de operación para residuo de naranja fueron 4 kg con 10 s de molienda y una relación agua-residuo de 1.9.

Un aspecto crítico de la producción a escala piloto es la identificación de compuestos representativos en el aceite esencial. Las concentraciones de D-limoneno y eucaliptol, dos de los compuestos más importantes, estuvieron dentro del rango aceptable, produciendo aceites esenciales de calidad comparable a los obtenidos en la literatura a escala de laboratorio.

Los costos operativos del sistema son bajos, lo que brinda una oportunidad factible para personas o empresas interesadas en implementar un sistema de extracción de aceite esencial para uso personal o comercial.

Se recomienda realizar pruebas de laboratorio para identificar los parámetros y métodos de extracción clave para desarrollar un sistema extractor similar. El siguiente paso es seleccionar materiales y equipos que estén disponibles en el mercado y que sean fáciles de reparar y mantener. Una vez que se ha construido un prototipo, se puede evaluar su desempeño a través de pruebas exploratorias y diseño experimental. También es importante seleccionar métodos analíticos apropiados que sean relevantes para el caso específico. Siguiendo estos pasos, es posible desarrollar un sistema de extracción personalizado que satisfaga las necesidades específicas de las aplicaciones.

Referencias

Agriculture Organization of the United Nations statistics division. 2021. <http://faostat3.fao.org/home/E> (último acceso: 5 de mayo de 2023).

Ashmawy, A., Mostafa, N., & Eldahshan, O. (2019). GC/MS analysis and molecular profiling of lemon volatile oil against breast cancer. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 22(4), 903–916. DOI: 10.1080/0972060x.2019.1667877.

Ayala, J. R., Montero, G., Campbell, H. E., García, C., Coronado, M. A., León, J. A., Sagaste, C. A., and Pérez, L. J. (2017). “Extraction and characterization of orange peel essential oil from Mexico and United States of America,” *Journal of Essential Oil-bearing Plants* 20(4), 897-914. DOI: 10.1080/0972060x.2017.1364173.

Aziz, Z. A., Ahmad, A., Setapar, S. H. M., Karakucuk, A., Azim, M. M., Lokhat, D., y Ashraf, G. M. (2018). Essential oils: extraction techniques, pharmaceutical and therapeutic potential-a review. *Current drug metabolism*, 19(13), 1100-1110.

Bayramoglu, B., Sahin, S., & Sumnu, G. (2008). Solvent-free microwave extraction of essential oil from oregano. *Journal of food Engineering*, 88(4), 535-540.

Bourgou, S., Rahali, F. Z., Ourghemmi, I., & Saïdani Tounsi, M. (2012). Changes of peel essential oil composition of four Tunisian citrus during fruit maturation. *The Scientific World Journal*, 2012. <https://doi.org/10.1100/2012/528593>.

Bradra, P., & Parida, S. (2021). Aromatherapy and its benefits. Renu publishers, 84–88. https://www.researchgate.net/figure/Cold-Pressed-Method-Expression-Method-of-Essential-Oil-Extraction-Anonymous-a_fig2_350038518.

Brahmi, F., Mokhtari, O., Legssyer, B., Hamdani, I., Asehraou, A., Hasnaoui, I., Rokni, Y., Diass, K., Oualdi, I. y Tahani, A. (2021). Chemical and biological characterization of essential oils extracted from citrus fruits peels. *Materialstoday: Proceedings*.

Bulbul, A., Bulbul, T., Biricik, H., Yesilbag, D., & Gezen, S. S. (2012). Effects of various levels of rosemary and oregano volatile oil mixture on oxidative stress parameters in quails.

Bustamante, J., van Stempvoort, S., García-Gallarreta, M., Houghton, J. A., Briers, H. K., Budarin, V. L., Matharu, A. y Clark, J. H. (2016). Microwave assisted hydro-distillation of essential oils from wet citrus peel waste. *Journal of cleaner production*, 137, 598-605.

Capuzzo, A., Maffei, M. E., & Occhipinti, A. (2013). Supercritical fluid extraction of plant flavors and fragrances. *Molecules*, 18(6), 7194-7238.

