

Evaluation of Clean Technologies for the Extraction of Citrus Essential Oils

Cesar Horna-Saldaña¹ , Elmer Laguna² 

¹²Universidad ESAN, Peru, chorna@esan.edu.pe, elaguna@esan.edu.pe

Abstract– Peru is a country with vast biodiversity, significant citrus crops, and abundant citrus peel waste, which poses a challenge in terms of its use through essential oil extraction methods that minimize costs and are more energy-efficient and environmentally sustainable. In this study, two essential oil extraction technologies (traditional steam distillation and the Clevenger method) were compared in orange, tangerine, and tangelo peels with the aim of evaluating performance and finding the optimal parameters for the process. Different controlled tests were carried out with the two methods, measuring the volume of oil obtained, and a difference in the yield of the methods was found. The Clevenger method showed a 6.08% higher yield than the classic method (0.24%) in oranges, with similar trends observed in tangerines and tangelos. Consequently, it has been confirmed that the Clevenger method is more efficient for extracting essential oil from citrus waste, which represents an opportunity for industries with growth potential such as pharmaceuticals, cosmetics, and food due to its greater efficiency and sustainability.

Keywords– Essential oils, Citrus waste valorization, Clean extraction technologies, Clevenger method, Circular economy.

Evaluación de Tecnologías Limpias para la Extracción de Aceites Esenciales Cítricos

Jhonnatan Horna¹, Elmer Laguna²

¹²Universidad ESAN, Peru, 1204142@esan.edu.pe, elaguna@esan.edu.pe

Resumen– Perú es un país con una vasta biodiversidad, significativos cultivos de cítricos y abundantes residuos de cáscara de cítricos, los cuales representan un desafío en su aprovechamiento a través de métodos de extracción de aceites esenciales que minimicen costos y sean más eficientes energética y ambientalmente sostenibles. En este estudio se compararon dos tecnologías de extracción de aceite esencial (arrastre de vapor tradicional y el método Clevenger) en cáscaras de naranja, mandarina y tangelo con el objetivo de evaluar el rendimiento y encontrar los parámetros óptimos para el proceso. Se realizan diferentes pruebas controladas con los dos métodos, midiendo el volumen de aceite obtenido y se encontró una diferencia en el rendimiento de los métodos, el método Clevenger mostró un rendimiento superior de 6.08% frente al método clásico 0,24% en naranja, observándose tendencias similares en mandarinas y tangelo. En consecuencia, se ha podido confirmar que el método Clevenger presenta un mejor desempeño de extracción bajo las condiciones experimentales evaluadas, lo que representa una oportunidad para industrias con potencial crecimiento como la farmacéutica, cosmética y la alimenticia por su mayor eficiencia y sostenibilidad.

Palabras Clave – Aceites esenciales, Valorización de residuos cítricos, Tecnologías limpias de extracción, Método Clevenger, Economía circular.

I. INTRODUCCIÓN

Las exigencias actuales de producción demandan procesos que sean amigables a con el medio ambiente, capaces de diferenciarse y de aportar valor agregado a los productos. En ese contexto, los aceites esenciales representan una alternativa relevante por su uso industrial y su potencial para impulsar esquemas de aprovechamiento de residuos agroindustriales, alineados con enfoques de sostenibilidad y economía circular. La sostenibilidad no solo responde a una exigencia ambiental, sino que también puede entenderse como un criterio de gestión que fortalece la diferenciación, la generación de valor y la viabilidad de largo plazo de los procesos productivos [1]. Esta importancia también se refleja en el dinamismo del comercio internacional del sector, reportes de comercio internacional indican que el las exportaciones a nivel global de “essential oils” (HS 3301) alcanzó alrededor de US\$ 6.31 mil millones en 2024, mientras que las importaciones a nivel global alcanzaron alrededor de US\$ 6.4 mil millones en 2024 lo que confirma la relevancia económica de este grupo de productos a escala mundial [2], [3].

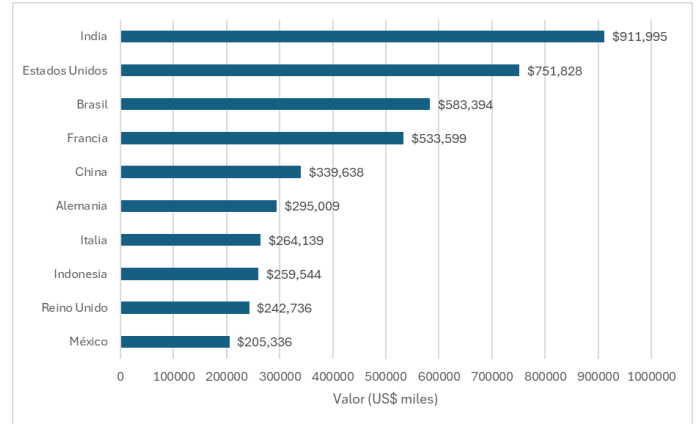


Fig 1. Principales exportadores de aceites esenciales en 2024 (en miles de USD)

En la Figura 1 se registran a los principales exportadores de aceites esenciales, destacan India como principal exportador, seguido por Estados Unidos y Brasil [2]. Por el lado de las importaciones en la Figura 2, destacan Estados Unidos como principal importados, seguido de Alemania y Francia [3].

