



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

*"Francisco García Salinas"*

Unidad Académica de Ciencias Químicas  
Maestría en Ciencia y Tecnología Química

TESIS

“USO DE ESTUFA SOLAR PARA LA EXTRACCIÓN DE  
ACEITES ESENCIALES”

Para obtener el grado de:

Maestra en Ciencia y Tecnología Química

Presenta:

Q.F.B. Rosalinda Najera Lerma

Director de Tesis: Dr. En C. Hiram Hernández López

Co-Director: Dr. En C. Lázaro Canízales Dávalos

Asesor- Externo: Dr. En C. Raúl Adrián Martínez Orozco

Diciembre 2019



Universidad Autónoma de Zacatecas

*“Francisco García Salinas”*

Unidad Académica de Ciencias Químicas

Maestría en Ciencia y Tecnología Química



## USO DE ESTUFA SOLAR PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES

Presenta:

Q.F.B. Rosalinda Najera Lerma



Comité Tutorial:

Dr. Hiram Hernández López

Dr. Lázaro Canizales Dávalos

Dr. Raúl Adrián Martínez Orozco

Fecha: Diciembre 2019

El científico encuentra su recompensa en lo que Henri Poincare llama el placer de la comprensión, y no en las posibilidades de aplicación que cualquier descubrimiento pueda conllevar.

**Albert Einstein (1879-1955)**

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo de investigación, se realizó en el Laboratorio de Síntesis Orgánica de la Maestría en Ciencia y Tecnología Química (MCTQ) de la Unidad Académica de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas, contando con el apoyo financiero otorgado por la Secretaría de Energía (SENER) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de la beca de maestría con número de CVU 860646.

Así mismo al Laboratorio de Fotoquímica y Síntesis de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por todo el apoyo y capacitación brindados para la realización del proyecto, en especial a la Dra. En C. Denisse Atenea de Loera Carrera por el recibimiento y al M. en C. Oswaldo Eliecer Cardenas Gonzalez por la capacitación brindada durante la caracterización fitoquímica de los aceites esenciales.

## DEDICATORIA

*Me gustaría agradecer en estas líneas la ayuda que muchas personas y colegas prestado durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo. A mi comité asesor Dr. Hiram Hernández, Dr. Lázaro Canízales y Dr. Raúl Martínez, porque sin su ayuda y conocimientos no hubiese sido posible realizar este proyecto, a pesar de nuestro poco conocimiento sobre el tema logramos incorporar los aspectos necesarios para llevarlo a cabo.*

*A mis padres y hermanas por haber apoyado mi decisión de realizar este posgrado. Lu y Star, por alentarme en los días difíciles que surgieron durante el camino.*

*A mis amigas Nancy, Ixamail y Georgina, por todos esos momentos que pasamos juntas en la escuela, por todo lo bueno y malo que sucedió y el apoyo incondicional que mostramos mutuamente, las palabras de aliento, las salidas de desestrés, los convivios en el laboratorio y demás cosas que realizamos juntas.*

*Al Dr. Roque Martínez por su paciencia, el tiempo y el espacio que me brindó para enseñarme ecuaciones diferenciales desde cero.*

*En especial a Carlos Sanchez por siempre estar conmigo en los momentos más difíciles de la realización de este proyecto.*

*Gracias a todos por creer en mí.*



## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN .....   | 3  |
| 1. ACEITES ESENCIALES.....                                   | 5  |
| 2. MÉTODOS CONVENCIONALES/CLÁSICOS .....                     | 7  |
| 2.1 DESTILACIÓN POR ARRASTRE DE VAPOR .....                  | 7  |
| 2.2 DESTILACIÓN CON AGUA-VAPOR o VAPOR-HIDRODESTILACIÓN... 8 |    |
| 2.3 HIDRODESTILACIÓN .....                                   | 9  |
| 2.4 HIDRODIFUSIÓN.....                                       | 11 |
| 2.5 EXTRACCIÓN CON SOLVENTES ORGÁNICOS.....                  | 12 |
| 2.6 MÉTODOS AVANZADOS/INNOVADORES.....                       | 13 |
| 2.7 EXTRACCIÓN CON FLUIDOS SUPERCRÍTICOS (SCFE) .....        | 13 |
| 2.8 EXTRACCIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO .....                | 14 |
| 2.9 EXTRACCIÓN ASISTIDA POR MICROONDAS (MAE) .....           | 15 |
| 3.1 PRINCIPIOS DE QUÍMICA VERDE.....                         | 17 |
| 4.1 ENERGÍAS RENOVABLES.....                                 | 19 |
| 5.1 ESTUFAS SOLARES .....                                    | 20 |
| 5.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTUFAS SOLARES .....               | 20 |
| 5.3 ESTUFAS SOLARES DIRECTAS .....                           | 21 |
| 5.3.1 ESTUFA SOLAR TIPO CAJA.....                            | 21 |
| 5.3.2 ESTUFA DE PANEL SOLAR.....                             | 21 |
| 5.3.3 ESTUFA CONCENTRADORA SOLAR .....                       | 22 |
| 5.3.4 ESTUFAS SOLARES INDIRECTAS.....                        | 23 |
| 5.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTUFAS SOLARES.....    | 25 |
| 6.1 ¿POR QUÉ UTILIZAR ENERGÍA SOLAR? .....                   | 26 |
| I. JUSTIFICACIÓN .....                                       | 29 |
| II. HIPÓTESIS .....  | 30 |
| III. OBJETIVOS .....   | 31 |
| A. OBJETIVO GENERAL.....                                     | 31 |
| B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                               | 31 |
| 8.1 ESTUFA SOLAR .....                                       | 32 |
| 8.2 PERFIL DE TEMPERATURAS (PERIODO DE PRUEBA) .....         | 34 |
| 8.3 EFICIENCIA TÉRMICA GENERAL .....                         | 34 |
| 8.4 EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES EN LABORATORIO.....     | 35 |

|  |    |
|--|----|
| 8.5 RECUPERACIÓN DE SOLVENTE POR DESTILACIÓN SIMPLE .....                    | 36 |
| 8.6 EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES POR MEDIO DE LA ESTUFA SOLAR.....       | 37 |
| 8.7 ANÁLISIS FITOQUÍMICO POR CROMATOGRAFÍA EN CAPA FINA (CCF) .....          | 39 |
| 8.8 ANÁLISIS POR CROMATOGRAFÍA DE GASES (GC) DE LOS ACEITES ESENCIALES ..... | 39 |
| 8.8.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO .....                              | 40 |
| 8.8.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL GC PARA CADA ACEITE ESENCIAL.....         | 41 |
| 8.9 ANÁLISIS POR INFRARROJO (IR) DE ACEITES ESENCIALES.....                  | 43 |
| 9.1 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTUFA SOLAR.....                                     | 44 |
| 9.2 GEOMETRÍA DE LA ESTUFA SOLAR.....  | 45 |
| 9.3 DISEÑO DEL REFLECTOR.....  | 46 |
| 9.4 DISPOSITIVO DE DESTILACIÓN.....  | 51 |
| 9.5 PERFIL DE TEMPERATURAS.....  | 52 |
| 9.6 EFICIENCIA TÉRMICA GENERAL .....   | 57 |
| 9.7 RENDIMIENTO DE LOS ACEITES ESENCIALES.....                               | 61 |
| 9.8 CÁLCULO DEL CONSUMO DE ENERGÍA.....                                      | 66 |
| 9.9 ANÁLISIS FITOQUÍMICO CUALITATIVO .....                                   | 68 |
| 9.9.1 VAINILLINA EN ÁCIDO SULFÚRICO 98%P/V .....                             | 68 |
| 9.9.2 REACTIVO DE DRAGGENDORF .....  | 70 |
| 9.9.3 CAPACIDAD ANTIOXIDANTE (DPPH).....                                     | 71 |
| 9.10 DETERMINACIÓN CUALITATIVA DE ESTEROLES.....                             | 72 |
| 9.10.1 PRUEBA DE SALKOWSKI.....  | 72 |
| 9.11 RESULTADOS DE GC DE LOS ACEITES ESENCIALES.....                         | 73 |
| 9.12 ANÁLISIS POR INFRARROJO (IR) DE ACEITES ESENCIALES .....                | 77 |
| 10.1 CONCLUSIONES .....  | 82 |
| 11.0 PERSPECTIVAS.....   | 84 |
| 12.0 REFERENCIAS.....  | 85 |
| 13.0 ANEXOS .....  | 91 |
| 13.1 ESTADISTICAS DE LOS ACEITES ESENCIALES .....                            | 91 |
| 13.2 CROMATOGRAFÍA DE GASES (Datos Crudos).....                              | 93 |
| 13.3 INFRARROJOS .....   | 95 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Características generales de las estufas solares (8).....   | 25 |
| Tabla 2. Radiación solar en lugares selectos de México en kWh/m <sup>2</sup> por día. ..                             | 27 |
| Tabla 3. Irradiancia solar en Zacatecas en Wh/m <sup>2</sup> por día .....   | 28 |
| Tabla 4. Conductividad térmica de los materiales. ....   | 33 |
| Tabla 5. Especies vegetales utilizadas.....  | 35 |
| Tabla 6. Condiciones generales de operación del GC Agilent 6890N.....  | 40 |
| Tabla 7. Rampas de temperatura para cada aceite esencial .....   | 41 |
| Tabla 8. Eficiencia de la estufa solar.....  | 57 |
| Tabla 9. % Rendimiento de los aceites esenciales por ambos métodos .....   | 62 |
| Tabla 10. Análisis estadístico de las extracciones. ....   | 64 |
| Tabla 11. CO <sub>2</sub> producido en relación con la energía consumida en el proceso                               | 67 |
| Tabla 12. Relación de frentes. Metabolitos presentes en cada aceite esencial   | 69 |
| Tabla 13. Comparación de los grupos funcionales presentes en el aceite<br>esencial de corteza de Cinammomun sp. .... | 78 |
| Tabla 14. Comparación de los grupos funcionales presentes en el aceite<br>esencial de Origanum vulgare.....          | 80 |
| Tabla 15. Comparación de los grupos funcionales presentes en aceite esencial<br>de Mentha piperita.....              | 81 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Clasificación y ejemplos de algunos compuestos encontrados en aceites esenciales ..... | 6  |
| Figura 2. Método de destilación al vapor.....  | 7  |
| Figura 3. Alambique .....  | 8  |
| Figura 4. Método de destilación vapor-agua en alambique.....                                     | 9  |
| Figura 5. Método de hidrodestilación en laboratorio.....   | 10 |
| Figura 6. Método de hidrodestilación (industrial).....   | 10 |
| Figura 7. Variantes por arrastre de vapor.....   | 11 |
| Figura 8. Hidrodifusión .....  | 12 |
| Figura 9. Ejemplo de técnica para extracción de OE con solventes (extracción Soxhlet). .....     | 13 |
| Figura 10. Proceso de extracción con SCFE.....   | 14 |
| Figura 11. Extracción asistida por ultrasonido.....  | 15 |
| Figura 12. Técnica de hidrodestilación asistida por microondas .....                             | 16 |
| Figura 13. Clasificación de estufas solares. ....  | 20 |
| Figura 14. Estufa solar tipo caja con reflector .....  | 21 |
| Figura 15. Estufa de panel solar.....  | 22 |
| Figura 16. Estufa concentradora solar .....  | 23 |
| Figura 17. Estufa indirecta.....   | 23 |
| Figura 18. Estufa indirecta con almacenamiento de calor sensible.....                            | 24 |
| Figura 19. Irradiación solar a escala mundial.....   | 26 |
| Figura 20. Radiación solar diaria, promedio anual. ....  | 27 |
| Figura 21. Partes de una estufa solar de tipo caja. ....   | 33 |
| Figura 22. Material para Hidrodestilación.....   | 36 |
| Figura 23. Aparato de destilación simple con adaptador de vacío. ....                            | 37 |
| Figura 24. Estufa Solar con prototipo de destilador solar en funcionamiento...                   | 38 |
| Figura 25. Condensador del dispositivo de destilación. ....                                      | 38 |
| Figura 26. Cromatografo de gases Agilent 6890N; Columna HP-INNOWAX. ...                          | 39 |
| Figura 27. Prototipo de una estufa solar de tipo caja para extraer aceites esenciales .....      | 44 |
| Figura 28. Diseño rectangular de la estufa solar. ....   | 45 |
| Figura 29. El ángulo que refleja el rayo de sol en el reflector.....                             | 46 |
| Figura 30. Dirección de los rayos solares hacia la superficie objetivo.....                      | 47 |
| Figura 31. Ancho de la superficie objetivo y longitud del reflector.....                         | 48 |
| Figura 32. Ángulos del reflector.....  | 49 |
| Figura 33. Diseño optimizado de la estufa solar.....   | 50 |
| Figura 34. Propuesta de hidrodestilador solar.....   | 51 |
| Figura 35. Temperaturas registradas durante el proceso de destilación con 175 ml de agua.....    | 52 |
| Figura 36. Destilado obtenido.....   | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 37. Prototipos de estufa solar con sistema de destilación para extracción de aceites esenciales. ....                       | 53 |
| Figura 38. Temperaturas registradas por las tres estufas solares en simultaneo con 175 mL de agua dentro del destilador. ....      | 54 |
| Figura 39. Temperaturas registradas por las tres estufas solares en simultaneo con 175 ml de agua + 12.5 ± 0.3 gr de orégano. .... | 55 |
| Figura 40. Muestras de destilado obtenidas de estufa solar. ....   | 56 |
| Figura 41. Comportamiento de temperaturas registradas en diferentes días bajo diversas condiciones climáticas. ....                | 58 |
| Figura 42. Comportamiento de temperaturas registradas en diferentes días bajo diversas condiciones climáticas. ....                | 59 |
| Figura 43. Comportamiento de temperaturas registradas con diferentes volúmenes de agua. ....                                       | 60 |
| Figura 44. Rendimiento del aceite esencial de <i>Citrus sinensis</i> . ....  | 64 |
| Figura 45. Rendimientos de los aceites esenciales de <i>Mentha piperita</i> y <i>Laurus nobilis</i> respectivamente. ....          | 65 |
| Figura 46. Metabolitos presentes en cada aceite esencial. ....   | 68 |
| Figura 47. Cromatografía en capa fina. ....  | 69 |
| Figura 48. Alcaloides. ....  | 70 |
| Figura 49. Polifenoles. ....   | 72 |
| Figura 50. Esteroles. ....   | 73 |
| Figura 51. Comparación de cromatogramas de aceite esencial de Romero. ...  | 76 |
| Figura 52. Espectro IR del aceite esencial de <i>Cinnamomun sp.</i> ....   | 77 |
| Figura 53. Comparación de espectros IR de aceite esencial de <i>Origanum vulgare</i> obtenido por ambos métodos. ....              | 79 |
| Figura 54. Comparación de espectros IR de aceite esencial de <i>Mentha piperita</i> obtenido por ambos métodos. ....               | 80 |
| Figura 55. Rendimiento del aceite esencial de <i>Cinnamomun sp.</i> ....   | 91 |
| Figura 56. Rendimiento del aceite esencial de <i>Rosmarinus officinalis</i> . ....   | 91 |
| Figura 57. Rendimiento del aceite esencial de <i>Origanum vulgare</i> . ....   | 92 |
| Figura 58. Rendimiento del aceite esencial de <i>Cymbopogon citratus</i> . ....  | 92 |
| Figura 59. Comparación de cromatogramas del aceite esencial de <i>Mentha piperita</i> . ....                                       | 93 |
| Figura 60. Comparación de cromatogramas del aceite esencial de <i>Laurus nobilis</i> . ....  | 93 |
| Figura 61. Comparación de cromatogramas del aceite esencial de <i>Citrus sinensis</i> . ....                                       | 94 |
| Figura 62. Comparación de cromatogramas del aceite esencial de <i>Cymbopogon citratus</i> . ....                                   | 94 |
| Figura 63. Espectro IR del aceite esencial de <i>Laurus nobilis</i> . ....   | 95 |
| Figura 64. Espectro IR del aceite esencial de <i>Citrus sinensis</i> . ....  | 96 |
| Figura 65. Espectro IR del aceite esencial de <i>Cymbopogon citratus</i> . ....  | 96 |
| Figura 66. Espectro IR del aceite esencial de <i>Rosmarinus officinalis</i> . ....   | 97 |

