

**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN DESTILADOR
PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES DE *Cymbopogon
martinii*, *Cymbopogon nardus* Y *Lippia alba* QUIMIOTIPO CITRAL**

JUAN CARLOS PÉREZ CORTÉS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN DESTILADOR
PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES DE *Cymbopogon
martinii*, *Cymbopogon nardus* Y *Lippia alba* QUIMIOTIPO CITRAL.**

JUAN CARLOS PÉREZ CORTÉS

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título
de ingeniero químico**

Director:

Elena E. Stashenko, Química, Ph.D.

Jairo René Martínez Morales, Químico, Ph.D.

Co-Director:

Camilo Andrés Tavera Reyes, Ingeniero químico.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS.....	15
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1 .Aceite esencial.....	16
1.2. <i>Cymbopogon martinii</i> (Palmarrosa).....	17
1.3. <i>Cymbopogon nardus</i> (Citronela)	17
1.4. <i>Lippia alba</i> quimiotipo citral (Pronto alivio)	18
1.5. Método de extracción	18
1.6. Influencia de las variables en el proceso de extracción	19
1.7. Fundamentos de la extracción	20
2. METODOLOGÍA	22
2.1. Diseño experimental	22
2.2. Cosecha material vegetal.....	22
2.3. Extracción de aceite esencial.....	23
2.4. Caracterización y cuantificación de los aceites esenciales.	23
2.5. Evaluación de parámetros.....	24
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
3.1 Resultados Respecto A <i>Cymbopogon Martinii</i> :.....	25
3.1.1. Análisis cromatográfico:	26
3.1.2. Evaluación del efecto de los parámetros de extracción:	27

3.1.3. Condición ideal de operación para la extracción de AE de <i>Cymbopogon martinii</i> .	28
3.2. Resultados De Destilación Para <i>Cymbopogon nardus</i> :	29
3.2.1. Análisis cromatográfico:	30
3.2.2. Evaluación del efecto de los parámetros de extracción:	31
3.2.3. Condición ideal de operación para la extracción de AE de <i>Cymbopogon nardus</i>	32
3.3. Resultados De Destilación Para <i>Lippia Alba</i> (Citral):	33
3.3.1. Análisis cromatográfico:	34
3.3.2. Evaluación del efecto de los parámetros de extracción:	35
3.3.3. Condición ideal de operación para la extracción de AE <i>Lippia alba</i> (Citral).	36
4. CONCLUSIONES	37
5. RECOMENDACIONES	38
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Diseño experimental.	22
Tabla 2. Datos obtenidos de las destilaciones de <i>Cymbopogon martinii</i>	25
Tabla 3. Composición aceite esencial <i>Cymbopogon martinii</i>	26
Tabla 4. Criterios de análisis de varianza para <i>Cymbopogon martinii</i>	27
Tabla 5. Datos obtenidos de las destilaciones de <i>Cymbopogon nardus</i>	29
Tabla 6. Composición aceite esencial <i>Cymbopogon nardus</i>	31
Tabla 7. Criterios del análisis de varianza para <i>Cymbopogon nardus</i>	31
Tabla 8. Datos obtenidos de las destilaciones de <i>Lippia alba</i> (CITRAL).....	33
Tabla 9. Composición AE <i>Lippia alba</i> (CITRAL).	34
Tabla 10. Criterios del análisis de varianza para <i>Lippia alba</i> (CITRAL).	35
Tabla 11. Criterios para el cálculo del sueldo del operario.	62
Tabla 12. Costo de operario.....	62
Tabla 13. Costo de operación de equipos.	63
Tabla 14. Costos de extracción.....	63

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de la destilación por arrastre con vapor	19
Figura 2. Cromatograma típico obtenido por GC-MS del AE de <i>Cymbopogon martinii</i> , obtenido por el método de arrastre con vapor. Columna DB-WAX (60 m). Split 1:30	26
Figura 3. Costos acumulados en el tiempo para la extracción de AE de <i>Cymbopogon martinii</i>	29
Figura 4 Cromatograma típico obtenido por GC-MS del AE de <i>Cymbopogon nardus</i> , obtenido por el método de arrastre con vapor. Columna DB-WAX (60 m). Split 1:30	30
Figura 5. Costos acumulados en el tiempo para la extracción de AE de <i>Cymbopogon nardus</i>	32
Figura 6. Cromatograma típico obtenido por GC-MS del AE de <i>Lippia alba</i> (CITRAL), obtenido por el método de arrastre con vapor. Columna DB-WAX (60 m). Split 1:30	34
Figura 7. Costos acumulados en el tiempo para la extracción de AE de <i>Lippia alba</i> (CITRAL).	36
Figura 8. Equipo de destilación por arrastre de vapor.	46
Figura 9. Alambique.	47
Figura 10. Tapa y cuello del alambique.	48
Figura 11. Condensador de tubos y carcasa.	48
Figura 12. Torre de enfriamiento.	49
Figura 13. Vaso florentino.	50
Figura 14. Caldera Tecnik® de 6 BHP.	51
Figura 15. Picadora Penagos® PE-800	52
Figura 16. Columna y polipasto manual.	52

Figura 17. Recolección del material vegetal.	53
Figura 18. Pesado del material vegetal recolectado.	53
Figura 19. Transporte a la planta de extracción.....	54
Figura 20. Material vegetal picado.	54
Figura 21. Obtención del aceite y volátiles no condensables.	55
Figura 22. Recolección y decantado del aceite extraído.....	55
Figura 23. Material vegetal residual.	56
Figura 24. Filtrado y secado del aceite con sulfato de sodio anhidro.....	56
Figura 25. Muestras preparadas para análisis cromatográfico.	57
Figura 26. Cromatógrafo de gases de alta resolución Agilent Technologies 7890 A, acoplado a espectrómetro de masas Agilent Technologies 5975C,	58
Figura 27. Consumo de energía en el proceso de extracción de AE.	60

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: Equipo Usado En La Extracción De Aceites Esenciales	46
ANEXO B: Descripción Del Equipo De Destilación	47
ANEXO C: Imágenes De La Investigación	53
ANEXO D: Cromatógrafo	58
ANEXO E: Identificación De Aceites	59
ANEXO F: Esquema De Energía Necesaria Para El Proceso	60
ANEXO G: Costos De Operación	62

RESUMEN

TÍTULO:

Evaluación de las condiciones de operación de un destilador para la extracción de aceites esenciales de *Cymbopogon martinii*, *Cymbopogon nardus* y *Lippia alba* quimiotipo citral¹.

AUTORES:

Juan Carlos Pérez Cortés²

PALABRAS CLAVE:

Aceite esencial, *Cymbopogon martinii*, *Cymbopogon nardus*, *Lippia alba*, Destilación por arrastre con vapor, equipo prototipo escala industrial.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo tuvo como objetivos evaluar los efectos del tiempo de extracción y el tamaño de picado del material vegetal sobre el rendimiento de extracción y la calidad del aceite esencial (AE), para tres diferentes especies de plantas (*Cymbopogon martinii*, *Cymbopogon nardus* y *Lippia alba* quimiotipo citral). Las variables de respuesta fueron rendimiento de extracción (relación en masa de la cantidad de AE y la cantidad de materia prima) y la composición del aceite esencial. Los AE obtenidos se analizaron por cromatografía de gases acoplada con espectrometría de masas (GC-MS). Los rendimientos de extracción obtenidos variaron entre 0,29 y 0,40% para *Cymbopogon martinii*, 0,60 y 0,91% para *Cymbopogon nardus*, 0,13 y 0,46% para *Lippia alba*. Por medio de un análisis estadístico (ANOVA) se encontró que solo el tiempo afectó el rendimiento de la extracción para *Cymbopogon martinii* y *Cymbopogon nardus*, y que ninguno de los parámetros dentro de los valores estudiados afectó la calidad del aceite esencial. Se realizó un análisis económico que solo abarca los costos en la extracción, con el cual se determinaron los rangos de tiempo donde es económicamente viable la extracción; el rango para *Cymbopogon martinii* fue de 45 a 60 min, 50 a 82,5 min para *Cymbopogon nardus* y 40 a 55 min para *Lippia alba*.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Jairo René Martínez, Químico PhD.

ABSTRACT

TITLE:

Evaluation of the operating conditions of a distiller for the extraction of essential oils of *Cymbopogon martinii*, *Cymbopogon nardus* y *Lippia alba* quimiotipo citral³.

AUTHOR:

Juan Carlos Pérez Cortés⁴

KEYWORDS:

Essential oil, *Cymbopogon martinii*, *Cymbopogon nardus*, *Lippia alba*, Steam distillation, equipment to scale industrial.

DESCRIPCIÓN:

The objective of the present work was to evaluate the effects of extraction time and size of the plant material on extraction yield and essential oil quality for three different plant species (*Cymbopogon martinii*, *Cymbopogon nardus* and *Lippia alba* citral chelotype). The response variables were extraction yield (mass ratio of the amount of essential oil and the amount of raw material) and the composition of the essential oil. The essential oils obtained were analyzed by gas chromatography coupled with mass spectrometry (GC-MS). The extraction yields ranged from 0.29 to 0.40% for *Cymbopogon martinii*, 0.60 and 0.91% for *Cymbopogon nardus*, 0.13 and 0.46% for *Lippia alba*. Statistical analysis (ANOVA) found that only time affected the yield of the extraction for *Cymbopogon martinii* and *Cymbopogon nardus*, and that none of the parameters within the values studied affected the quality of the essential oil. An economic analysis was carried out that only covers the costs in the extraction, with which it was determined the time ranges where the extraction is economically viable; The range for *Cymbopogon martinii* was 45 to 60 min, 50 to 82.5 min for *Cymbopogon nardus* and 40 to 55 min for *Lippia alba*.

³ Trabajo de grado.

⁴ Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Jairo René Martínez, Químico PhD.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mercado mundial de los aceites esenciales ha experimentado un buen crecimiento, como consecuencia del cambio de patrones en el consumo y el auge que han tenido las plantas aromáticas y medicinales debido a la tendencia de la utilización de productos naturales. Colombia es un país megadiverso que alberga más del 10% de la biodiversidad del planeta, y posee el mayor número de ecosistemas representados en un mismo país; es el segundo país en el mundo en diversidad de plantas, al contar con más de 27.000 especies diferentes [1]. Esta gran cantidad de plantas le otorga al país una ventaja competitiva que propicia nuevas posibilidades para el desarrollo de la agroindustria, con las que se pueden generar alternativas de desarrollo y fuentes importantes de empleo.

