







## Optimización del proceso de extracción asistido por microondas de aceites esenciales de *Peperomia subspathulata* en el suroccidente colombiano

Optimization of Essential Oils Microwave Assisted Extraction Process of *Peperomia subspathulata* in Colombian Southwest

 Valeria Pérez-Pazos<sup>1</sup>;  David Arturo-Perdomo<sup>1</sup>;  Cesar A. Mujica-Martínez<sup>1</sup>;  
 Jhon Ironzi Maldonado-Rodríguez<sup>2</sup>;   Juan Camilo Vargas-Gallego<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Nariño, Pasto-Colombia

<sup>2</sup>Universidad de la Amazonía, Florencia-Caquetá

Correspondencia: [camilovargas@udenar.edu.co](mailto:camilovargas@udenar.edu.co)

---

**Recibido:** 6 Enero 2025

**Aceptado:** 27 Agosto 2025

**Disponible:** 8 Octubre 2025

---

### Cómo citar / How to cite

V. Pérez-Pazos, D. Arturo-Perdomo, C. A. Mujica-Martínez, J. I. Maldonado-Rodríguez, J. C. Vargas-Gallego, "Optimización del proceso de extracción asistido por microondas de aceites esenciales de *Peperomia subspathulata* en el suroccidente colombiano," *Tecnológicas*, vol. 28, no. 64, e3371, 2025. <https://doi.org/10.22430/22565337.3371>



### Resumen

La extracción de aceites esenciales es un área de estudio que avanza con la implementación de nuevos métodos de extracción en la búsqueda de nuevos quimiotipos, mejores rendimientos y reducción del consumo energético, siendo aplicada en campos como la agroindustria, las ciencias farmacéuticas, entre otras. En este estudio se exploraron nuevas tecnologías para la extracción de volátiles en especies vegetales colombianas, enfocándose en la optimización de parámetros a través de un diseño experimental, utilizando radiación de microondas. El objetivo fue optimizar los parámetros de potencia y tiempo para maximizar el rendimiento de aceites esenciales de *Peperomia subspathulata*, una especie sin estudios previos en el departamento de Nariño. La metodología empleada consistió en el uso de la hidrodestilación asistida por microondas bajo un diseño factorial 3<sup>2</sup> y el método de superficie de respuesta para obtener el perfil químico a través de cromatografía de gases y espectrometría de masas, y comparar los rendimientos. Los resultados obtenidos en este estudio fueron los siguientes: los parámetros óptimos por microondas fueron 800 W y 81 minutos, obteniendo un rendimiento de 1,49 % para hojas y 0,99 % para tallos, valores superiores a los de la hidrodestilación convencional (1,15 % y 0,84 %, respectivamente). El perfil químico de los aceites esenciales reveló un nuevo quimiotipo compuesto por Miristicina, Safrol y alfa-bisabolol en ambos métodos. Asimismo, se optimizaron las áreas cromatográficas de estos componentes, obteniendo valores de 46,88 % para Safrol, 58,84 % para Miristicina y 18,58 % para alfa-bisabolol. En conclusión, esta investigación implementa una metodología innovadora de extracción con altos rendimientos y tiempos reducidos, además un nuevo quimiotipo para *P. subspathulata* del departamento de Nariño sentando las bases para el estudio de otras especies aromáticas en futuras investigaciones.

### Palabras clave

Congona, diseño experimental, hidrodestilación clewenger, quimiotipo, Piperaceas.

## Abstract

Essential oil extraction is an area of study that is advancing with the implementation of new extraction methods in the search for new chemotypes, improved yields, and reduced energy consumption. It is applied in the agroindustry and pharmaceutical sciences, among others. In this study, new technologies for extracting volatiles from Colombian plant species were explored, focusing on parameter optimization through an experimental design using microwave radiation. The objective was to optimize power and time parameters to maximize the yield of essential oils of *Peperomia subspathulata*, a species that had not been studied before in the Nariño department. The methodology consisted of microwave-assisted hydrodistillation under a  $3^2$ -factorial design and the response surface method. The chemical profile was obtained through gas chromatography and mass spectrometry, and the yields were compared. The results obtained in this study were as follows: the optimal microwave parameters were 800 W and 81 minutes, with a yield of 1.49% for leaves and 0.99% for stems, values higher than those of conventional hydrodistillation (1.15% and 0.84%, respectively). The chemical profile of the essential oils revealed a new chemotype composed of Myristicin, Safrole, and alpha-bisabolol in both methods. Likewise, the chromatographic areas of these components were optimized, obtaining values of 46.88% for Safrole, 58.84% for Myristicin and 18.58% for alpha-bisabolol. In conclusion, this study establishes the implementation of an innovative extraction methodology with high yields and reduced times; moreover, a new chemotype for *P. subspathulata* from the Nariño province, laying the foundation for the study of other aromatic species in future research.

## Keywords

Congona, design methodology, clevenger hydrodistillation, chemotype, Piperaceae.

## 1. INTRODUCCIÓN

La obtención de aceites esenciales de plantas aromáticas se puede realizar mediante diversos métodos de extracción como la hidrodestilación, destilación por arrastre con vapor y extracción con disolventes. Sin embargo, en los últimos años la hidrodestilación asistida por microondas ha tenido gran aceptación [1]. Esta técnica se destaca por sus mejores rendimientos y menores tiempos de extracción, reduciendo el consumo energético, lo que resulta en procesos más sostenibles en comparación con métodos convencionales. Estas ventajas no solo minimizan el impacto ambiental, sino que también incrementan la viabilidad industrial, haciéndola ideal para aplicaciones en sectores como cosméticos, agroquímicos y alimentarios [1]. Sin embargo, la hidrodestilación asistida por microondas presenta varias condiciones que pueden modificar el rendimiento, el perfil fitoquímico y la calidad de los aceites esenciales, lo que hace necesario optimizar los parámetros mediante métodos estadísticos como el de superficie de respuesta [2], [3]. Esta metodología permite identificar qué condiciones hacen que la variable de respuesta estimada alcance un valor óptimo [4].

En la actualidad muchos estudios enfocados en la extracción de fitoquímicos de diferentes matrices utilizan esta metodología para encontrar los valores óptimos de rendimiento, y la interacción entre las variables que afectan el proceso, donde se considera de gran importancia el tiempo y la potencia utilizada como es el caso de la extracción de cafeína [5], o volátiles [6]- [8]. Estudios realizados en aceites esenciales comerciales extraídos de lavanda [9], romero [10] y albahaca [11] han permitido optimizar las condiciones de extracción, obteniendo mejoras significativas tanto en los tiempos del proceso como en los rendimientos, con resultados comparables o incluso superiores a los alcanzados en el método convencional. Otro parámetro importante que se considera es el área cromatográfica de los componentes marcadores en el aceite esencial; es por ello, que se realiza un perfil cromatográfico del aceite esencial para evaluar cómo afectan los factores y cuáles son los valores óptimos del área para cada metabolito [12].

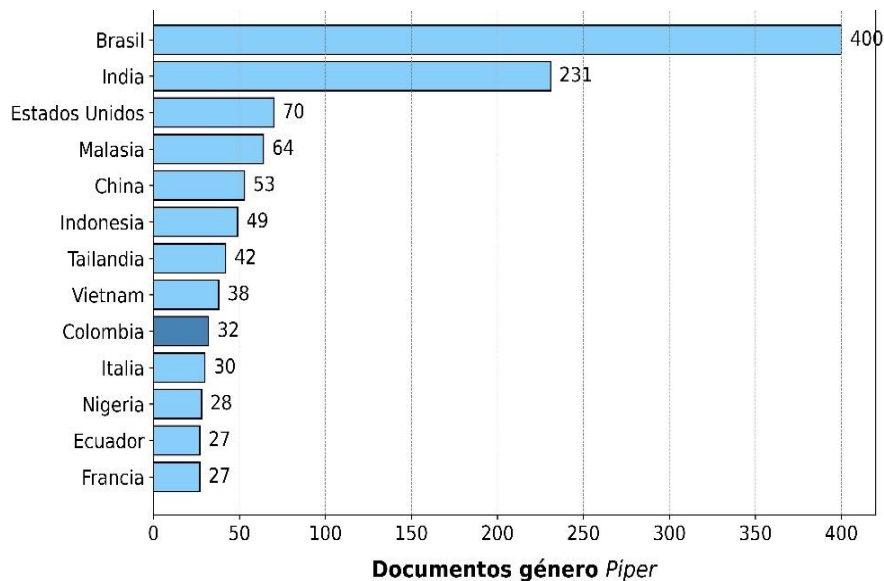
En el caso de la hidrodestilación asistida por microondas, la radiación empleada sigue mecanismos de transferencia de masa y calor en la misma dirección, desde el interior hacia el exterior de las células vegetales. Esto contrasta con la extracción convencional, donde los procesos ocurren en direcciones opuestas, generando pérdidas y mayor consumo energético [13]. La interacción de este tipo de radiación con la muestra permite la ruptura de las células del material vegetal de manera eficiente y realizar el calentamiento de los

componentes volátiles y del disolvente a través de los mecanismos de conducción iónica y rotación dipolar lo cual, mejora los rendimientos en menor tiempo. La absorción de este tipo de radiación generalmente es directamente proporcional a la constante dieléctrica del disolvente, razón por la cual se usa agua puesto que no genera procesos de contaminación ambiental en este método de extracción [14].

La producción de aceites esenciales en Colombia tiene un gran potencial para aplicaciones en sectores como la industria alimentaria, cosmética y agrícola, con la posibilidad de generar ingresos económicos significativos. En 2023, se reportaron dividendos de 42,79 millones de dólares, con un crecimiento anual estimado del 6 % [15]. Lo anterior ha incentivado un interés creciente en el país de especies vegetales, tanto endémicas como introducidas y en familias o géneros con gran diversidad con el propósito de encontrar nuevos quimiotipos con altos rendimientos, basados en nuevas técnicas de extracción que permitan optimizar las materias primas y generar un menor consumo energético.

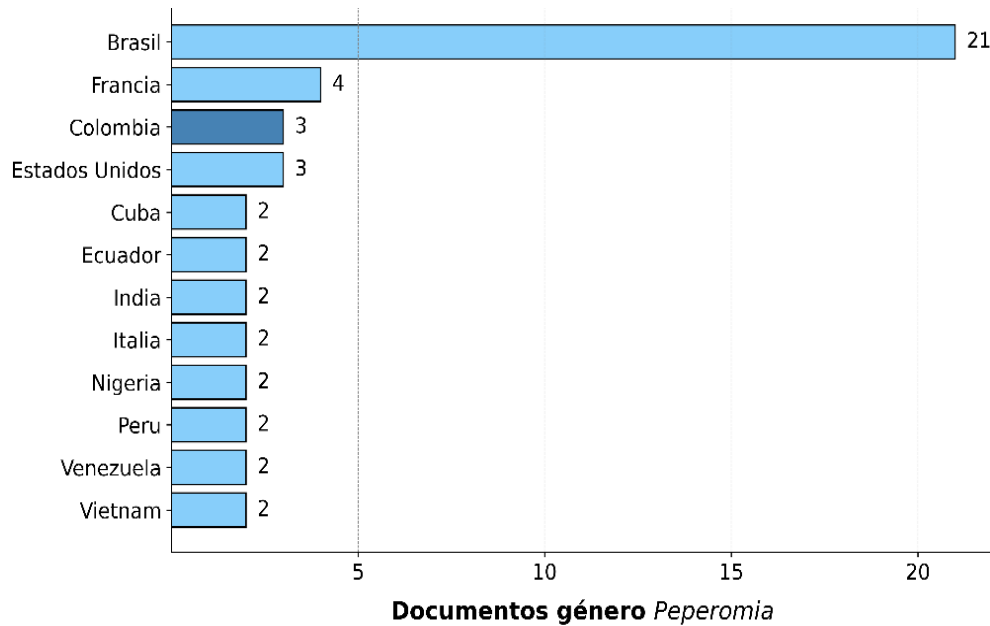
Entre las especies vegetales, se destaca la familia Piperaceae, que cuenta con más de 600 especies en Colombia [16] y un uso amplio en la medicina tradicional. Los géneros más representativos son *Piper* y *Peperomia*.