## ABREVIATURAS

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| <b>AFNOR</b>                       | Asociación Francesa de Normalización                                      |
| <b>Ac</b>                          | Área  |
| <b>ATR</b>                         | Reflexión total atenuada  |
| <b>Ai</b>                          | Ángulo Interno  |
| <b>Ae</b>                          | Ángulo Externo  |
| <b>AVR</b>                         | Altura Vertical del Reflector   |
| <b>AlCl<sub>3</sub></b>            | Tricloruro de Aluminio  |
| <b>AS</b>                          | Ancho de la superficie  |
| <b>CP</b>                          | Punto Crítico   |
| <b>CO<sub>2</sub></b>              | Dióxido de Carbono  |
| <b>C<sub>w</sub></b>               | Calor específico del agua   |
| <b>CHCl<sub>3</sub></b>            | Cloroformo  |
| <b>Cm</b>                          | Centímetro  |
| <b>CCF</b>                         | Cromatografía en Capa Fina  |
| <b>CAS</b>                         | Número de registro químico  |
| <b>C=C</b>                         | Enlace doble carbono-carbono  |
| <b>C-H</b>                         | Enlace sencillo carbono-hidrógeno   |
| <b>DPPH</b>                        | 2,2-Difenil-1-PicrilHidrazilo   |
| <b>EO</b>                          | Aceite esencial (Essential Oil)   |
| <b>EtOH</b>                        | Alcohol Etílico   |
| <b>ES</b>                          | Estufa Solar  |
| <b>FID</b>                         | Detector de Ionización de Flama   |
| <b>FDA</b>                         | Administración de Alimentos y Medicamentos (Food and Drug Administration) |
| <b>GRAS</b>                        | Generalmente reconocidos como seguros (Generally recognized as safe)      |
| <b>GC</b>                          | Cromatografía de Gases  |
| <b>g</b>                           | gramos  |
| <b>HD</b>                          | Hidrodestilación  |
| <b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b> | Ácido Sulfúrico   |
| <b>h</b>                           | Horas   |
| <b>IR</b>                          | Infrarrojo  |
| <b>i.e.</b>                        | En ejemplos (latín <i>id est</i> )  |
| <b>KWh</b>                         | Kilowatt-hora   |
| <b>Kg</b>                          | Kilogramo   |
| <b>LR</b>                          | Longitud del Reflector  |
| <b>M<sub>w</sub></b>               | Masa del agua   |
| <b>m<sup>2</sup></b>               | Metro cuadrado  |
| <b>min</b>                         | Minutos   |
| <b>mL</b>                          | Mililitros  |
| <b>MAE</b>                         | Extracción Asistida por Microondas  |
| <b>P</b>                           | Potencia  |
| <b>P/V</b>                         | Relación Peso-Volumen   |
| <b>PCM</b>                         | Material de Cambio de Fase  |
| <b>Psi</b>                         | Libra de fuerza por pulgada cuadrada                                      |
| <b>RES</b>                         | Energías Renovables   |
| <b>Rf</b>                          | Relación de Frentes   |

|                                      |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>SCFE</b>                          | Extracción con Fluidos Supercríticos |
| <b>SCF</b>                           | Fluido Supercrítico                  |
| <b>sp</b>                            | Subespecie                           |
| <b>T</b>                             | Tiempo                               |
| <b>UV</b>                            | Ultravioleta                         |
| <b>W</b>                             | Watt                                 |
| <b><math>\eta_u</math></b>           | Eficiencia Térmica                   |
| <b><math>\Delta T</math></b>         | Diferencia de Temperaturas           |
| <b><math>\mu\text{L}</math></b>      | Micro litros                         |
| <b><math>^{\circ}\text{C}</math></b> | Grados Celsius                       |

## RESUMEN

Los aceites esenciales tienen características fisicoquímicas interesantes por lo cual han sido utilizados ampliamente en la industria para mejorar diversa gama de productos. Se pueden extraer de cualquier parte de la planta, sin embargo, es importante que el procedimiento de extracción aplicado para recuperar los aceites esenciales de la planta pueda mantener la proporción natural de sus componentes originales.

Hay varios métodos para la extracción de aceites esenciales, no obstante, la destilación por arrastre de vapor es ampliamente utilizada, ya que es un método sencillo y de bajo costo. Las últimas tendencias en técnicas de extracción se han centrado principalmente en encontrar soluciones que minimicen el uso de solvente y energía, de tal forma que el método utilizado tenga el menor impacto posible en el medioambiente. El uso de energías alternas se ha propuesto como fuente de calor para el proceso, tal como lo es la energía solar, donde el uso de la estufa solar se considera una de las opciones más simples, viables y atractivas que da como resultado un ahorro apreciable de combustible. Por lo tanto, se ha optado por acoplar un dispositivo de estufa solar a un sistema de destilación para extraer aceites esenciales de manera verde, acoplando el uso de la energía solar (térmica) al proceso de extracción de manera exitosa, aunque enfocado hacia muestras de bajo volumen, pero con eficiencia altamente aceptable para dispositivos de su clase.

Los resultados obtenidos, mostraron capacidad de la estufa para alcanzar la temperatura de 80°C y mantenerla durante tres horas, tiempo suficiente para desarrollar el proceso de destilación con eficiencias del 24% y volúmenes de destilado de hasta 12 ml; mostrando, además, rendimientos entre el 0.1 y 1%, el cual es dependiente de la especie vegetal. La tendencia a ser mejor dispositivo de extracción fue para especies como *Mentha piperita* y *Laurus nobilis*.

## ABSTRACT

Essential oils have interesting physicochemical characteristics; they have been used specifically in the industry to improve the product range. Essential oils can be recovered from any part of the plant, however, it's important that extraction procedure applied to recover the essential oils from plant can maintain the natural proportion of its original components.

There are different methods for of essential oils extraction, however, steam distillation is widely used, it's a simple and inexpensive method. The latest trends in extraction techniques have focused mainly on finding solutions that minimize the use of solvent and energy, so that, the method used has the least possible impact on the environment. The use of alternative energy has been proposed as a source of heat for the process, such as, solar energy where the use of a solar stove is considered one of the simplest, most viable and attractive options that results in a significant fuel saving. Therefore, we were decided to couple a distillation device in a solar oven to extract essential oils in a green way, in such a way that, it was sought to introduce the use of solar (thermal) energy to the extraction process in a successful way, although for low volume samples, it has a highly acceptable efficiency for devices in its class.

The results obtained showed the capacity of the stove to reach and maintain 80°C for three hours, enough time to develop the distillation process with efficiencies of 24% and distillate volumes of up to 12 ml; also showing yields between 0.1 and 1%, which is dependent on the plant species. The tendency to be a better extraction device was for species like *Mentha piperita* and *Laurus nobilis*.

## INTRODUCCIÓN

Durante años y debido a sus propiedades biológicas, los aceites esenciales se han utilizado para mejorar la funcionalidad de diversos productos, tales como: alimentos, bebidas, perfumes, productos farmacéuticos, cosméticos o pesticidas verdes (1). También son llamados aceites odoríferos volátiles, son líquidos oleosos aromáticos extraídos de diferentes partes de plantas, por ejemplo: hojas, cáscaras, cortezas, flores, brotes, semillas, etc. (2).

La gama de las industrias que utilizan los aceites esenciales o sus subproductos es amplia y variada. Como productos naturales, tienen características fisicoquímicas interesantes con altos valores agregados. (3). Varían en olor y sabor, que se rigen por los tipos y la cantidad de constituyentes presentes en la mezcla, se sabe que poseen actividades antioxidantes y antimicrobianas, por lo que sirven como aditivos naturales en alimentos y productos alimenticios. Casi cualquier parte de la planta puede ser fuente del aceite, que permite extraerse y explotarse por completo para aplicaciones alimentarias u otras (2). Por lo tanto, es importante que el procedimiento de extracción aplicado para recuperar los aceites esenciales de la matriz de la planta mantenga la proporción natural de sus componentes originales (4).

Hay varios métodos para la extracción de aceites esenciales: hidrodestilación, destilación por arrastre de vapor, hidrodifusión, extracción con solventes, extracción con fluidos supercríticos, extracción asistida por microondas y extracción asistida por ultrasonido. Entre todos los métodos, la destilación por arrastre de vapor ha sido ampliamente utilizada, ya que es sencillo y de bajo costo, especialmente para la producción a escala comercial (2).

Las últimas tendencias en técnicas de extracción se han centrado principalmente en encontrar soluciones que minimicen el uso de solvente y energía. Dentro del concepto verde, se debe obtener el extracto de la forma en que tenga el menor impacto posible hacia el medioambiente (5). Ya que la extracción actual implica un impacto ambiental como la contaminación, emisión de gases de efecto

invernadero y, por ende, calentamiento global; la fuente de energía del proceso sigue siendo combustibles fósiles (electricidad, gas natural, gas butano, etc.).

El uso de energías alternas se ha propuesto como fuente de calor para el proceso, tal como lo es la energía solar (5), entre las tecnologías de energía limpia, es reconocida como una de las más prometedoras, ya que es gratuita y respetuosa con el medio ambiente (6), reduce el uso de combustibles fósiles y las importaciones energéticas, como calentar agua, cocinar, secar o acondicionar un ambiente, entre otros (7).

La estufa solar se considera una de las opciones más simples, viables y atractivas (8). El uso de estufas solares da como resultado el ahorro apreciable de combustible (9). En todo el mundo, hay alrededor de 60 diseños principales y más de 100 variaciones, diferentes tipos de estufas solares se han diseñado, desarrollado y probado en todo el mundo para diferentes condiciones y propósitos (10). Por lo tanto, se ha optado por acoplar un dispositivo de estufa solar al sistema de destilación para extraer aceites esenciales de manera verde, buscando introducir el uso de la energía solar (térmica) al proceso de extracción.

# CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

## 1. ACEITES ESENCIALES

Según la "Asociación Francesa de Normalización" (AFNOR) y la Farmacopea Europea (Ph. Eur.), el aceite esencial (EO, por sus siglas en inglés) se define como un producto manufacturado a partir de materias primas puras e identificadas de origen vegetal, obtenidas por hidrodestilación, destilación al vapor, procesos mecánicos o destilación "seca" para algunas maderas (11). También se les llama aceites etéreos o aceites volátiles porque se vaporizan rápidamente cuando se exponen al aire a temperaturas normales, son el principio de la fragancia de las plantas. En general, consisten en muchas mezclas que incluyen diferentes tipos de moléculas (12).

Estos aceites son mezclas complejas que pueden contener más de 300 moléculas diferentes. Los terpenos y terpenoides constituyen el grupo principal que conforman el aceite esencial, seguido de aromáticos (fenólicos) y, en menor grado, alifáticos (alcanos y alquenos) (Ver Figura 1) (13).

Con respecto a su ingesta dietética, los aceites esenciales generalmente se consideran seguros (GRAS) para su uso previsto por la Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU. (FDA) (14).

Se conocen alrededor de 3000 aceites esenciales de al menos 2000 especies de plantas, de los cuales 300 son importantes desde el punto de vista comercial (*por ejemplo*: Lavanda, geranio, jazmín, rosa, manzanilla, orégano, hierbabuena, canela, naranja, etc.). Una producción de 40 000-60 000 toneladas por año con un valor de mercado estimado de \$ 700 millones de dólares, indicando que la producción y el consumo está aumentando en todo el mundo (15). Muchos factores, como la variación genética, la variedad de plantas, la nutrición, la aplicación de fertilizantes, la ubicación geográfica, el clima circundante, las variaciones estacionales, el estrés durante el crecimiento o la madurez, el

secado y almacenamiento después de la cosecha, afectan la química de los EO (16).

Los métodos utilizados para la extracción de aceites esenciales normalmente dependen del material botánico utilizado. El método es uno de los factores principales que determinan la calidad. Los EO se obtienen primordialmente a partir de materia prima vegetal mediante dos categorías de extracción: métodos convencionales/clásicos y métodos avanzados/innovadores (3).

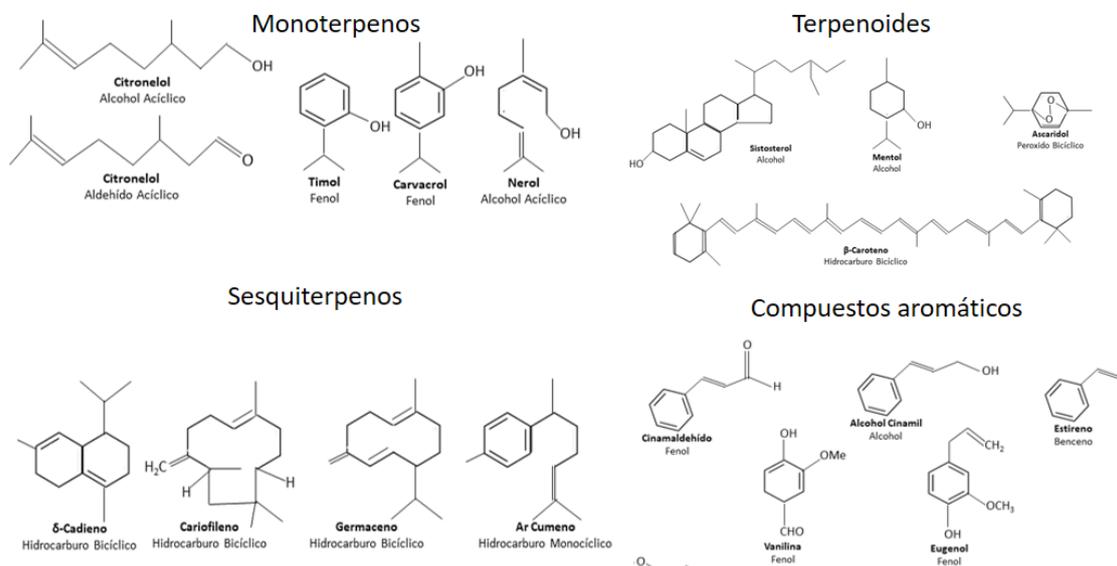


Figura 1. Clasificación y ejemplos de algunos compuestos encontrados en aceites esenciales. Adaptado de: (13).

## CAPÍTULO 2 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN

### 2. MÉTODOS CONVENCIONALES/CLÁSICOS

#### 2.1 DESTILACIÓN POR ARRASTRE DE VAPOR

La forma tradicional de aislar compuestos volátiles como aceites esenciales del material vegetal es la destilación. Durante la destilación, el material vegetal es expuesto al vapor generado en una cámara diferente a la que contiene la muestra, el vapor cargado del aceite esencial se eleva y entra al condensador donde se enfría por una fuente externa (ver Figura 2). A medida que se condensan vapor y vapores de aceites esenciales, ambos se recogen y separan en un recipiente. El aceite esencial, al ser menos denso que el agua, flota en la parte superior mientras el agua se mantiene en el fondo y se puede separar fácilmente (17).

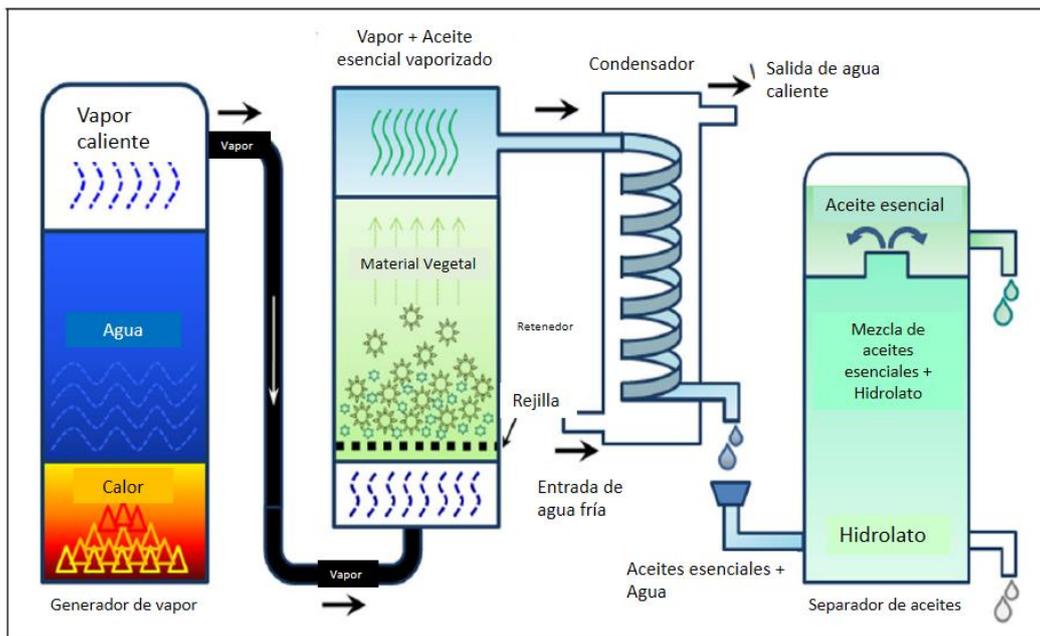


Figura 2. Método de destilación al vapor. Modificado de: (2).

## 2.2 DESTILACIÓN CON AGUA-VAPOR o VAPOR-HIDRODESTILACIÓN

La extracción se realiza dentro del alambique (ver Figura 3), en este sistema de extracción se emplea vapor húmedo proveniente de agua en ebullición, que traspasa de abajo hacia arriba el material vegetal suspendido encima y apoyado sobre una malla que evita el contacto directo con el agua, al igual que el sistema por arrastre de vapor, el vapor transporta los materiales volátiles (ver Figura 4). El tiempo de extracción se reduce, así como la pérdida de moléculas polares (3).



*Figura 3. Alambique. Dispositivo para extraer aceites esenciales de manera artesanal. Silvan Nature, 2014. Recuperado de [Silvan Nature - WordPress.com](http://Silvan Nature - WordPress.com).*

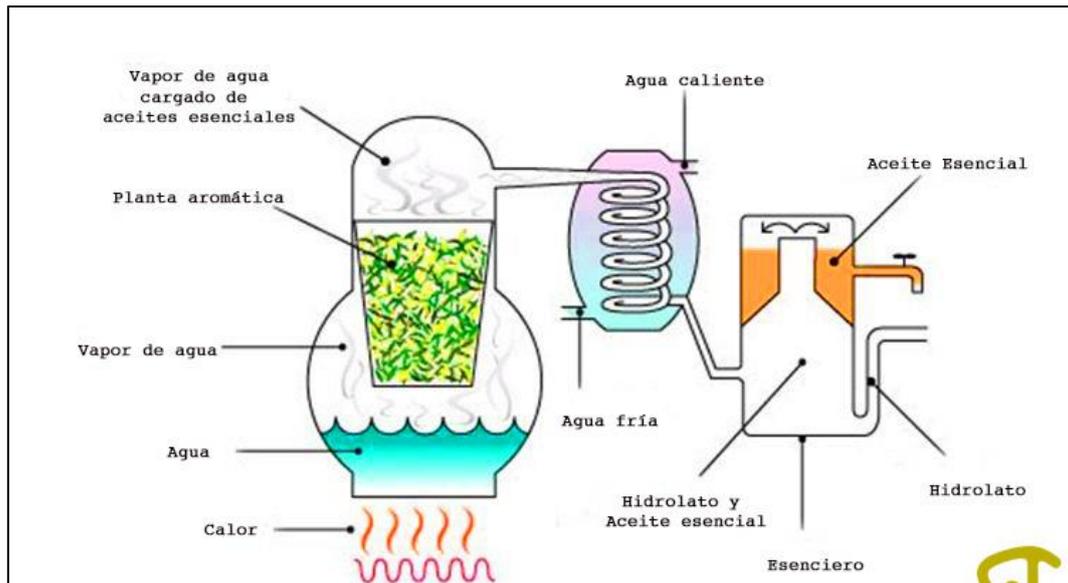


Figura 4. Método de destilación vapor-agua en alambique. AROMATHERII, 2016. Recuperado de [www.aromatherii.com](http://www.aromatherii.com).

## 2.3 HIDRODESTILACIÓN

Es un método en el cual implica que el material vegetal se sumerge directamente dentro del agua y se calienta a hervor (ver Figura 5). Este método protege los aceites extraídos en cierta medida ya que el agua circundante actúa como una barrera para evitar el sobrecalentamiento (2). De hecho, a presión atmosférica y durante el proceso de extracción (calentamiento), las moléculas de agua y OE, forman una mezcla heterogénea que alcanza su temperatura de ebullición en un punto más bajo a 100 °C, para los componentes EO este punto es muy alto (3). La ventaja del agua es que es inmisible con la mayoría de las moléculas terpénicas de EO y, por lo tanto, después de la condensación, los EO se pueden separar fácilmente del agua mediante decantación simple (2).

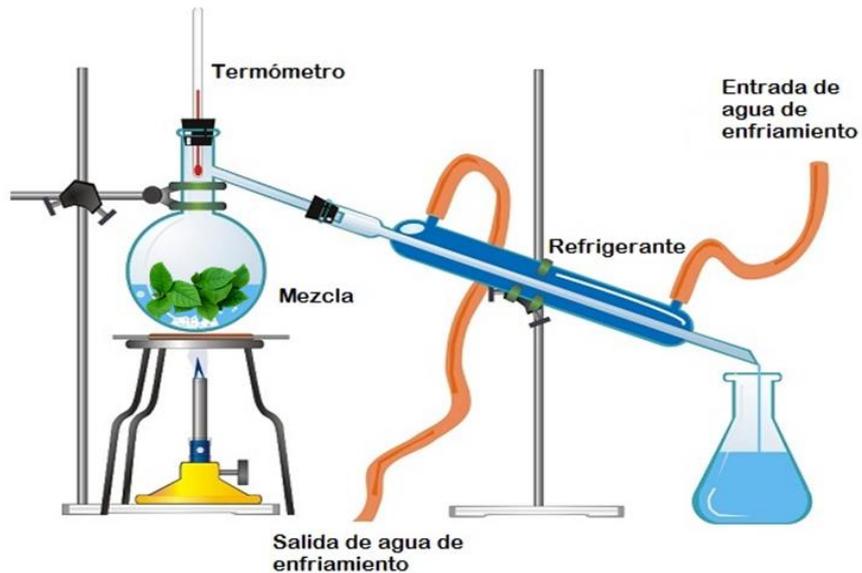


Figura 5. Método de hidrodestilación en laboratorio (destilación simple). Niko, 2018. Recuperado de <http://www.resuelto.com/wp-content/uploads/2014/12/destila2.jpg>.