Los aceites esenciales (AE) son el conjunto de componentes volátiles aislados de plantas aromáticas mediante diferentes métodos de extracción (hidrodestilación, destilación por arrastre con vapor de agua, entre otros). Algunos AE han ganado gran interés debido a sus múltiples propiedades funcionales. Muchos autores, han reportado para este tipo de productos actividades como: antifúngica, antioxidante, antimicrobial entre otras [2,3,4]. Las propiedades biológicas están directamente relacionadas con su composición química. Gracias a estas propiedades, algunos aceites esenciales han sido incluidos en la formulación de productos de limpieza bucal, de tocador, alimentos y agroquímicos [5,6,7]. Algunos aceites en particular, ejercen efectos sobre los sistemas nervioso central, digestivo y respiratorio [8].

En el Centro Nacional de Investigaciones para la Agro-Industrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinales Tropicales (CENIVAM), mediante la investigación de especies promisorias (aromáticas y medicinales) colombianas busca impulsar y fortalecer un nuevo sector económico el cual puede generar grandes ingresos para la región y el país. Uno de sus proyectos más recientes tiene como objetivo el desarrollo y la implementación del conocimiento tecnológico en la

región de Barbosa (Santander), para la producción y comercialización a escala industrial de aceites esenciales de alta calidad, de manera rentable y competitiva, creando nuevas fuentes de ingreso para las comunidades campesinas y las asociaciones de productores.

Dentro del marco del proyecto mencionado anteriormente, se desprende este trabajo de investigación que está enfocado en establecer las mejores condiciones para la extracción de aceites esenciales de las especies vegetales: *Cymbopogon martinii*, *Cymbopogon nardus* y *Lippia alba*, soportado en el estudio del tamaño del material vegetal, el tiempo de extracción y su influencia en el rendimiento y composición de los aceites esenciales obtenidos por el método de extracción por arrastre con vapor teniendo en cuenta la factibilidad económica de trabajar en un equipo de escala industrial.

OBJETIVOS

Objetivo general: establecer las mejores condiciones de tiempos de extracción y tamaño de partícula para la obtención de aceites esenciales por el método de extracción por arrastre con vapor de las especies vegetales: *Cymbopogon martinii*, *Cymbopogon nardus* y *Lippia alba*.

Objetivo específico:

- Analizar los rendimientos de extracción y la composición química de los aceites esenciales para cada especie vegetal.
- Evaluar el efecto que tienen el tamaño del material vegetal y el tiempo de extracción, sobre el rendimiento y la composición química en la extracción de los aceites esenciales de cada especie.
- Realizar un estudio económico del proceso de extracción para cada especie, con el fin de definir el tiempo de operación del destilador que proporcione rentabilidad económica.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aceite esencial.

Los aceites esenciales son sustancias obtenidas de las plantas, de compleja composición química. Armando Bandoni define que un AE es “parte del metabolismo de un vegetal, compuesto generalmente por terpenos, que están asociados o no a otros componentes, la mayoría de ellos volátiles, y que generan en conjunto el olor de dicho vegetal” [8]. Es decir, los aceites esenciales son mezclas multicomponentes de varias sustancias, éstas se encuentran en diferentes proporciones y en conjunto proporcionan características propias al aceite esencial. Además, se ha identificado que las plantas desarrollan algunos quimiotipos (individuos de una misma especie botánica, identificados morfológicamente, pero con diferente composición química de sus metabolitos secundarios [8]).

Normalmente tienen una densidad menor que la del agua. Son inflamables, no son tóxicos, aunque pueden provocar alergias a personas sensibles a determinados terpenoides [8]. Sufren degradación química en presencia de la luz solar, del aire, del calor, de ácidos y álcalis fuertes. Además, en su mayoría son insolubles en disolventes polares como el agua, pero fácilmente solubles en disolventes orgánicos como el alcohol, el éter, el metanol, etc. [8]. La mayoría son incoloros y de carácter volátil, los hay viscosos o semisólidos [9]. Además, los aceites esenciales son conocidos y utilizados desde la antigüedad por su gran variedad de usos y de aplicaciones como en perfumes, ambientadores, cosméticos, medicinas, entre otras [10,11].

1.2. *Cymbopogon martinii* (Palmarrosa)

Cymbopogon martinii conocida como Palmarrosa, es un pasto aromático perteneciente a la familia *Poaceae* y es originaria del sur de Asia. India es el país de mayor producción y exportación de aceite esencial con una producción de 40 a 60 toneladas por año [5].

La composición de este AE se caracteriza por altos contenidos de geraniol (63-80% p/p), acetato de geranilo (8-28%) y su rendimiento de extracción varía entre 0.1% y 1.2% [12], A escala industrial este aceite esencial se utiliza ampliamente como materia prima en la perfumería, en la formulación de jabones, preparaciones de cosméticos y otros productos [5,6,7]. En el área de la salud tiene usos comunes como diurético, antiséptico, para calmar dolores estomacales. Además, posee una alta actividad contra diversos microorganismos (*E. coli*, *Salmonella typhimurium*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Saccharomyces cerevisiae*), entre otras [13,14,15,16].

1.3. *Cymbopogon nardus* (Citronela)

El *Cymbopogon nardus* es una especie vegetal originaria de la India y de Sri Lanka; es una planta silvestre que crece en áreas tropicales [2,17]. El rendimiento en aceite esencial de esta especie se encuentra comprendido entre 0.6 y 1.2%(p/p). Los componentes principales de este son: citronelal (29.7%), geraniol (24.2%) y γ -terpineol (9.2%), compuestos que determinan su calidad [8,9,12].

Este aceite ha sido empleado como materia prima para productos, por sus actividades: repelente de insectos, en especial del mosquito de la fiebre amarilla (*Aedes aegypti*) [3], antimicrobianas contra *Pseudomonas putida* [2], actividad inhibidora del crecimiento de *Aspergillus niger*, analgésicas, antioxidantes, anticonceptivas. Además, de los usos en las industrias de cosméticos, aromatizantes, jabones, productos de perfumería, entre otras [4,12,17].

1.4. *Lippia alba* quimiotipo citral (Pronto alivio)

La especie *Lippia alba* (Mill.) N.E Brown, es un arbusto aromático perteneciente a la familia Verbenaceae y crece en zonas tropicales como América Central, Suramérica, África Tropical y algunas regiones de Asia [18,19]. Esta planta es conocida en diferentes regiones de Colombia con nombres como “Pronto alivio”, “Curalotodo”, “Orégano de cerro” y “Quita dolor” [20].

La composición química del AE de *L. alba* depende sensiblemente del origen geográfico, las condiciones del cultivo, la edad, la parte empleada para la extracción y de algunos otros factores geobotánicos [20]. Esta planta contiene de 0.1% a 1.2 % de aceite esencial [8,19,21]. Algunos de sus componentes son: citral (mezcla de isómeros, neral y geranial [22]) como componente mayoritario (42-56%), geraniol (7-16%), el *trans*- β -cariofileno (4-8%), la 6-metil-5-hepten-2-ona (1-3%), el nerol (0-5%), el limoneno (2-3%), el biciclosesquifelandreno (1-2%) y el α -humuleno (1-2%) [23]. Algunas de las aplicaciones más conocidas de *L. alba* están en el área de la medicina contra enfermedades gastrointestinales, hepáticas, respiratorias, la diabetes. Además, algunos de sus compuestos tienen gran valor para industria farmacéutica [22,24].

1.5. Método de extracción

La extracción por arrastre con vapor, es uno de los métodos de extracción de aceites esenciales más tradicionales y utilizados a nivel industrial, ya que permite obtener AE con buenos rendimientos, y además, se pueden procesar grandes cantidades de material vegetal [8]. La extracción por arrastre con vapor se lleva a cabo con vapor de agua sobrecalentado que por lo general es producido por una caldera. La corriente de vapor rompe las células o canales oleíferos en la planta y arrastra la mezcla volátil [25]. Esta mezcla pasa por un condensador, donde regresan a la fase líquida y luego es separada por decantación, ya que la mezcla que se obtiene corresponde a dos líquidos inmiscibles (debido a que generalmente los aceites son

más livianos que el agua, y poco solubles en ella, a excepción del aceite esencial del clavo que es más pesado). En general este método es utilizado para extraer aceites de rizomas, raíces, algunas semillas y de hojas secas [8,25]. En la Figura 1 se presentan las partes del proceso:

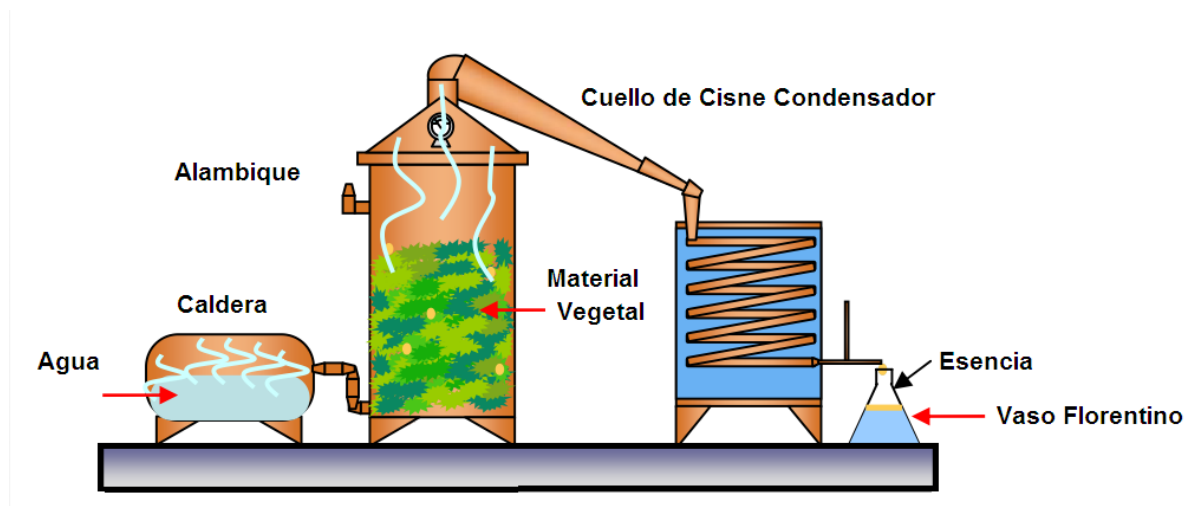


Figura 1. Esquema de la destilación por arrastre con vapor

*Figura tomada del estudio de la composición química de los aceites esenciales de seis especies vegetales cultivadas en los municipios de bolívar y el peñon-santander [20].