Cortés-Rojas, D. F., de Souza, C. R. F., & Oliveira, W. P. (2014). Clove (*Syzygium aromaticum*): a precious spice. *Asian Pacific journal of tropical biomedicine*, 4(2), 90-96. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(14\)60215-X](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(14)60215-X).

Dangkulwanich, M., & Charaslertrangsri, T. (2020). Hydrodistillation and antimicrobial properties of lemongrass oil (*Cymbopogon citratus*, Stapf): An undergraduate laboratory exercise bridging chemistry and microbiology. *Journal of Food Science Education*, 19(2), 41-48.

del Carmen Razola-Díaz, M., Guerra-Hernández, EJ, García-Villanova, B., & Verardo, V. (2021). Desarrollos recientes en técnicas de extracción y encapsulación de aceite esencial de naranja. *Química de los alimentos*, 354, 129575.

El Asbahani, A., Miladi, K., Badri, W., Sala, M., Addi, E. A., Casabianca, H., El Mousadik, A., Hartmann, D., Jilale, A., Renaud, F. y Elaissari, A. (2015). Essential oils: From extraction to encapsulation. *International journal of pharmaceutics*, 483(1-2), 220-243.

Fornari, T., Vicente, G., Vázquez, E., García-Risco, M. R., y Reglero, G. (2012). Isolation of essential oil from different plants and herbs by supercritical fluid extraction. *Journal of Chromatography A*, 1250, 34-48.

Gavahian, M., Chu, YH y Mousavi Khaneghah, A. (2019). Avances recientes en la extracción de aceite de naranja: una oportunidad para la valorización de los residuos de piel de naranja una revisión. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos*, 54 (4), 925-932.

INEGI. La industria restaurantera en México - Censos económicos 2019, 2019. s.f. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825199357.pdf. (último acceso: 2022).

Jablaoui, C., Zeaiter, A., Bouallegue, K., Jemoussi, B., Besombes, C., Allaf, T. y Allaf, K. (2019). Caída de presión controlada instantánea como nuevas formas de intensificación para la extracción de aceite vegetal. En *Técnicas de procesamiento de alimentos ecológicos* (págs. 221-244). Prensa académica.

Jaramillo-Colorado, B. E., Vega-Díaz, R., & Pino-Benítez, C. N. (2022). Volatile chemical composition of Colombian *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng essential oil and its biocidal action against *Tribolium castaneum* (Herbst). *Revista colombiana de ciencias hortícolas*, 16(1). DOI: 10.17584/rcch.2022v16i1.13413.

John, I., Muthukumar, K., & Arunagiri, A. (2017). A review on the potential of citrus waste for D-Limonene, pectin, and bioethanol production. *International Journal of Green Energy*, 14(7), 599-612.

Justiniano-Medina, A., Arrieta-Conde, J., Torres-Taípe, A. L., Cruz-Anchiraico, J. A., & Huamanchahua, D. (2022, October). Design of a Steam Distillation of Essential Oils from Grapefruit Peel with Raspberry Pi B+ Using Telegram Connection. In 2022 IEEE 13th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON) (pp. 0132-0137). IEEE.

Kant R, Kumar A, Review on essential oil extraction from aromatic and medicinal plants: Techniques, performance and economic analysis. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 30: 100829 (2022).

Khedhri, S., Polito, F., Caputo, L., Manna, F., Khammassi, M., Hamrouni, L., Amri, I., Nazzaro, F., De Feo, V., & Fratianni, F. (2022). Chemical composition, phytotoxic and antibiofilm activity of seven Eucalyptus species from Tunisia. *Molecules* (Basel, Switzerland), 27(23), 8227. DOI: 10.3390/molecules27238227.

León, C., Jordán, E. P., Salazar, K., Castellanos, E. X., & Salazar, F. W. (2020). Extraction system for the industrial use of essential oil of the subtle lemon (*Citrus aurantifolia*). *Journal of physics. Conference series*, 1432(1), 012044. DOI: 10.1088/1742-6596/1432/1/012044.