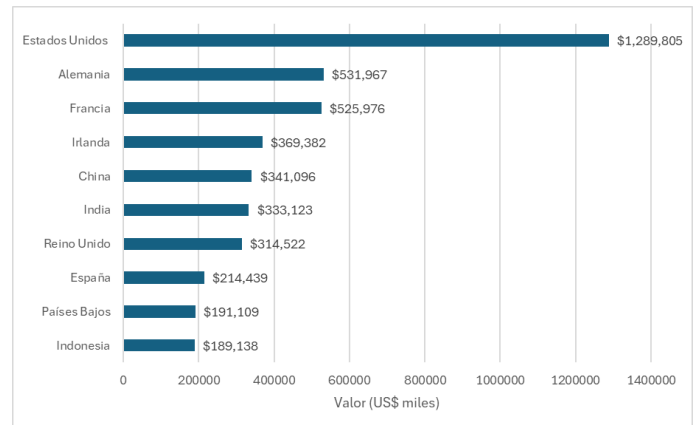


Fig 2. Principales importadores de aceites esenciales en 2024 (en miles de USD)

Además, en la Figura 3, se pudo visualizar una tendencia de incremento sostenible del consumo de aceites esenciales a nivel mundial, con una leve disminución en el año 2020, año en el que se agudizó la pandemia Covid-19. Lo que indica que el interés por el consumo de aceites esenciales ha ido creciendo considerablemente en los últimos años [3].

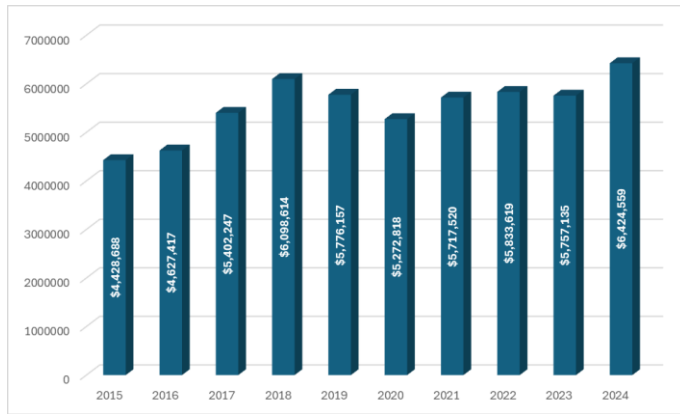


Fig. 3 Importaciones a nivel mundial de aceites esenciales en el periodo 2015-2024 (en miles de USD)

El Perú no es ajeno a la producción y exportación de “essential oils” (HS 3301), en 2024 alcanzó US\$108 millones en exportaciones [2]. Sin embargo, junto con el crecimiento, cada año se desaprovechan grandes volúmenes de vegetales y frutas, asociados mermas en campo, limitaciones logísticas y estrategias de venta poco eficientes. Precisamente acá es donde surge una oportunidad de transformar desperdicios en recursos, porque puede revalorizarse mediante procesos de extracción para obtener aceites esenciales de cítricos con mayor valor agregado. Aprovechar estos subproductos, no solo permitiría reducir pérdidas y mejorar la eficiencia en la cadena, sino también incrementar la rentabilidad en áreas de negocios como la farmacéutica, cosmética y la alimenticia.

En el 2022 la producción de cítricos en el Perú llegó a 1651 miles de toneladas, según lo reportando por el Minagri. En la Figura 4 se observa un aumento significativo de la producción de cítricos, incrementándose en un 38,27% desde el 2017 al 2022 [4].

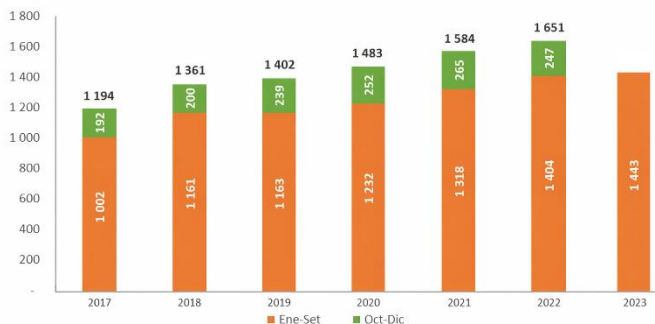


Fig. 4 Producción de Cítricos en el Perú entre 2017 a 2023. (Miles de toneladas)
Nota. Fuente y Elaboración: Minagri (Dirección de Estadísticas e Información Agraria y Dirección de Estudios Económicos) [4].

En 2022, la mandarina dominó la producción, alcanzó 639 mil toneladas y lideró ampliamente las exportaciones con US\$224 millones, impulsadas sobre todo por la demanda de Estados Unidos. La naranja, aunque produjo 591 mil toneladas, tuvo un desempeño exportador mucho menor (US\$4 millones). El tangelo quedó como un producto más pequeño en volumen (83 mil toneladas), pero con una presencia exportadora intermedia (US\$9 millones), también centrada en el mercado

estadounidense [4]. En la Tabla 1 se muestra los datos más relevantes sobre los cítricos en el Perú en el año 2022.

TABLA 1
PRINCIPALES INDICADORES DE CITRICOS EN EL PERÚ EN EL 2022

Indicador	Mandarina	Naranja	Tangelo
Producción	639 mil t	591 mil t	83 mil t
Principales zonas productoras	Lima 48%, Ica 34%, Junín 9% (92% total)	Junín 51%, San Martín 15%, Lima 6,1%, Ica 5,5% (78% total)	Junín 51%, Ica 29%, Lima 13%
Exportaciones	US\$224 millones	US\$4 millones	US\$9 millones
Destinos exportación	EE. UU. 56%, Inglaterra 12%, Holanda 10%, Japón 8%	Holanda 51% y Países Bajos 28%	EE. UU. 37%, Holanda 24%, Inglaterra 9%

Es por esto por lo que, para este estudio, se está utilizando un residuo agroindustrial abundante como materia prima, lo que le agrega valor, al utilizar principios de economía circular y sostenibilidad. Las metodologías empleadas en este estudio para extraer aceites esenciales no requieren solventes orgánicos. Esto permite que los residuos del proceso puedan reaprovecharse como subproductos biodegradables y que las cáscaras, en lugar de desecharse, se conviertan en un producto de mayor valor: el aceite esencial.