1.6. Influencia de las variables en el proceso de extracción

Este proyecto estudió la influencia de las siguientes variables que afectan el proceso para determinar los valores en los cuales se presentan los mejores rendimientos y mayor aprovechamiento del material.

- Tamaño de partícula del material vegetal: El objeto principal de reducir el tamaño de la planta es el de aumentar el área superficial de contacto entre el material vegetal y el vapor de agua para facilitar la difusión y el arrastre de los componentes volátiles.

- Tiempo de extracción: es uno de los factores más importantes que influye en todo el proceso de extracción de AE, ya que a medida que el tiempo aumenta, la velocidad de extracción de aceite disminuye. Los costos de operación y los rendimientos de extracción son proporcionales al aumento del tiempo. Por estas razones el tiempo de extracción es el parámetro diferencial que debe optimizarse para garantizar la rentabilidad en toda la operación de extracción de aceites esenciales.

Adicional a estas, el proceso de obtención de los aceites también depende del flujo de vapor, la presión de entrada de vapor y la densidad de carga del material vegetal entre otras. Pero estas se mantuvieron en un valor fijo para este proyecto.

1.7. Fundamentos de la extracción

El método de arrastre con vapor para la extracción de AE, se ha tratado de explicar teniendo como fundamentado la teoría de la destilación fraccionada, la rectificación y la desorción. Sin embargo, otros análisis proponen que el mecanismo de extracción del aceite esencial se asemeja más a la difusión del vapor en un lecho empacado. De acuerdo a esto la extracción de AE en un lecho empacado obedecería al efecto combinado de la difusión- evaporación-convectiva. De este modo, el vapor caliente utilizado debe llegar hasta las membranas que almacenan los AE dentro del material vegetal, y vencer resistencias difusivas, para penetrar y salir de la matriz a través de los poros de la pared celular. Finalmente, los aceites esenciales en fase vapor deben llegar hasta el tope de la columna transportados por la fuerza convectiva del vapor que asciende a través del lecho [26].

De este método de extracción se deduce que existen, por lo menos, tres fenómenos controlantes del proceso: El primero, una vaporización instantánea del AE, en la interfase de la película formada en la superficie del material vegetal (MV) y el vapor. El segundo, la difusión del aceite vaporizado a la corriente del vapor, debido a la convección que ejerce el vapor en el lecho. Y el tercero, un transporte convectivo

de materias debido al arrastre de los componentes del AE, que se lleva a lo largo del alambique. Según de la ley de *Fick* [27,28].

El factor más relevante que gobierna el fenómeno de evaporación, es el calor latente de vaporización, definido como la cantidad de energía que requiere una sustancia para que ocurra un cambio de fase, de líquido a gas. La velocidad de evaporación de los aceites esenciales es favorecida por la disminución de la presión parcial debido a la presencia del vapor [26]. Durante la extracción se lleva a cabo un equilibrio de fases entre el AE y el agua, el cual se toma como una mezcla ideal multicomponente. Las leyes de Dalton y Raoult describen este equilibrio de fases:

La ley de Dalton describe que la presión del sistema es la suma de las presiones de vapor de cada una de las sustancias.

$$P = P_{\text{agua}}^0 + P_{\text{AE}} \quad \text{Ecuación 1}$$

La ley de Raoult para el AE describe que la presión de vapor de una sustancia es el resultado de la contribución de la presión de vapor de cada uno de sus componentes y su fracción molar.

$$P_{\text{AE}} = \sum_{i=1}^n x_i P_i^0 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde n es la cantidad de compuestos dentro del AE.

Y la composición en la fase vapor está descrita por:

$$y_i = \frac{x_i P_i^0}{P} \quad \text{Y} \quad y_{\text{agua}} = \frac{P_{\text{agua}}^0}{P} \quad \text{Ecuaciones 3 y 4}$$

Este proceso necesita energía suficiente para calentar el material vegetal, el calentamiento del equipo, la vaporización del aceite esencial, y también para compensar las pequeñas pérdidas de energía que se generan a través del alambique [ver 0]

2. METODOLOGÍA

La extracción de los aceites esenciales se realizó por el método destilación por arrastre con vapor (descrito en la sección 1.5). El equipo empleado se describe en los **Anexos A y B**. La metodología implementada para este trabajo consistió en: diseño experimental, cosecha de material, extracción de los aceites esenciales, caracterización, cuantificación, evaluación y análisis de parámetros.

2.1. Diseño experimental

Se buscó evaluar el efecto que tienen las variables (tamaño del material vegetal y tiempo de extracción), sobre el rendimiento del proceso, la composición del aceite esencial y el costo de operación de la extracción del AE. Se realizó un diseño de experimentos factorial 2^2 con replica para cada experimento. En la Tabla 1 se observa el diseño de experimentos común *Cymbopogon martinii* (*C. martinii*), *Cymbopogon nardus* (*C. nardus*) y *Lippia alba citral* (*L. alba*).

Tabla 1. Diseño experimental.

Nivel	Tamaño de partícula	Tiempo en destilación
-1	1,5 cm	40 min
1	3 cm	90 min

2.2. Cosecha material vegetal.

Se recolectó el material vegetal proveniente de parcelas experimentales cultivadas por productores de los municipios de Puente nacional y Barbosa, Santander,

pertenecientes al proyecto titulado: Fortalecimiento de la agroindustria de aceites esenciales crudos y rectificadas en el municipio de Barbosa, Santander, financiado por Colciencias y ejecutado por CIBIMOL. Luego este MV se transportó hasta las instalaciones de la planta de extracción que se encuentra en la Universidad Industrial de Santander sede Barbosa para su posterior procesamiento.

2.3. Extracción de aceite esencial.

El material vegetal fue homogeneizado y picado en una picadora PE-800 marca Penagos, con diámetros de picado de 1.5 y 3 cm. Para las especies *C. martinii* y *C. nardus* se tomaron 100 kg de MV para cada experimento, de *L. alba* se utilizaron 80 kg de MV. Para cada extracción se utilizó un flujo de vapor en un rango de 600 a 700 mililitros por minuto a una presión de 80 ± 10 Psi, El flujo de vapor inyectado al destilador fue producido con una caldera marca *Tecnik* de 58,86 kW o 6 BHP (Ver ANEXO B.5). Cabe resaltar que para cada experimento se recogió el AE en el tiempo descrito en el diseño de experimento y el equipo se dejó operar hasta un tiempo total de 2 horas con el fin de extraer la mayor cantidad de AE.

2.4. Caracterización y cuantificación de los aceites esenciales.

El aceite esencial obtenido de cada destilación se filtró y secó (con sulfato de sodio anhidro). Para la preparación de las muestras se utilizó 50 μ L de cada aceite esencial, 2 μ L de *n*-tetradecano y se aforó a 1 mL con diclorometano. Para el análisis de los aceites esenciales extraídos se empleó un cromatógrafo *Agilent Technologies 6890 Plus* (HP, Palo Alto, California, USA) acoplado a un detector selectivo de masas *Agilent Technologies MSD 5973* (Ver ANEXO C).

La identificación tentativa de los componentes del aceite esencial se realizó calculando los índices de retención (Ver ANEXO D) y comparando los espectros de masas obtenidos por GC-MS, con los espectros de masas que se encuentran en las bases de datos *Adams, NIST y Wiley*.

La cuantificación de los compuestos se realizó utilizando el área cromatográfica de cada pico, dividiéndola en la sumatoria de áreas de todos los picos del cromatograma y multiplicándola por 100. De esta manera se dio una composición tentativa de cada muestra de aceite.

2.5. Evaluación de parámetros.

La evaluación de parámetros se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) de los resultados obtenidos de cada destilación, evaluando como observables: el rendimiento de extracción y la composición de cada aceite esencial.

Para el desarrollo del modelo matemático se usó como herramienta de cálculo el programa EXCEL, para realizar la respectiva regresión múltiple, con el fin de predecir el comportamiento del proceso en función de los parámetros de estudio.

Por último se realizó un estudio económico, para determinar el costo de operación de la planta y poder dar la condición de tiempo de operación ideal para la extracción de los aceites de las 3 especies bajo estudio. En el balance económico se tuvo en cuenta los costos fijos (la depreciación de la planta y el costo de mano de obra) y los costos variables (costo de los servicios públicos consumidos en el proceso) solo durante el proceso de obtención del aceite esencial, sin tener en cuenta los costos de cosecha, el transporte del MV y los costos de manejo post destilación (elaboración de ficha técnicas y otros). El valor del aceite esencial de *C. martinii*, *C. nardus* y *L. alba* es de 55, 27 y 30 dólares respectivamente (valores obtenidos de la base de datos del CENIVAM).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. RESULTADOS RESPECTO A *Cymbopogon martinii*:

Siguiendo el diseño de experimentos se procesó un total de 800 kg de material vegetal (este material provenía de varios cultivos y fue homogeneizado para disminuir los errores aleatorios). De los cuales se obtuvieron 2,7 kg de aceite esencial. El material vegetal residual se utilizó como materia prima para la preparación de compost con el fin de fertilizar los cultivos. Los resultados obtenidos para las extracciones de AE de *C. martinii* por el método de destilación por arrastre con vapor se muestran en Tabla 2. Como observables se tienen el rendimiento de la extracción (relación de cantidad de aceite esencial y material vegetal fresco en porcentaje), la cantidad de geraniol en el aceite esencial y el costo de operación de la planta para cada experimento. El rendimiento promedio de extracción de aceite esencial fue similar a los rendimientos reportados (0,4% -0,5%) [29].

Tabla 2. Datos obtenidos de las destilaciones de *Cymbopogon martinii*.

Experimento	Tamaño de partícula	Tiempo en destilación	Costo de operación [COP]	Rendimiento [%]	Geraniol [%]
1	1,5 cm	90 min	39627	0,38	72,23
2	1,5 cm	90 min	39627	0,40	73,42
3	1,5 cm	40 min	17612	0,29	67,02
4	1,5 cm	40 min	17612	0,29	68,68
5	3 cm	90 min	39627	0,34	68,22
6	3 cm	90 min	39627	0,33	71,28
7	3 cm	40 min	17612	0,33	65,42
8	3 cm	40 min	17612	0,34	76,26

3.1.1 Análisis cromatográfico: En la Figura 2, se muestra el cromatograma típico del aceite esencial de *Cymbopogon martinii*. Se pueden identificar positivamente 6 compuestos para cada AE; en la Tabla 3 se encuentra la composición química de estos aceites esenciales.