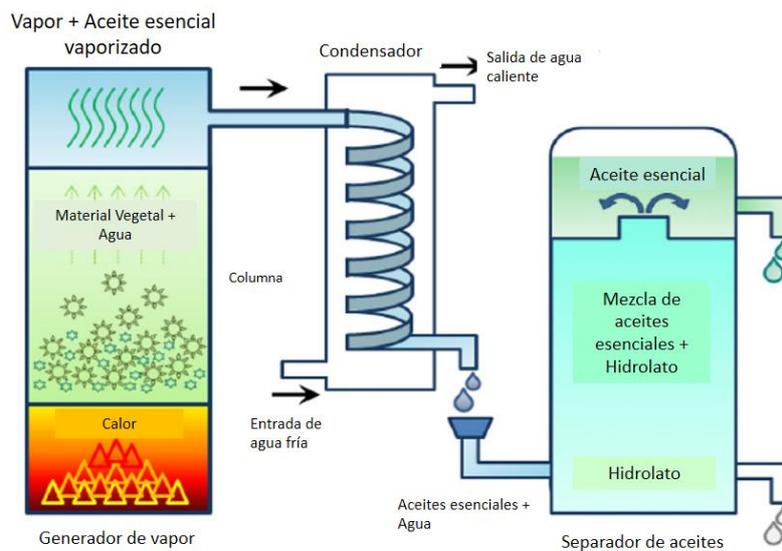


Figura 6. Método de hidrodestilación (industrial). Modificado de: (2).

A escala industrial (ver Figura 6), este método todavía se utiliza por la simplicidad de las instalaciones es decir, no requiere equipo costoso, la facilidad de implementación del método y su selectividad (2). En la figura 7 se puede apreciar en que consiste cada tipo de destilación por arrastre de vapor, la cual varía en la colocación del material vegetal.

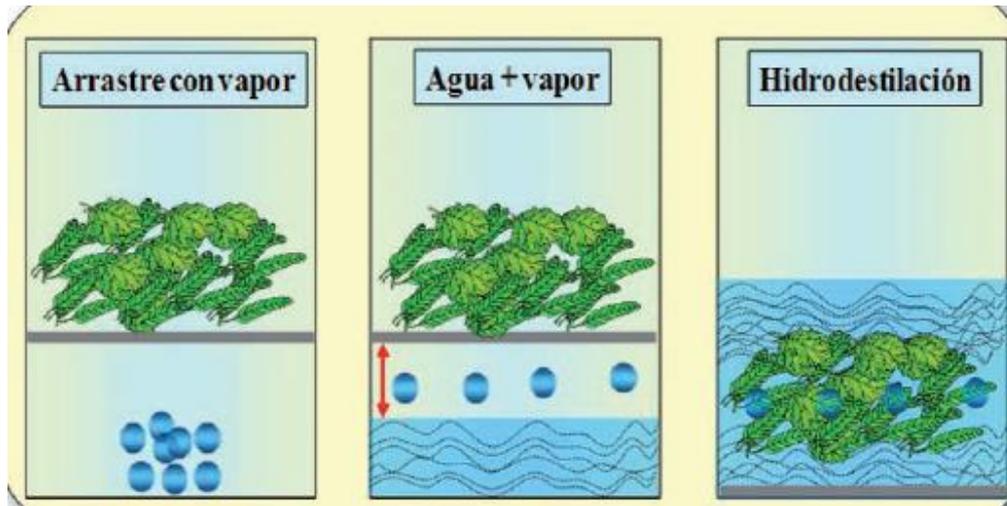


Figura 7. **Variantes por arrastre de vapor.** **Arrastre con vapor:** Vapor seco, fuente de vapor externa, i.e. Caldera. **Agua + vapor:** Vapor húmedo producido por calentamiento de agua hasta ebullición. **Hidrodestilación:** Calentamiento del agua con el material vegetal sumergido. (18).

## 2.4 HIDRODIFUSIÓN

Este es un caso particular de destilación de vapor donde el flujo de los vapores se produce hacia abajo. También se llama hidrodifusión o hidrodifusión-gravedad (3). Este método se usa cuando el material vegetal se ha secado y no se daña a la temperatura de ebullición. El vapor se introduce por la parte superior del material de la planta (ver Figura 8), mientras que para el método de destilación al vapor este se introduce desde la parte inferior (2).

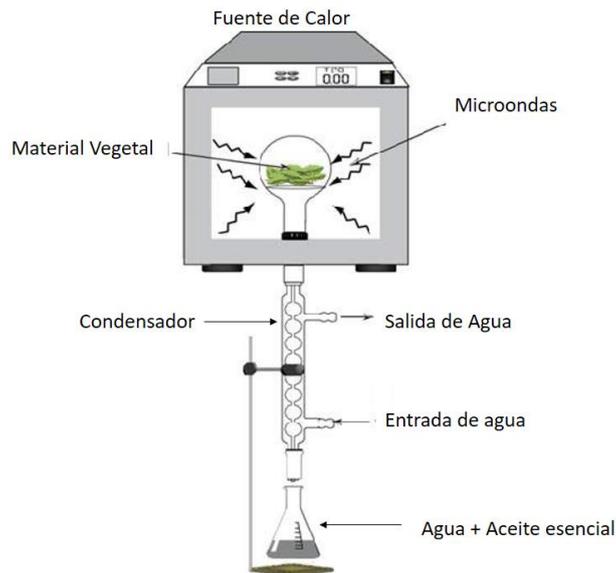


Figura 8. **Hidrodifusión.** Actualmente para optimizar el proceso la fuente de calor es asistida por microondas. Adaptado de: (19).

## 2.5 EXTRACCIÓN CON SOLVENTES ORGÁNICOS

La extracción con disolvente convencional se ha implementado para materiales florales frágiles o delicados, que no son tolerantes al calor de la destilación al vapor (3). El solvente se mezcla con el material de la planta y luego se calienta para extraer el aceite esencial, seguido por filtración. Posteriormente, el filtrado se concentra por evaporación del solvente. A partir del concentrado, se mezcla con alcohol puro para extraer el aceite y se destila a baja temperatura, el alcohol absorbe la fragancia y cuando el alcohol se evapora, el aceite absoluto aromático permanece (2). La extracción dependerá del tipo de disolvente, su polaridad, el tiempo de extracción, la temperatura, así como de la composición química, las características físicas de las muestras y la técnica empleada (ver Figura 9) (20).



Figura 9. Ejemplo de técnica para extracción de OE con solventes (extracción Soxhlet). 1. Tubo condensador, 2. Tubo de extracción, 3. Tubo sifón, 4. Camino de destilación y 5. Matraz (Disolvente + Muestra) (21).

Los extractos obtenidos por solventes orgánicos contienen residuos que contaminan los alimentos y fragancias a los que se agregan. Esto compromete la seguridad de los productos extraídos por esta técnica (3) el residuo del disolvente podría retenerse en el producto final debido a la eliminación incompleta. Esto puede causar alergias, toxicidad y afectar el sistema inmunológico (2).

## 2.6 MÉTODOS AVANZADOS/INNOVADORES

### 2.7 EXTRACCIÓN CON FLUIDOS SUPERCRÍTICOS (SCFE)

Un fluido supercrítico (SCF) se forma cuando la temperatura y la presión están por encima del punto crítico (CP) de la sustancia, formando una fase homogénea con propiedades tanto líquidas como gaseosas (ver Figura 10). Debido a su baja viscosidad similar a la del gas y su alta difusividad, puede penetrar fácilmente los materiales vegetales con una velocidad de transferencia de masa rápida. Además, la densidad se puede modificar ajustando la presión y la temperatura.

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el disolvente más comúnmente utilizado por varias razones: está disponible, es un gas reutilizable y tiene puntos críticos bajos (22).

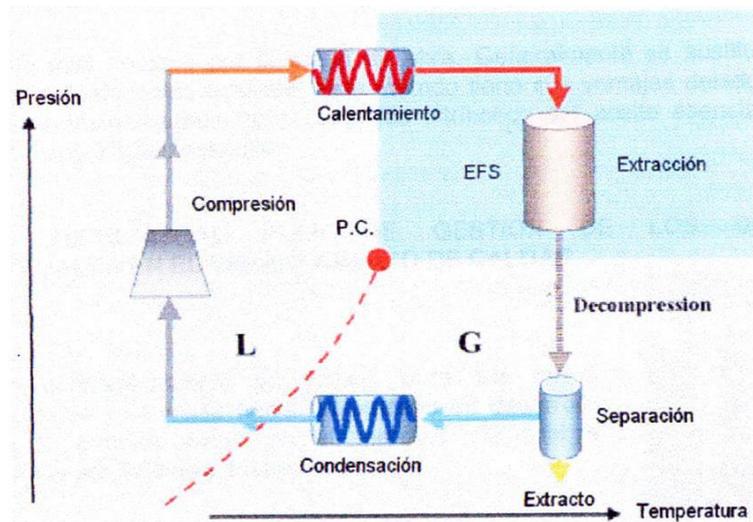


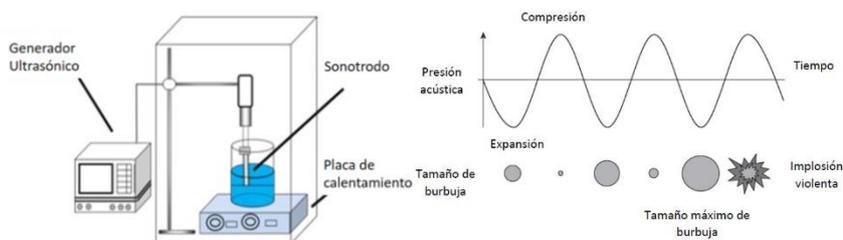
Figura 10. **Proceso de extracción con SCFE.** En SCFE, los parámetros del proceso deben ser más altos que los valores correspondientes al punto crítico. La temperatura crítica ( $T_c$ ) y la presión de vapor ( $P_c$ ), son características de la sustancia utilizada,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{EtOH}$ ,  $\text{CO}_2$ , etc. (23).

Las ventajas de SCFE son: la versatilidad que ofrece para identificar los componentes que desea extraer de un material determinado y el hecho de que su producto final prácticamente no contiene residuos de disolventes, se evaporan por completo (4). Desafortunadamente, los métodos basados en SCFE son de alto costo; y el  $\text{CO}_2$  solo disuelve moléculas pequeñas no polares (22).

## 2.8 EXTRACCIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO

La mejora producida por la aplicación de energía ultrasónica en la extracción de plantas es muy reconocida. El ultrasonido causa varios efectos físicos como la turbulencia, la aglomeración de partículas y la disrupción celular (4), Debido a sus ondas ultrasónicas de alta frecuencia se inducen ciclos de contracción y expansión causando cavitación (ver Figura 11), de esta manera se rompen las

paredes celulares de las plantas causando la infiltración del solvente . La tasa de extracción y el rendimiento depende de factores como la concentración de disolvente; la relación solvente/material; tiempo de ultrasonidos, temperatura, potencia, etc. (24).



*Figura 11. Extracción asistida por ultrasonido y efecto de las ondas acústicas en la creación de burbujas en el fenómeno de la cavitación. Modificado de: (25).*

## 2.9 EXTRACCIÓN ASISTIDA POR MICROONDAS (MAE)

La radiación de microondas consiste en campos oscilantes y magnéticos. Las microondas utilizadas deben estar en la región de frecuencia natural de las moléculas de agua. Cuando el campo eléctrico de microondas pasa sobre una molécula de agua, las áreas positivas y negativas de las moléculas interactúan con las fuerzas positivas y negativas del campo en movimiento. Esto obliga a las moléculas de agua a oscilar, lo que resulta en la fricción entre ellas, seguida del calentamiento (20).

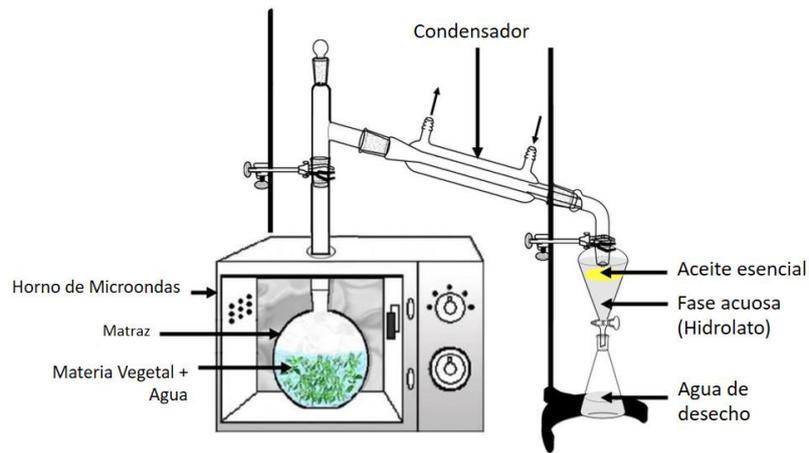


Figura 12. **Técnica de hidrodestilación asistida por microondas.** Modificado de: (26).