Un análisis en la base de datos Scopus sobre el estudio de aceites esenciales muestra una diferencia significativa entre los dos géneros en el cual se reportan más de 1236 resultados para el primero incluyendo 32 estudios en Colombia (Figura 1), mientras que solo se encuentran 45 estudios para el segundo con solo 3 reportes en el país (Figura 2), donde las áreas relacionadas con las ciencias agrícolas, ciencias biológicas y ciencias químicas tienen mayor impacto. Algunos quimiotipos de aceites esenciales de esta familia incluyen algunos fenilpropanoides como safrol, miristicina y elemicina en especies como *Piper rivinoides* [17], *Piper xylosteoides* [18], *Piper caninum* [19], *Piper hispidinervum*, *Piper auritum*, *Piper marginatum* [20], [21] los cuales han demostrado propiedades antimicrobianas y antifúngicas ya sean solos o en mezclas con medicamentos, llegando a inhibir cepas resistentes.



**Figura 1.** Reportes de investigaciones realizadas en el género *Piper*.

Fuente: elaboración propia a partir de Scopus.



**Figura 2.** Reportes de investigaciones realizadas en el género *Peperomia*.  
Fuente: elaboración propia a partir de Scopus.

En el caso del género *Peperomia*, los escasos estudios realizados en Colombia indican un campo de investigación amplio por explorar, especialmente en procesos de optimización mediante metodología de superficie de respuesta. Tan solo dos estudios se han realizado utilizando la extracción por hidrodestilación convencional uno en *P. subspathulata* [22] y otro en *P. galioides* [23] ambos en Cundinamarca con rendimientos de 0,16 % y 0,3 %, respectivamente. También se encuentran dos estudios utilizando el método asistido por microondas, uno en el oriente en Arauca, donde se utilizó material vegetal fresco de cada especie y con bajos rendimientos, para *P. angustata*, *P. glabella*, *P. pellucida* y *P. serpens* con valores de 0,0032 %, 0,0033 %, 0,06 % y 0,02 %, respectivamente [24], y otro en la costa Caribe donde se realizó el análisis de *P. pellucida*; sin embargo, no reportan el rendimiento [25]. Estos datos brindan una oportunidad de búsqueda de nuevas fuentes de especies aromáticas de este género que puedan brindar mayor cantidad de aceites esenciales y metabolitos activos en mayor concentración, en áreas de gran biodiversidad como lo es el suroccidente colombiano.

En el departamento de Nariño, la familia Piperaceae es representativa de los bosques húmedos tropicales, incluyendo los géneros *Piper* y *Peperomia*. Estas últimas son plantas arbustivas que crecen desde el nivel del mar hasta los 3500 msnm. En los páramos zonales cercanos a la Laguna de la Cocha [26] se cultiva *Peperomia subspathulata*, conocida tradicionalmente como “congona”, y valorada en la medicina tradicional por sus propiedades terapéuticas, especialmente en varios municipios de la región [27].

En la actualidad no hay reportes previos sobre las especies del género *Peperomia* orientados hacia la extracción y caracterización de sus aceites esenciales en este departamento. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue optimizar la extracción del aceite esencial de *Peperomia subspathulata* de Nariño mediante el método asistido por microondas utilizando un diseño experimental factorial y se compararon los rendimientos con los obtenidos en el método convencional.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Reactivos

El sulfato de sodio anhidro grado reactivo fue adquirido de Panreac (Barcelona, España), la mezcla de estándares de n-alcános (C7-C30) de Sigma-Aldrich (St. Louis, EE. UU.). Los reactivos fueron usados directamente sin purificación adicional.

### 2.2 Material vegetal

Se recolectaron 10 kg de hojas de *P. subspathulata* en la vereda El Motilón, corregimiento de El Encano, del municipio de Pasto, con coordenadas 1° 07' 14" N, 77° 10' 14" W en el mes de septiembre del 2021. La especie vegetal fue identificada de acuerdo con el código COL-612215 el cual reposa en el Herbario Nacional Colombiano (COL). El material vegetal se secó a temperatura ambiente obteniendo 3,05 kg y se procedió a su extracción.

### 2.3 Proceso de optimización del rendimiento del aceite

Para este proceso se aplicó un diseño experimental factorial 3<sup>2</sup> considerando dos factores (potencia y tiempo) con tres niveles, cada uno por triplicado (Tabla 1).

**Tabla 1.** Variables de extracción y niveles usados en el diseño experimental. Fuente elaboración propia.

Variables independientes (factores)	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
Potencia (W)	400	600	800
Tiempo (min)	30	60	90

Se utilizaron los gráficos de efectos principales para conocer la correlación de los factores con la variable de respuesta y se establecieron los parámetros óptimos con la metodología de superficie de respuesta a través del software Statgraphics Centurión versión 19.6.04, ajustada al siguiente modelo (1):

$$Y(\text{respuesta}) = K + \sum_{i=1}^n K_i X_i + \sum_{i,j=1}^n K_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n K_{ii} X_i^2 \quad (1)$$

### 2.4 Extracción asistida por microondas

Se emplearon 70 g de hojas secas trituradas manualmente, se utilizó 1,1 L de agua desionizada y las extracciones se realizaron en un microondas convencional marca Hacob modelo 1.1 99822D (1000 W; 2,45 GHz) en intervalos de 15 min, la variable de respuesta fue el rendimiento del aceite (Figura 3). Se utilizó agua como sistema de refrigeración a 4°C. Concluido el tiempo de extracción se separó el aceite esencial, se eliminaron los residuos de humedad con sulfato de sodio anhidro, y se almacenó en un vial ámbar en refrigeración hasta su posterior análisis cromatográfico. El porcentaje de rendimiento se calculó en base seca (% m/m).



**Figura 3.** Sistema de extracción asistido por microondas. Fuente: elaboración propia.

## 2.5 Proceso de optimización del área cromatográfica de los componentes mayoritarios

Como compuestos mayoritarios en el aceite esencial de *P. subspatulata* se identificaron safrol, miristicina y alfa-bisabolol (Figura 4). Para los dos últimos, se utilizó el mismo diseño experimental factorial. El proceso de optimización se llevó a cabo mediante el método de superficie de respuesta, lo que permitió encontrar los valores óptimos para cada componente.



**Figura 4.** Estructuras de los compuestos mayoritarios en el aceite esencial de *P. subspatulata*. Fuente: elaboración propia.

## 2.6 Análisis estadístico

Se utilizó la prueba ANOVA para analizar los datos con un nivel de significancia del 95 %, se incluyó el estadístico de Durbin-Watson para el análisis de los residuos.

## 2.7 Extracción por hidrodestilación Clevenger convencional

Para este proceso se tomó 100 g del material vegetal seco, se molió manualmente, se utilizó 1,1 L de agua desionizada y se realizó la extracción por hidrodestilación tipo Clevenger por 3 horas en una plancha de calentamiento. Concluido el tiempo, se separó el aceite esencial, se eliminó el agua remanente con sulfato de sodio anhidro, se trasvasó a un vial ámbar y se mantuvo bajo refrigeración hasta el análisis cromatográfico. El porcentaje de rendimiento se calculó en base seca (% m/m) y el procedimiento fue realizado por triplicado.

## 2.8 Análisis por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas

Los análisis fueron realizados en un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas marca Shimadzu GC-MS QP 2010S bajo las siguientes condiciones: se utilizó una columna SHRXI-5MS (30 m x 0,25 mm x 0,25 µm, Shimadzu), el gas de arrastre fue helio UAP, un volumen de inyección de 1,0 µL, la temperatura del inyector fue de 250°C y la inyección se realizó en modo Split 1:50, la temperatura de la interfase fue de 280°C, la rampa de temperatura utilizada fue: 40°C x 5 min, aumentando a una proporción de 5°C/min hasta 250°C y se mantuvo a esta temperatura por 15 min. Los espectros de masas fueron obtenidos en modo full scan de 35 – 400 uma, por impacto electrónico a 70 eV. Los compuestos fueron identificados por comparación con los espectros de masas de las librerías NIST y Wiley, los índices de retención y con datos de la literatura [28], [29]. Los índices de retención se calcularon de acuerdo con (2):

$$RI = 100 * Pz + 100 * [(RT(x) - RT(Pz)) / (RT(Pz + 1) - RT(Pz))] \quad (2)$$

donde: Pz: número de carbonos de la parafina previa al analito  
 RT(x): tiempo de retención del analito (min)  
 RT(Pz): tiempo de retención de la parafina previa al analito (min)  
 RT (Pz+1): tiempo de retención de la parafina posterior al analito (min)

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Proceso de optimización por microondas y análisis estadístico

El diseño experimental se llevó a cabo utilizando el método asistido por microondas y se estructuró mediante un diseño factorial 3<sup>2</sup> de manera aleatoria y por triplicado en términos de la variable rendimiento en hojas. Para el análisis de los datos se usó el software Statgraphics. Los resultados obtenidos para los 27 experimentos se presentan en la Tabla 2.

El gráfico de efectos principales muestra un comportamiento creciente del rendimiento en función de la potencia y no lineal creciente en función del tiempo como se observa en la Figura 5.

Trabajos previos han demostrado cómo el uso de la radiación de microondas permite el rompimiento de las células al interior del material vegetal, como se ha evidenciado mediante estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM), facilitando la liberación de metabolitos secundarios [30], [12]. Algunos factores clave a considerar en la potencia de extracción son la tasa de transferencia de calor y el transporte de metabolitos, ya que ambos aumentan proporcionalmente a la energía suministrada, proporcionando mayores rendimientos en tiempos más cortos. Sin embargo, el uso de altas potencias puede generar la degradación de compuestos [31], [32] o la pérdida de componentes muy volátiles afectando el rendimiento de extracción [33], [34].

**Tabla 2.** Valores de rendimiento en hojas obtenidos en cada bloque del diseño experimental 3<sup>2</sup>.  
Fuente: elaboración propia.

Experimento	Potencia (W)	Tiempo (min)	Rendimiento obtenido (%)	Rendimiento predicho (%)
1	600	60	1,16	1,21
2	600	90	1,16	1,08
3	400	60	0,60	0,72
4	600	30	0,51	0,49
5	800	30	0,79	0,87
6	800	60	1,47	1,41
7	400	30	0,12	0,09
8	800	90	1,47	1,49
9	400	90	0,98	0,90
10	400	60	0,80	0,74
11	600	60	1,00	1,10
12	600	90	1,19	1,23
13	400	90	0,95	0,92
14	800	30	0,88	0,89
15	600	30	0,51	0,52
16	800	60	1,47	1,43
17	400	30	0,11	0,11
18	800	90	1,57	1,52
19	400	30	0,10	0,12
20	400	90	0,92	0,93
21	800	60	1,45	1,44
22	600	90	1,25	1,24
23	800	90	1,49	1,53
24	800	30	0,90	0,90
25	600	60	1,11	1,11
26	400	60	0,71	0,75
27	600	30	0,62	0,53

De manera similar, en el caso del tiempo, se debe tener en cuenta el calentamiento debido a la transferencia de calor del disolvente, que posee un alto valor de constante dieléctrica. Esto permite que la extracción alcance un valor máximo, determinado por la tasa de solvatación de los compuestos en la matriz, tras lo cual el rendimiento permanece constante o disminuye. Para implementaciones exhaustivas y prolongadas, se puede recurrir a ciclos de extracción, dependiendo de la matriz y los analitos, asegurando evitar la degradación por sobrecalentamiento o tiempos excesivos. Los modelos cinéticos de primer y segundo orden explican el comportamiento del rendimiento de extracción en función del tiempo [35]. La disponibilidad de los compuestos volátiles en la superficie del material y en el interior de las células depende de la tasa de transferencia del disolvente, lo que puede generar comportamientos lineales o no lineales [10].