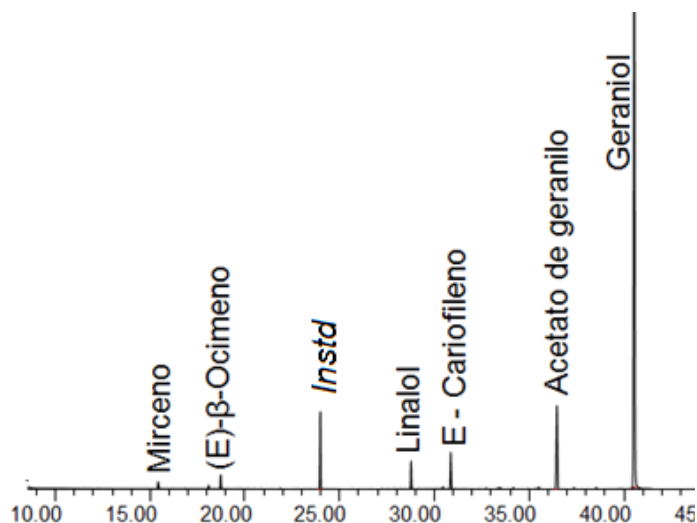


Figura 2. Cromatograma típico obtenido por GC-MS del AE de *Cymbopogon martinii*, obtenido por el método de arrastre con vapor. Columna DB-WAX (60 m). Split 1:30

En el AE de *C. martinii* se destacan los altos contenidos de geraniol y acetato de geranilo, 70,32% y 8,94% respectivamente. Esta composición es similar a la reportada por el CENIVAM y CIBIMOL [12].

Tabla 3. Composición aceite esencial *Cymbopogon martinii*

NOMBRE	CONCENTRACIÓN RELATIVA [%]*							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Mirceno	0,84	0,76	1,03	1,16	0,77	0,68	0,96	0,64
(E)-β-Ocimeno	0,99	0,64	0,86	0,84	0,76	1,04	0,90	1,48
Linalol	1,83	1,59	1,61	1,87	1,41	1,82	1,60	3,49
(E)-Cariofileno	3,35	2,74	3,50	3,32	3,12	2,79	3,77	4,02
Acetato de geranilo	10,15	9,69	10,24	9,56	10,04	8,66	6,06	7,10
Geraniol	72,23	73,42	67,02	68,68	68,22	71,28	65,42	76,26

*Se refiere a la relación de áreas cromatográficas del compuesto sobre el área de todos los picos multiplicado por 100

3.1.2 Evaluación del efecto de los parámetros de extracción: Se evaluaron estadísticamente la influencia de los parámetros tiempo de extracción y el tamaño de picado del material vegetal sobre el rendimiento y la composición de geraniol en el AE, mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un valor crítico del F umbral de 7,71 para 1 y 4 grados de libertad con un nivel de confianza de 95% sobre las 8 muestras de aceite esencial. En la Tabla 4 se muestra el efecto de cada parámetro y su interacción respecto a cada observable.

Tabla 4. Criterios de análisis de varianza para *Cymbopogon martinii*

Variables	F umbral.	Valor F		
		Tiempo	Tamaño	Interacción
Rendimiento	7.71	52.80	0.06	71,05
Composición en geraniol		1.45	0.18	0,73

De los datos de la Tabla 4 se infiere que ninguno de los parámetros tiene efecto significativo sobre la cantidad de geraniol presente en el aceite esencial en los niveles estudiados. El tiempo y su interacción con el tamaño de picado sí tienen efecto significativo sobre el rendimiento de extracción de aceite esencial ya que el valor F es mayor que el F umbral.

De acuerdo con lo anterior, se realizó una regresión lineal múltiple con el fin de predecir el comportamiento del rendimiento frente al cambio en los parámetros de extracción. El modelo tiene en cuenta la contribución del tiempo y la contribución de la interacción entre el tiempo y el tamaño del picado del material vegetal. Este modelo matemático tiene un R² de 0.988 lo cual significa que el modelo matemático tiene una buena calidad para replicar resultados.

$$Y = 0,2239 + 0,002597 * tiempo - 0,000154 * tiempo * tamaño \quad \text{Ecuación 5.}$$

3.1.3 Condición ideal de operación para la extracción de AE de *Cymbopogon martinii*: Se hizo un balance económico donde se tuvieron en cuenta los mayores costos que encierran el proceso de extracción del aceite. Todos los costos se llevaron a la unidad de tiempo de minutos de operación de la planta, y en el balance se tuvieron en cuenta: los costos de operario (prestaciones sociales para 2 salarios mínimos vigentes del año 2016), costos de los servicios públicos generados y como ultimo la depreciación de la planta. Como criterio para dar la condición ideal de tiempo de operación del equipo para la extracción del aceite esencial, se tiene como límite el momento donde se obtiene la mayor rentabilidad durante la extracción.

De este análisis económico, se determinó que el tiempo ideal de extracción fue de 60,7 min. En la Figura 3 se observan los costos de operación de la planta, costo del valor del aceite extraído acumulados en el tiempo y la curva de rentabilidad durante el proceso. Cabe aclarar que esta rentabilidad no es absoluta, ya que en este estudio no se tuvo en cuenta los costos durante la pre-extracción y la post-extracción. Teniendo en cuenta la rentabilidad durante el tiempo estudiado, se infiere que a partir de los 45 minutos la rentabilidad del proceso casi que llega a su máximo valor, y que durante los minutos siguientes hasta que llega a su máximo valor (60,7 min), la rentabilidad no cambia drásticamente. Los 45 minutos, es un tiempo aceptable para la extracción del aceite de esencial de *Cymbopogon martinii* bajo las condiciones estudiadas. En la Tabla 14 (Ver **ANEXO G**) se muestra los costos totales de extracción.

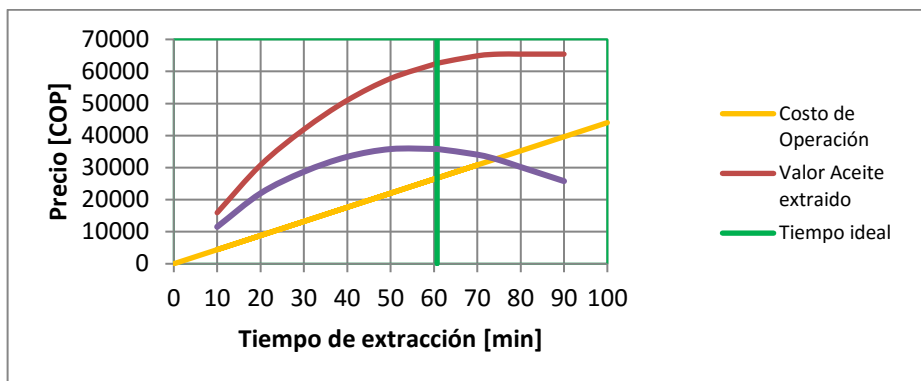


Figura 3. Costos acumulados en el tiempo para la extracción de AE de *Cymbopogon martinii*.

3.2. RESULTADOS DE DESTILACIÓN PARA *Cymbopogon nardus*:

Siguiendo el diseño de experimentos se procesó un total de 800 kg de material vegetal (este material provenía de varios cultivos y fue homogeneizado para disminuir los errores aleatorios.) de los cuales se obtuvieron 6,5 kg de aceite esencial. Los resultados obtenidos para las extracciones de AE de *Cymbopogon nardus* por el método de destilación por arrastre con vapor se muestran en la Tabla 5. Como observables se tienen el rendimiento de la extracción, las cantidades de geraniol, geranial y citronelol en el aceite esencial, y el costo de operación de la planta para cada experimento. El rendimiento promedio de extracción de aceite esencial fue similar a los rendimientos reportados (1,06%) por métodos de extracción más eficientes como hidrodestilación asistida por radiación de microondas [12].

Tabla 5. Datos obtenidos de las destilaciones de *Cymbopogon nardus*.

Exp.	Tamaño de partícula	Tiempo de destilación	Rendimiento [%]	Costo de operación [COP]	Geraniol [%]	Citronelal [%]	Citronelol [%]
1	3 cm	90 min	0,81	39627	16,81	34,63	15,59
2	3 cm	90 min	0,91	39627	11,27	19,71	14,34
3	3 cm	40 min	0,70	17612	15,34	9,35	16,31

Exp.	Tamaño de partícula	Tiempo de destilación	Rendimiento [%]	Costo de operación [COP]	Geraniol [%]	Citronelal [%]	Citronelol [%]
4	3 cm	40 min	0,77	17612	22,01	17,90	19,96
5	1,5 cm	90 min	0,91	39627	13,05	20,14	15,62
6	1,5 cm	90 min	0,99	39627	13,05	20,14	15,62
7	1,5 cm	40 min	0,60	17612	13,02	31,68	17,04
8	1,5 cm	40 min	0,81	17612	15,49	9,80	19,41

3.2.1 Análisis cromatográfico: En la Figura 4, se muestra el cromatograma típico del aceite esencial de *Cymbopogon nardus*. De acuerdo con esta, se puede identificar positivamente 12 compuestos para cada AE, en la Tabla 6 se encuentra la composición de estos aceites esenciales.

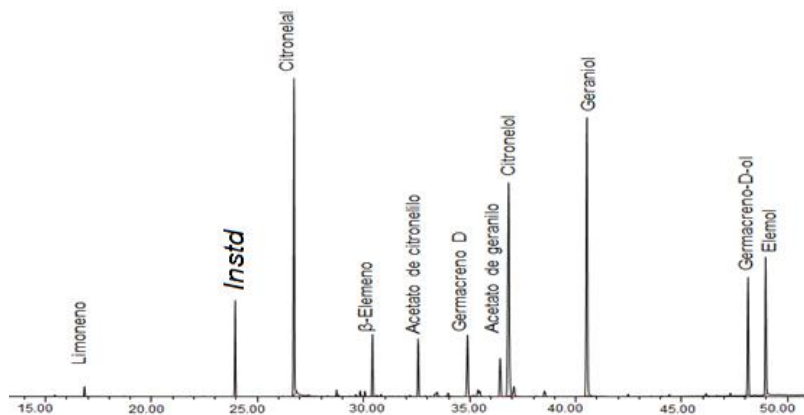


Figura 4 Cromatograma típico obtenido por GC-MS del AE de *Cymbopogon nardus*, obtenido por el método de arrastre con vapor. Columna DB-WAX (60 m). Split 1:30

Como compuestos mayoritarios en el AE de *C. nardus* se identificaron el citronelal, citronelol, geraniol y elemol en cantidades promedio de 18.1%, 15.83% y 14,6% respectivamente. Citronelal, citronelol y geraniol son componentes de interés para este estudio cuyas composiciones son similares a las reportadas por el CENIVAM y el CIDEIM [3].