El microondas es fuente de calor que logra un calentamiento más efectivo y selectivo. Puede consistir en la destilación simple con agua-hidrodestilación (ver figura 12) o una extracción en seco a presión atmosférica sin agregar agua ni disolvente orgánico o se puede emplear el fenómeno de hidrodifusión y gravedad (12). MAE tiene un tiempo de extracción más corto, ahorro significativo de energía y carga ambiental reducida con menor liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (20).

## CAPÍTULO 3

### 3.1 PRINCIPIOS DE QUÍMICA VERDE

Una definición general de química verde es la invención, el diseño y la aplicación de productos químicos y procesos para reducir o eliminar el uso y la generación de sustancias peligrosas. En relación con la extracción verde de productos naturales, esta definición puede modificarse de la siguiente manera: "Extracción Verde se basa en el descubrimiento y diseño de procesos de extracción para reducir el consumo de energía, permitir el uso de solventes alternativos y productos naturales renovables que garantizarán una seguridad y un extracto/producto de alta calidad" (5).

Al diseñar y demostrar la extracción verde en el laboratorio y a escala industrial para abordar un consumo óptimo de materias primas, disolventes y energía se han establecido los seis principios de la extracción verde (27):

- I. Innovación mediante la selección de las plantas (cultivos renovables).
- II. Uso de solventes alternativos, principalmente agua o agro-solventes.
- III. Reducir el consumo de energía mediante la recuperación y el uso de tecnologías innovadoras.
- IV. Producción de co-productos en lugar de desechos para incluir la industria *i.e.* agropecuaria.
- V. Reducir las operaciones unitarias y favorecer los procesos seguros, robustos y controlados.
- VI. Preferiblemente obtener un extracto no desnaturalizado y biodegradable sin contaminantes.

Dentro de los cuales, el tema energético tiene un elevado interés. Existen cuatro rutas para minimizar el consumo de energía:

- Optimizar los procesos existentes,
- Recuperar la energía liberada durante el proceso de extracción,
- Ayudar a los procesos existentes con la intensificación de la temperatura *i.e.* Microondas,
- Innovación completa del proceso.

Una vez que el proceso de extracción se ha convertido en un paso limitante para el desarrollo industrial, la innovación es obligatoria en la cual se busca reducir el consumo de energía (5).

Consecuentemente, el uso de solventes alternativos principalmente agua, por sus beneficios como que, es económica y no tóxica para un procesamiento limpio con prevención de la contaminación. Además, una vez procesada, los productos orgánicos no son solubles a temperatura ambiente, lo que permite una separación rápida con lo cual se simplifican los pasos del proceso (28).

## CAPÍTULO 4

### 4.1 ENERGÍAS RENOVABLES

Durante los últimos siglos, la demanda mundial de energía se basó en gran medida en los combustibles fósiles. Si bien las reservas de combustibles fósiles son limitadas, y su uso a gran escala está asociado con el deterioro ambiental y al incremento en el nivel de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera además del continuo aumento en la demanda de energía, el combustible fósil no satisficará esta demanda creciente y su costo aumentará drásticamente por lo cual se están haciendo esfuerzos para utilizar las fuentes de energía renovables (29).

Las Energías Renovables (RES): Pueden definirse como aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por el ser humano, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles (30). RES incluye biomasa, hidroelectricidad, energía geotérmica, solar, eólica y marina.

Entre las tecnologías de energía renovables, la energía solar es reconocida como una de las más prometedoras, es gratuita, proporciona energía limpia y respetuosa con el medio ambiente (8), es la más económica, inagotable y se utiliza para diversos requisitos domésticos y agrícolas (10). La energía solar posee gran diversidad de aplicaciones que se pueden dividir en dos tipos de sistemas (31):

- I. Sistemas que se basan en la **conversión de energía solar en energía térmica** para diferentes propósitos.
- II. Sistemas que **transforman la energía solar directamente en electricidad** mediante tecnología fotovoltaica.

Entre las aplicaciones de conversión de energía solar en energía térmica, la estufa solar se considera una de las opciones más simples, más viables y atractivas en términos de utilización (8).

## CAPÍTULO 5

### 5.1 ESTUFAS SOLARES

Una estufa solar es un dispositivo que cocina los alimentos mediante la absorción de la radiación solar, la cual se convierte en energía térmica. La cocción solar ahorra una cantidad significativa de combustibles convencionales (10). Puede usarse para calentar/cocinar alimentos o bebidas. Además, puede utilizarse para lograr procesos como la pasteurización y la esterilización (31).

### 5.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTUFAS SOLARES

Hay diferentes tipos de estufas solares que se han desarrollado en todo el mundo. La característica común de cada diseño es la superficie reflectante brillante que dirige los rayos del sol hacia el área de cocción y las paredes interiores oscuras del área de cocción y el recipiente de cocción (10).

Herez, Ramadan y Khaled (31) clasificaron las estufas solares en base a tipo de aprovechamiento de la energía solar (Figura 13):

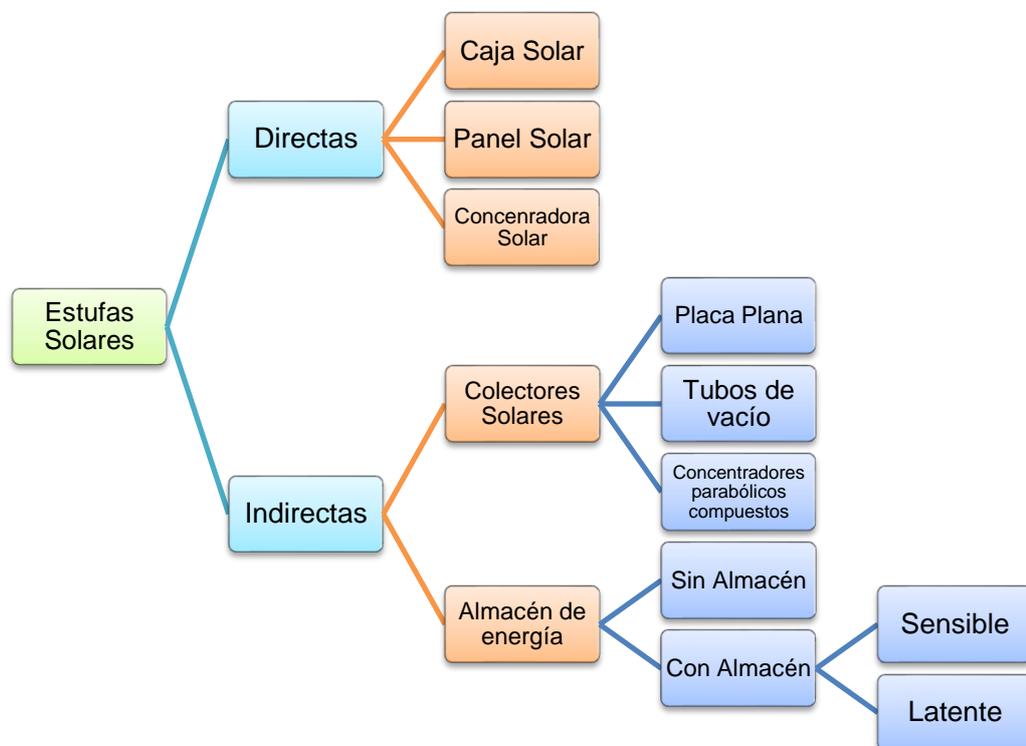


Figura 13. Clasificación de estufas solares.

### 5.3 ESTUFAS SOLARES DIRECTAS

Las estufas solares directas aprovechan la luz del sol directamente y se pueden considerar el tipo más común debido a su facilidad de construcción y material de bajo costo (8).

#### 5.3.1 ESTUFA SOLAR TIPO CAJA

La primera estufa de caja solar fue inventada por un naturalista franco-suizo llamado Horace de Saussure en 1767. Una estufa de caja solar básicamente consiste en una caja aislada con una cubierta de vidrio transparente y superficies reflectantes (ver Figura 14) para dirigir la luz solar hacia la caja, la parte interior está pintada de negro con el fin de maximizar la absorción de la luz solar (6).

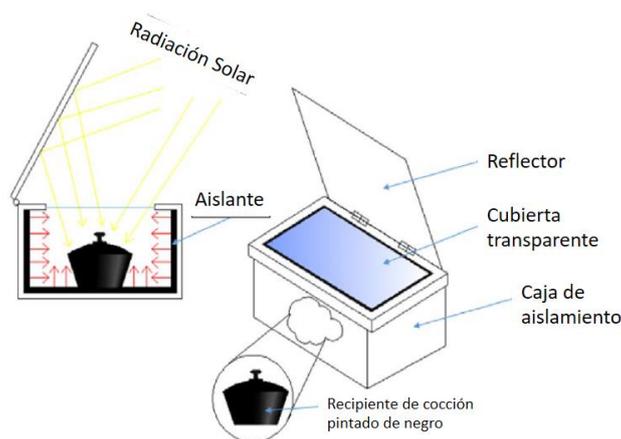


Figura 14. Estufa solar tipo caja con reflector (31).

#### 5.3.2 ESTUFA DE PANEL SOLAR

Las estufas de paneles solares son similares a las estufas de caja solar en su principio de funcionamiento. Pero el panel de cocina utiliza una gran superficie reflectante en lugar de una caja aislada para enfocar la luz solar en el recipiente de cocina negro que convierte la luz solar en energía térmica (ver Figura 15). Además, tiene una construcción fácil y material de bajo costo en el que se puede construir a partir de una sola caja de cartón y un poco de papel de aluminio (31). La desventaja es que son inestables con vientos fuertes y no retienen mucho calor cuando el sol se oculta detrás de las nubes. La convección y las pérdidas

por transferencia de calor por radiación son más grandes en esta estufa comparada con la estufa de caja solar (10).

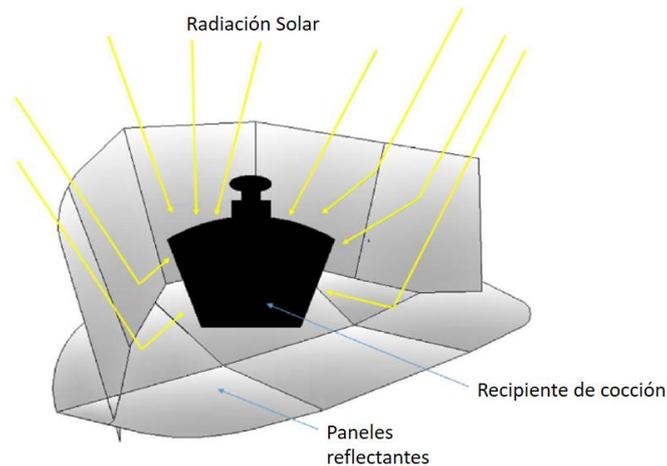


Figura 15. Estufa de panel solar. Adaptado de: (31).

### 5.3.3 ESTUFA CONCENTRADORA SOLAR

Se basa en el principio de la óptica solar en la que concentra la radiación solar directa en el fondo del recipiente para calentarlo y lograr temperaturas extremadamente altas. La estufa de concentración está formada por un reflector parabólico (ver Figura 16), una olla de cocción que se coloca en el punto de enfoque y un soporte con un mecanismo de giro para mantener el reflector orientado hacia el sol (31). Las estufas concentradoras utilizan espejos multifacéticos, lentes Fresnel o concentradores parabólicos para alcanzar temperaturas más altas. Por lo general, se calientan rápidamente y a una temperatura más alta, no conservan calor y requieren un ajuste direccional para rastrear el sol, es muy esencial un alto grado de claridad del reflector (32).

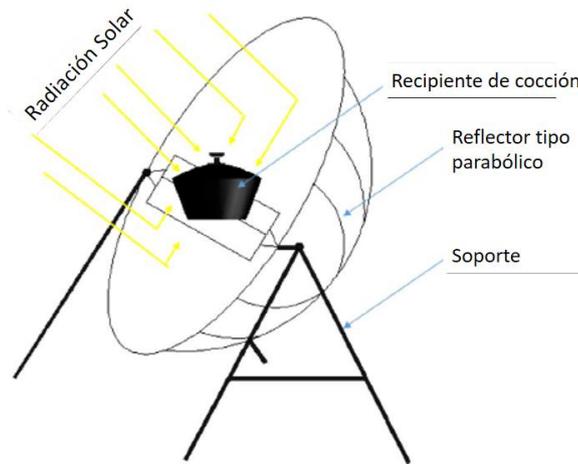


Figura 16. **Estufa concentradora solar.** Modificado de: (31).

### 5.3.4 ESTUFAS SOLARES INDIRECTAS

En las estufas solares de tipo indirecto, el utensilio de cocina se encuentra separado físicamente del colector y se requiere un medio de transferencia de calor para calentar la olla de cocción (ver Figura 17). Hay tres tipos de estufas solares indirectas disponibles, estufa solar con colector de placa plana, colector de tubo de vacío y con colector tipo concentrador (8). Tienen la ventaja de ser adecuadas para la recolección remota de energía que es útil para aplicaciones de estufa en interiores, pero son más caras de producir. La potencia térmica útil es mucho mayor en este tipo de estufas (6).