El objetivo de este estudio es comparar el rendimiento de extracción de aceite esencial de naranja, mandarina y tangelo utilizando la destilación por arrastre de vapor clásica y Clevenger, identificando qué tecnología produce mayor rendimiento.

Este estudio desarrolla pruebas experimentales para establecer condiciones adecuadas de extracción de aceites esenciales desde cáscaras de cítricos, usando dos tecnologías limpias, clásica por arrastre de vapor y Clevenger, con enfoque en su aplicación industrial. La comparación considera no solo el volumen obtenido, sino también la eficiencia en tiempo, energía y las características del aceite producido.

II. MARCO TEÓRICO

A. Aceites esenciales a partir de cáscara de cítricos

A menudo, suele confundirse el término fragancia o esencia, con el de aceite esencial. Los aceites esenciales son la mezcla volátil obtenida por materias primas vegetales mediante la destilación de agua y vapor, también mediante procesos mecánicos aplicados sobre el epicardio (cáscara), separados posteriormente por medios físicos [5]. Desde una perspectiva histórica, han sido descritos como la “quinta esencia” de la planta. La acuñación del término “aceite esencial” suele atribuirse a Paracelso en el siglo XVI [6].

La fuente principal de los aceites esenciales son las plantas aromáticas, aunque la mayoría de las plantas los contienen, en general, se concentran en mayor proporción en órganos ricos en

compuestos volátiles como flores, hojas, semillas y, en cítricos, la cáscara[7].

En términos composicionales, los aceites esenciales son mezclas complejas dominadas por terpenos y terpenoides, además de fracciones oxigenadas donde suelen encontrarse alcoholes, aldehídos, cetonas y ésteres. En aceites esenciales cítricos, la fracción mayoritaria suele corresponder proporción hidrocarburos monoterpénicos $C_{10}H_{16}$ y en menor de sesquiterpenos ($C_{15}H_{24}$), ambos componentes explican en gran medida el perfil aromático característico [7]. Dentro de estos, el d-limoneno es uno de los principales componentes y su fórmula estructural se muestra en la Figura 5. En aceite esencial de naranja puede presentarse como componente predominante, reportándose valores cercanos a 90% o superiores según el método y las condiciones de obtención [8].

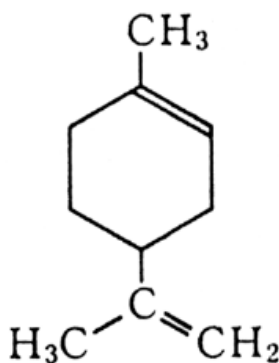


Fig. 5 Fórmula del d-limoneno

En aceites cítricos, aunque el d-limoneno suele dominar la fracción hidrocarbonada, los hidrocarburos monoterpénicos aportan relativamente poco a las notas organolépticas finas y pueden oxidarse con mayor facilidad, afectando la estabilidad oxidativa relativa frente a fracciones más oxigenadas y el desempeño como la baja solubilidad en alcohol. Por ello, la separación parcial o profunda de la fracción hidrocarbonada es una operación relevante. Este proceso se conoce como desterpenación y permite obtener aceites “concentrados” cuando se remueve solo una parte de los hidrocarburos, o aceites “terpeneless” cuando la fracción hidrocarbonada final es mucho menor; comercialmente, la intensidad del concentrado suele expresarse como “fold” (por ejemplo, 2-fold, 5-fold, 10-fold), asociada al grado de concentración y al incremento de estabilidad, calidad organoléptica y valor del producto frente a un aceite crudo [7].

B. Tecnologías de extracción

La extracción de aceites esenciales por destilación con agua y/o vapor es una de las rutas más empleadas por su simplicidad y su aplicación a múltiples procesos con vegetales. A escala de laboratorio, el montaje tipo Clevenger se usa ampliamente en hidrodestilación porque integra la condensación y una trampa de separación que facilita la recuperación del aceite. En cambio, la destilación por arrastre de vapor se asocia a esquemas de producción y escalamiento

industrial por su robustez operativa. Bajo este enfoque, comparar ambas tecnologías para aprovechar residuos cítricos permite evaluar desempeño no solo en rendimiento, sino también en tiempo de obtención y costos de utilidades, como criterios técnicos para el aprovechamiento de subproductos [9], [10].

En la metodología clásica, el principal inconveniente es que no siempre se recupera todo el aceite: una parte puede quedarse en el recipiente de la muestra sin llegar al refrigerante. Además, si el recipiente se llena con el destilado, el proceso puede desestabilizarse y perjudicar la extracción. En contraste, el sistema Clevenger tiende a mejorar la recuperación a escala laboratorio porque mantiene un equilibrio de destilación-condensación con separación integrada, aunque exige mayor acondicionamiento de la muestra (secado y reducción de tamaño) [9].