Tabla 6. Composición aceite esencial *Cymbopogon nardus*.

NOMBRE	CONCENTRACIÓN RELATIVA [%]*							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Limoneno	0,91	0,42	0,20	0,56	0,40	0,40	0,40	0,13
Citronelal	34,63	19,71	9,35	17,90	20,14	20,14	31,68	9,80
β -Elemeno	3,09	4,17	4,41	3,57	4,46	4,46	4,43	5,82
Acetato de citronelilo	4,55	2,76	3,65	3,59	2,61	2,61	3,40	2,75
Germacreno D	3,57	5,26	6,35	4,82	5,66	5,66	5,50	7,07
Acetato de geraniol	3,86	2,15	3,27	3,07	-	-	1,81	1,75
Citronelol	15,59	14,34	16,31	19,96	15,62	15,62	17,04	19,41
Geraniol	16,81	11,27	15,34	22,01	13,05	13,05	13,02	15,49
Germacreno -D-ol	5,53	6,50	13,37	7,68	9,08	9,08	6,65	10,71
Elemol	8,27	20,15	17,91	8,89	20,16	20,16	12,09	22,79
Eugenol	1,72	1,33	1,47	1,39	1,55	1,55	1,78	-
α - Cadinol	-	4,53	2,65	1,11	4,28	4,28	2,20	4,28

*Se refiere a la relación de áreas cromatográficas del compuesto sobre el área de todos los picos multiplicado por 100

3.2.2 Evaluación del efecto de los parámetros de extracción: Se evaluó estadísticamente la influencia de los parámetros tiempo de extracción y el tamaño de picado del material vegetal sobre el rendimiento y la fracción de los componentes citronelol, citronelal y geraniol en el AE, mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un valor crítico del F umbral de 7,71 para 1 y 4 grados de libertad con un nivel de confianza de 95% sobre las 8 muestras de aceite esencial. En la Tabla 7 se muestra el efecto de cada parámetro y su interacción respecto a cada observable.

Tabla 7. Criterios del análisis de varianza para *Cymbopogon nardus*.

Variables	F umbral.	Valor F		
		Tiempo	Tamaño	Interacción
Rendimiento	7.71	8,94	0,22	0,89
Citronelol		6,50	0,11	0,06
Citronelal		1,96	0,04	0,39
Geraniol		1,68	1,44	0,58

De los datos de la Tabla 7 se infiere que para el rendimiento solo el parámetro tiempo, tiene un efecto significado. Para el resto de variables de composición, ninguno de los parámetros tiene efecto significativo en los niveles de estudio. Se realizó una regresión lineal simple para predecir el comportamiento del rendimiento solo en función del tiempo. El modelo tiene un R^2 de 0.992 y tiene como límite, el tiempo calculado con la Figura 5.

$$Y = -0,0001 * tiempo^2 + 0,0243 * tiempo + 0,0975 \quad \text{Ecuación 6.}$$

3.2.3 Condición ideal de operación para la extracción de AE de *Cymbopogon nardus*. Del mismo modo que se realizó el estudio económico para *Cymbopogon martinii* (ver sección 0 párrafo 1) se realizó un análisis económico para dar el tiempo ideal de extracción para la especie *Cymbopogon nardus*.

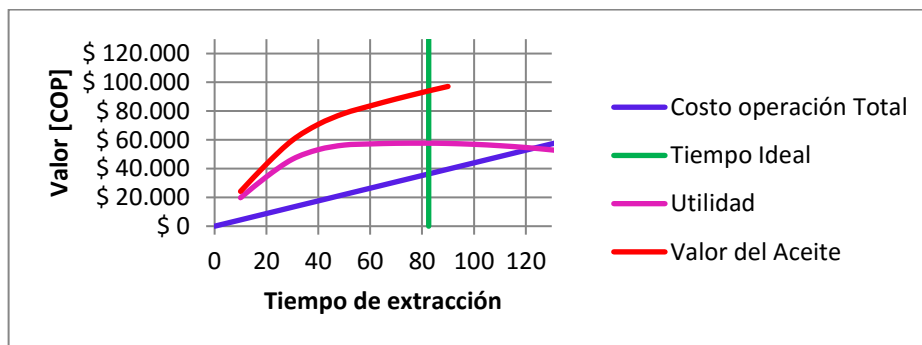


Figura 5. Costos acumulados en el tiempo para la extracción de AE de *Cymbopogon nardus*.

De los datos de la gráfica anterior se determinó que el tiempo ideal de extracción fue de 82,5 min. De la Figura 5 y teniendo en cuenta la rentabilidad durante el tiempo estudiado, se infiere que a partir de los 50 minutos la rentabilidad del proceso casi que llega a su máximo valor, y que durante los minutos siguientes, hasta que llega a su máximo valor (82,5 min), la rentabilidad no cambia drásticamente. 50 minutos, es un tiempo aceptable para la extracción del aceite de esencial de *Cymbopogon*

nardus bajo las condiciones estudiadas. En la Tabla 14 se muestra los costos totales de extracción (Ver **ANEXO G**).

3.3. RESULTADOS DE DESTILACIÓN PARA *Lippia alba* (CITRAL):

Siguiendo el diseño de experimentos se procesó un total de 642 kg de material vegetal (este material provenía de varios cultivos y fue homogeneizado para disminuir los errores aleatorios.) de los cuales se obtuvieron 1,6 kg de aceite esencial. Los resultados obtenidos para las extracciones de AE de *Lippia alba* por el método de destilación por arrastre con vapor se muestran en la Tabla 8. Como observables se tienen el rendimiento de la extracción, las cantidades de citral (mezcla de los isómeros neral y geranial [22,23]) en el aceite esencial, y el costo de operación de la planta para cada experimento. El rendimiento promedio de extracción de AE de *L. alba* no fue similar a los rendimientos reportados [30], esto se atribuye principalmente a las condiciones climáticas y de suelo de la zona donde se cultivan las plantas.

Tabla 8. Datos obtenidos de las destilaciones de *Lippia alba* (CITRAL).

Exp	Tamaño de partícula	Tiempo en destilación	Costo de operación [COP]	Rendimiento [%]	Neral [%]	Geranial [%]	Citral [%]
1	1,5 cm	90 min	40650	0,25	9,94	13,79	23,73
2	1,5 cm	90 min	40650	0,29	10,44	14,44	24,88
3	1,5 cm	40 min	18067	0,18	9,85	14,66	24,52
4	1,5 cm	40 min	18067	0,27	9,22	12,13	21,35
5	3 cm	90 min	40650	0,46	11,72	16,14	27,86
6	3 cm	90 min	40650	0,23	7,79	11,11	18,90
7	3 cm	40 min	18067	0,13	8,79	13,70	22,49
8	3 cm	40 min	18067	0,18	6,98	9,87	16,85

3.3.1 Análisis cromatográfico: En la Figura 6 se muestra un cromatograma típico del AE de *L. alba*. Se logró identificar positivamente 17 compuestos en todas las muestras de AE. Como compuestos mayoritarios se identificaron el E-cariofileno, neral, geranial y geraniol.

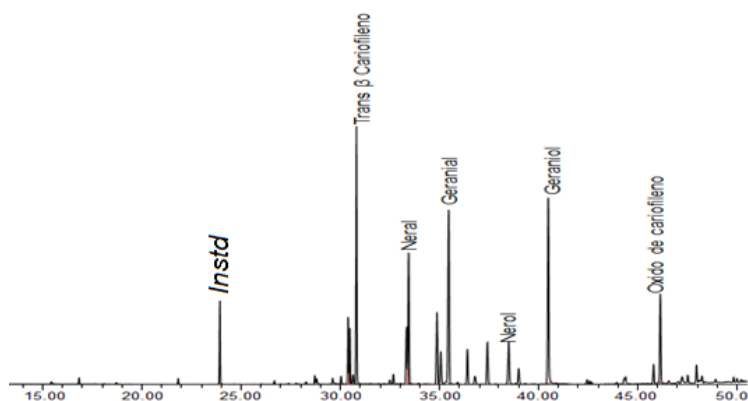


Figura 6. Cromatograma típico obtenido por GC-MS del AE de *Lippia alba* (CITRAL), obtenido por el método de arrastre con vapor. Columna DB-WAX (60 m). Split 1:30

En la Tabla 9 se muestran los compuestos identificados con una concentración relativa mayor de 0,3. Como compuestos mayoritarios se identificaron el E-cariofileno, Neral, Germacreno D, Geranial y geraniol, en composiciones relativas promedio de 17,93%, 9,34%, 5,44%, 13,23% y 13,88% respectivamente. Este AE tiene una composición similar a las reportadas en trabajos anteriores [23,24,31,32] aunque tienen una diferencia en la fracción de citral, ya que la reportada varía entre 30% al 50% y la fracción promedio en este estudio fue de 22,57%.

Tabla 9. Composición AE *Lippia alba* (CITRAL).

NOMBRE	CONCENTRACIÓN RELATIVA [%]*							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Mirceno	0,76	0,62	0,48	0,81	0,35	0,27	-	0,41
Limoneno	0,54	0,44	0,33	0,47	0,50	0,31	0,33	0,25
Linalol	0,77	0,53	-	0,72	-	0,41	0,49	0,31

NOMBRE	CONCENTRACIÓN RELATIVA [%]*							
	1	2	3	4	5	6	7	8
β -Elemeno	4,20	3,64	4,22	4,39	5,66	4,66	3,56	4,65
α -Guaieno	2,85	2,88	2,98	3,00	3,40	3,70	2,96	3,96
<i>Trans</i> - β -Cariofileno	16,92	16,49	15,80	17,79	21,09	19,01	14,62	21,70
α -Cariofileno	4,01	4,05	3,83	4,17	5,03	4,67	3,83	5,41
Neral	9,94	10,44	9,85	9,22	11,72	7,79	8,79	6,98
Germacreno D	5,17	4,99	4,81	4,40	5,32	6,54	5,34	6,97
α -Bulneseno	1,92	2,26	2,13	1,76	2,11	2,60	2,44	2,92
Geranial	13,79	14,44	14,66	12,13	16,14	11,11	13,70	9,87
Acetato de geranilo	1,50	2,09	1,37	-	1,45	2,59	2,63	1,90
Nerol	1,82	1,35	1,52	3,01	-	-	3,44	3,15
Isobutanoato de geranilo	1,03	1,31	1,25	-	-	-	1,24	0,93
Geraniol	15,57	13,87	14,28	16,47	12,73	11,60	14,24	12,31
Oxido de cariofileno	7,60	7,13	8,88	10,03	7,68	7,26	6,37	4,99
Epóxido de humuleno	1,49	1,34	-	2,13	-	1,32	1,25	1,07

* Índices de retención experimentales calculados con una columna DB-WAX

3.3.2 Evaluación del efecto de los parámetros de extracción: Se evaluaron estadísticamente la influencia de los parámetros tiempo de extracción y el tamaño de picado del material vegetal sobre el rendimiento y la fracción de componente citral (neral y geranial) en el AE, mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un valor crítico del F umbral de 7,71 para 1 y 4 grados de libertad con un nivel de confianza de 95% sobre las 8 muestras de aceite esencial. En la Tabla 7 se muestra el resumen de la evaluación de los efectos de cada parámetro y su interacción respecto a cada observable.