Por lo tanto, es esencial identificar los valores óptimos de estos factores para maximizar el rendimiento y evitar efectos de degradación. Con base en lo anterior, se realizó la optimización utilizando el método de superficie de respuesta (ver Figura 6), obteniendo (3), que describe el comportamiento entre la variable de respuesta (rendimiento) y los factores tiempo y potencia.

$$\begin{aligned}
 \text{Rendimiento} = & -1,94778 + 0,00258889 * \text{Potencia} + 0,0463704 * \text{Tiempo} - 3,3333 \times 10^{-7} \\
 & * \text{Potencia}^2 - 7,77778 \times 10^{-6} * \text{Potencia} * \text{Tiempo} - 2,48148 \times 10^{-4} * \text{Tiempo}^2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

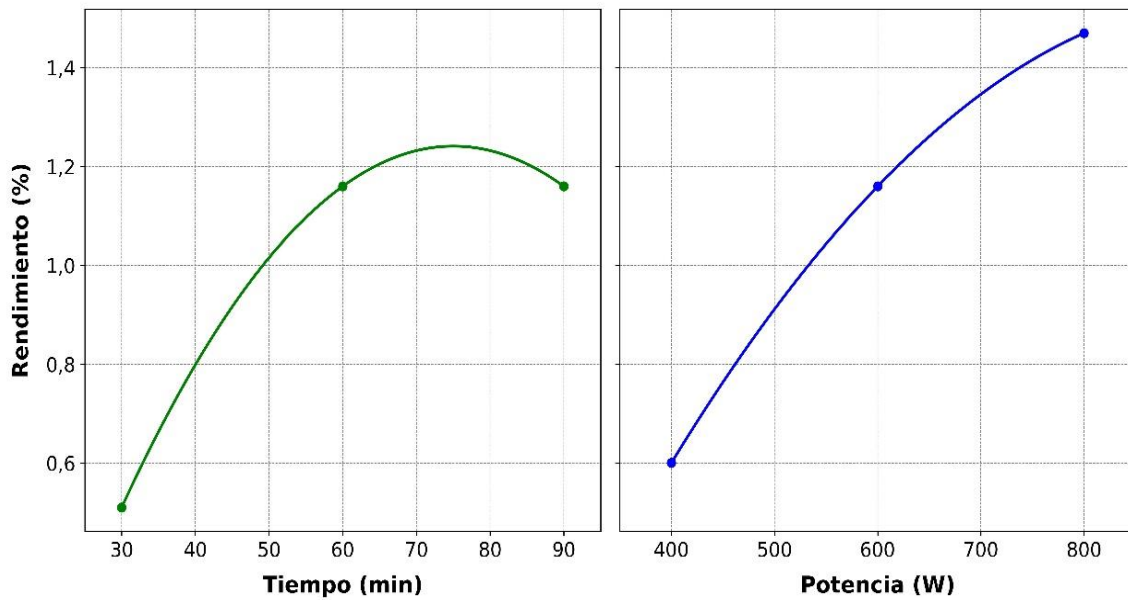


Figura 5. Gráfico de efectos principales para el rendimiento en hojas. Fuente: elaboración propia.

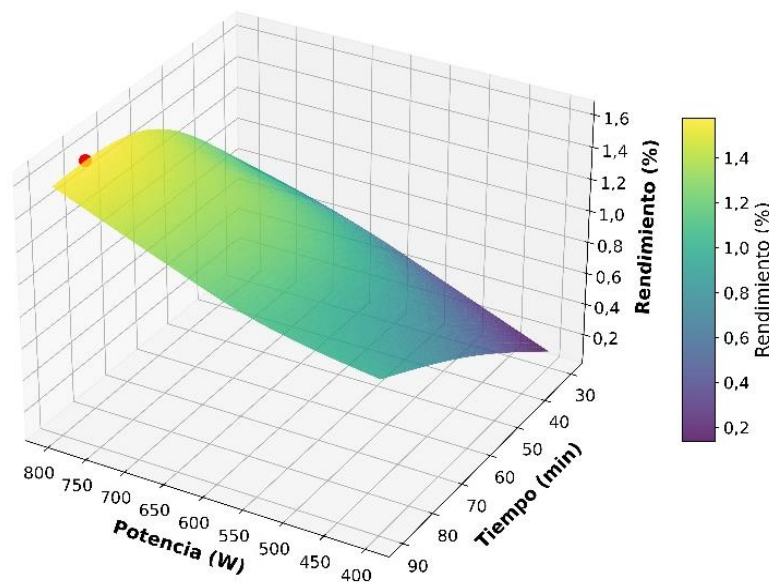
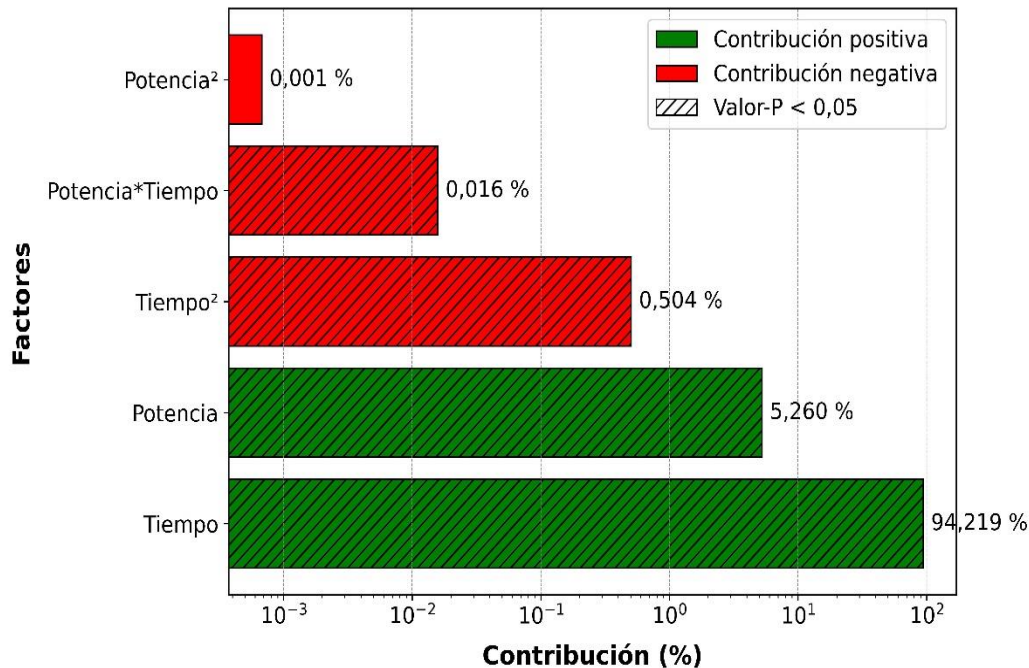


Figura 6. Gráfico de superficie de respuesta para el rendimiento en hojas. El punto óptimo en la superficie se indica por el punto rojo. Fuente: elaboración propia.

El diagrama de Pareto muestra cómo solo el parámetro potencia al cuadrado no es significativo en el modelo (ver Figura 7), lo cual se puede corroborar con el análisis de varianza ANOVA (ver Tabla 3) a través de los estadísticos F y P que demuestran que cuatro parámetros son significativos en el modelo: potencia, tiempo, tiempo al cuadrado y el producto de ambos, dando valores altos en el estadístico F y valores inferiores al 0,05 en el estadístico P (indicados por barras sombreadas en la Figura 7); solo el parámetro potencia al cuadrado no es significativo con un valor F de 0,27 y un valor P de 0,6106.



**Figura 7.** Diagrama de Pareto para los parámetros del modelo. Los parámetros significativos en el modelo se indican por sus barras sombreadas. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 3.** ANOVA para el rendimiento con respecto a los factores potencia y tiempo. Fuente: elaboración propia.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón- F	Valor- P
A (Potencia)	2,13556	1	2,13556	536,71	0,0000
B (Tiempo)	2,30409	1	2,30409	579,07	0,0000
AA	0,00106667	1	0,00106667	0,27	0,6106
AB	0,0261333	1	0,0261333	6,57	0,0190
BB	0,299267	1	0,299267	75,21	0,0000
Bloques	0,00508889	2	0,00254444	0,64	0,5386
Error total	0,0756	19	0,00397895		
Total (Corr.)	4,8468	26			
R <sup>2</sup>	98,44 %				
R <sup>2</sup> ajustado	97,87 %				
Estadístico de Durbin-Watson					0,5971

El valor de R<sup>2</sup> en el modelo fue 98,44 %, indicando la variabilidad del rendimiento, y el R<sup>2</sup> ajustado fue de 97,87 %, lo que representa un buen ajuste de los datos al modelo. Además, el estadístico de Durbin-Watson, con un valor P de 0,5971 (mayor a 0,05), indica que no hay correlación en los residuos, dando validez a los datos aleatorios.

Con los datos calculados a través del software, se estableció el punto óptimo con una potencia de 800 W y un tiempo de 81 minutos (punto rojo en la Figura 6), lográndose un valor esperado de rendimiento de 1,53 %. Estos parámetros se probaron experimentalmente, obteniéndose una respuesta de 1,49 %, con un error de 2,6 %. Adicionalmente, se realizó la extracción de los tallos mediante el método asistido por microondas en el punto óptimo, obteniendo un rendimiento de 0,99 %.

El valor de potencia óptima encontrado ha sido utilizado en otros estudios. Por ejemplo, en flores de mango (*Mangifera indica*), donde se utilizó 200 g de material fresco y 75 minutos de extracción, el rendimiento del aceite fue de 0,16 %, superior al método convencional, que alcanzó 0,11 % [36]. Otro reporte en hojas frescas de *Cinnamomum iners* (200 g) obtuvo un rendimiento de 0,12 %, mismo valor que el obtenido mediante hidrodestilación convencional, pero requiriendo 5 horas de extracción [37].

Otras investigaciones recientes en especies colombianas también han utilizado el método asistido por microondas. En *Hyptis colombiana*, en estado vegetativo y de floración, se lograron rendimientos de 0,1 % con un tiempo de 45 minutos [38]. En *Salvia aratocensis*, se obtuvo un rendimiento de 0,08 % utilizando una potencia de 1100 W y 1,5 horas de extracción [39]. En otro estudio, que analizó once especies diferentes colectadas en Santander, se empleó una potencia de 800 W y 30 minutos de extracción, obteniéndose los siguientes rendimientos: *Swinglea glutinosa* y *Pelargonium graveolens* con 0,2 %; *Thymus vulgaris* con 0,3 %; *Salvia officinalis*, *Lippia origanoides* (quimiotipo felandreno), *Cymbopogon nardus* y *Cymbopogon martinii* con 0,4 %; *Lipia alba* con 0,5 %; *Turnera difusa* con 0,7 %; *Lippia origanoides* (quimiotipo timol) con 1,6 % y *Eucalyptus globulus* con 2,0 % [40].

Sin embargo, solo se conocen dos investigaciones realizadas en Colombia sobre aceites esenciales de especies del género *Peperomia* mediante extracción asistida por microondas.

La primera, en *P. pellucida* de la costa Caribe colombiana, reportó un quimiotipo Carotol/Dilapiol con áreas relativas de 43,7 % y 20,9 %, respectivamente, utilizando una potencia de 700 W y 60 minutos de extracción [25], no se informó el rendimiento, lo que impide comparar este parámetro con el presente estudio. La segunda, realizada en Arauca, investigó cuatro especies: *P. angustata*, *P. glabella*, *P. serpens* y *P. pellucida*, obteniendo quimiotipos tipo sesquiterpeno en las tres primeras y sesquiterpeno-fenilpropanoide en la última. Los rendimientos en base fresca no superaron el 0,02 %, utilizando 800 W y 30 minutos [24].

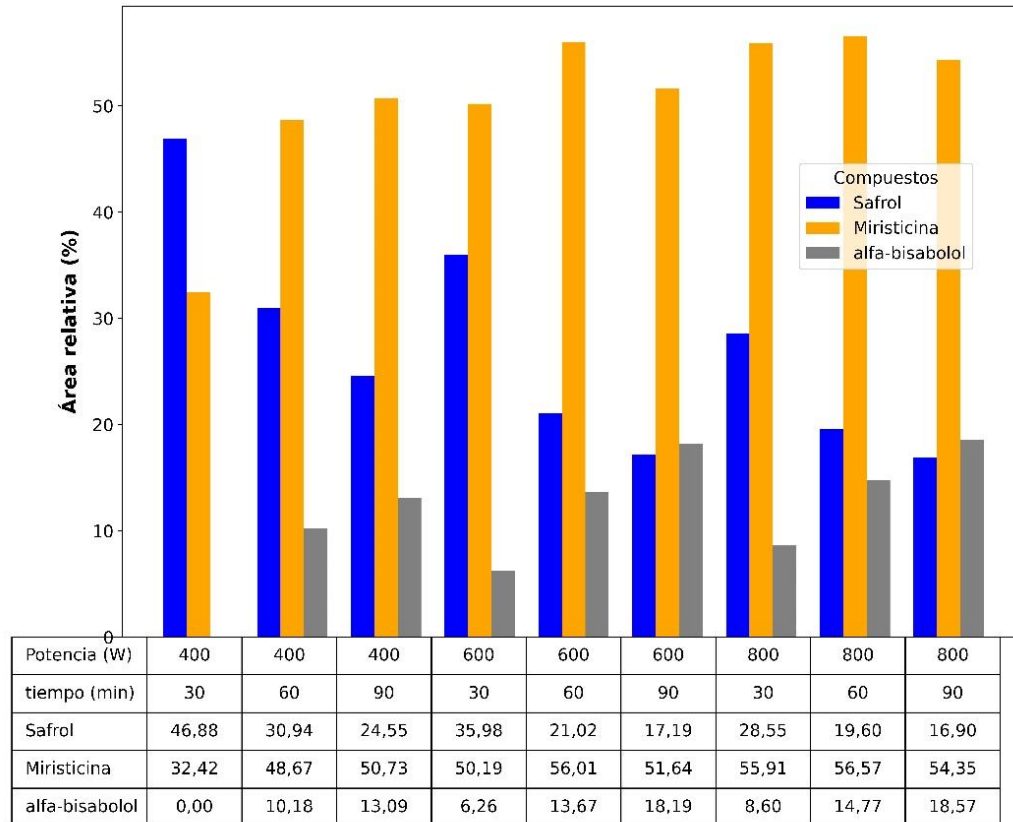
El parámetro rendimiento y el quimiotipo dependen de las condiciones ambientales y agroecológicas. Sin embargo, se observan rendimientos de extracción bajos en la mayoría de las especies comparadas con este estudio, lo que resalta el potencial de esta especie aromática.