C. Aplicaciones de los aceites esenciales.

En los últimos años, el aumento de la demanda se vincula con la preferencia por ingredientes naturales en alimentos y bebidas, perfumería y cosmética, productos de cuidado personal y usos funcionales (preservación natural). En revisiones literarias recientes se ha encontrado que la expansión de aplicaciones y el interés sostenido en aromaterapia y bienestar. [11]. Además, debido a que su fracción terpénica (limoneno) puede comportarse como biosolvente de origen natural, se usa en formulaciones y procesos donde se valoran propiedades de solvencia “verde”, lo que respalda su adopción en segmentos como limpieza doméstica e industrial [12].

TABLA 2
UTILIZACIÓN DE ACEITES ESENCIALES EN DIFERENTES
INDUSTRIAS Y SEGMENTOS

Industrias / Segmentos	Aplicación típica de aceites esenciales	Ejemplos de producto
Alimentos y bebidas	Aromatizante/saborizante: notas cítricas	Gaseosas, bebidas saborizadas, repostería, confitería
Cosmética y perfumería	Fragancia, sensorial	Cremas, jabones, perfumes, productos capilares
Hogar e industria	Fragancia y componente terpénico con función de solvencia en formulación	Limpiadores, desengrasantes, ambientadores
Farmacéutica y bienestar	Aromaterapia; soporte funcional (según formulación)	Difusores, mezclas para masaje
Preservación de alimentos (tendencia)	Actividad antimicrobiana/antioxidante en sistemas específicos	Recubrimientos, formulaciones naturales de conservación

D. Sostenibilidad y Valorización de Residuos

Aplicando un enfoque de sostenibilidad a la destilación de aceites esenciales, los “desechos” del proceso se pueden revalorizar en una lógica de economía circular, la postdestilación genera residuos (biomasa agotada) y corrientes líquidas (aguas del proceso), las cuales se pueden reinsertar en cadenas de valor mediante rutas como compostaje, abonos orgánicos y la recuperación de compuestos bioactivos.

Reduciendo así la incertidumbre de la disposición final y el aumento del valor global al sistema [13].

Por el lado operativo, la mejora ambiental se asocia a la eficiencia hídrica del sistema: el agua utilizada en el enfriamiento puede ser reutilizada mediante recirculación y enfriamiento de manera natural, lo que generaría una disminución al consumo total de agua [14].

Por último, la valorización de residuos adquiere sentido completo cuando se integra la dimensión social. El abastecimiento de material vegetal involucra recolectores, agricultores o proveedores locales. Bajo esta lógica, la valorización de residuos también puede entenderse como una oportunidad de creación de valor compartido, en la medida en que articula beneficios económicos con relaciones más estables entre actores locales, proveedores y esquemas productivos de base territorial [15]. En marcos como BioTrade, la sostenibilidad exige no solo conservación y uso sostenible, sino también distribución justa de beneficios, sostenibilidad socioeconómica y respeto por los derechos de los actores en la cadena de valor. En consecuencia, el trabajo con proveedores y, si corresponde, comunidades vinculadas al recurso vegetal debe alinearse con prácticas de comercio justo, condiciones adecuadas de trabajo y mecanismos claros de beneficios, fortaleciendo el impacto positivo del proceso más allá del desempeño técnico [16].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describe el procedimiento de cómo se llevó a cabo la extracción de aceites, abarcando desde la selección de la materia prima, la preparación de los residuos de cáscara, la descripción de los métodos de extracción y el análisis posterior de los aceites obtenidos.

Se ejecuto una serie de ensayos experimentales, se realizaron 12 pruebas por cada tipo de presentación de la muestra (húmeda, seca, pulverizada), completando un total de 108 pruebas experimentales.

A. Materia Prima

La materia prima utilizada para este estudio estuvo constituida de cáscara (epicarpio/flavedo) de naranja dulce cuyo nombre científico es *Citrus sinensis* Linn Osbeck, la cual está dentro de las especies del grupo blancas y pertenece a la variedad Valencia, Así mismo, se empleó la cáscara de mandarina (*Citrus reticulata* Blanco) y la cáscara de tangelo (*Citrus x citrus paradisi*). Debido a que estas materias cítricas concentran compuestos de interés tecnológico para la obtención de aceites esenciales [17].

B. Preparación de muestra

Se realizaron 36 pruebas experimentales por cada especie, de las cuales 12 fueron con cáscara húmeda (fruto recién pelado) y por metodología de arrastre por vapor clásico, 12 fueron con cáscara semiseca (expuesta al sol por dos días) y por metodología de arrastre por vapor clásico y las otras 12 fueron con cáscara molida (colocada en la estufa a 60 °C por dos días y posteriormente molida) empleando el método Clevenger.

Además, se tiene que tener en cuenta algunos parámetros, los cuales se muestran en la Tabla 3.

TABLA 3
PARAMETROS OPTIMOS DE LA MUESTRA

Parámetros	Descripción
Secado	El secado del material se realiza para concentrar el aceite esencial por unidad de masa antes de la destilación. Para ello, las cáscaras se mantuvieron en estufa a 60 °C durante dos días.
Molienda	La molienda busca controlar el tamaño de partícula para favorecer la extracción. Se trabajó con un rango de 4 a 6 mm, ya que una mayor superficie expuesta al vapor incrementa la recuperación de aceite esencial.
Riesgo operativo	Si se muele demasiado y si el tamaño no es el adecuado, pueden generarse partes que producirían espuma, que puede mezclarse con el aceite y arruinar el procedimiento

C. Métodos de Extracción de Aceites Esenciales

En la Figura 6, se esquematiza el proceso de extracción correspondiente a los métodos seleccionados. En cada metodología se trabajó con distintos tipos de muestra, utilizando cáscaras de naranja, mandarina y tangelo. En términos generales, la destilación con agua/vapor es una de los métodos más empleadas para obtener aceites esenciales, a escala de laboratorio, el montaje tipo Clevenger se utiliza ampliamente para hidrodestilación y recuperación del aceite, mientras que la destilación por arrastre de vapor se asocia a aplicaciones industriales por su simplicidad operativa [9].