Li, Y., Liu, S., Zhao, C., Zhang, Z., Nie, D., Tang, W., and Li, Y. (2022). "The chemical composition and antibacterial and antioxidant activities of five citrus essential oils," *Molecules* (Basel, Switzerland)27(20), article 7044. DOI: 10.3390/molecules27207044

López Pineda, H. A. (2019). Evaluación del rendimiento de extracción del aceite esencial de la cáscara de naranja Washinton Navel (*Citrus sinensis* var Washinton Navel), procedente del municipio de Alotenango, Sacatepéquez, a escala laboratorio y escala planta piloto (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).

Maes, C., Bouquillon, S., y Fauconnier, M. L. (2019). Encapsulation of essential oils for the development of biosourced pesticides with controlled release: A review. *Molecules*, 24(14), 2539.

Manyako, K. E., Chiyanzu, I., Mulopo, J., & Abdulsalam, J. (2022). Pilot-scale evaluation of concentrating solar thermal technology for essential oil extraction and comparison with conventional heating sources for use in Agro-based industrial applications. *ACS Omega*, 7(24), 20477–20485. DOI:10.1021/acsomega.1c06879.

Marongiu, B., Piras, A., Porcedda, S., & Tuveri, E. (2006). Comparative analysis of the oil and supercritical CO₂ extract of *Cymbopogon citratus* Stapf. *Natural Product Research*, 20(05), 455-459. DOI: 10.1080/14786410500277837.

Matthaus, B., & Özcan, M. M. (2012). Chemical evaluation of citrus seeds, an agro-industrial waste, as a new potential source of vegetable oils. *grasas y aceites*, 63(3), 313-320.

Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillén, E., & Galáan-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27-41.

Moemenbellah-Fard, M. D., Shahriari-Namadi, M., Kelidari, H. R., Nejad, Z. B., Ghasemi, H., and Osanloo, M. (2020). "Chemical composition and repellent activity of nine medicinal essential oils against *Anopheles stephensi*, the main malaria vector," *International Journal of Tropical Insect Science* 41(2), 1325-1332. DOI: 10.1007/s42690-020-00325-2

Moreno, J., López, G., & Jara, R. S. (2010). Modeling and optimization of extraction process of eucalyptus essential oil (*Eucalyptus globulus*). *Scientia agropecuaria*, 1(2), 147-154.

Nakamura, A., Hara, Y., & Kawano, T. (2017). Dewatering and extraction of hydrophilic solutes and essential oils from cryo-preserved lemon peels using liquefied dimethyl ether. *Solvent Extraction Research and Development, Japan*, 24(1), 37-45.

Negro, V., Mancini, G., Ruggeri, B., & Fino, D. (2016). Citrus waste as feedstock for bio-based products recovery: Review on limonene case study and energy valorization. *Bioresource Technology*, 214, 806-815.

Noshirvani, N., Ghanbarzadeh, B., Gardrat, C., Rezaei, M. R., Hashemi, M., Le Coz, C., & Coma, V. (2017). Cinnamon and ginger essential oils to improve antifungal, physical and mechanical properties of chitosan-carboxymethyl cellulose films. *Food Hydrocolloids*, 70, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.03.015>.

Obregon Edwar, E. W. (2018). Análisis comparativo de la hidrodestilación con el arrastre de vapor para la extracción de aceites esenciales de la cáscara de naranja.

OEC. The Observatory of Economic. Essential Oils, 2022. Available: <https://oec.world>. (Accessed november 18 2022).

Ovares, J. (2016). Determinación de los rendimientos y caracterización de aceites esenciales obtenidos por hidrodestilación a partir de *Lippia alba* y *Rosmarinus offinalis*. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/5569/1/40655.pdf>

Rassem, H. H., Nour, A. H., & Yunus, R. M. (2018). Analysis of bioactive compounds for Jasmine flower via Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 14(2), 198-201.

Romdhane, M., Bendaoud, H., Saadaoui, E., & Elfalleh, W. (2019). A new process for green extraction of essential oil from *Eucalyptus oleosa*: Microwave-assisted hydro distillation. *Arabian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 5(3), 35-46.