Tabla 10. Criterios del análisis de varianza para *Lippia alba* (CITRAL).

Variables	F umbral.	Valor F		
		Tiempo	Tamaño	Interacción
Rendimiento		3,56	0,01	1,32
Neral		1,32	0,90	0,30
Geranial	7.71	0,56	0,38	0,11
Citral		0,84	0,57	0,18

De los datos de la Tabla 10 se infiere que ninguno de los parámetros en sus niveles de estudio, tiene efecto significativo sobre las variables de estudio.

3.3.3 Condición ideal de operación para la extracción de AE *Lippia alba* (CITRAL). Del mismo modo que se realizó el estudio económico para *Cymbopogon martinii* (ver sección 0 párrafo 1) se realizó un análisis económico para dar el tiempo ideal de extracción para la especie *Lippia alba*.

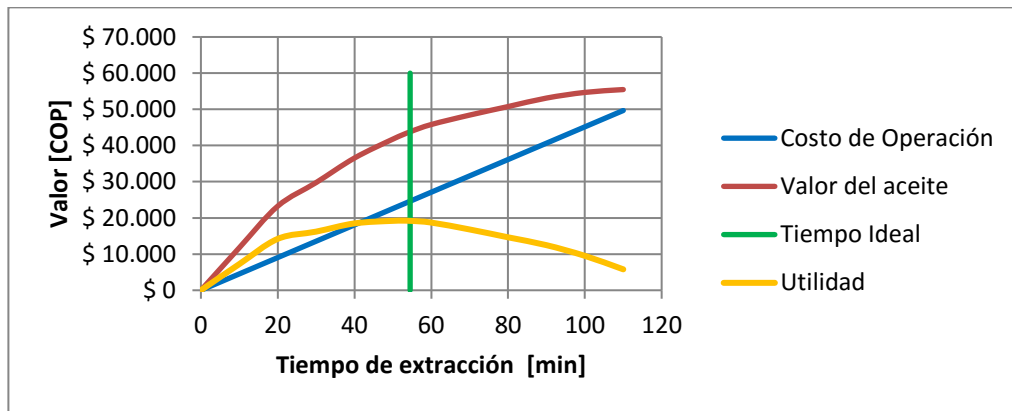


Figura 7. Costos acumulados en el tiempo para la extracción de AE de *Lippia alba* (CITRAL).

De los datos de la gráfica anterior se determinó que el tiempo ideal de extracción fue de 54,5 min. De la Figura 7 y teniendo en cuenta la rentabilidad durante el tiempo estudiado, se infiere que a partir de los 40 minutos la rentabilidad del proceso casi que llega a su máximo valor, y que durante los minutos siguientes, hasta que llega a su máximo valor (54,5 min), la rentabilidad no cambia drásticamente. Entonces los 40 minutos, es un tiempo aceptable para la extracción del aceite de esencial de *Lippia alba*. En la Tabla 14 se muestra los costos totales de extracción (Ver **ANEXO G**).

4. CONCLUSIONES

A escala industrial la extracción de los aceites esenciales de las 3 especies en estudio es rentable y se encontraron los rangos de tiempo de extracción, donde la operación es económicamente viable para cada una de las 3 especies. Estos fueron De 45 a 60 min, 50 a 82 min y de 40 a 54 min para *Cymbopogon martinii*, *Cymbopogon nardus* y *Lippia alba*, respectivamente.

Solo el rendimiento y la composición del aceite esencial de las especies *Cymbopogon martinii*, *Cymbopogon nardus*, fueron similares a los datos reportados por otros estudios realizados anteriormente.

Para las especies *Cymbopogon martinii* y *Cymbopogon nardus*, se evidenció que solo el tiempo tuvo efecto significativo sobre el rendimiento de la extracción. Para la *Lippia alba* ninguna de los variables tuvo efecto sobre el rendimiento y la calidad del aceite esencial. El tamaño de partícula en los valores evaluados no tuvo efecto significativo para ninguna de las variables de estudio.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer un estudio, donde las extracciones se hagan con la carga completa del material vegetal en el destilador, respetando la densidad de carga y adicionando algunos niveles de estudio para el tiempo de extracción.
- Evaluar la influencia de la densidad de carga en el rendimiento de extracción y la composición de los aceites.
- Evaluar el cambio en el rendimiento de extracción de aceites esenciales, al aumentar la carga de materia vegetal en el equipo, manteniendo la densidad de carga.
- Realizar un análisis económico general, donde se tenga en cuenta todos los costos en la pre-extracción y post-extracción.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rajeswara Rao BR. Biomass and essential oil yields of rainfed palmarosa (*Cymbopogon martinii* (Roxb.) Wats. var. *motia* Burk.) supplied with different levels of organic manure and fertilizer nitrogen in semi-arid tropical climate. *Industrial Crops and Products*. 2001; 14: p. 171-178.
2. Katewa SS, Guria BD, Jain A. Ethnomedicinal and obnoxious grasses of Rajasthan, India. *Journal of Ethnopharmacology*. 2001; 76: p. 293-297.
3. Teixeira Duarte MC, Figueira GM, Sartoratto A, Garcia Rehder VL, Delarmelina C. Anti-candida activity of Brazilian medicinal plants. *Journal of Ethnopharmacology*. 2005; 97: p. 305-311.
4. Prashar A, Hili P, Veness R, Evans C. Antimicrobial action of palmarosa oil (*Cymbopogon martinii*) on *Saccharomyces cerevisiae*. *Phytochemistry*. 2003; 63: p. 569-575.
5. Oussalah M, Caillet S, Saucier L, Lacroix M. Antimicrobial effects of selected plant essential oils on the growth of a *Pseudomonas putida* strain isolated from meat. *Meat Science*. 2006; 73: p. 236-244.
6. Oussalah M, Caillet S, Saucier L, Lacroix M. Inhibitory effects of selected plant essential oils on the growth of four pathogenic bacteria: *E. coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium*, *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes*. *Food Control*. 2007; 18: p. 414-420.
7. Neiro LS, Olivero Verbel J, Stashenko E. Repellent activity of essential oils: A review. *Bioresource Technology*. 2010; 101: p. 372-378.
8. Chen W, Viljoen AM. Geraniol — A review of a commercially important fragrance material. *South African Journal of Botany*. 2010; 76: p. 643-651.
9. Ortuño Sanchez MF. MANUAL PRÁCTICO de Aceites esenciales, aromas y perfumes. Primera edición ed. España: AIYANA EDICIONES; 2006.
10. Bandoni AL. Los Recursos Vegetales Aromáticos en Latinoamérica; su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores Bandoni AL, editor. Buenos Aires; 2002.
11. Stashenko EE. Aceites Esenciales Bucaramanga; 2009.
12. Olivero Verbel J, Caballero Gallardo K, Jaramillo Colorado B, Stashenko E. Actividad repelente de los aceites esenciales de *Lippia organoides*, *Citrus*

sinensis y *Cymbopogon nardus* cultivadas en Colombia frente a *Tribolium castaneum*, Herbst. REVISTA SALUD UIS. 2009; 41(3).

13. Sánchez Y, Pino O, Jorge Lazo F, Naranjo Y, Naranjo E, Iglesia A. Actividad promisorio de aceites esenciales especies pertenecientes a la tribu pipereae frente a *Artemia salina* Y *Xanthomonas albilineans*. Revista de Protección Vegetal. 2011; 26(1): p. 45-51.
14. Rodríguez Quintanilla R, Ruiz Nova C, Arias Moyano G, Castro Salazar H, Martínez J, Stashenko E. Estudio comparativo de la composición de los aceites esenciales de cuatro especies del género *Cymbopogon* (Poaceae) cultivadas en Colombia. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas. 2012; 11(1): p. 77-85.
15. Man HC, Hamzah MH, Jamaludin H, Abidin ZZ. Preliminary Study: Kinetics of Oil Extraction from *Citronella* Grass by Ohmic Heated Hydro Distillation. APCBEE Procedia. 2012; 3: p. 124-128.
16. Kpoviessi S, Bero J, Agbani P, Gbaguidi F, Kpadonuo-Kpoviessi, Sinsin B, et al. Chemical composition, cytotoxicity and in vitro antitrypanosomal and antiplasmodial activity of the essential oils of four *Cymbopogon* species from Benin. Journal of Ethnopharmacology. 2014; 151: p. 652-659.
17. Braga MEM, Ehlert PAD, Ming LC, Meireles MAA. Supercritical fluid extraction from *Lippia alba*: global yields, kinetic data, and extract chemical composition. The Journal of Supercritical Fluids. 2005; 34(2): p. 149-156.
18. Conde R, Correa VSC, Carmona F, Contini SHT, Pereira AMS. Chemical composition and therapeutic effects of *Lippia alba* (Mill.) N. E. Brown leaves hydro-alcoholic extract in patients with migraine. Phytomedicine. 2011; 18(14): p. 1197-1201.
19. Vargas Rodríguez AP, Bottia Santos EJ. Estudio de la composición química de los aceites esenciales de seis especies vegetales cultivadas en los municipios de Bolívar y el Peñón- Santander, Colombia Bucaramanga; 2008.
20. Stashenko EE, Jaramillo BE, Martínez JR. Comparación de la composición química y de la actividad antioxidante in vitro de los metabolitos secundarios volátiles de plantas de la familia Verbenaceae. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias. 2003; 27(105): p. 579-597.
21. Galvao Peixoto M, Costa-Junior LM, Fitzgerald Blank A, Lima AdS, Alves Menezes TS, Santos DdA, et al. Acaricidal activity of essential oils from *Lippia*