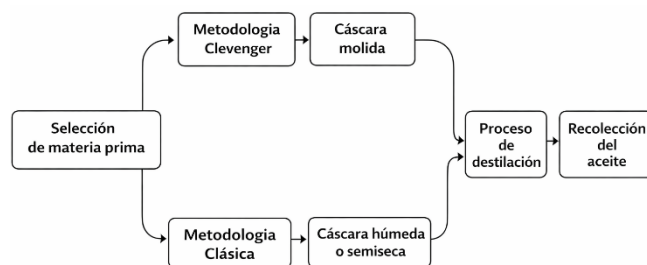


Fig. 6 Esquema de proceso experimental para la extracción de aceites esenciales cítricos.

- Método de arrastre de vapor clásico

La muestra se prepara recolectando la cáscara y se la convierte en tiras, en condición húmeda o semiseca. Se pesa aproximadamente 200 g (registrando el valor exacto) y se coloca en la columna de vidrio del equipo de destilación. Posteriormente, en el balón de fondo plano se adicionan aproximadamente 2000 mL de agua destilada y se arma el sistema verificando el sellado de juntas para evitar fugas. Luego, se conectan las mangueras del refrigerante, se habilita el flujo continuo de agua de enfriamiento y se inicia el calentamiento hasta mantener destilación a condiciones constantes durante 90 min. El destilado se conduce hacia el sistema de separación, recolectándose la fase oleosa en las peras de separación. Para minimizar contaminación cruzada entre corridas y matrices, el equipo se lava completamente al término de cada extracción. Tras un periodo de reposo (~24 h) se

recupera el aceite en goteros previamente esterilizados y rotulados [9], [10].

- Método Clevenger

La cáscara se acondiciona mediante secado en estufa y posterior molienda hasta obtener material pulverizado, con el objetivo de homogenizar la matriz y favorecer la liberación de compuestos volátiles durante la hidrodestilación. Se pesa aproximadamente 50 g (registrando el valor exacto) y se transfiere a un balón de fondo plano de 1000 mL; se adicionan aproximadamente 500 mL de agua destilada y se ensambla el equipo de destilación tipo Clevenger. Se conecta el refrigerante, se establece el flujo de agua de enfriamiento y se destila a condiciones constantes durante 90 min. El aceite se recolecta directamente en recipientes estériles rotulados, cuidando el almacenamiento en condiciones que reduzcan oxidación y pérdidas por volatilización (por ejemplo, envases adecuados y mínima exposición a luz) [9].

D. Parámetros Medidos

Al finalizar cada extracción, la cual dura en promedio 90 min, se registró el volumen de aceite (mL), la masa de la muestra (g), el caudal del agua (mL/min) y el consumo de energía eléctrica (kW). En estudios de destilación e hidrodestilación es habitual expresar el rendimiento como mL de aceite por 100 g de muestra [18]. El rendimiento se calculó como:

$$R(\%) = \frac{V(mL)}{m(g)} \cdot 100$$

Los costos de la extracción se calcularon teniendo en cuentas los costos relacionados al consumo de agua y energía eléctrica. El costo de agua se calculó a partir del volumen total circulado por el condensador:

$$C_{agua} = Q \left(\frac{mL}{min} \right) \cdot t(min) \cdot p_a \left(\frac{\$}{mL} \right)$$

Donde Q es el caudal medido, t el tiempo de extracción y p_a el precio unitario del agua. El control del caudal de agua del condensador es una variable operativa relevante en destilación porque puede influir en la recuperación y calidad del aceite recuperado [14]. El costo de electricidad se calculó con potencia y tiempo efectivo en horas:

$$C_{electricidad} = P(kW) \cdot t \left(\frac{min}{60} \right) \cdot p_e \left(\frac{\$}{kWh} \right)$$

Donde P es la potencia nominal de la plancha o equipo de calentamiento y p_e el precio unitario de electricidad. La cuantificación de consumo energético y su impacto económico es consistente con análisis termo económicos reportados para sistemas de destilación de aceites esenciales [19].

Se delimitó que el análisis económico presentado en este estudio corresponde únicamente a la etapa de extracción, considerando el consumo de agua y energía eléctrica del proceso de destilación. No se consideró el costo de trituración o pulverización de la muestra, debido a que esta provino de

residuos agroindustriales recolectados de otras operaciones de descarte y acondicionamiento previo. En consecuencia, los costos reportados deben interpretarse como costos operativos directos de extracción a escala de laboratorio y no como el costo total de una línea integral de procesamiento.

E. Caracterización fisicoquímica

Los aceites esenciales de naranja, mandarina y tangelo obtenidos mediante destilación por arrastre de vapor (metodología clásica) y mediante el método Clevenger fueron analizados y caracterizados fisicoquímicamente. Se determinó la densidad relativa, el índice de refracción y la solubilidad en agua y en otros solventes, además de registrarse las características de color y apariencia de cada muestra. Para estos ensayos se consideraron normas técnicas aplicables, tales como: densidad relativa (NTP 319.075:1974), índice de refracción (NTP 319.084:1984) y solubilidad en etanol 70.2% (NTP 319.081:1974).