### 3.2 Proceso de optimización de los componentes mayoritarios

Se realizó un análisis de los componentes mayoritarios (Figura 4) en el proceso de optimización. La Figura 8 muestra que el comportamiento del Safrol con el tiempo y la potencia es decreciente, teniendo un valor máximo para el primer nivel. Para la Miristicina y el alfa-bisabolol y se optimizaron los factores e identificaron las condiciones necesarias para obtener el valor máximo de área (Ver Tablas 4 y 5).

**Tabla 4.** Valores del área cromatográfica de Miristicina para cada punto del diseño experimental.  
Fuente: elaboración propia.

Potencia (W)	Tiempo (min)	% Área Miristicina
600	30	50,19
800	90	54,35
400	60	48,67
800	60	56,57
400	90	50,73
400	30	32,42
600	90	51,64
600	60	56,01
800	30	55,91

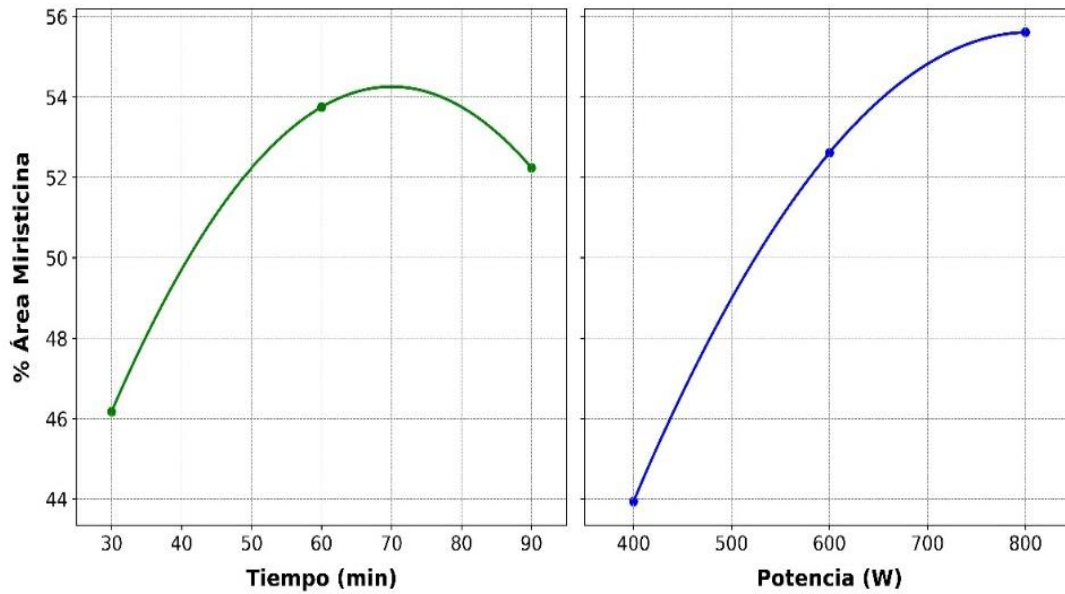


**Figura 8.** Perfil químico de los componentes mayoritarios en cada punto del diseño experimental.  
Fuente: elaboración propia.

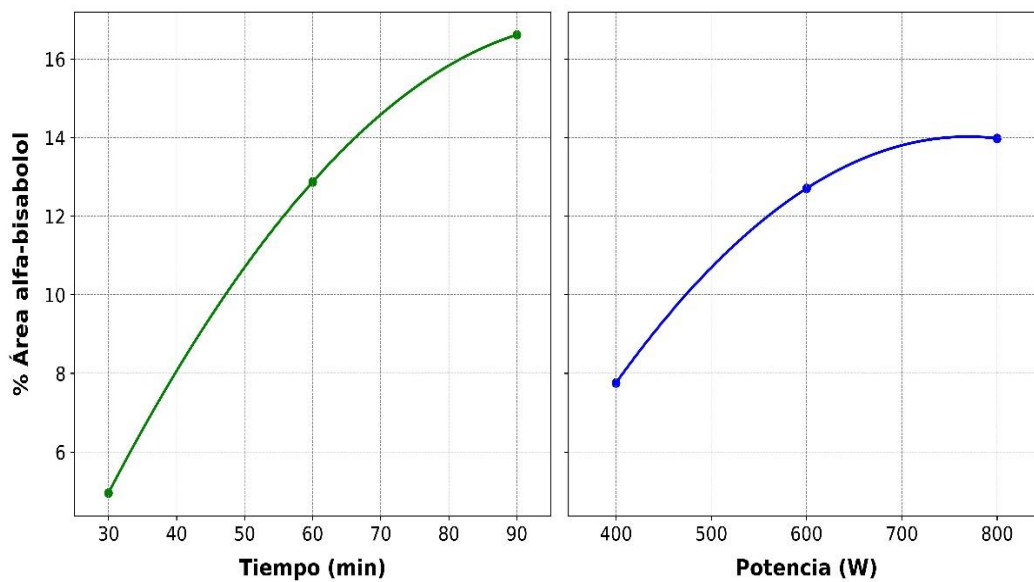
**Tabla 5.** Valores del área cromatográfica de alfa-bisabolol para cada punto del diseño experimental.  
Fuente: elaboración propia.

Potencia (W)	Tiempo (min)	Área alfa-bisabolol
600	60	13,67
800	60	14,77
800	90	18,57
600	30	6,26
400	60	10,18
800	30	8,60
400	90	13,09
600	90	18,19
400	30	0,00

Los gráficos de efectos principales para ambos compuestos se pueden ver en las Figuras 9 y 10. En el caso de la Miristicina la potencia tiene un comportamiento ascendente no lineal mientras que el tiempo presenta un punto de inflexión para el valor máximo de área cromatográfica cerca de los 70 minutos. Para el caso del alfa-bisabolol ambos factores son crecientes no lineales; sin embargo, la potencia presenta un valor máximo para el área cerca de los 700 W.



**Figura 9.** Gráfico de efectos principales para Miristicina. Fuente: elaboración propia.



**Figura 10.** Gráfico de efectos principales para Miristicina. Fuente: elaboración propia.

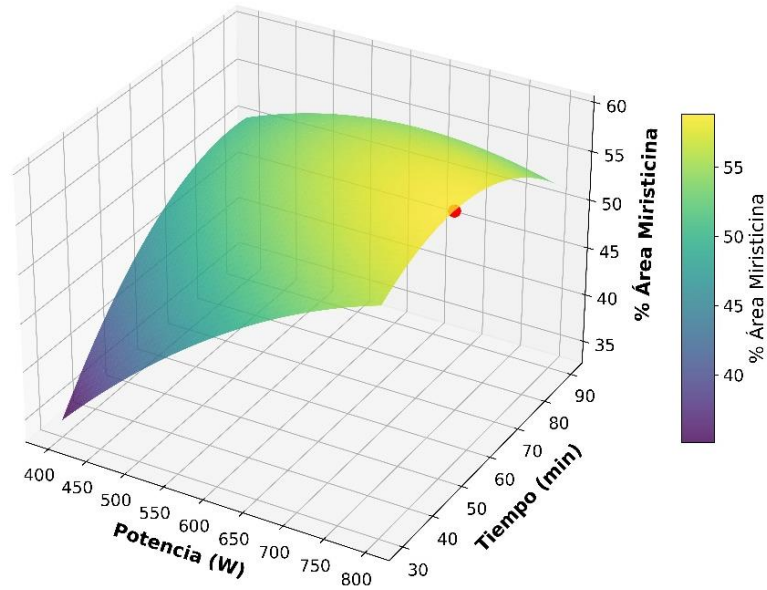
Para realizar el proceso de optimización se empleó el método de superficie de respuesta para ambos compuestos (ver Figuras 11 y 12), obteniendo los modelos cuadráticos dados por (4) y (5) para Miristicina y alfa-bisabolol, respectivamente.

*Área Miristicina*

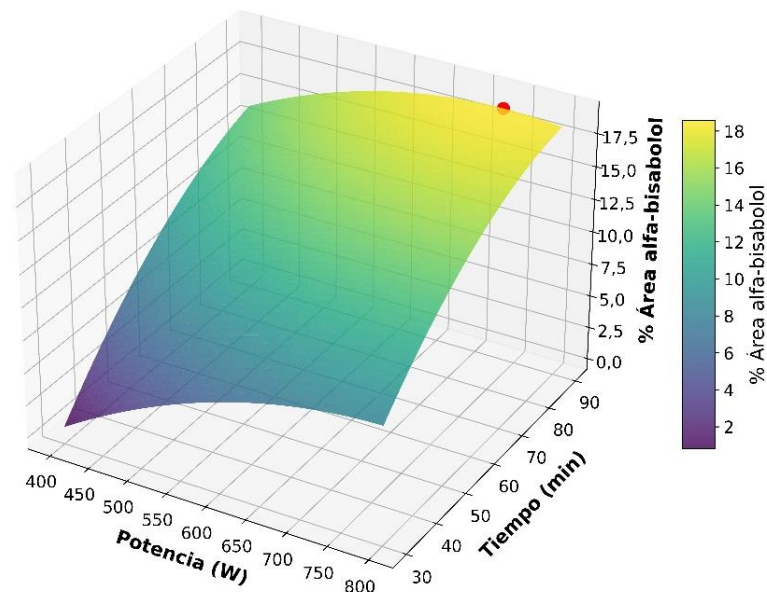
$$= -41,4528 + 0,164 * Potencia + 1,20364 * Tiempo - 7,09583 \times 10^{-5} * Potencia^2 - 8,27917 \times 10^{-4} * Potencia * Tiempo - 0,00504815 * Tiempo^2 \quad (4)$$

*Área (alfa - bisabolol)*

$$= -36,4778 + 0,0785083 * Potencia + 0,550833 * Tiempo - 4,59583 \times 10^{-5} * Potencia^2 - 1,3 \times 10^{-4} * Potencia * Tiempo - 0,00232037 * Tiempo^2 \quad (5)$$

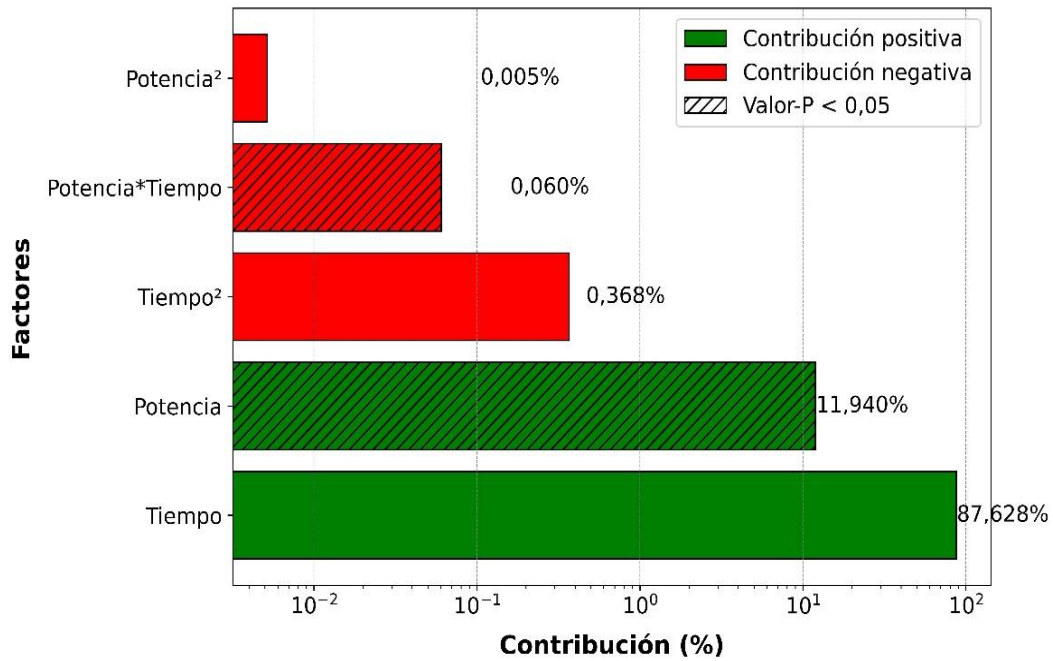


**Figura 11.** Gráfico de superficie de respuesta para Miristicina. El punto óptimo en la superficie se indica por el punto rojo. Fuente: elaboración propia.