Ruiz Galán, J. (2019). Ingeniería básica de una planta de extracción de aceite esencial de “*Mentha arvensis* L.” por destilación de arrastre con vapor.

Sánchez CE, García JM, García I, Rodríguez JF, García MT, Pilot-Plant-Scale Extraction of Antioxidant Compounds from Lavender: Experimental Data and Methodology for an Economic Assessment. *Processes* 10(12): 2708 (2022).

Sebei, K., Sakouhi, F., Herchi, W., Khouja, M. L., & Boukhchina, S. (2015). Chemical composition and antibacterial activities of seven *Eucalyptus* species essential oils leaves. *Biological research*, 48(1), 1-5. <https://doi.org/10.1186/0717-6287-48-7>.

SIAP. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON-NG) Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, México. Reporte, México, 2020.

Stefanova, G., Girova, T., Gochev, V., Stoyanova, M., Petkova, Z., Stoyanova, A., & Zheljazkov, V. D. (2020). Comparative study on the chemical composition of laurel (*Laurus nobilis* L.) leaves from Greece and Georgia and the antibacterial activity of their essential oil. *Heliyon*, 6(12), e0549. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05491>.

Suresh, A., Velusamy, S., Ayyasamy, S., & Rathinasamy, M. (2021). Techniques for essential oil extraction from kaffir lime and its application in health care products—A review. *Flavour and Fragrance Journal*, 36(1), 5–21. DOI: [10.1002/ffj.3626](https://doi.org/10.1002/ffj.3626).

Tesfaye, B., & Tefera, T. (2017). Extraction of essential oil from neem seed by using soxhlet extraction methods. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 3(6), 239870.

Torrenegra Alarcón, M., Granados Conde, C., & León Mendez, G. (2019). Extracción, caracterización y actividad antioxidante del aceite esencial de *Eucalyptus globulus* Labill. *Revista Cubana de Farmacia*, 52(1). Recuperado de <https://revfarmacia.sld.cu/index.php/far/article/view/266/206>.

Trujillo-Juárez, L. G., Hernández-Meléndez, Ó., Gimeno, M., Gracia-Fadrique, J., & Bárzana, E. (2021). Extraction of essential oil from waste grapefruit peel using a pilot-scale twin-screw extruder. *ACS Food Science & Technology*, 1(7), 1198-1205. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.1c00098.

Urango-Anaya, K. J., Ortega-Quintana, F. A., Vélez-Hernández, G., y Pérez-Sierra, Ó. A. (2018). Extracción rápida de pectina a partir de cáscara de maracuyá (*Passiflora edulis* flavicarpa) empleando microondas. *Información tecnológica*, 29(1), 129-136.

Uysal, B., Sozmen, F., Aktas, O., Oksal, B. S., & Kose, E. O. (2011). Essential oil composition and antibacterial activity of the grapefruit (*Citrus Paradisi*. L) peel essential oils obtained by solvent-free microwave extraction: comparison with hydrodistillation: Essential oil composition and antibacterial activity of the grapefruit. *International Journal*

of Food Science & Technology, 46(7), 1455–1461. [DOI: 10.1111/j.1365-2621.2011.02640.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02640.x).

Anexos

Otros productos académicos

Artículo intitulado “Essential Oil Extraction for All: A Flexible and Modular System for Citrus Biomass Waste” publicado en la revista Bioresources. DOI: 10.15376/biores.18.3.4977-4993.

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

Essential Oil Extraction for All: A Flexible and Modular System for Citrus Biomass Waste

Edson E. Armenta, Marcos A. Coronado, José R. Ayala,* José A. León, and Daniela Montes