Tras la ejecución de los ensayos experimentales, se compararon los rendimientos, el método de extracción, la duración del proceso, la influencia del tipo de muestra de cáscara, los costos asociados, el análisis organoléptico y la caracterización fisicoquímica de los aceites, con el propósito de explicar las diferencias observadas entre tratamientos y metodologías.

IV. RESULTADOS

A. Efectos del Pretratamiento de la Muestra

Los resultados iniciales que se obtuvieron al preparar la muestra que se muestra en la Tabla 4, se observó que, bajo la metodología clásica con muestra semiseca, el secado al sol produjo una disminución moderada de la masa (entre 25% y 30%), lo que sugiere una pérdida parcial de humedad. En cambio, el método Clevenger mostró reducciones mucho mayores al secar la muestra en estufa (de 61.04% a 70%), indicando un retiro más intenso de agua. Además, al pulverizar la muestra (etapa posterior al secado), la masa final resultó aún menor respecto a la masa húmeda inicial, alcanzando reducciones totales de 65.64% a 75.47%, lo que evidencia el efecto combinado del secado más eficiente y la preparación física del material para la extracción.

TABLA 4
RESULTADOS INICIALES AL PREPARAR LA MUESTRA

Ensayo	Metodología clásica	Clevenger	Clevenger (pulverización)
1	30%	70%	73%
2	25%	68.00%	75.47%
3	28%	61.04%	65.64%

B. Comparación del Desempeño de Extracción

En la comparación de metodologías de arrastre por vapor (clásica con muestra húmeda y semiseca, y Clevenger con muestra molida), el resultado más relevante es la clara superioridad del método Clevenger en volumen, rendimiento y tiempo. Según la Tabla 5, la naranja extraída por Clevenger alcanzó el mayor volumen de aceite (3.04 mL) y el mayor

rendimiento (6.08%), además de presentar el menor tiempo de obtención (26.92 min). En contraste, en la metodología clásica los volúmenes fueron marcadamente menores; sin embargo, la mandarina destacó dentro de este método al registrar los mayores volúmenes (0.87 mL con cáscara húmeda y 1.19 mL con cáscara semiseca).

El rendimiento también incrementó de forma consistente al aplicar Clevenger en los tres cítricos: mandarina llegó a 1.31% y tangelo a 3.11%, superando los valores obtenidos con el método clásico. En costos, la mandarina semiseca por método clásico presentó el mayor costo (S/. 268.77), mientras que la naranja por Clevenger mostró el menor (S/. 191.78).

El tiempo reportado en la Tabla 5 corresponde únicamente al tiempo efectivo de extracción/destilación y no al tiempo total de acondicionamiento previo de la muestra.

TABLA 5
RESULTADOS DE COMPARAR METODOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES

Var.	Clásico (muestra húmeda)			Clásico (muestra semiseca)			Clevenger (muestra molida)		
	N	M	T	N	M	T	N	M	T
V (mL)	0.51	0.87	0.66	0.69	1.19	0.81	3.04	0.66	1.56
t (min)	40.33	34	34.67	34.25	33.58	34.75	26.92	28.42	28.25
R (%)	0.24%	0.41%	0.31%	0.32%	0.56%	0.38%	6.08%	1.31%	3.11%
Costos (S/.)	209.77	261.75	237.75	209.77	268.77	241.77	191.78	243.77	207.76

Nota: N: Naranja, M: Mandarina, T: Tangelo

Bajo las condiciones experimentales evaluadas y considerando únicamente los costos operativos directos de la etapa de extracción, el método Clevenger mostró un mejor desempeño técnico y una mejor relación entre rendimiento obtenido y costo operativo directo de extracción. Más allá de los valores absolutos, el diferencial se entiende mejor en términos relativos: en naranja, Clevenger incrementa el rendimiento de 0.24% a 6.08% (25.3 veces) y reduce el tiempo de 40.33 min a 26.92 min (~33%). Además, el costo específico cae de S/. 411.31 por mL (clásico húmeda) a S/. 63.09 por mL (Clevenger molida), evidenciando una ventaja operativa dentro del alcance experimental evaluado, cuando el objetivo es maximizar la recuperación del aceite a partir de residuos.

En términos de costo específico, Clevenger en naranja reduce significativamente el costo por mL obtenido frente al método clásico, evidenciando una ventaja operativa en la etapa de extracción cuando el objetivo es maximizar la recuperación del aceite a partir de residuos, como se muestra en la Tabla 6.

TABLA 6
COSTOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE POR MILILITRO

Caso	Costo (S/.)	Volumen (mL)	S/ por mL
Clásico húmeda (Naranja)	209.77	0.51	411.31
Clásico semiseca (Mandarina)	268.77	1.19	225.85
Clevenger molida (Naranja)	191.78	3.04	63.09

C. Caracterización fisicoquímica del aceite

En la Tabla 7 se presenta el consolidado de los resultados correspondientes a la caracterización realizada para cada uno de los aceites.