- alba* genotypes and its major components carvone, limonene, and citral against *Rhipicephalus microplus*. *Veterinary Parasitology*. 2015; 210(1-2): p. 118-122.
22. Cifuentes Marckwordt RA. Evaluación del rendimiento de extracción de las fracciones volátiles del tomillo (*thymus vulgaris L.*), obtenidas en una planta piloto de extracción de aceites esenciales.; 2005.
 23. Cerpa Chavez MG. Hidrodestilación de aceites esenciales: modelado y caracterización.; 2007.
 24. Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN. Fenómenos de transporte Mexico: Limusa Wiley; 2006.
 25. Muñoz V. JA, Staschenko E, Ocampo D. B. Actividad insecticida de aceites esenciales de plantas nativas contra *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Revista Colombiana de Entomología*. 2014; 40(2).
 26. Agudelo Gómez LS, Gómez Ríos GA, Durán García DC, Stashenko E, Betancur Galvis L. Composición química y evaluación de la actividad antiherpética in vitro de aceites esenciales de *Lippia alba* (Mill) N.E. Brown y sus componentes mayoritarios. *SALUD UIS*. 2010; 42(3).
 27. Mesa Arango c, Montiel Ramos J, Zapata B, Durán C, Betancur Galvis L, Stashenko E. Citral and carvone chemotypes from the essential oils of Colombian *Lippia alba* (Mill.) N.E. Brown: composition, cytotoxicity and antifungal activity. *Men Inst Oswaldo Cruz*. 2009; 104(5).
 28. Bueno Sánchez JG, Martínez Morales R, Stashenko EE, Ribon W. Anti-tubercular activity of eleven aromatic and medicinal plants occurring in Colombia. *Biomédica*. 2009; 29(1): p. 51-60.
 29. López MA, Stashenko EE, Fuentes JL. Chemical composition and antigenotoxic properties of *Lippia alba* essential oils. *Genetics and Molecular Biology*. 2011; 34(3).
 30. Stashenko EE, Jaramillo BE, Martinez JR. Comparison of different extraction methods for the analysis of volatile secondary metabolites of *Lippia alba* (Mill.) N.E. Brown, grown in Colombia, and evaluation of its in vitro antioxidant activity. *Journal of Chromatography A*. ; 1025(1): p. 93-103.
 31. Smitha GR, Rana VS. Variations in essential oil yield, geraniol and geranyl acetate contents in palmarosa (*Cymbopogon martinii*, Roxb. Wats. var. motia) influenced by inflorescence development. *Industrial Crops and Products*. 2015; 66: p. 150-160.

32. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Informe sobre el estado de los recursos naturales renovables y del medio ambiente Componente de biodiversidad. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; 2012.

BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO GÓMEZ, L. GÓMEZ RÍOS, G. DURÁN GARCÍA, D. STASHENKO, E. Y BETANCUR GALVIS, L. Composición química y evaluación de la actividad antiherpética in vitro de aceites esenciales de *Lippia alba* (Mill) N.E. Brown y sus componentes mayoritarios. *Salud UIS*. 2010, vol. 3, nro. 42, p.230-239.

BANDONI, A. Los Recursos Vegetales Aromáticos en Latinoamérica; su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores. Buenos Aires Editorial Cornell University CYTED, 2000

BIRD, R., STEWART, W., Y LIGHTFOOT, E. Fenómenos de transporte. México: Limusa Wiley .2006.

BRAGA, M. EHLERT, P. MING, L. y MEIRELES, M. Supercritical fluid extraction from *Lippia alba*: global yields, kinetic data, and extract chemical composition. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2005, vol.2, nro.34, p 149-156.

BUENO SÁNCHEZ, J. G., MARTÍNEZ MORALES, J. R., STASHENKO, E. E., y RIBON, W. Anti-tubercular activity of eleven aromatic and medicinal plants occurring in Colombia. *Biomédica*. 2009, vol.1, nro.29, p 51-60.

CERPA CHAVEZ, M. G. Hidro destilación de aceites esenciales: modelado y caracterización. Tesis doctoral Doctorado en Ing. Química. Valladolid: Universidad De Valladolid facultad de ciencias. 2007

CHEN, W. y VILJOEN, A. Geraniol — A review of a commercially important fragrance material. *South African Journal of Botany*. 2010, nro. 76, p 643-651.

CIFUENTES MARCKWORDT, R. Evaluación del rendimiento de extracción de las fracciones volátiles del tomillo (*thymus vulgaris* L.), obtenidas en una planta piloto de extracción de aceites esenciales. Trabajo de grado ingeniero químico. Guatemala: Universidad San Carlos De Guatemala. Facultad De Ingeniería. (2005).

CONDE, R. CORREA, V. CARMONA, F. CONTINI, S. y PEREIRA, A. Chemical composition and therapeutic effects of *Lippia alba* (Mill.) N. E. Brown leaves hydro-alcoholic extract in patients with migraine. *Phytomedicine*. 2011, vol.14, nro. 18, p 1197-1201.

GALVAO PEIXOTO, M. COSTA JUNIOR, L. M. FITZGERALD BLANK, et al Acaricidal activity of essential oils from *Lippia alba* genotypes and its major components carvone, limonene, and citral against *Rhipicephalus microplus*. *Veterinary Parasitology*. 2015, vol. 1-2, nro.210, p 118-122.

KATEWA, S. GURIA, B. y JAIN, A. Ethnomedicinal and obnoxious grasses of Rajasthan, India. *Journal of Ethnopharmacology*.2001, nro. 76, p 293-297.

KPROVIESSI, S., BERO, J., AGBANI, P, et al Chemical composition, cytotoxicity and in vitro antitrypanosomal and antiplasmodial activity of the essential oils of four *Cymbopogon* species from Benin. *Journal of Ethnopharmacology*. 2014, nro.151, p 652-659.

LÓPEZ, M. STASHENKO, E.y FUENTES, J. Chemical composition and antigenotoxic properties of *Lippia alba* essential oils. *Genetics and Molecular Biology*. 2011, vol 3 nro.34, p 479 488 ISSN 1415-4757

MAN, H. HAMZAH, M. JAMALUDIN, H. y ABIDIN, Z. Preliminary Study: Kinetics of Oil Extraction from Citronella Grass by Ohmic Heated Hydro Distillation. *APCBEE Procedia*, 2012, vol.3, p 124-128.

MUÑOZ, V. STASCHENKO, E. y OCAMPO, D.. Actividad insecticida de aceites esenciales de plantas nativas contra *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Revista Colombiana de Entomología*. 2014, vol.2 nro. 40, p 198-202 ISSN 198-202

OLIVERO VERBEL, J. CABALLERO GALLARDO, K. JARAMILLO COLORADO, B. y STANCHENKO, E. Actividad repelente de los aceites esenciales de *Lippia organoides*, *Citrus sinensis* y *Cymbopogon nardus* cultivadas en colombia frente a *Tribolium castaneum*, Herbst. *REVISTA SALUD UIS*. 2009, vol.3, nro.41, p 244-250

ORTUÑO SANCHEZ, M. F. MANUAL PRÁCTICO de Aceites esenciales, aromas y perfumes (Primera edición ed.). España: AIYANA EDICIONES. (2006).

OUSSALAH, M. CAILLET, S. SAUCIER, L. y LACROIX, M. Antimicrobial effects of selected plant essential oils on the growth of a *Pseudomonas putida* strain isolated from meat. *Meat Science*. 2006, nro.73, p. 236-244.

OUSSALAH, M. CAILLET, S. SAUCIER, L. y LACROIX, M. Inhibitory effects of selected plant essential oils on the growth of four pathogenic bacteria: *E. coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes*. *Food Control*. 2007, vol.18, p 414-420.

RODRÍGUEZ QUINTANILLA, R., RUIZ NOVA, C., ARIAS MOYANO, G., et al. Estudio comparativo de la composición de los aceites esenciales de cuatro especies del género *Cymbopogon* (Poaceae) cultivadas en Colombai. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*. 2012, vol.1, nro.11 p. 77-85.

SMITHA, G. y RANA, V. Variations in essential oil yield, geraniol and geranyl acetate contents in palmarosa (*Cymbopogon martinii*, Roxb. Wats. var. *motia*) influenced by inflorescence development. *Industrial Crops and Products*. 2015, vol. 66, p.150-160.

STASHENKO, E. JARAMILLO, B. y MARTÍNEZ, J. comparación de la composición química y de la actividad antioxidante in vitro de los metabolitos secundarios volátiles de plantas de la familia verbenaceae. *Revista de la academia Colombiana de ciencias*. 2003, vol.105 nro.27, p. 579-597.

Teixeira Duarte, M. C., Figueira, G. M., Sartoratto, A., et al. Anti-Candida activity of Brazilian medicinal plants. *Journal of Ethnopharmacology*. 2005 vol. 97, p. 305-311.

ANEXOS

ANEXO A EQUIPO USADO EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES



Figura 8. Equipo de destilación por arrastre de vapor.

Partes del equipo: 1. Alambique para destilación por arrastre con vapor de 1 m³; 2. Cuello de cisne; 3. Condensador; 4. Vaso florentino; 5. Caldera; 6. Picapasto.

ANEXO B DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE DESTILACIÓN

B.1 Alambique

El alambique, destilador o extractor (Figura 9), es donde se deposita el material a destilar. Es un tanque cilíndrico con capacidad de 1 m³ de capacidad, que tiene en su base una cruz de distribución de vapor.



Figura 9. Alambique.

B.2 Cuello de cisne

Este dispositivo tapa del alambique que tiene incorporado el cuello de cisne Figura 10, dentro del cual circula la mezcla de vapor de agua y AE; el diseño de estas dos partes minimiza la condensación de la mezcla de vapores dentro del alambique.



Figura 10. Tapa y cuello del alambique.

B.3 Condensador y torre de enfriamiento

En la Figura 11 se muestra el condensador de tubos y carcasa empleado para la condensación de los vapores provenientes del cuello de cisne. En la Figura 12 se muestra la torre de enfriamiento fabricada por Glaciar INGENIERÍA S.A.S, que enfría el agua utilizada por el condensador en un circuito cerrado.



Figura 11. Condensador de tubos y carcasa.



Figura 12. Torre de enfriamiento

B.4 Vaso florentino

Es el recipiente en el que se separa la mezcla de agua y aceite esencial condensados por diferencia de densidades, el que se muestra en Figura 13, fue diseñado para flujos de 1300 ml/min de condensados.



Figura 13. Vaso florentino.

B.5 Caldera

Caldera piro tubular vertical de 6 BHP marca TECNİK; presión de diseño de 150 Psi y presión máxima de trabajo de 125 psi.



Figura 14. Caldera Tecnik® de 6 BHP

B.6 Picadora Penagos® PE-800

En la Figura 15 se muestra la picadora utilizada para reducir el tamaño del material vegetal. La picadora tiene 3 tamaños de longitud de corte.