The essential oil industry is a growing sector that generates 5.41 billion USD annually worldwide. Essential oils are widely used in medicine, agriculture, and perfumery. Although there are available systems in the market for domestic essential oil extraction, replacing the entire equipment in case of repair or malfunction can be costly. To address this problem, a pilot-scale essential oil extractor system was developed that operates through hydrodistillation. This system was used to process various citrus wastes such as green and yellow lemons, oranges, grapefruits, and *Eucalyptus globulus*. A factorial design was performed, and the best conditions were used to extract other biomass residues. GC-MS analysis revealed that the primary compound for orange, grapefruit, and green lemon essential oils is D-limonene, with 95.4%, 95.5%, and 49.2%, respectively. For yellow lemon the primary compound appeared to be D-limonene with 73.0% content, though the GC/MS data were less clear, and for eucalyptus, it is eucalyptol with 71.0%. The estimated production costs were 0.01 USD/mL, 0.04 USD/mL, 0.06 USD/mL, 0.07 USD/mL, and 0.15 USD/mL for orange, grapefruit, green lemon, yellow lemon, and eucalyptus essential oils, respectively. Therefore, the developed system is a competitive option for pilot-scale essential oil extraction.

DOI: 10.15376/biores.18.3.4977-4993

Keywords: Citrus; Essential oil; Eucalyptus; Extraction system

Contact Information: Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, 21280, Mexicali, Baja California, México;

* Corresponding author: ramon.ayala@uabc.edu.mx

INTRODUCTION

Plants have been widely used in medicine, agriculture, and perfumes throughout history, but in recent years interest in essential oils (EOs) has increased noticeably due to their properties and applications in the food, pharmaceutical, and cosmetic industries, as well as having antioxidant and biocide activities (Maes *et al.* 2019; Manyako *et al.* 2022). Essential oils (EOs) are synthesized in aromatic plants as secondary metabolites and are distributed in multiple plant segments such as shells, bark, leaves, seeds, roots, stems, flowers, peels, and fruits. EOs are heterogeneous mixtures of terpenes, sesquiterpenes, acids, esters, phenols, and lactones (Aziz *et al.* 2018; Bailão *et al.* 2022; Jaramillo-Colorado *et al.* 2022). EOs are composed mainly of terpenes but also contain other chemical compounds (Maes *et al.* 2019).

The quality of essential oil may vary considerably, depending on factors such as geographical origin, plant variety, extraction method, and storage (Uysal *et al.* 2011). It can be determined by analyzing its organoleptic, physical, and chemical properties. The chemical composition of essential oil is usually the primary parameter used to assess its

Capítulo de libro intitulado “Energy Potential of Bioethanol and Biodiesel from Residual Biomass in Baja California” aceptado en el libro Biomass: The novel green gold – Current trends and future uses of biomass resources.

CHAPTER PROPOSAL DECISION

Title: Energy Potential of Bioethanol and Biodiesel from Residual Biomass in Baja California

Authors: Daniela G. Montes, Lisandra Quintana, Jesús M. Armenta, Iracema Valenzuela and Edson E. Armenta.

Book Editors Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega and Dr. José Ramón Ayala Bautista.

We are pleased to inform you that your book chapter proposal has

FULL CONSIDERATION WITH MINOR REVISIONS

To be included in the final book proposal:

Biomass: The novel green gold – Current trends and future uses of biomass resources
Under the section: Energy applications

That will be submitted to **Nova Science Publishing** once all the chapters from the remaining contributors are finished. You have until **August 1, 2022**, to send us the corrections requested for your chapter proposal to the following email addresses:

marcos.coronado@uabc.edu.mx

ramon.ayala91@uabc.edu.mx

You are requested to strictly follow the authors guidelines to avoid unnecessary delays. We are looking forward to establish a long term professional relationship with you.

Best Regards,
The Editors



Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega



Dr. José Ramón Ayala Bautista

Ponencia oral en congreso nacional AMIDIQ con el tema “Sistema de extracción de aceite esencial de cítricos a escala piloto”



ENCUENTRO NACIONAL DE LA AMIDIQ

Investigación e industria:
inclusión, retos y oportunidades
para la Ingeniería Química en México

Ciudad de México a jueves, 13 de abril de 2023

CONSEJO DIRECTIVO 2021-2023

Dr. Jorge Ramón Robledo Ortiz
PRESIDENTE
jorge.robledo@academicos.udg.mx

Dra. Nelly Ramírez Corona
VICEPRESIDENTA
nelly.ramirez@udlap.mx

Dr. Fernando Israel Gómez Castro
SECRETARIO
iq_fergo@hotmail.com

Dra. Sara Núñez Correa
TESORERA
samunez@uv.mx

Dra. Aida Alejandra Pérez Fonseca
VOCAL DE INVESTIGACIÓN
aida.perez@academicos.udg.mx