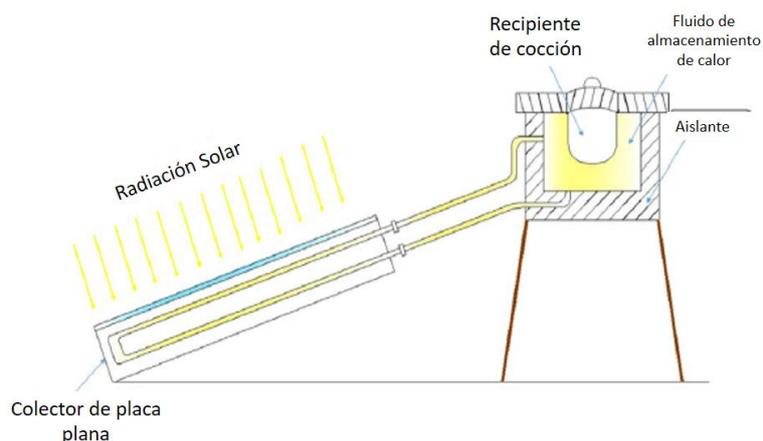


Figura 17. **Estufa indirecta.** Modificado de: (31).

El almacenamiento de calor sensible es la forma más simple de almacenar la energía térmica (ver Figura 18). El fluido de transferencia de calor se mueve a la unidad de cocción después de que se haya calentado en el colector. El agua, las rocas, el hierro, el aceite vegetal y el petróleo son los principales medios de almacenamiento de calor sensible, la limitación es que la mayoría de los materiales tienen poca capacidad para almacenar calor sensible (31).

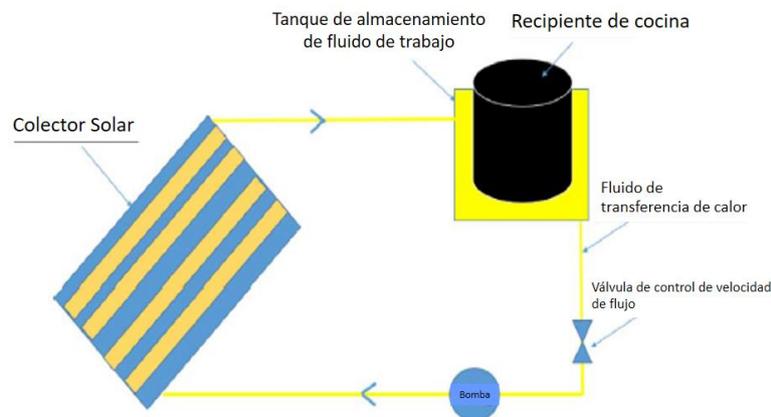


Figura 18. *Estufa indirecta con almacenamiento de calor sensible.* Adaptado de: (31).

El almacenamiento de calor latente explota la energía utilizando material de cambio de fase (PCM) que permite contener una cantidad significativa de energía térmica, la cual se absorbe durante el proceso de calentamiento y se liberan al medio durante el enfriamiento. Algunos de los materiales para la cocción solar son: nitrato de magnesio hexahidratado, cloruro de magnesio hexahidratado y ácido esteárico, acetamida, acetanilida y eritritol (31). Sin embargo, son costosas y complicadas para construir.

## 5.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTUFAS SOLARES

Tabla 1. Características generales de las estufas solares (8).

| <b>Tipo de Estufa</b>                | <b>Ventajas</b>  | <b>Desventajas</b>  |
|--------------------------------------|--|---|
| Caja Solar<br>T= 150°C               | -Utiliza radiación directa y difusa.<br>-Requiere poca intervención del usuario, muy fácil y seguro de usar.<br>-Fácil de construir. | -Cocción lenta 1.5-2 horas<br><br>-No se usa para freír   |
| Panel Solar<br>T= 200-250°C          | -Mejor rendimiento que la cocina de caja.  | -Bajo Rendimiento en condiciones nubladas.<br><br>-Se basa más en la radiación reflejada.   |
| Concentradora Solar<br>$\eta = 50\%$ | -Muy eficiente.<br>-Puede alcanzar temperaturas de 300 a 350°C.<br>-Cocinar es más rápido (1/2 a 1 hora)                             | -Diseño complejo.<br>-Requiere la atención del usuario.<br>-Fuerte dependencia del haz directo.<br>-Costo relativamente alto.<br>-Problemas de seguridad (quemaduras o daños a los ojos). |
| Colectores<br>T= 250°C<br>-1300°C    | -Utiliza radiación directa y difusa.<br>-Simple, seguro y conveniente de usar.<br><br>-Aplicaciones Industriales                     | -Complicado para construir.<br><br>-Costoso.  |

## CAPÍTULO 6

### 6.1 ¿POR QUÉ UTILIZAR ENERGÍA SOLAR?

El potencial de la energía solar en México es uno de los más altos del mundo. Esto se debe a que el país se encuentra en el llamado "cinturón solar" (ver Figura 19) con radiación superior a 5KWh por metro cuadrado por día (29).

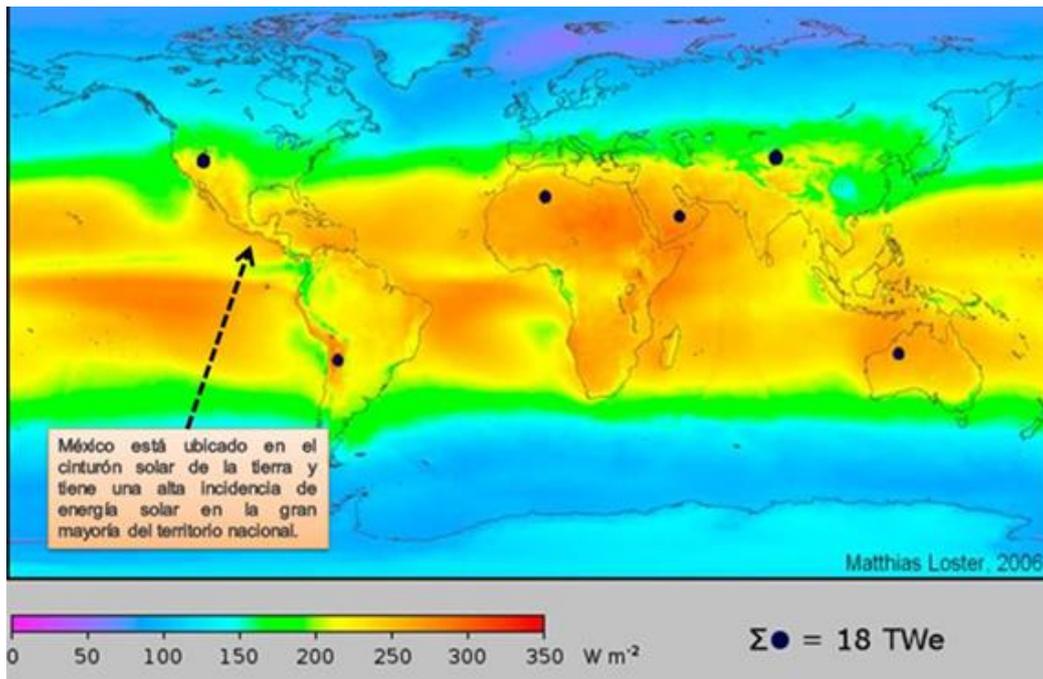
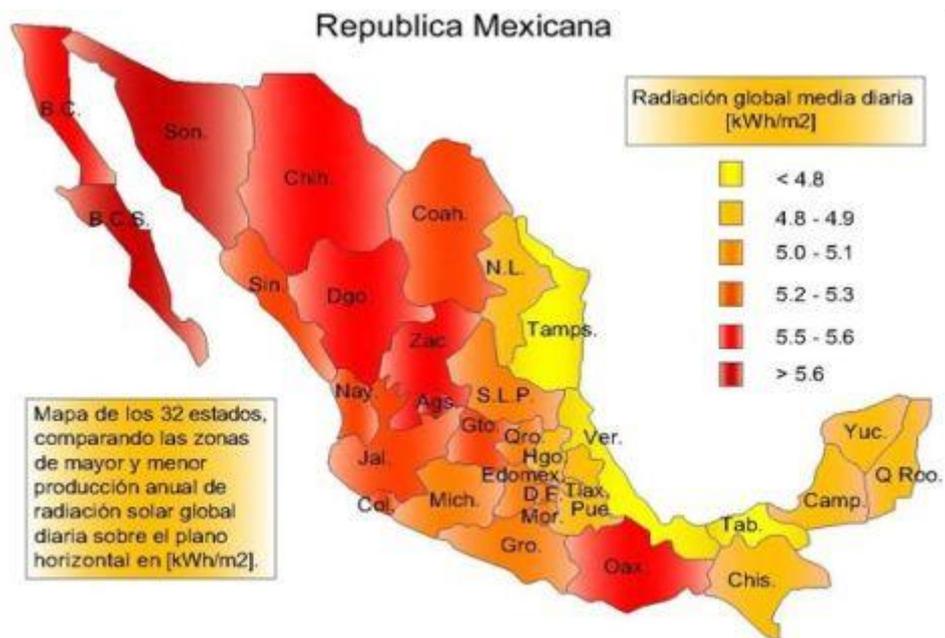


Figura 19. Irradiación solar a escala mundial; cinturón solar (CONUEE; Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía).

Dentro de México, el potencial de energía solar está muy acumulado en la parte noroccidental del país. La radiación solar global anual en México va de 5.6 a 6.1 KWh /m<sup>2</sup>-día (ver Figura 20) (29).



Diseño ilustrativo. Elaboro: Ing. Manuel Muñoz Herrera. Datos: Servicio Meteorológico Nacional

Figura 20. Radiación solar diaria, promedio anual. Enerbiomex, recuperado de <http://enerbiomex.com/energia-solar/>.

Tabla 2. Radiación solar en lugares selectos de México en kWh/m<sup>2</sup> por día (Instituto de Investigaciones Eléctricas).

| Estado          | Ciudad         | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Prom |
|-----------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Sonora          | Hermosillo     | 4.0 | 4.6 | 5.4 | 6.6 | 8.3 | 8.5 | 6.9 | 6.6 | 6.7 | 6.0 | 4.7 | 3.9 | 6.0  |
| Sonora          | Guaymas        | 4.5 | 5.7 | 6.5 | 7.2 | 7.3 | 6.8 | 5.9 | 5.8 | 6.3 | 5.9 | 5.0 | 5.6 | 5.9  |
| Chihuahua       | Chihuahua      | 4.1 | 4.9 | 6.0 | 7.4 | 8.2 | 8.1 | 6.8 | 6.2 | 5.7 | 5.2 | 4.6 | 3.8 | 5.9  |
| SLP             | SLP            | 4.3 | 5.3 | 5.8 | 6.4 | 6.3 | 6.1 | 6.4 | 6.0 | 5.5 | 4.7 | 4.2 | 3.7 | 5.4  |
| Zacatecas       | Zacatecas      | 4.9 | 5.7 | 6.6 | 7.5 | 7.8 | 6.2 | 6.2 | 5.9 | 5.4 | 4.8 | 4.8 | 4.1 | 5.8  |
| Guanajuato      | Guanajuato     | 4.4 | 5.1 | 6.1 | 6.3 | 6.6 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.8 | 5.2 | 4.8 | 4.6 | 5.6  |
| Aguascalientes  | Aguascalientes | 4.5 | 5.2 | 5.9 | 6.6 | 7.2 | 6.3 | 6.1 | 5.9 | 5.7 | 5.1 | 4.8 | 4.0 | 5.6  |
| Oaxaca          | Salina Cruz    | 5.4 | 6.3 | 6.6 | 6.4 | 6.1 | 5.0 | 5.6 | 5.9 | 5.2 | 5.9 | 5.7 | 5.2 | 5.8  |
| Oaxaca          | Oaxaca         | 4.9 | 5.7 | 5.8 | 5.5 | 6.0 | 5.4 | 5.9 | 5.6 | 5.0 | 4.9 | 4.8 | 4.4 | 5.3  |
| Jalisco         | Colotlán       | 4.6 | 5.7 | 6.5 | 7.5 | 8.2 | 6.6 | 5.8 | 5.6 | 5.8 | 5.3 | 4.9 | 4.1 | 5.9  |
| Jalisco         | Guadalajara    | 4.6 | 5.5 | 6.3 | 7.4 | 7.7 | 5.9 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 4.9 | 4.8 | 4.0 | 5.6  |
| Durango         | Durango        | 4.4 | 5.4 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 6.8 | 6.0 | 5.6 | 5.7 | 5.1 | 4.8 | 3.9 | 5.7  |
| Baja California | La Paz         | 4.4 | 5.5 | 6.0 | 6.6 | 6.5 | 6.6 | 6.3 | 6.2 | 5.9 | 5.8 | 4.9 | 4.2 | 5.7  |
| Baja California | San Javier     | 4.2 | 4.6 | 5.3 | 6.2 | 6.5 | 7.1 | 6.4 | 6.3 | 6.4 | 5.1 | 4.7 | 3.7 | 5.5  |
| Baja California | Mexicali       | 4.1 | 4.4 | 5.0 | 5.6 | 6.6 | 7.3 | 7.0 | 6.1 | 6.1 | 5.5 | 4.5 | 3.9 | 5.5  |
| Querétaro       | Querétaro      | 5.0 | 5.7 | 6.4 | 6.8 | 6.9 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 5.4 | 5.0 | 4.4 | 5.9  |
| Puebla          | Puebla         | 4.9 | 5.5 | 6.2 | 6.4 | 6.1 | 5.7 | 5.8 | 5.8 | 5.2 | 5.0 | 4.7 | 4.4 | 5.5  |
| Hidalgo         | Pachuca        | 4.6 | 5.1 | 5.6 | 6.8 | 6.0 | 5.7 | 5.9 | 5.8 | 5.3 | 4.9 | 4.6 | 4.2 | 5.4  |