TABLA 7
CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES

Propiedades	Naranja	Mandarina	Tangelo
Apariencia	Líquido oleoso límpido, olor cítrico característico	Líquido oleoso límpido, olor cítrico característico	Líquido oleoso límpido, olor cítrico característico
Color	Ligeramente amarillo lechoso	Ligeramente lechoso	Ligeramente amarillo lechoso
Densidad (g/mL)	1.4718	1.474	1.4724
Índice de refracción	1.4738	1.4765	1.4744
Solubilidad en agua	No	No	No
Solubilidad en alcohol	Sí	Sí	Sí
Solubilidad en cloroformo	Sí	Sí	Sí
Solubilidad en éter etílico	Sí	Sí	Sí

Como se puede apreciar, la apariencia y color de los aceites de naranja, mandarina y tangelo son muy similares y sus valores de densidad e índice de refracción son muy cercanos, aunque la mandarina presenta valores ligeramente mayores respecto a los otros dos cítricos, es decir si los ordenamos de mayor a menor el orden sería: mandarina, tangelo y naranja. Asimismo, los tres cítricos son solubles en solventes orgánicos, pero no en agua.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados confirman que el pretratamiento es un factor determinante en el rendimiento de la extracción, ya que modifica directamente la transferencia de masa entre la matriz vegetal y el vapor. Un secado más intenso, asociado a una reducción del tamaño, aumenta la superficie específica y facilita la ruptura o apertura de las estructuras que retienen el aceite, lo que mejora el contacto sólido-vapor y acelera su liberación. Esto explica los volúmenes recuperados y los rendimientos más elevados observados con el sistema Clevenger. Sin embargo, el efecto no es lineal: una trituration excesiva puede ser contraproducente, ya sea por las pérdidas de aceite esencial durante la fase de trituración o por las alteraciones físicas del material, que dificultan el paso del vapor y la posterior separación. Por lo tanto, los datos confirman la necesidad de controlar el tamaño de las partículas y trabajar en el rango óptimo determinado, donde se maximiza la recuperación sin aumentar las pérdidas ni comprometer el funcionamiento del proceso.

Con el secado a 60°C, se favoreció a la concentración del aceite y la posterior recuperación en el sistema Clevenger, sin embargo, debe considerarse que temperaturas elevadas y exposición al oxígeno pueden afectar la estabilidad de

compuestos volátiles como el d-limoneno. Los resultados muestran una optimización del rendimiento de extracción, pero futuras investigaciones deberían complementar el análisis con pruebas cromatográficas (HPLC o GC-MS) que permitan verificar posibles cambios en la composición química del aceite.

Como limitación del estudio, la comparación económica se centró en los costos operativos directos de la extracción a escala de laboratorio y no se incorporó de forma independiente el costo de acondicionamiento mecánico de la muestra ni el tiempo total de preparación previa a la destilación. Por ello, la ventaja técnico-económica observada para el método Clevenger debe interpretarse principalmente en términos de rendimiento y desempeño durante la extracción, más que como una estimación de costo total de una línea industrial completa.

VI. CONCLUSIONES

Los resultados confirman que el pretratamiento del material es decisivo para optimizar la recuperación de aceite esencial. El secado busca concentrar el aceite por unidad de masa antes de la destilación (60 °C durante 48 h), no debería implicar pérdidas relevantes y mejora la eficiencia del proceso al reducir humedad y estabilizar la materia prima. En la metodología Clevenger, el tamaño de partícula se identificó como un parámetro crítico, trabajar con material molido en el rango de 4 a 6 mm equilibra adecuadamente el aumento de superficie expuesta al vapor y minimiza pérdidas. Si la molienda es excesiva y se generan partículas demasiado finas, pueden presentarse pérdidas de aceite esencial y dificultades operativas durante la destilación, por lo que el rango definido se justifica como condición óptima.

Al comparar los métodos empleados en los tres cítricos analizados, se observaron comportamientos diferenciados según el método y la condición de la muestra. Con Clevenger se tiene que la naranja presenta el mayor volumen (~ 3 mL), mientras que con la metodología clásica la mandarina registró los mayores volúmenes (~ 0.8 mL con cáscara húmeda y 1 mL con cáscara semiseca). El tangelo mostró un desempeño intermedio, con volúmenes superiores a la mandarina en Clevenger (~ 1.5 mL) y superiores a la naranja en la metodología clásica (~ 0.6 mL con cáscara húmeda y 0.8 mL con cáscara semiseca), evidenciando que el rendimiento final depende del tipo de cítrico, la preparación de la muestra y el esquema de extracción.

En términos de desempeño operativo, el método Clevenger presentó ventaja frente al método clásico al reducir los tiempos de obtención del destilado. Además, el análisis del rendimiento ratifica que el método Clevenger es superior a la metodología clásica, en el caso de la naranja el rendimiento es 6.08% y 0.24% cuando se trata de cáscara húmeda, para la mandarina 0.41% con método clásico y cáscara húmeda, 0.56% con método clásico y cáscara semiseca y 1.31% con método Clevenger, para el tangelo 0.31% con método clásico y cáscara húmeda, 0.38% con método clásico y cáscara semiseca y 3.11% con método Clevenger.

Desde la perspectiva económica a escala de laboratorio, la mandarina semiseca procesada por la metodología clásica presentó el mayor costo operativo directo de extracción (S/. 268.77), mientras que la menor estructura de costos correspondió a la naranja tratada por Clevenger (S/. 191.78). La mandarina resultó sistemáticamente más costosa en ambos métodos, asociada a las condiciones de la muestra evaluada. En costo específico, la naranja con Clevenger destacó por reducir de manera marcada el costo por volumen obtenido (S/. 63.09 por mL).

A escala de laboratorio, y restringiendo el análisis económico a los costos directos de extracción, la muestra de naranja procesada por Clevenger presentó el menor costo específico por mL obtenido. Sin embargo, para una comparación integral entre tecnologías sería necesario incorporar el consumo energético del secado, el costo de pulverización y el tiempo total de acondicionamiento de la muestra.