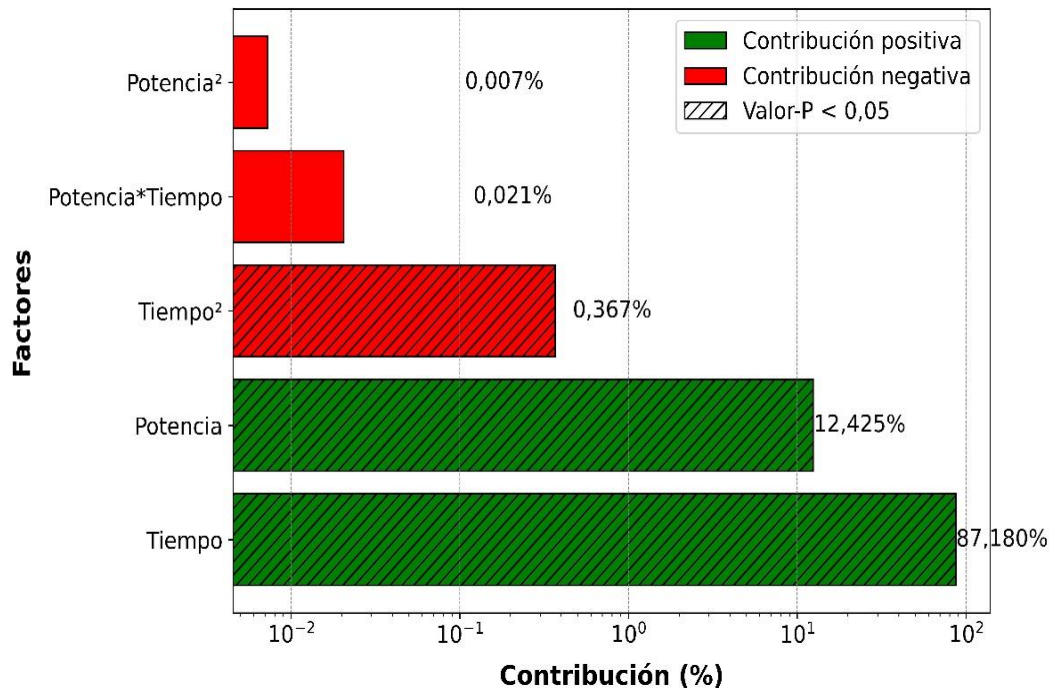


**Figura 12.** Gráfico de superficie de respuesta para alfa-bisabolol. El punto óptimo en la superficie se indica por el punto rojo. Fuente: elaboración propia.

Para la miristicina se observa tanto en el diagrama de Pareto (Figuras 13) como en el análisis de varianza ANOVA (Tabla 6), que solo los parámetros potencia y la interacción de potencia y tiempo son significativos en el modelo, mientras que para el alfa-bisabolol los parámetros potencia, tiempo y tiempo al cuadrado son significativos en el modelo (ver Figura 14 y Tabla 7). Los valores de P mayores a 0,05 en el estadístico de Durbin-Watson tanto para Miristicina como alfa-bisabolol indican que no hay una correlación en los residuos dando validez a los datos aleatorios (Ver Tablas 6 y 7).



**Figura 13.** Diagrama de Pareto para Miristicina. Los parámetros significativos en el modelo se indican por sus barras sombreadas. Fuente: elaboración propia.



**Figura 14.** Diagrama de Pareto para alfa-bisabolol. Los parámetros significativos en el modelo se indican por sus barras sombreadas. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** ANOVA para el rendimiento con respecto a los factores potencia y tiempo para Miristicina. Fuente: elaboración propia.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón- F	Valor- P
A (Potencia)	204,283	1	204,283	22,74	0,0175
B (Tiempo)	55,2067	1	55,2067	6,15	0,0893
AA	16,1123	1	16,1123	1,79	0,2729
AB	98,7042	1	98,7042	10,99	0,0452
BB	41,2838	1	41,2838	4,6	0,1214
Error total	26,9492	3	8,98307		
Total (Corr.)	442,539	8			
R <sup>2</sup>	93,91 %				
R <sup>2</sup> ajustado	83,76 %				
Estadístico de Durbin-Watson					0,2647

**Tabla 7.** ANOVA para el rendimiento con respecto a los factores potencia y tiempo para alfa-bisabolol. Fuente: elaboración propia.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón- F	Valor- P
A (Potencia)	58,0948	1	58,0948	70,62	0,0035
B (Tiempo)	204,05	1	204,05	248,03	0,0006
AA	6,75894	1	6,75894	8,22	0,0642
AB	2,4336	1	2,4336	2,96	0,1838
BB	8,72227	1	8,72227	10,60	0,0473
Error total	2,46804	3	0,822681		
Total (Corr.)	282,528	8			
R <sup>2</sup>	99,13 %				
R <sup>2</sup> ajustado	97,67 %				
Estadístico de Durbin Watson					0,3731

Con los datos obtenidos del proceso de optimización se espera un área de 58,84 %, con un tiempo de extracción de 54 minutos y una potencia de 800 W para la Miristicina, mientras que para el alfa-bisabolol, se espera un área de 18,58 % con un tiempo de 90 minutos y una potencia de 727 W (punto rojo en las Figuras 11 y 12). Un estudio realizado de la especie *Trachyspermum ammi*, permitió determinar el comportamiento de los 3 componentes mayoritarios del aceite esencial [8]. Para el caso del timol, el área aumenta con el aumento del factor potencia, pero disminuye con el aumento del tiempo. Por otro lado, p-cimeno y gama-terpineno presentan un punto de inflexión para el valor del área [8], similar al comportamiento observado para la Miristicina en este estudio (Ver figura 9). Otro reporte para el romero (*Rosmarinus officinalis*) de Irán [41] permitió establecer que tiempos altos y bajas potencias favorecían el aumento en la concentración de los cuatro componentes mayoritarios (alfa-pineno, 1,8-cineol, canfor y verebenona), ya que al aumentar la potencia (por encima de 800 W) se generaba degradación de estos metabolitos, disminuyendo su concentración. Una potencia de 700 W y un tiempo de 68 minutos fueron los valores óptimos para encontrar la mayor concentración de los cuatro compuestos [41], parámetros comparables a los obtenidos en este estudio para el alfa-bisabolol. En el caso de la Miristicina, en este estudio se observó que requiere una potencia ligeramente mayor a la requerida para el alfa-bisabolol, lo que concuerda con su punto de ebullición, masa molar y grado de oxidación, permitiendo reducir el tiempo de extracción y obtener una mayor área cromatográfica.

Hasta el momento, no hay reportes previos que hayan optimizado el área cromatográfica de los tres componentes mayoritarios, lo que establece un punto de partida para estudios posteriores en especies de la familia Piperaceae.

### 3.3 Hidrodestilación convencional

La hidrodestilación convencional se ha utilizado por mucho tiempo como método de extracción de aceites esenciales de diferentes plantas aromáticas [42]. El uso de esta técnica en el presente estudio permitió obtener porcentajes de rendimiento de 1,15 % para las hojas y 0,84 % para los tallos. Estos valores se compararon con estudios previos de la misma especie en plantas colectadas alrededor de Bogotá, donde se obtuvieron rendimientos de 1 % tanto para hojas como tallos luego de 4 horas de extracción del material fresco [43] y 0,16 % luego de 3 horas de extracción de las partes aéreas [22].

En cuanto al perfil químico del aceite esencial, ambas partes de la planta presentaron como componentes mayoritarios Miristicina, Safrol y alfa-bisabolol (ver Figura 4), con áreas relativas de 50,1/19,4/16,5 % para hojas y 60,6/22,8/10,0 % para tallos. Estos resultados difieren de los estudios mencionados en los que el Safrol fue el componente mayoritario con áreas relativas de 49 % y 44,3 %, respectivamente. Por lo tanto, los datos de la presente investigación permiten establecer un nuevo quimiotipo para la especie de estudio.

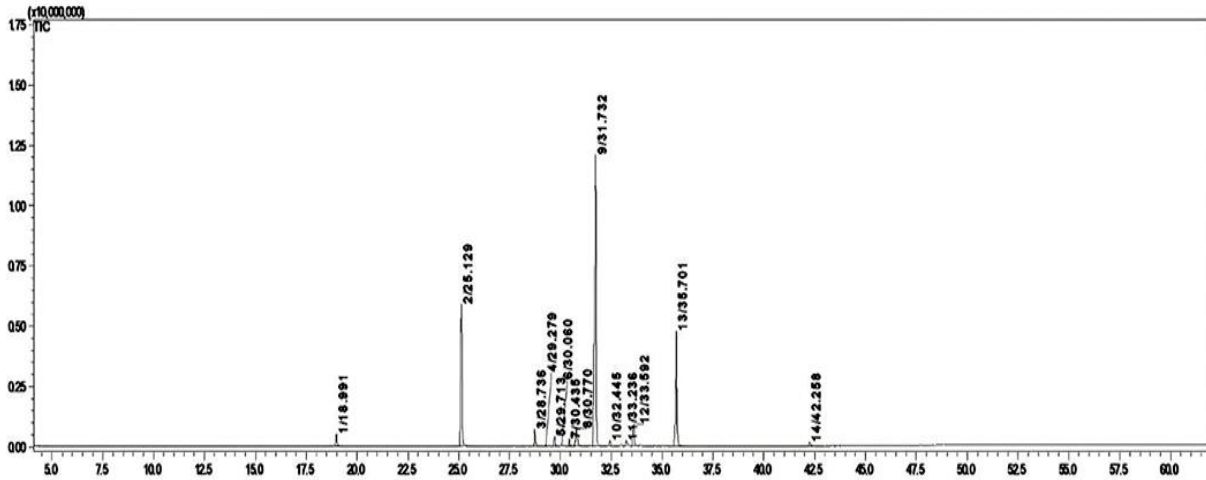
Algunas variaciones medioambientales o agroecológicas pueden generar cambios en el perfil químico de diferentes especies y afectar la producción de algunos metabolitos, entre ellos los fenilpropanoides, los cuales ayudan a regular el estrés por factores bióticos y abióticos [44], un ejemplo claro es la Miristicina, conocida por sus propiedades insecticidas [45]. La edad de la especie vegetal, diferente etapa fenológica, la fecha de cosecha, también pueden influir significativamente en el metabolismo de compuestos afectando el perfil y el rendimiento. Un reporte previo del romero (*R. officinalis*) muestra la variación del perfil químico en diferentes épocas del año, el 1,8-cineol y  $\beta$ -pineno aumentaron la concentración en temporada de lluvia, el  $\alpha$ -pineno presenta un aumento significativo en verano y mientras que el  $\alpha$ -felandreno y el alcanfor en otoño, generando variación en la actividad antimicrobiana en los aceites obtenidos [46]. La colecta de material vegetal en diferente estado fenológico muestra el cambio en la composición de los aceites de la especie *Myrtus communis*, al comparar el estado vegetativo con el estado de floración se observó una disminución del contenido de monoterpenos como  $\alpha$ -pineno, 1,8-cineol y linalool, mientras que el limoneno y acetato de linalilo aumentaron su concentración [47].