Dra. Adela Irmene Ortiz López
VOCAL DE DOCENCIA
irmene@cua.uam.mx

contacto@amidiq.com
WWW.AMIDIQ.COM
Canarias 704 Portales
CDMX, Benito Juárez
México, CP 03300

Estimado(a) autor(a) de contacto

Agradecemos sinceramente su interés por participar en el XLIV Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C. (AMIDIQ). Por este conducto nos complace informarle que su trabajo:

SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE CÍTRICOS A ESCALA PILOTO

ID: 779

Cuyos autores son:

Edson Eliseo Armenta Galvez, Marcos Alberto Coronado Ortega, José Ramón Ayala Bautista, Jesús Manuel Armenta Gálvez

ha sido aceptado para su presentación en la sesión de Biotecnología en la modalidad presentación Oral

Para ser acreedor de la constancia de participación se requiere que al menos uno de los autores esté inscrito, y que el trabajo haya sido efectivamente presentado. Para que el trabajo sea publicado en las memorias del congreso, es necesario cumplir con los criterios anteriores y haber enviado su trabajo en extenso.

En fechas posteriores podrá consultar el programa completo en nuestra página web www.amidiq.com para conocer el día y hora precisa de su presentación. Recuerde que tiene hasta el **21 de abril** para sustituir el resumen de dos páginas por su trabajo en extenso en la plataforma OpenConf y que al menos uno de los autores del trabajo deberá estar inscrito al evento a más tardar el **21 de abril** para ser incluido en el programa final.

A nombre de la AMIDIQ le agradecemos una vez más su participación y esperamos tener la oportunidad de saludarlo durante el evento.

Atentamente

COMITÉ TÉCNICO

XLIV Encuentro Nacional de la AMIDIQ A.C.

Certificación del “Curso General de Propiedad Intelectual DL-101”, de la WIPO.



Certificados del registro de obras literarias en INDAUTOR.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
MONTERO ALPIREZ GISELA
MONTES NUNEZ DANIELA GUADALUPE LUCIA

TÍTULO: EXTRACCION DE ACEITE ESENCIAL DE CITRICOS

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I, II y III de la Ley Federal del Derecho de Autor, no es objeto de protección como derecho de autor: las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras; los esquemas, planes o reglas para realizar actos mentales, juegos o negocios.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 165 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas constan, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2021-100613114100-01

Ciudad de México, a 11 de octubre de 2021

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESUS PARETS GOMEZ

SECRETARÍA DE CULTURA
INSTITUTO NACIONAL DEL
DERECHO DE AUTOR
DIRECCIÓN DE REGISTRO
PÚBLICO DEL DERECHO DE
AUTOR

 **CULTURA**
SECRETARÍA DE CULTURA

 **INDAUTOR**
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
MONTES NUÑEZ DANIELA GUADALUPE LUCIA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
SAGASTE BERNAL CARLOS ALFONSO
URBANO NILA ANDREA

TÍTULO: EXTRACTOS Y ACEITES ESENCIALES: ESTUDIO DE SU IMPORTANCIA EN EL MEDIO AMBIENTE

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3º de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 206, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-121310594400-01

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2022
EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
URBANO NILA ANDREA

TÍTULO: SISTEMA DE GESTION INTEGRAL DE CASCARA DE NARANJA RESIDUAL EN MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-120711222700-01

Ciudad de México, a 14 de diciembre de 2022
EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
URBANO NILA ANDRES

TÍTULO: ACEITES ESENCIALES COMO INGREDIENTES ACTIVOS PARA EL PADECIMIENTO DE LA PEDICULOSIS

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 63 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-121310472600-01

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2022

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
TORRES RAMOS RICARDO
URBANO NILA ANDREA

TÍTULO: BIOGAS A PARTIR DE ESTIERCOL BOVINO

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

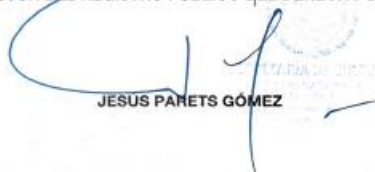
Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-121311005900-01