Figura 15. Picadora Penagos® PE-800

B.7 Diferencial (polipasto manual)

En la Figura 16 se muestra la diferencial utilizada para retirar la tapa del destilador, cargar y descargar el destilador.



Figura 16. Columna y polipasto manual.

ANEXO C IMÁGENES DE LA INVESTIGACIÓN



Figura 17. Recolección del material vegetal.



Figura 18. Pesado del material vegetal recolectado.



Figura 19. Transporte a la planta de extracción.



Figura 20. Material vegetal picado.



Figura 21. Obtención del aceite y volátiles no condensables.



Figura 22. Recolección y decantado del aceite extraído.



Figura 23. Material vegetal residual.

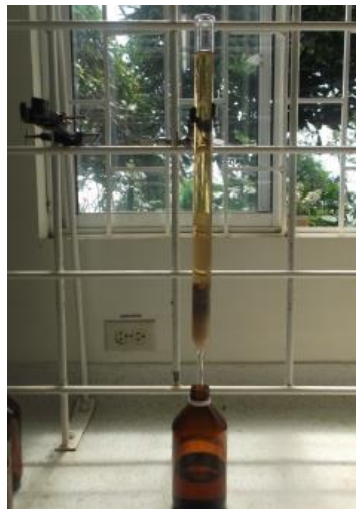


Figura 24. Filtrado y secado del aceite con sulfato de sodio anhidro.

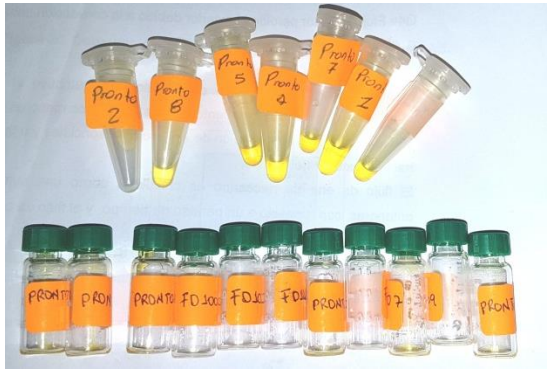


Figura 25. Muestras preparadas para análisis cromatográfico.

ANEXO D CROMATÓGRAFO

Cromatógrafo de gases *Agilent Technologies 7890^a* (ver Figura 26) acoplado a un detector selectivo de masas *Agilent Technologies 5975C*, con analizador cuadrupolar; un puerto de inyección *Split* (relación 30:1) a 250°C. Con columna polar de sílice fundida DB-WAX (J & W Scientific, Folsom, CA, EE.UU.) Con fase estacionaria de polietilenglicol de 60 m X 0.25 mm D.I X 0.25 µm df. El gas arrastre empleado fue helio (99.9995%, AP Fano, S.A) con una presión de entrada de la columna de 16.91 psi. La programación de la temperatura del horno inicio desde 50°C (5 min) hasta 150°C (7 min) a 4°C min⁻¹, seguidamente, se aumentó hasta 230°C (40 min) a 4°C min⁻¹. Espectros de masas y corrientes iónicas reconstruidas (TIC) se obtuvieron en un cuadrupolo, por medio de barrido automático de frecuencia (*full scan*), a 4.75 *scan s*⁻¹, en el rango de masas *m/z* 40-350.



Figura 26. Cromatógrafo de gases de alta resolución Agilent Technologies 7890 A, acoplado a espectrómetro de masas Agilent Technologies 5975C,

ANEXO E IDENTIFICACIÓN DE ACEITES

La identificación del aceite esencial se realizó usando los índices de retención y comparando los espectros de masas obtenidos por GC-MS, con los espectros de masas que se encuentran en las bases de datos *Adams*, *NIST* y *Wiley*. Los índices de retención (IR), se calcularon teniendo en cuenta los tiempos de retención de una serie homóloga de patrones de hidrocarburos desde C10 hasta C25, que se corrieron en el GC bajo las mismas condiciones operacionales que los aceites esenciales. La ecuación que se usó fue:

$$I_R = 100n + 100 \left[\frac{t_{Rx} - t_{Rn}}{t_{RN} - t_{Rn}} \right]$$

Ecuación 7.

Donde $n < N$

n = Numero de átomos de carbono del hidrocarburo lineal, que eluye antes del compuesto de interés.

t_{Rx} = Tiempo de retención del compuesto de interés.

t_{Rn} = Tiempo de retención del hidrocarburo lineal, que eluye antes del compuesto de interés.

t_{RN} = Tiempo de retención del hidrocarburo lineal, que eluye después del compuesto de interés.

ANEXO F ESQUEMA DE ENERGÍA NECESARIA PARA EL PROCESO

Balance energético en el proceso de extracción

La Figura 27 se muestra un esquema donde se denota el consumo de energía en el proceso de extracción de AE.

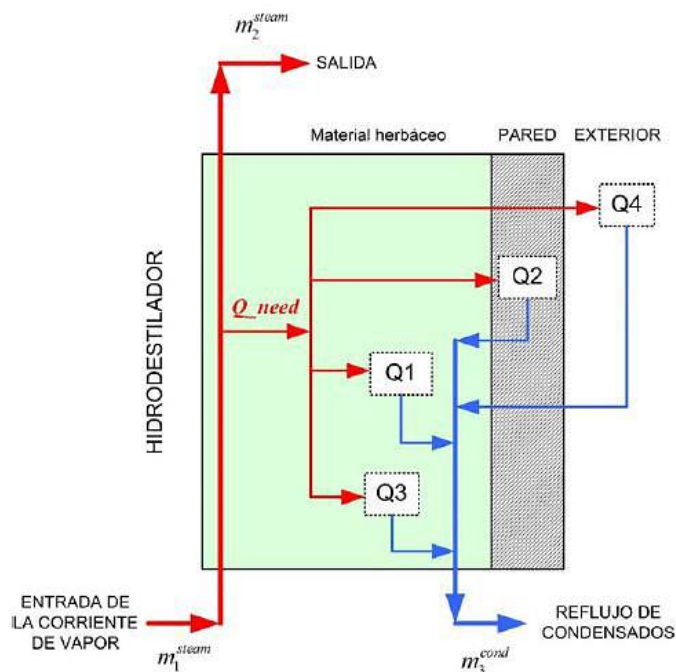


Figura 27. Consumo de energía en el proceso de extracción de AE.

*Imagen tomada de [27]: CERPA CHÁVEZ, Manuel Guillermo. Hidrodestilación de aceites esenciales: modelado y caracterización. Tesis doctoral. Valladolid: Universidad de Valladolid. Departamento de ingeniería química y Tecnología del medio ambiente, 2007.

El flujo de energía necesario (Q_{need}) para realizar la operación de extracción del AE está compuesto por 4 términos [27]:

Q_1 = Energía necesaria para el calentamiento del material vegetal.

$$Q_1 = M^{MV} C_p^{MV} (T_b - T_\infty)$$

Ecuación 8.

Q2= Energía necesaria para el calentamiento del hidroddestilador.

$$Q_2 = M^{hd} C_p^{hd} (T_b - T_\infty)$$

Ecuación 9.

Q3= Energía necesaria para vaporizar el AE.

$$Q_3(T) = M^{AE} \Delta H_{vapor}^{AE}(T)$$

Ecuación 10.

Q4= Flujo de calor perdido al exterior debido a la convección natural.

$$Q_4(T) = hA_{hd}(T - T_\infty)$$

Ecuación 11.

El mayor gasto energético en el proceso se le atribuye al calentamiento del material vegetal y el calentamiento del destilador. Los menores gastos energéticos son atribuidos a la vaporización de los aceites esenciales y a las pérdidas de calor hacia el exterior del equipo.

El flujo de energía necesario es calculado como una suma de las energías anteriores, con respecto a un periodo de tiempo, y el flujo de calor perdido:

$$Q_{need} = \left(\frac{Q_1 + Q_2 + Q_3(T)}{\Delta t} \right) + Q_4(T)$$

Ecuación 12.

ANEXO G COSTOS DE OPERACIÓN

Tabla 11. Criterios para el cálculo del sueldo del operario.

SALARIO MÍNIMO	\$ 689.445
AUXILIO DE TRANSPORTE	\$ 74.000
CESANTÍAS	8,33%
INTERESES DE CESANTÍAS	12%
PRIMA	8,33%
DOTACIÓN	7%
VACACIONES	4,17%
APORTES PARAFISCALES	4%
SALUD	8,5%
PENSIONES	12%
RIESGOS PROFESIONALES (4)	2,44%
APORTES PARAFISCALES	
ICBF	0%
SENA	0%
CAJA DE COMPENSACIÓN FAMILIAR	4%

Tabla 12. Costo de operario.

S.M.L.V.	2
SALARIO	\$ 1.378.890
AUXILIO DE TRANSPORTE	\$ 74.000
TOTAL SALARIO BASE	\$ 1.452.890
CESANTÍAS	\$ 121.074
INTERESES DE CESANTÍAS	\$ 14.529
PRIMA	\$ 121.074
DOTACIÓN	\$ 101.702
VACACIONES	\$ 60.537
SUBTOTAL PRESTACIONES	\$ 418.917
APORTES PARAFISCALES	\$ 55.156
EPS, PENSIONES, ARP	\$ 316.262
TOTAL PRESTACIONES	\$ 790.334
TOTAL SUELDO Y PRESTACIONES	\$ 2.243.224
SUELDO ANUAL OPERARIO	\$ 26.918.693

Tabla 13. Costo de operación de equipos.

ELECTRICIDAD		
EQUIPO	KW*h	costo/h
PICADORA	5,22	682,2
TORRE	2,24	1171,0
CALDERA (ventilador)	0,75	313,7
CALDERA (motobomba)	1,49	155,8
VARIOS	0,135	70,6
Total		2393,3
GAS		
EQUIPO	m³/h	costo/h
CALDERA	5,28	10018,3
AGUA		
EQUIPO	m³/h	costo/h
CALDERA	0,045	16,1
TORRE	0,0005	0,2
Total		16,2

Tabla 14. Costos de extracción.

ESPECIE	MASA CARGADA (kg)	TIEMPO EXTRACCIÓN (min)	COSTOS FIJOS/min	COSTOS VARIABLES /min	TOTAL/ min	TOTAL EXTRACCIÓN
Palmarrosa	100	45	\$ 233	\$ 207	\$ 440	\$ 19800
Citronela	100	50	\$ 233	\$ 207	\$ 440	\$ 22000
Pronto alivio	100	40	\$ 233	\$ 219	\$ 451	\$ 18040