Cada uno de estos parámetros contribuye a la generación de nuevos quimiotipos en diferentes regiones de Colombia como Nariño y Cundinamarca, con altitudes similares. La comparación entre el método convencional y el método asistido por microondas permitió establecer diferencias significativas. En el caso de las hojas, el segundo método presentó rendimientos con más del 30 % de incremento y tiempos que disminuyen en más del 50 % en el punto óptimo con respecto al primero. Esto refleja una disminución considerable en cuanto a energía y un aumento en la eficiencia del proceso de extracción, lo cual concuerda con trabajos previos [48]-[50]. En el caso de los tallos, los rendimientos fueron de 0,84 % y 0,99 %, respectivamente, lo que indica que el método asistido por microondas mejora esta variable en un 15,15 %.

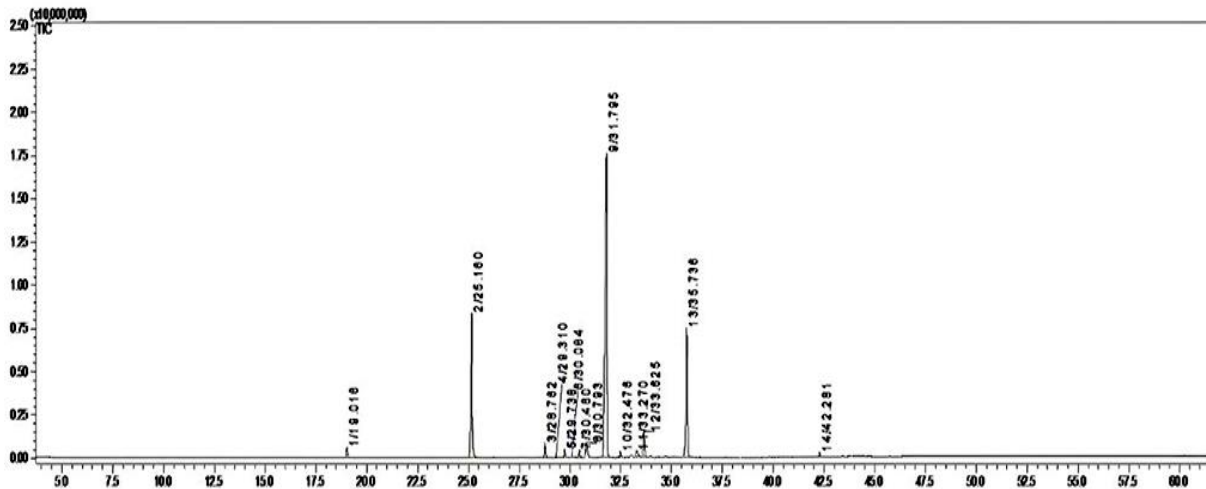
### 3.4 Análisis cromatográfico

En cuanto al perfil químico se comparó el quimiotipo por el método convencional y el método asistido por microondas de los aceites esenciales de hojas a través de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Específicamente, se obtuvieron, para Miristicina, Safrol y alfa-bisabolol, áreas relativas de 50,1/19,4/16,5 % para el primer método y 53,7/18,1/17,0 % para el segundo método en el punto óptimo del rendimiento (ver Figuras 15 y 16). La ausencia de cambios significativos en el perfil químico al utilizar radiación de microondas sugiere que

este método preserva la composición de los metabolitos mayoritarios del aceite esencial. Este hallazgo abre la posibilidad de escalar este método para su implementación en procesos industriales, asegurando uniformidad en el perfil químico sin comprometer el rendimiento. Los datos completos del perfil químico se presentan en la Tabla 8.



**Figura 15.** Cromatograma para el aceite esencial de las hojas de *Peperomia subspathulata* por hidrodestilación convencional. Fuente: elaboración propia.



**Figura 16.** Cromatograma para el aceite esencial de las hojas de *Peperomia subspathulata* por hidrodestilación asistida por microondas. Fuente: elaboración propia.

La cantidad de componentes oxigenados es ligeramente mayor en la extracción asistida por microondas comparada con la hidrodestilación convencional. Tanto los fenilpropanoides como los sesquiterpenos oxigenados presentaron una mayor área cromatográfica en el primer método (ver Tabla 9). Este efecto puede explicarse por la polaridad de las moléculas oxigenadas, las cuales absorben fácilmente la radiación de microondas debido a su mayor momento dipolar. Esto permite un calentamiento más rápido y, por lo tanto, una mayor concentración de estos compuestos [51], [52].

**Tabla 8.** Caracterización de los aceites esenciales para ambos métodos de extracción en hojas. Fuente: elaboración propia.

Compuesto	IR <sup>a</sup>	IR <sup>b</sup>	IR <sup>c</sup>	Área relativa % HD	Área relativa % MWHD
Linalool	1113	1095	1099	1,54	1,10
Safrol	1308	1285	1286,7	19,41	18,11
(E)-cariofileno	1437	1417	1420,1	2,08	1,64
Aromadendreno	1457	1439	1440,6	0,14	0,11
alfa-humuleno	1473	1452	1453,1	1,17	0,91
Alfa-guaieno	1486	1437	1439,6	0,11	0,10
Germacreno D	1500	1484	1480,6	0,91	0,84
Ledeno	1513	1496	1492,2	2,97	0,79
Miristicina	1551	1517	1518,4	50,06	53,77
(E)-nerolidol	1579	1561	1560,9	0,64	0,69
Espatuleno	1610	1577	1576,4	0,67	0,91
Ledol	1625	1602	1566,8	3,2	3,36
alfa-bisabolol	1713	1685	1682,8	16,52	17,06
NI <sup>d</sup>	2016	-	-	0,58	0,61
Total identificado				99,42	99,39

IR<sup>a</sup> índice de retención lineal experimental, IR<sup>b</sup>, índice de retención ADAMS [28], IR<sup>c</sup> índice de retención NIST [29], NI<sup>d</sup> no identificado.

**Tabla 9.** Familias de compuestos extraídos en la hidrodestilación. Fuente: elaboración propia.

	Fenil- propanoides	Monoterpenos oxigenados	Sesquiterpenos	Sesquiterpenos oxigenados
Extracción convencional	69,47	1,54	7,38	21,03
Extracción asistida por microondas	71,74	1,1	4,38	21,98

Algunos estudios previos del género *Peperomia* presentan quimiotipos tipo fenilpropanoide tanto en base seca como en base fresca. Un ejemplo de ello son las especies *P. pellucida* y *P. circinnata* var. *circinnata*, donde se reportan rendimientos de 0,7 % y 1,0 %, respectivamente [53]; mientras que para *P. macrostachya*, *P. rotundifolia* y *P. pellucida* se obtuvieron rendimientos en base seca de 1,1 %, 1,4 % y 1,4 %, respectivamente [54]. En ambos estudios se utilizó hidrodestilación convencional y para *P. pellucida* se obtuvo un perfil enriquecido en Dilapiol con 39,7 % y 55,3 %, respectivamente.

Otros estudios en base fresca utilizando el mismo método de extracción se han realizado en varias especies con rendimientos bajos y tiempos entre 2 y 4 horas, empleando grandes cantidades de material vegetal. Por ejemplo, para *P. inaequalifolia* de Ecuador se obtuvo un rendimiento de 0,16 % con un quimiotipo Elemicina (27,4 %), Miristicina (15,45 %) y alfa-bisabolol (17,76 %) utilizando 4 kg de materia prima [55]. Para *P. borbonensis* se obtuvo un rendimiento de 0,46 % y el quimiotipo Miristicina/Elemicina (39,5/26,6 %) utilizando 1,3 kg de la especie de estudio [56]; y en *P. leptostachya* el rendimiento fue de 0,10 % con un perfil enriquecido en sesquiterpenos, utilizando 1 kg de hojas [57].

Estos reportes demuestran la importancia de la biosíntesis de fenilpropanoides y sesquiterpenos oxigenados en especies del género *Peperomia*. Por lo tanto, se resalta la importancia de la extracción de este tipo de metabolitos, los cuales sirven de guía para corroborar la autenticidad de las especies de estudio a través del perfil químico y las aplicaciones que pueden tener en diferentes sectores como se menciona a continuación.

La miristicina, componente mayoritario del aceite esencial obtenido ha sido estudiada ampliamente como un componente principal de aceites esenciales de la nuez moscada (*Myristica fragans*), perejil (*Petroselinum crispum*), chirivía (*Pastinaca sativa*), entre otros debido a su aroma o sabor, lo que permite el uso de estas especies en la industria alimentaria [58]. Sin embargo, como compuesto puro no es recomendada debido a que pueden generar toxicidad a altas concentraciones [59]. Posee una amplia gama de actividades biológicas como antimicrobiana, antioxidante, antiinflamatoria, es usada en patologías del sistema nervioso central e inhibe la proliferación de células cancerosas [60], su uso a bajas concentraciones (mM) ha demostrado una reducción significativa de células de cáncer de ovario in vitro cuando se mezcla con agentes quimioterapéuticos como el cisplatino y el docetaxel lo que ha generado interés en la actualidad [61].

Por su parte el safrol es un compuesto regulado en Colombia mientras que en Estados Unidos es restringido su uso, ya que puede servir como precursor del MDMA (éxtasis) y por su hepatotoxicidad a altas concentraciones [62], [63]. En Europa en la industria cosmética el safrol puede tener una concentración máxima de 100 ppm o en 50 ppm en formulaciones para higiene oral.

El  $\alpha$ -bisabolol es un sesquiterpeno bien conocido en géneros de las familias Asteraceae y Lauraceae, como *Stachys*, *Vanillosmopsis*, *Nepeta*, *Ocotea* y *Matricaria*, en ese último se encuentra la manzanilla (*Matricaria chamomilla*) de donde se obtiene para uso industrial. El contenido de este metabolito oscila entre el 8-94 %, es ampliamente usado en medicina tradicional por sus propiedades terapéuticas como antiinflamatorio, problemas dermatológicos, contra la diabetes, anticancerígeno, antinociceptivo, cardioprotector, y antimicrobiano [64], [65]. La FDA aprueba su uso en la industria alimentaria como saborizante o adyuvante, fue incluido en el listado de las 236 nuevas sustancias reconocidas como saborizantes de la asociación de fabricantes de saborizantes y extractos de Estados Unidos (FEMA) y se le dio el carácter de GRAS (sustancia reconocida como segura) [66], [67]. Se utiliza en la industria cosmética en productos de belleza y cuidado para la piel, la comisión europea lo clasifica como ingrediente cosmético con aplicaciones como fragancia, acondicionador de la piel y calmante.

Con los resultados obtenidos en esta investigación, se implementa una metodología que permite obtener valores significativos de rendimiento en los aceites esenciales de hojas y tallos de *Peperomia subspathulata*. Además, el uso de grandes cantidades de material vegetal y disolvente, así como tiempos prolongados de extracción, son reducidos significativamente utilizando la extracción asistida por microondas. Esta técnica aplicada a una especie aromática empleada en medicina tradicional en el departamento de Nariño [57] puede ser utilizada en aplicaciones para la industria. Estudios futuros podrían considerar variables como la edad de la planta, época de cosecha, altitud o condiciones edafoclimáticas para validar la reproducibilidad del método optimizado.

#### 4. CONCLUSIONES

Se implementó una nueva metodología de extracción de aceites esenciales con la optimización de la extracción asistida por microondas para la especie *P. subspathulata* a través del método de superficie de respuesta, donde se establecieron los parámetros potencia y tiempo de 800 W y 81 minutos. Este enfoque logró rendimientos superiores al método convencional, mejorando significativamente el proceso de extracción de aceites esenciales tanto para hojas (1,49 % vs. 1,15 %) como tallos (0,99 % vs. 0,84 %). Tanto la variable de respuesta rendimiento como el factor tiempo de extracción mostraron mejoras significativas con el método propuesto en comparación con estudios previos del género *Peperomia*.

Se realizó la caracterización química de los aceites esenciales, encontrándose un nuevo quimiotipo para la especie *P. subspathulata* del departamento de Nariño: Miristicina/Safrol/alfa-bisabolol. Este hallazgo contribuye al estudio de especies aromáticas del

suroccidente colombiano, generando información sobre fuentes alternativas de estos metabolitos que pueden ser empleados en diversos sectores de la industria y como método para validar la autenticidad de la especie estudiada. Estudios futuros podrían complementar los hallazgos químicos con análisis biológicos funcionales.