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2022

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR


JESUS PARETS GÓMEZ



CULTURA |
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

Certificado del curso SolidWorks Profesional®

INNOVACIONES TECNOLÓGICAS

EN MENCIÓN ESPECIAL POR SU DESARROLLO A:

Edson Eliseo Armenta Gálvez

Por cumplir con la competencia en el entrenamiento de 30 hrs en:

SOLIDWORKS PROFESIONAL

PhD. Héctor Velasco

Céd: 4267416, 4983894, 8307786, 11999751

Reg. STPS: VEMH820315BC4-0005

Reg. SEP: D-0001267820

INSTRUCTOR



No. 6092



Constancia de asistencia al ciclo de conferencias “La Propiedad Intelectual y la Juventud: Innovar para un Futuro Mejor”.



Universidad
Autónoma de
Baja California

La Universidad Autónoma de Baja California a través
del Instituto de Ingeniería otorga la presente

CONSTANCIA

Edson Eliseo Armenta Gálvez

Por haber asistido al ciclo de conferencias “La Propiedad Intelectual y la Juventud: Innovar para un Futuro Mejor”.

Con motivo del Día Mundial de la Propiedad Intelectual celebrado por la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), en el marco de actividades del Modelo de Vinculación Inteligente-Centro Inteligente de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la UABC y el Ecosistema STEAM UABC.

Dr. Mario Alberto Curiel Álvarez
Director
del Instituto de Ingeniería

Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega
Responsable de Propiedad Intelectual
del Instituto de Ingeniería

POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL HOMBRE
Mexicali, Baja California, México a 26 de abril de 2022



#worldipday
wipo.int/ipday

**LA PROPIEDAD
INTELLECTUAL
y la JUVENTUD:**

Innovar para un
Futuro Mejor



Participación como expositor del taller “Cocina y carga tu cel” en el festival aeroespacial “Mexicali en las alturas” abril 2022 y noviembre 2022.



Constancias de cursos de Coursera



4 cursos

Ser más creativos
Innovar
Entender el diseño
Creatividad, diseño e innovación: Técnicas y herramientas - Proyecto Final




Dec 2, 2022

Edson Eliseo Armenta Galvez
completó con éxito el programa especializado en línea sin créditos

Creatividad, diseño e innovación: Técnicas y herramientas

Utilice las herramientas y técnicas de creatividad, diseño e innovación para generar soluciones diferentes a las convencionales ante retos complejos y reconozca el papel crítico que juega el diseño en la sociedad. ¡Convértase en un líder creativo en su campo!

Prasad Boradkar
Professor
The Design School,
Arizona State University

Dra. Guadalupe Vadillo
Académica
Universidad Abierta y
Educación a Distancia

The online specialization named in this certificate may draw on material from courses taught on-campus, but the included courses are not equivalent to on-campus courses. Participation in this online specialization does not constitute enrollment at this university. This certificate does not confer a university grade, course credit or degree, and it does not verify the identity of the learner.

Verifica este certificado en:
<https://coursera.org/verify/specialization/7CNDZNPJH5CH>



COURSE
CERTIFICATE



Nov 3, 2022

Edson Eliseo Armenta Galvez
completó con éxito

Entender el diseño

un curso en línea sin crédito autorizado por Arizona State University y ofrecido a través de Coursera


Prasad Boradkar
Professor
The Design School, Arizona State University

Verify at:
<https://coursera.org/verify/EL78NIAFPWB>
Coursera confirmó la identidad de esta persona y su participación en el curso.



ARIZONA STATE UNIVERSITY

Certificate of Completion

Presented to

Edson Eliseo Armenta Gálvez

For successfully completing the
UABC INNOVATION PROGRAM

Session/Program Date
awarded on January 20, 2023
at Arizona State University



Dianna Lippincott

Dr. Dianna Lippincott, Ed. D.
Associate Director
Academic Programming & Innovation
Global Launch



Erin McCloskey

Erin McCloskey
Program Coordinator, Sr.
Global Launch