*Tabla 3. Irradiancia solar en Zacatecas en Wh/m<sup>2</sup> por día (INIFAP, Zacatecas).*

| <b>Mes</b>        | <b>2017</b>                            | <b>2018</b> | <b>2019</b> |
|-------------------|--|-------------|-------------|
|                   | Irradiancia Solar (Wh/m <sup>2</sup> ) |             |             |
| <b>Enero</b>      | 607.49                                 | 572.204     | 571.450     |
| <b>Febrero</b>    | 673.144                                | 575.849     | 624.582     |
| <b>Marzo</b>      | 781.405                                | 837.96      | 787.952     |
| <b>Abril</b>      | 859.693                                | 848.774     | 846.450     |
| <b>Mayo</b>       | 895.633                                | 842.902     | 891.979     |
| <b>Junio</b>      | 822.198                                | 685.212     | 758.534     |
| <b>Julio</b>      | 746.337                                | 673.717     |             |
| <b>Agosto</b>     | 742.451                                | 748.496     |             |
| <b>Septiembre</b> | 603.858                                | 573.144     |             |
| <b>Octubre</b>    | 673.431                                | 595.830     |             |
| <b>Noviembre</b>  | 636.862                                | 526.995     |             |
| <b>Diciembre</b>  | 493.07                                 | 516.449     |             |

El estado de Zacatecas recibe una cantidad relativamente alta de radiación solar durante todo el año (ver Tabla 2) lo que lo hace un lugar viable para aplicación de tecnologías solares. Solamente en la capital se reciben cada año altas cantidades de energía solar aprovechable, tan solo en 2017 los meses con mayor irradiación fueron abril, mayo y junio (ver Tabla 3), estos datos sugieren que es la mejor temporada para trabajar con tecnología solar.

## CAPÍTULO 7 CONSIDERACIONES GENERALES

### I. JUSTIFICACIÓN

Dentro de los principios de Química Verde se ha hecho énfasis en la innovación de las técnicas de extracción, dentro de las cuales el tema de reducción del consumo de energía es uno de los principales, en la actualidad hay métodos innovadores (*i.e.* extracción asistida por microondas, ultrasonido y fluidos súper críticos) que implican poco uso de energía; sin embargo, su costo en infraestructura es elevado, por lo que se ha limitado su uso en la industria, optando por innovar los métodos convencionales de extracción (*i.e.* Destilación por arrastre de vapor e hidrodestilación).

La destilación es una técnica sencilla y fácil de implementar, ya que se utiliza agua como disolvente, la cual es considerada económica y no contaminante, no obstante, lleva consigo un alto consumo de combustible para los procesos de calentamiento y enfriamiento de las muestras, por esta razón se ha propuesto reemplazar las fuentes de energía convencionales por una fuente renovable.

Dentro de las energías renovables, la energía solar es una fuente prometedora y amigable con el ambiente, ya que su transformación en energía térmica ha permitido el diseño de dispositivos tan diversos como las estufas solares. Diversos ensayos muestran su capacidad de alcanzar temperaturas óptimas para diversos procesos, incluyendo la destilación. La eficiencia alcanzada por el modelo de estufa solar tipo caja, la hace un sustituto atractivo de fuente de calor para el proceso de destilación con el cual se reduciría la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de contaminantes a la atmósfera, cumpliendo con la innovación de un método convencional de extracción a base de proceso verde.

## II. HIPÓTESIS

Utilizar un dispositivo de estufa solar tipo caja como fuente de energía, permitirá alcanzar temperaturas óptimas para llevar a cabo el proceso de obtención de aceites esenciales de diversas plantas a través de la destilación en diferentes épocas del año; esto a pesar de la variación de radiación solar con lo cual se podrá disminuir el uso de combustibles convencionales.

### **III. OBJETIVOS**

#### **A. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un dispositivo de estufa solar acoplado al sistema de destilación convencional para obtener aceites esenciales de manera verde.

#### **B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Diseñar un prototipo de destilador acoplado a la estufa solar tipo caja.
- b) Analizar térmicamente el prototipo diseñado.
- c) Evaluar la capacidad de destilación, así como rendimiento obtenido en comparación con los métodos ya existentes.
- d) Emplear el método de extracción con diferentes plantas.

## CAPÍTULO 8 MATERIALES Y MÉTODOS

### 8.1 ESTUFA SOLAR

Se construyó una estufa solar tipo caja (figura 21), teniendo en cuenta las recomendaciones de Solar Cookers International (33)(34):

El material estructural de cartón presenta resistencia limitada a las condiciones climáticas, sin embargo, es un material reciclable y funciona perfectamente como soporte; los materiales aislantes (poliestireno y cartón), fueron elegidos en base a su disponibilidad, ya que son materiales que se pueden reutilizar ya que al ser desechados generan problemas de contaminación, además cuentan con baja conductividad térmica, evitando la pérdida de calor.

Para la cubierta, que permite la entrada de los rayos solares, se utilizaron dos placas de vidrio de 6 mm de grosor, con la finalidad de disminuir la pérdida de calor, además de ser más sencillo de limpiar, se raya con menos facilidad y no sufre desgaste por la incidencia de radiación solar, lo que permite incrementar el efecto invernadero al interior de la estufa solar.

El colector, material con el cual se transfiere la energía almacenada, ese encuentra conformada por una placa de acero galvanizado, sobre el cual se posiciona el concentrador y los reflectores, que fueron construidos con hojas de aluminio grueso, por ser barato y accesible.

1. **Material estructural:** Cartón.
2. **Aislante:** Poliestireno.
3. **Material transparente:** Vidrio.
4. **Colector:** Acero Galvanizado.
5. **Concentrador:** Aluminio.
6. **Reflector:** Aluminio.
7. **Geometría:** Rectangular.

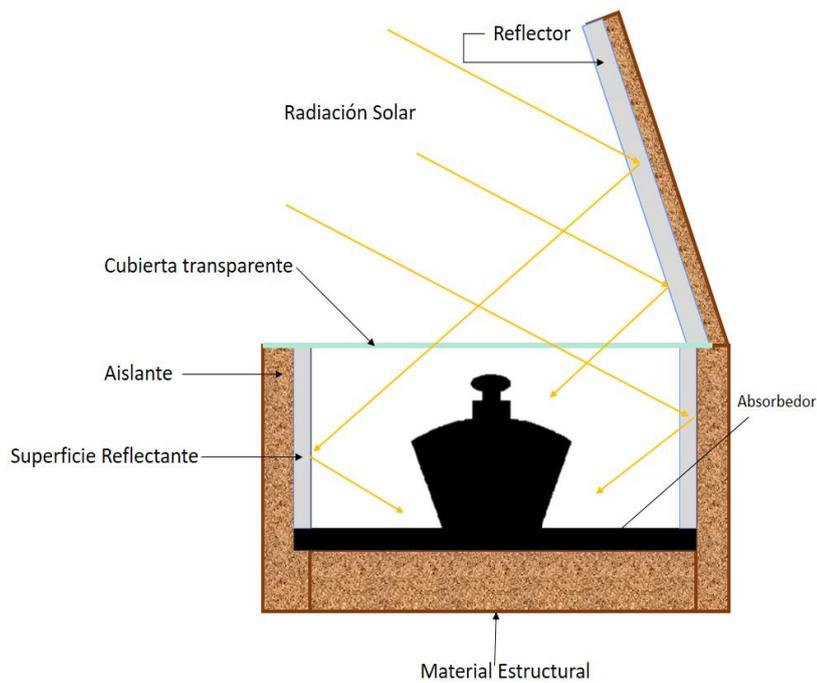


Figura 21. Partes de una estufa solar de tipo caja.

Los materiales fueron elegidos conforme su conductividad térmica (ver tabla 4), de tal manera que sirviesen como aislantes o conductores según fuese el caso.

Tabla 4. Conductividad térmica de los materiales.

| Material          | Conductividad Térmica |
|-------------------|-----------------------|
| Cartón            | 0.14-0.35 W/m K       |
| Poliestireno      | 0.037 W/m K           |
| Acero Inoxidable  | 12-45 W/m K           |
| Acero galvanizado | 47-58 W/m K           |
| Vidrio            | 1.05 W/m K            |
| Vidrio soplado    | 0.034 W/m K           |
| Cobre             | 428 m K               |

## 8.2 PERFIL DE TEMPERATURAS (PERIODO DE PRUEBA)

Para determinar la eficiencia del dispositivo fue necesario, crear un perfil de las temperaturas involucradas en el sistema, para lo cual se utilizó un termómetro digital Termopar, con el fin de evaluar la temperatura alcanzada por el sistema durante las horas solares con y sin dispositivo de destilación. A demás se monitoreó la temperatura ambiente y la radiación solar.

## 8.3 EFICIENCIA TÉRMICA GENERAL

Con el diseño óptimo de estufa solar, se realizó la evaluación del prototipo determinando la eficiencia térmica.

La eficiencia térmica general se calculó de acuerdo al siguiente modelo matemático(35):

$$\eta_u = \frac{M_w C_w}{A_c I_{av}} \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (4)$$

Donde:

$\eta_u$ = Eficiencia térmica general de la estufa solar

$M_w$  = Masa del agua (Kg)

$C_w$  = Calor específico del agua (J/kg°C)

$A_c$  = Área del colector (m<sup>2</sup>)

$\Delta_T$  = Diferencia de temperatura entre la temperatura máxima del fluido de cocción y la temperatura ambiente (°C).

$\Delta_t$  = Tiempo requerido para alcanzar la temperatura máxima del fluido de cocción (s).

## 8.4 EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES EN LABORATORIO

Uno de los objetivos de este trabajo es comparar el rendimiento y la calidad de los aceites esenciales extraídos por ambos métodos de hidrodestilación que, si bien siguen el mismo principio de extracción, los destiladores son diferentes en cuanto a su diseño y materiales.

Por lo cual se procedió a extraer aceites esenciales por el método convencional de laboratorio para el cual se eligieron las especies vegetales presentadas en la tabla 5.

*Tabla 5. Especies vegetales utilizadas*

| Nombre               | Nombre científico             | Gramos utilizados (g) |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Orégano (Hojas)      | <i>Origanum vulgare</i>       | 12.5                  |
| Naranja (Cáscaras)   | <i>Citrus sinensis</i>        | 35                    |
| Canela (Corteza)     | <i>Cinnamomum spp.</i>        | 20                    |
| Romero (Hojas)       | <i>Rosmarinus officinalis</i> | 20                    |
| Zacate Limón (Hojas) | <i>Cymbopogon citrus</i>      | 25                    |
| Laurel (Hojas)       | <i>Laurus nobilis</i>         | 20                    |
| Hierbabuena (Hojas)  | <i>Mentha piperita</i>        | 20                    |

Cada extracción se realizó por triplicado de acuerdo a la siguiente metodología:

En un matraz de fondo redondo se colocaron 125 ml de agua purificada junto con la materia vegetal a destilar (ver gramos en tabla 6). El cual, fue colocado un un sistema de destilación, de acuerdo a la figura 22.

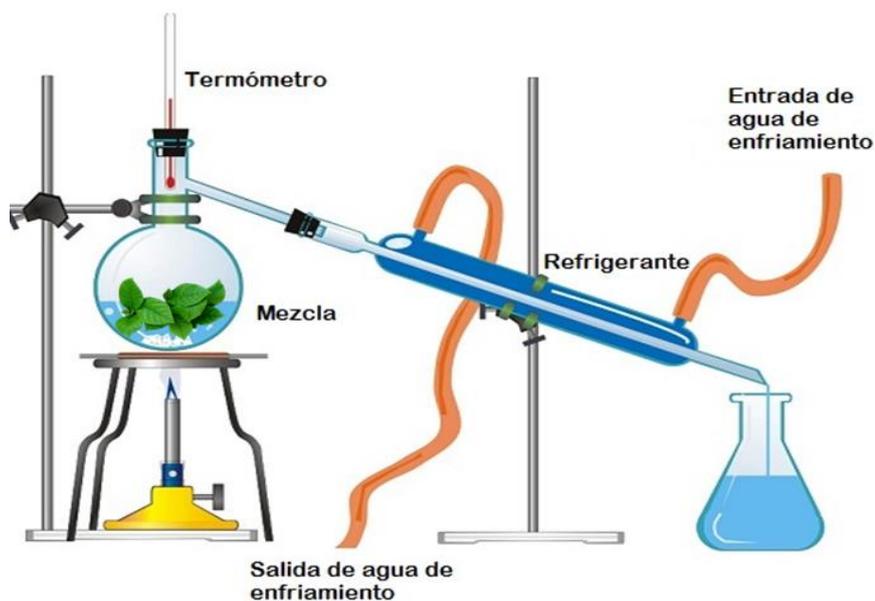


Figura 22. Material para Hidrodestilación.