Se reporta por primera vez la optimización de las áreas cromatográficas para el género *Peperomia* de los componentes mayoritarios Miristicina y alfa-bisabolol. Los factores óptimos para obtener el máximo valor de área cromatográfica fueron 58,84 % a 800 W y 54 minutos para la primera y 18,58 % con 727 W y 90 minutos para el segundo. Para el safrol el valor de mayor área cromatográfica fue en el primer nivel del diseño experimental a 400W y 30 minutos.

Este estudio representa un avance significativo al optimizar la extracción asistida por microondas en una especie no estudiada en el suroccidente colombiano, proporcionando una metodología aplicable en otras especies aromáticas. La disminución del tiempo de extracción por este método (81 minutos) en comparación con el método convencional (180 minutos) incide directamente en los costos de extracción. La extracción asistida por microondas no solo mejora los rendimientos de extracción y reduce los tiempos de procesamiento, sino que también tiene un impacto positivo en el ámbito ambiental y económico al reducir significativamente el uso de disolventes y generar un menor consumo de energía eléctrica. La implementación de este método a escala industrial podría reducir significativamente los costos operativos y el impacto ambiental, haciéndolo competitivo frente a métodos tradicionales para la extracción de aceites esenciales. Estudios futuros podrían abordar la viabilidad técnica y económica de la metodología implementada en este trabajo en escala piloto o industrial.

Con el quimiotipo encontrado será importante evaluar la actividad biológica de los aceites para aplicaciones futuras y encontrar el potencial en otras áreas.

## 5. AGRADECIMIENTOS Y FINANCIACIÓN

Los autores agradecen a Catalina Garzón del Herbario Nacional Colombiano por la clasificación taxonómica de la especie de estudio. A la Vicerrectoría de Investigaciones e Interacción Social (VIIS antigua VIPRI) de la Universidad de Nariño por la financiación del proyecto con código 1701. Al señor Norberto Jojoa, del corregimiento del encano el cual nos brindó la especie de estudio y permitió la realización de este trabajo.

## 6. REFERENCIAS

- [1] H. López-Salazar, B. H. Camacho-Díaz, M. L. A. Ocampo, and A. R. Jiménez-Aparicio, "Microwave-assisted extraction of functional compounds from plants: A Review," *BioResour*, vol. 18, no. 3, pp. 6614-6638, Jun. 2023. <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.Lopez-Salazar>
- [2] Q. Toan Tran et al., "Optimization of microwave-assisted extraction process of *Callicarpa candicans* (Burm. f.) Hochr essential oil and its inhibitory properties against some bacteria and cancer cell lines," *Processes*, vol. 8, no. 2, p. 173, Feb. 2020. <https://doi.org/10.3390/pr8020173>
- [3] S. Hihat, N. Touati, A. Sellal, and K. Madani, "Response Surface Methodology: An Optimal Design for Maximising the Efficiency of Microwave-Assisted Extraction of Total Phenolic Compounds from *Coriandrum sativum* Leaves," *Processes*, vol. 12, no. 5, p. 1031, May. 2024. <https://doi.org/10.3390/pr12051031>
- [4] J. Domínguez Domínguez, and E. Castaño Tostado, "Optimización estadística del proceso," in *Diseño de experimentos Estrategias y análisis en ciencias e ingeniería*, Ciudad de México, México: Alfaomega Editorial, 2010, pp. 303-304. [https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9786076227558\\_A43652600/preview-9786076227558\\_A43652600.pdf](https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9786076227558_A43652600/preview-9786076227558_A43652600.pdf)

- [5] I. M. Savić, I. M. Savić Gajić, and D. G. Gajić, "Optimization of the Microwave-Assisted Extraction of Caffeine from Roasted Coffee Beans," *Foods*, vol. 13, no. 15, p. 2333, Jul. 2024. <https://doi.org/10.3390/foods13152333>
- [6] A. H. Nour, R. H. Modather, R. M. Yunus, A. A. M. Elnour, and N. Ain Ismail, "Characterization of bioactive compounds in patchouli oil using microwave-assisted and traditional hydrodistillation methods," *Ind. Crops Prod.*, vol. 208, p. 117901, Feb. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117901>
- [7] M. Hearunyakij, and W. Phutdhawong, "Optimization, Yield and Chemical Composition of Essential Oil from *Kaempferia galanga* L. Rhizome: Comparative Study with Microwave Assisted Extraction and Hydrodistillation," *J. Essent Oil Bear Plants*, vol. 25, no. 3, pp. 444-455, Aug. 2022. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2022.2108727>
- [8] E. Mazzara et al., "A design of experiment (Doe) approach to model the yield and chemical composition of ajowan (*trachyspermum ammi* L.) essential oil obtained by microwave-assisted extraction," *Pharmaceuticals*, vol. 14, no. 8, p. 816, Aug. 2021. <https://doi.org/10.3390/ph14080816>
- [9] B. Liu, J. Fu, Y. Zhu, and P. Chen, "Optimization of microwave-assisted extraction of essential oil from lavender using response surface methodology," *J. Oleo Sci.*, vol. 67, no. 10, pp. 1327-1337, Oct. 2018. <https://doi.org/10.5650/jos.ess18019>
- [10] M. Elyemni et al., "Extraction of Essential Oils of *Rosmarinus officinalis* L. by Two Different Methods: Hydrodistillation and Microwave Assisted Hydrodistillation," *Scient. World J.*, vol. 2019, p. 659432, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3659432>
- [11] N. Đorđević et al., "The effect of distillation methods on the yield, composition and biological activity of basil (*Ocimum basilicum* L.) essential oil," *Adv. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 16-25, Aug. 2022. <https://doi.org/10.5937/savteh2202016d>
- [12] P. Suttiarporn, N. Wongkattiya, K. Buaban, P. Poolprasert, and K. Tanruean, "Process Optimization of Microwave Assisted Simultaneous Distillation and Extraction from Siam cardamom Using Response Surface Methodology," *Processes*, vol. 8, no. 4, p. 449, Apr. 2020. <https://doi.org/10.3390/PR8040449>
- [13] P. Veggi, J. Martinez, and A. Meireles, "Fundamentals of microwave extraction," in *Microwave-Assisted Extraction for Bioactive Compounds*, F. Chemat, and G. Cravotto, Eds., New York, USA: Springer, 2013, ch., 2, pp. 15-52. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4830-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4830-3_2)
- [14] S. K. Movaliya, "Extraction of essential oil by Microwave-assisted extraction: A review," *Int. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ.*, vol. 3, no. 2, pp. 5312-5321, Oct. 2017. <https://ijariie.com/FormDetails.aspx?MenuScriptId=3901>
- [15] EMR Claight Corp., "Mercado de Aceites Esenciales en Colombia - Por Tipo (Aceite de Naranja, Aceite de Menta, Aceite de Clavo, Aceite de Eucalipto, Aceite de Lavanda, Aceite de Limón, Otros); Por Aplicación (Alimentos y Bebidas, Fármacos y Formulaciones Medicinales, Limpieza y Hogar, Spa y Relajación, Otros); Dinámica del Mercado (2024-2032) y Panorama Competitivo," EMR Claight Corp. Accessed: Jan. 4, 2025. [Online]. Available: <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-aceites-esenciales-en-colombia/toc>
- [16] C. Ulloa Ulloa et al., "An integrated assessment of the vascular plant species of the Americas," *Science*, vol. 358, no. 6370, pp. 1614-1617, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1126/science.aao0398>
- [17] V. J. Alencar Fonseca et al., "Characterization and analysis of the bioactivity of the *Piper rivinoides* Kunth essential oil and its components myristicin and elemicin, against opportunistic fungal pathogens," *Microb. Pathog.*, vol. 199, p. 107242, Feb. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.107242>
- [18] J. Dognini et al., "Antibacterial activity of high safrole contain essential oils from *Piper xylosteoides* (Kunth) Steudel," *J. Essential Oil Res.*, vol. 24, no. 3, pp. 241-244, May. 2012. <https://doi.org/10.1080/10412905.2012.676768>
- [19] W. M. N. H. Wan Salleh, F. Ahmad, K. Heng Yen, and H. Mohd Sirat, "Chemical compositions, antioxidant and antimicrobial activities of essential oils of *Piper caninum* Blume," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 12, no. 11, pp. 7720-7731, Nov. 2011. <https://doi.org/10.3390/ijms12117720>
- [20] J. K. Da Silva, R. Da Trindade, N. S. Alves, P. L. Figueiredo, J. G. S. Maia, and W. N. Setzer, "Essential Oils from Neotropical *Piper* Species and Their Biological Activities," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 18, no. 12, p. 2571, Dec. 2017. <https://doi.org/10.3390/IJMS18122571>
- [21] B. Salehi et al., "*Piper* species: A comprehensive review on their phytochemistry, biological activities and applications," *Molecules*, vol. 24, no. 7, p. 1364, Apr. 2019. <https://doi.org/10.3390/molecules24071364>
- [22] D. Gutiérrez, "Antifungal activity of *Peperomia subspathulata* Yunck against three phytopathogenic fungi: *Aspergillus*, *Botrytis*, and *Penicillium* species," *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.*, vol. 18, no. 1, p. e16885, Jan. 2024. <https://doi.org/10.17584/rcch.2024v18i1.16885>

- [23] P. A. Robayo-Gama, C. E. Quijano, G. Morales, and J. A. Pino, "Composition of the essential oil from leaves of *Peperomia galioides* HBK grown in Colombia," *J. Essent Oil Res.*, vol. 22, no. 4, pp. 307-309, Dec. 2010. <https://doi.org/10.1080/10412905.2010.9700332>
- [24] G. Tafurt-García, E. Valenzuela Vergara, Y. Salguero Rodríguez, R. A. Alegría Macías, and E. Stashenko, "Volatile compounds in Piperaceae collected in Arauca- Colombia Northeastern region and Colombian-Venezuelan plains," in *Essential Oils Contributions to the Chemical-Biological Knowledge*, V. F. Da Veiga Jr., I. Ajani Ogunwande, and J. L. Martinez, Eds., Boca Ratón, USA: CRC Press, 2023, pp. 1-18. <https://doi.org/10.1201/9781003226345>
- [25] A. Muñoz-Acevedo, M. C. González, J. E. Alonso, and K. C. Flórez, "The Repellent Capacity against *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) and *In Vitro* Inhibition of the Acetylcholinesterase Enzyme of 11 Essential Oils from Six Plants of the Caribbean Region of Colombia," *Molecules*, vol. 29, no. 8, p. 1753, Apr. 2024. <https://doi.org/10.3390/molecules29081753>
- [26] A. Delgado, S. Ruiz, L. Arévalo, G. Castillo, and N. Viles, "Plan de Acción en Biodiversidad del departamento de Nariño 2006-2030 Propuesta Técnica," Corponariño, Gobernación de Nariño - Secretaría de Agricultura, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales - UAESPNN - Territorial Surandina, Universidad de Nariño, Universidad Mariana y Asociación para el Desarrollo Campesino, 2008. Accessed: Jul. 19, 2025. [Online]. Available: <https://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/biodiversidad/partel.pdf>
- [27] A. F. Angulo, R. A. Rosero, and M. S. González Insuasti, "Estudio etnobotánico de las plantas medicinales utilizadas por los habitantes del corregimiento de Genoy, Municipio de Pasto, Colombia," *Univ. Salud*, vol. 14, no. 2, pp. 168-185, Jul-Dec. 2012. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-71072012000200007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072012000200007)
- [28] R. P. Adams, *Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectrometry*, Carol Stream Illinois, USA: Allured Business Media, 2012. [https://diabloanalytical.com/ms/essential-oil-components-by-gcms/essential\\_oil\\_components\\_ebook.pdf](https://diabloanalytical.com/ms/essential-oil-components-by-gcms/essential_oil_components_ebook.pdf)
- [29] V. I. Babushok, P. J. Linstrom, and I. G. Zenkevich, "Retention Indices for Frequently Reported Compounds of Plant Essential Oils," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 40, no. 4, p. 043101, Dec. 2011. <https://doi.org/10.1063/1.3653552>
- [30] M. T. Golmakani, and K. Rezaei, "Comparison of microwave-assisted hydrodistillation with the traditional hydrodistillation method in the extraction of essential oils from *Thymus vulgaris* L.," *Food Chem.*, vol. 109, no. 4, pp. 925-930, Aug. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.12.084>
- [31] I. M. Bodea, A. Garre Pérez, G. M. Cătunescu, and A. Palop, "A Review on Microwave and Ultrasound-Assisted Extractions of Essential Oil from Orange Peel Waste," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 18, pp. 7060-7082, Aug. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03882-x>
- [32] S. Chemat, H. Ait-Amar, A. Lagha, and D. C. Esveld, "Microwave-assisted extraction kinetics of terpenes from caraway seeds," *Chem. Engin. Process.: Process Inten.*, vol. 44, no. 12, pp. 1320-1326, Dec. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.03.011>
- [33] A. Shang *et al.*, "Optimization and characterization of microwave-assisted hydro-distillation extraction of essential oils from *Cinnamomum camphora* leaf and recovery of polyphenols from extract fluid," *Molecules*, vol. 25, no. 14, p. 3213, Jul. 2020. <https://doi.org/10.3390/molecules25143213>
- [34] S. Mollaei, F. Sedighi, B. Habibi, S. Hazrati, and P. Asgharian, "Extraction of essential oils of *Ferulago angulata* with microwave-assisted hydrodistillation," *Ind. Crops Prod.*, vol. 137, pp. 43-51, Oct. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.015>
- [35] X. Peng *et al.*, "Recent advances of kinetic model in the separation of essential oils by microwave-assisted hydrodistillation," *Ind. Crops Prod.*, vol. 187, no. part A, p. 115418, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115418>
- [36] H. W. Wang, Y. Q. Liu, S. L. Wei, Z. J. Yan, and K. Lu, "Comparison of microwave-assisted and conventional hydrodistillation in the extraction of essential oils from mango (*Mangifera indica* L.) flowers," *Molecules*, vol. 15, no. 11, pp. 7715-7723, Oct. 2010. <https://doi.org/10.3390/molecules15117715>
- [37] W. Phutdhawong, R. Kawaree, S. Sanjaiya, W. Sengpracha, and D. Buddhasukh, "Microwave-Assisted Isolation of Essential oil of *Cinnamomum iners* Reinw. ex Bl.: Comparison with Conventional Hydrodistillation," *Molecules*, vol. 12, no. 4, pp. 868-877, Apr. 2007. <https://doi.org/10.3390/12040868>
- [38] S. B. Beltrán, L. J. Sierra, J. L. Fernández-Alonso, A. K. Romero, J. R. Martínez, and E. E. Stashenko, "Antioxidant Properties and Secondary Metabolites Profile of *Hyptis colombiana* at Various Phenological Stages," *Molecules*, vol. 28, no. 19, p. 6767, Sep. 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules28196767>