Finalmente, este trabajo aporta una oportunidad clara de sostenibilidad al valorizar residuos agroindustriales cítricos como materia prima, transformándolos en un producto de mayor valor agregado sin emplear solventes orgánicos. La integración de prácticas de economía circular es viable: el residuo sólido post-destilación puede destinarse a compostaje o abonos orgánicos, y el agua del sistema puede recircularse mediante enfriamiento y recuperación, reduciendo consumo energético e impacto ambiental.

REFERENCIAS

- [1] Marshall Goldsmith School of Management at Alliant International University, San Francisco, USA y B. Tran, "Green management: the reality of being green in business", *Cuad. Difus.*, vol. 14, núm. 27, pp. 21–45, dic. 2009, doi: 10.46631/jefas.2009.v14n27.02.
- [2] TRADE MAP, "List of exporters for the selected product Product: 3301 Essential oils, whether or not terpeneless". [En línea]. Disponible en: https://www.trademap.org/tradestat/Country_SelProduct_TS.aspx?nvpm=1%7c%7c%7c%7c%7c3301%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c2%7c2%7c1%7c2%7c1%7c%7c1
- [3] TRADE MAP, "List of importers for the selected product Product: 3301 Essential oils, whether or not terpeneless". [En línea]. Disponible en: https://www.trademap.org/tradestat/Country_SelProduct_TS.aspx?nvpm=1%7c%7c%7c%7c%7c3301%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c2%7c1%7c%7c1
- [4] MINAGRI, "Situación Productiva y Comercial de los Cítricos en el Perú". 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/1920/1/situacion-productiva-y-comercial-de-los-citricos-en-el-peru.pdf>
- [5] D. P. De Sousa *et al.*, "Essential Oils: Chemistry and Pharmacological Activities", *Biomolecules*, vol. 13, núm. 7, p. 1144, jul. 2023, doi: 10.3390/biom13071144.
- [6] H. E. Allaoui *et al.*, "Selection of essential oil extraction methods using the analytic hierarchy process (AHP) and the preference ranking organization method for enrichment evaluations (PROMETHEE) approaches", *J. King Saud Univ. – Sci.*, vol. 37, p. 2962024, sep. 2025, doi: 10.25259/JKSUS_296_2024.
- [7] S. M. Vilas-Boas *et al.*, "Deterpenation of citrus essential oil via extractive distillation using imidazolium-based ionic liquids as entrainers", *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 156, p. 105367, mar. 2024, doi: 10.1016/j.jtice.2024.105367.
- [8] J. A. García-Fajardo *et al.*, "Separation of D-Limonene and Other Oxygenated Compounds from Orange Essential Oil by Molecular

- Distillation and Fractional Distillation with a Wiped Film Evaporator”, *Processes*, vol. 11, núm. 4, p. 991, mar. 2023, doi: 10.3390/pr11040991.
- [9] K. H. C. Başer y G. Buchbauer, Eds., *Handbook of essential oils: science, technology, and applications*, Third edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020.
- [10] C. A. Machado, F. O. Oliveira, M. A. De Andrade, K. V. S. Hodel, H. Lepikson, y B. A. S. Machado, “Steam Distillation for Essential Oil Extraction: An Evaluation of Technological Advances Based on an Analysis of Patent Documents”, *Sustainability*, vol. 14, núm. 12, p. 7119, jun. 2022, doi: 10.3390/su14127119.
- [11] P. Agarwal *et al.*, “Citrus Essential Oils in Aromatherapy: Therapeutic Effects and Mechanisms”, *Antioxidants*, vol. 11, núm. 12, p. 2374, nov. 2022, doi: 10.3390/antiox11122374.
- [12] M. Pagliaro, A.-S. Fabiano-Tixier, y R. Ciriminna, “Limonene as a natural product extraction solvent”, *Green Chem.*, vol. 25, núm. 16, pp. 6108–6119, 2023, doi: 10.1039/D3GC02068A.
- [13] S. Khiri *et al.*, “Transforming essential oil extraction Wastes: Sustainable valorization approaches for agricultural, industrial, and cosmetic applications”, *Biomass Bioenergy*, vol. 201, p. 108109, oct. 2025, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.108109.
- [14] H. Smith *et al.*, “The Flow Rate of the Condenser Cooling Water in the Distillation Process Increases the Quality and Quantity of Patchouli Oil”, *Sci. World J.*, vol. 2024, pp. 1–7, feb. 2024, doi: 10.1155/2024/9844242.
- [15] M. Maestre Matos, J. Lombana-Coy, y F. J. Mesías, “Creation of shared value in cooperatives: informal institutions’ perspective of small-sized banana growers from Colombia”, *J. Econ. Finance Adm. Sci.*, vol. 28, núm. 55, pp. 134–159, sep. 2023, doi: 10.1108/JEFAS-09-2021-0186.
- [16] M. J. Oliva, L. Jaramillo Castro, D. Vivas Eugui, y L. Sasaki, *UNCTAD BioTrade Initiative: BioTrade Principles and Criteria for terrestrial, marine and other aquatic biodiversity-based products and services*. Geneva: UN, 2020.
- [17] P. Ollitrault, F. Curk, y R. Krueger, “Citrus taxonomy”, en *The Genus Citrus*, Elsevier, 2020, pp. 57–81. doi: 10.1016/B978-0-12-812163-4.00004-8.
- [18] R. Kant y A. Kumar, “Review on essential oil extraction from aromatic and medicinal plants: Techniques, performance and economic analysis”, *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 30, p. 100829, dic. 2022, doi: 10.1016/j.scp.2022.100829.
- [19] R. Kant y A. Kumar, “Thermo-enviro-economic analysis of conventional steam distillation system for peppermint oil extraction”, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 46, p. 102246, dic. 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2023.102246.