- [39] J. C. Henríquez, L. V. Duarte, L. J. Sierra, J. L. Fernández-Alonso, J. R. Martínez, and E. E. Stashenko, "Chemical Composition and In Vitro Antioxidant Activity of *Salvia aratocensis* (Lamiaceae) Essential Oils and Extracts," *Molecules*, vol. 28, no. 10, p. 4062, May. 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules28104062>
- [40] N. Ríos, E. E. Stashenko, and J. E. Duque, "Evaluation of the insecticidal activity of essential oils and their mixtures against *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae)," *Rev. Bras. Entomol.*, vol. 61, no. 4, pp. 307-311, Oct-Dec. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rbe.2017.08.005>
- [41] M. Akhbari, S. Masoum, F. Aghababaei, and S. Hamedi, "Optimization of microwave assisted extraction of essential oils from Iranian *Rosmarinus officinalis* L. using RSM," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 55, no. 6, pp. 2197-2207, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3137-7>
- [42] J. Wainer, A. Thomas, T. Chimhau, and K. G. Harding, "Extraction of Essential Oils from *Lavandula × intermedia* 'Margaret Roberts' Using Steam Distillation, Hydrodistillation, and Cellulase-Assisted Hydrodistillation: Experimentation and Cost Analysis," *Plants*, vol. 11, no. 24, p. 3479, Dec. 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11243479>
- [43] A. M. P. De Díaz, P. P. Díaz, and H. Cardoso, "Volatile Constituents of *Peperomia subespatulata*," *Planta Med.*, vol. 54, no. 1, pp. 92-93, Feb. 1988. <https://doi.org/10.1055/s-2006-962356>
- [44] T. Vogt, "Phenylpropanoid biosynthesis," *Mol. Plant*, vol. 3, no. 1, pp. 2-20, Jan. 2010. <https://doi.org/10.1093/mp/ssp106>
- [45] K. Ramírez-Alarcón et al., "Myristicin: From its biological effects in traditional medicine in plants to preclinical studies and use as ecological remedy in plant protection," *eFood*, vol. 4, no. 3, p. e90, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1002/efd2.90>
- [46] S. Rathore, S. Mukhia, S. Kapoor, V. Bhatt, R. Kumar, and R. Kumar, "Seasonal variability in essential oil composition and biological activity of *Rosmarinus officinalis* L. accessions in the western Himalaya," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 3305, pp. 283-298, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07298-x>
- [47] S. H. Najafian, M. Aeineh, and M. Hosseinfarahi, "Phenological Variations in Essential Oil Composition and Phytochemical Characteristics of *Myrtus communis* L.," *Russ. J. Plant Physiol.*, vol. 72, no. 2, p. 53, May. 2025. <https://doi.org/10.1134/S1021443724609984>
- [48] N. Jeyaratnam, A. H. Nour, and J. O. Akindoyo, "Comparative Study between Hydrodistillation and Microwave-assisted Hydrodistillation for Extraction of *Cinnamomum cassia* Oil," *ARNP J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 4, pp. 2647-2652, Feb. 2016. <http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/12617/>
- [49] N. El Hachlafi et al., "Extraction of Bioactive Compound-Rich Essential Oil from *Cistus ladanifer* L. by Microwave-Assisted Hydrodistillation: GC-MS Characterization, In Vitro Pharmacological Activities, and Molecular Docking," *Separations*, vol. 11, no. 7, p. 199, Jul. 2024. <https://doi.org/10.3390/separations11070199>
- [50] J. L. Cano-Botero, Y. Ospina-Balvuela, J. A. Gutiérrez-Cifuentes, and E. Ríos-Vásquez, "Hidrodestilación asistida por microondas de aceite esencial de *Curcuma longa* (rizomas): optimización mediante superficie de respuesta," *Rev. Investig. Desarro. Innov.*, vol. 13, no. 1, pp. 185-200, Feb. 2023. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/10409>
- [51] T. H. Tran et al., "Effect of microwaves energy on volatile compounds in Pepper (*Piper nigrum* L.) leaves essential oil," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 736, no. 3, p. 032013, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/3/032013>
- [52] A. Filly, X. Fernandez, M. Minuti, F. Visinoni, G. Cravotto, and F. Chemat, "Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: From laboratory to pilot and industrial scale," *Food Chem.*, vol. 150, pp. 193-198, May. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.139>
- [53] M. H. L. Da Silva, M. B. Das, G. B. Zoghbi, E. H. A. Andrade, and J. G. S. Â Maia, "The essential oils of *Peperomia pellucida* Kunth and *P. circinnata* Link var. *circinnata*," *Flavour Frag. J.*, vol. 14, no. 5, pp. 312-314, Sep-Oct. 1999. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1026\(199909/10\)14:5<312::AID-FFJ835>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1026(199909/10)14:5<312::AID-FFJ835>3.0.CO;2-B)
- [54] P. N. B. de Lira, J. K. R. da Silva, E. H. A. Andrade, P. J. C. Sousa, N. N. S. Silva, and J. G. S. Maia, "Essential Oil Composition of Three *Peperomia* Species from the Amazon, Brazil," *NPC Nat. Prod. Commun.*, vol. 4, no. 3, pp. 427-430, Mar. 2009. <https://doi.org/10.1177/1934578X0900400323>
- [55] E. Valarezo et al., "Study of the Chemical Composition and Biological Activity of the Essential Oil from Congona (*Peperomia inaequalifolia* Ruiz and Pav.)," *Plants*, vol. 12, no. 7, p. 1504, Apr. 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12071504>
- [56] E. Dorla et al., "Insecticidal Activity of the Leaf Essential Oil of *Peperomia borbonensis* Miq. (Piperaceae) and Its Major Components against the Melon Fly *Bactrocera cucurbitae* (Diptera: Tephritidae)," *Chem. Biodivers.*, vol. 14, no. 6, p. e1600493, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201600493>

- [57] H. Minh Nguyen *et al.*, "Essential Oil from Vietnamese *Peperomia leptostachya* Hook. & Arn. (Piperaceae): Chemical Composition, Antioxidant, Anti-Inflammatory, Cytotoxic Activities, and In Silico Analysis," *Molecules*, vol. 29, no. 12, p. 2808, Jun. 2024. <https://doi.org/10.3390/molecules29122808>
- [58] Z. Shafi *et al.*, "Exploring the food safety and preservation landscape of *Myristica fragrans* (L.) against foodborne pathogen: A review of current knowledge," *J. Agric. Food Res.*, vol. 19, p. 101639, Mar. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101639>
- [59] M. E. Götz, B. Sachse, B. Schäfer, and A. Eisenreich, "Myristicin and Elemicin: Potentially Toxic Alkenylbenzenes in Food," *Foods*, vol. 11, no. 13, p. 1988, Jul. 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11131988>
- [60] E. Frederico Seneme, D. C. dos Santos, E. M. Rodrigues Silva, Y. E. Moreira Franco, and G. Barbarini Longato, "Pharmacological and therapeutic potential of myristicin: A literature review," *Molecules*, vol. 26, no. 19, p. 5914, Sep. 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26195914>
- [61] E. Frederico Seneme, D. C. dos Santos, C. A. de Lima, Í. A. Maccari Zelioli, J. Mozer Sciani, and G. Barbarini Longato, "Effects of Myristicin in Association with Chemotherapies on the Reversal of the Multidrug Resistance (MDR) Mechanism in Cancer," *Pharmaceuticals*, vol. 15, no. 10, p. 1233, Oct. 2022. <https://doi.org/10.3390/ph15101233>
- [62] National Toxicology Program, "15th Report on Carcinogens," U.S. Department of Health and Human Services, 2021. [Online]. Available: <https://ntp.niehs.nih.gov/research/assessments/cancer/roc>
- [63] Junta Internacional de Fiscalización de Estupefacientes, "Precursores, sustancias químicas y equipo frecuentemente utilizados para la fabricación ilícita de estupefacientes y sustancias sicotrópicas 2024," Naciones Unidas, 2024. Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: [https://www.incb.org/documents/PRECURSORS/TECHNICAL\\_REPORTS/2024/S/PRE\\_Report\\_S.pdf](https://www.incb.org/documents/PRECURSORS/TECHNICAL_REPORTS/2024/S/PRE_Report_S.pdf)
- [64] L. Bader Eddin *et al.*, "Health Benefits, Pharmacological Effects, Molecular Mechanisms, and Therapeutic Potential of  $\alpha$ -Bisabolol," *Nutrients*, vol. 14, no. 7, p. 1370, Mar. 2022. <https://doi.org/10.3390/nu14071370>
- [65] E. Ramazani, M. Akaberi, S. Ahmad Emami, and Z. Tayarani-Najaran, "Pharmacological and biological effects of alpha-bisabolol: An updated review of the molecular mechanisms," *Life Sci.*, vol. 304, p. 120728, Sep. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2022.120728>
- [66] R. L. Smith *et al.*, "GRAS Flavoring Substances 24 The 24th publication by the FEMA expert Panel presents safety and usage data on 236 new generally recognized as safe flavoring ingredients," *Food Technol.*, vol. 63, no. 6, pp. 46-105, 2009. <https://www.femaflavor.org/publications/gras-publications/gras-24>
- [67] L. J. Marnett *et al.*, "GRASr2 Evaluation of Aliphatic Acyclic and Alicyclic Terpenoid Tertiary Alcohols and Structurally Related Substances Used as Flavoring Ingredients," *J. Food Sci.*, vol. 79, no. 4, pp. 428-441, Apr. 2014. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12407>

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores Valeria Pérez Pazos, David Arturo Perdomo, Cesar A. Mujica Martínez, Jhon Ironzi Maldonado Rodríguez y Juan Camilo Vargas Gallego, contribuyeron a la conceptualización, diseño y desarrollo de la investigación, además de la redacción y revisión final del manuscrito.