Posteriormente, se elevó la temperatura del agua hasta alcanzar el punto de ebullición (98-100 °C) y manteniéndose así hasta recolectar entre 20 a 25 ml de destilado con apariencia turbia o aceitoso (corresponde a una emulsión aceite agua). El destilado obtenido fue transferido a un embudo de separación junto con  $\text{CHCl}_3$  en proporción de 3:1, por tres veces. A la fase se le adicionó sulfato de sodio anhidro para eliminar restos de agua, la muestra se almacenó en un frasco ámbar a 4°C (no más de 3 días).

## 8.5 RECUPERACIÓN DE SOLVENTE POR DESTILACIÓN SIMPLE

En un sistema de destilación simple (figura 23), se colocó la fase orgánica recuperada junto con perlas de ebullición (porcelana o vidrio); manteniendo la temperatura por debajo de los 60°C para evitar la ebullición violenta del disolvente hasta la obtención del aceite esencial, el cual fue almacenado en un frasco ámbar previamente pesado.

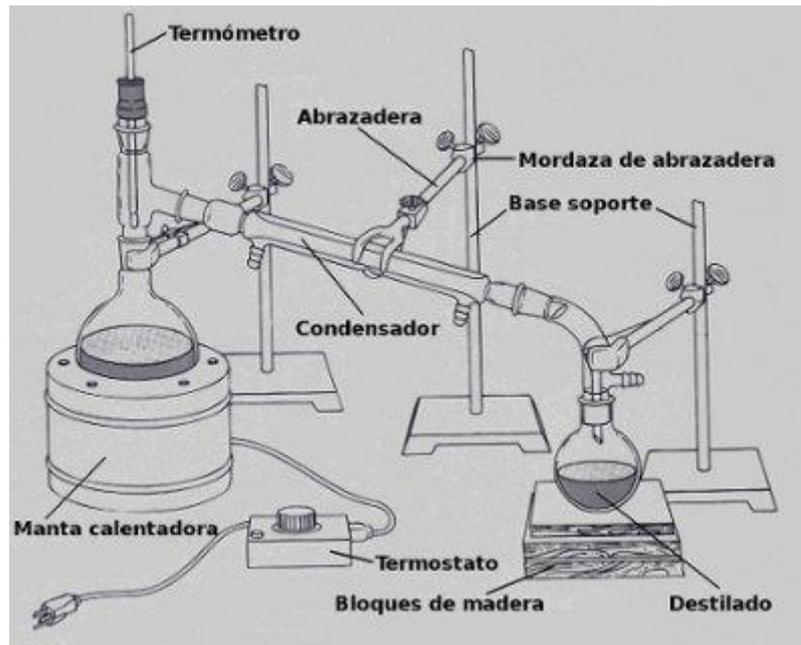
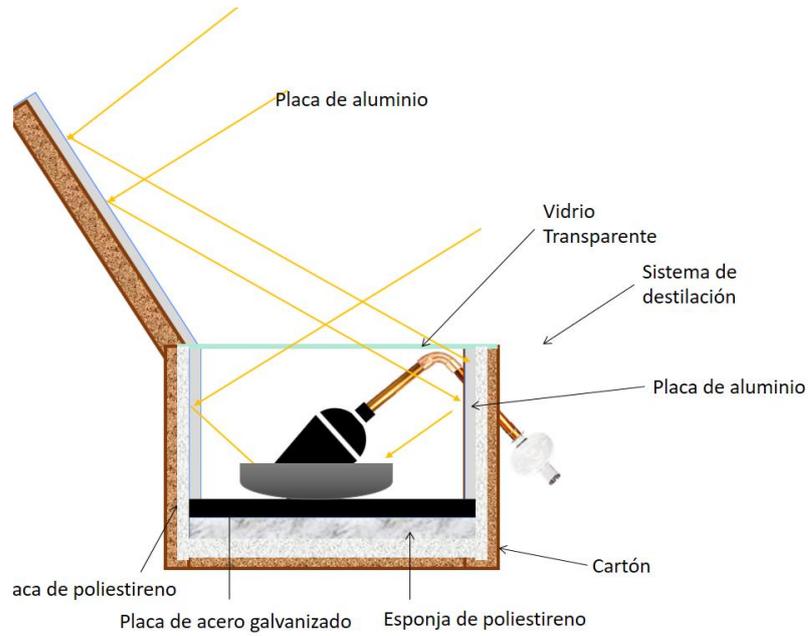


Figura 23. Aparato de destilación simple con adaptador de vacío.

## 8.6 EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES POR MEDIO DE LA ESTUFA SOLAR

Ya que el principal objetivo de este trabajo es la obtención de aceites esenciales usando energía alterna (solar) se procedió a extraer aceites esenciales usando el prototipo estandarizado de estufa solar.

En el recipiente de acero inoxidable se colocaron los gramos de la masa vegetal a destilar en trozos muy pequeños para mayor eficiencia de extracción. Se agregaron 125 ml de agua destilada/purificada al recipiente, dejándolo reposar por 15 minutos para humedecer la muestra vegetal. El recipiente tapado fue colocado en el interior de la estufa solar de tal manera que quede inclinado pero centrado en el concentrador y se conectan los tubos de condensación para la salida del vapor (figura 24 y 25).



*Figura 24. Estufa Solar con prototipo de destilador solar en funcionamiento.*



*Figura 25. Condensador del dispositivo de destilación.*

Al exponer la estufa solar directamente al sol, es necesario de una hora de precalentamiento para que el agua llegue a la temperatura optima de calentamiento y comience la evaporación. Al observar vapor en la esfera de condensación, la estufa solar permaneció de 3-4 horas al sol, reorientando la estufa solar conforme el movimiento del sol para aprovechar al máximo la radiación y obtener un máximo de destilado. El destilado obtenido, es procesado de acuerdo al apartado 1.7 y 1.8 anteriormente descrito.

## 8.7 ANÁLISIS FITOQUÍMICO POR CROMATOGRAFÍA EN CAPA FINA (CCF)

Se disolvieron 4  $\mu\text{L}$  del aceite esencial en 496  $\mu\text{L}$  de acetato de etilo hasta obtener una solución homogénea. Se tomó una alícuota y se colocó en placas cromatográficas con soporte de aluminio impregnadas con gel de sílice 60 F254, de 0.20 mm de espesor (Merck) y cortadas en el laboratorio (2 x 5 cm), utilizando la fase móvil Tolueno - Acetato de etilo (8:2). Para revelar las placas se utilizó lámpara de luz UV y soluciones de reactivo de dragendorff, vainillina - ácido sulfúrico, prueba de Salkoski,  $\text{AlCl}_3$  y DPPH que al reaccionar con los extractos toman una coloración determinada según el metabolito secundario presente en el extracto.

## 8.8 ANÁLISIS POR CROMATOGRAFÍA DE GASES (GC) DE LOS ACEITES ESENCIALES

Los análisis de composición química de los aceites esenciales se realizaron en un Cromatógrafo de gases Agilent Technologies (modelo 6890N) acoplado a un detector de ionización de llama (FID). Se utilizó una columna capilar polar HP-INNOWAX (polietilenglicol) 30 m x 0.32 mm, espesor 0.25  $\mu\text{m}$  con rango de temperatura de 40°C a 260/270°C (Agilent 19091N-133) (figura 26).



Figura 26. Cromatógrafo de gases Agilent 6890N; Columna HP-INNOWAX.

### 8.8.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

Para asegurar el buen funcionamiento del equipo, se utilizaron los parámetros mostrados en la tabla 6.

*Tabla 6. Condiciones generales de operación del GC Agilent 6890N*

| <b>Puerto de inyección</b>                 | <b>Split/Splitless</b>                                       |
|--|--|
| <b>Liner</b>                               | Split/Splitless, 4 mm i.d. con tapón de fibra de vidrio      |
| <b>Relación de Split</b>                   | 1/50   |
| <b>Flujo de Split</b>                      | 49 mL/min  |
| <b>Temperatura del puerto de inyección</b> | 250°C  |
| <b>Volumen de inyección</b>                | 1.0 µL   |
| <b>Columna</b>                             | 30 m x 0.32 mm i.d. x 0.25 mm                                |
| <b>Acarreador</b>                          | Helio  |
| <b>Presión del acarreador</b>              | 6 psi  |
| <b>Flujo del acarreador</b>                | 1 mL/min   |
| <b>Velocidad del acarreador</b>            | 35 cm/s  |
| <b>Detector</b>                            | FID (Detector de ionización de flama)                        |
| <b>Temperatura del detector</b>            | 250°C  |
| <b>Gases del detector</b>                  | Hidrógeno: 35 mL/min<br>Aire: 400 mL/min<br>Helio: 30 mL/min |
| <b>Ahorrador de gas</b>                    | Apagado  |

## 8.8.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL GC PARA CADA ACEITE ESENCIAL

Debido a que cada aceite esencial contiene diferentes metabolitos secundarios, se establecieron diferentes condiciones de temperaturas que permitieran la separación de los analitos en cuestión en base a lo reportado en la literatura.

*Tabla 7. Rampas de temperatura para cada aceite esencial*

| Aceite esencial               | Inyector           | Columna              | Rampa térmica           | Detector           |
|-------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|
| <i>Origanum vulgare</i>       | Temperatura: 240°C | Presión: 5.35 psi    | Inicial: 60°C- 2 min    | Temperatura: 250°C |
|                               | Presión: 5.35 psi  | Flujo: 0.9 mL/min    | 4°C/min - 240°C -9 min  |                    |
|                               | Flujo: 37.3 mL/min | Velocidad: 19 cm/sec | Limpieza: 250°C - 2 min |                    |
| <i>Rosmarinus officinalis</i> | Temperatura: 240°C | Presión: 5.35 psi    | Inicial: 60°C- 2 min    | Temperatura: 250°C |
|                               | Presión: 5.35 psi  | Flujo: 0.9 mL/min    | 4°C/min - 240°C -9 min  |                    |
|                               | Flujo: 37.3 mL/min | Velocidad: 19 cm/sec | Limpieza: 250°C - 2 min |                    |
| <i>Mentha piperita</i>        | Temperatura: 240°C | Presión: 5.35 psi    | Inicial: 60°C -2 min    | Temperatura: 250°C |
|                               | Presión: 5.35 psi  | Flujo: 0.9 mL/min    | 4°C/min - 240°C -9 min  |                    |
|                               | Flujo: 37.3 mL/min | Velocidad: 19 cm/sec | Limpieza: 250°C - 2 min |                    |
| <i>Citrus sinencis</i>        | Temperatura: 250°C | Presión: 5.35 psi    | Inicial: 90°C- 2 min    | Temperatura: 250°C |
|                               | Presión: 5.35 psi  | Flujo: 0.8 mL/min    | 8°C/min - 240°C -5 min  |                    |
|                               | Flujo: 32.7 mL/min | Velocidad: 17 cm/sec | Limpieza: 250°C - 2 min |                    |
| <i>Cinammomun sp</i>          | Temperatura: 250°C | Presión: 6.58 psi    | Inicial: 100°C -4 min   | Temperatura: 250°C |
|                               | Presión: 5.35 psi  | Flujo: 1 mL/min      | 5°C/min - 130°C -20 min |                    |

|                                      |                       |                         |                               |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|
|                                      | Flujo:<br>39.1 mL/min | Velocidad:<br>21 cm/sec | Limpieza:<br>140°C - 2<br>min |                       |
| <b><i>Cymbopogon<br/>citratu</i></b> | Temperatura:<br>250°C | Presión:<br>5.35 psi    | Inicial:<br>50°C -2 min       | Temperatura:<br>250°C |
|                                      | Presión:<br>5.35 psi  | Flujo:<br>1 mL/min      | 6°C/min -<br>240°C<br>-10 min |                       |
|                                      | Flujo:<br>31.9 mL/min | Velocidad:<br>19 cm/sec | Limpieza:<br>250°C - 2<br>min |                       |
| <b><i>Laurus nobilis</i></b>         | Temperatura:<br>250°C | Presión:<br>5.35 psi    | Inicial:<br>50°C -2 min       | Temperatura:<br>250°C |
|                                      | Presión:<br>5.35 psi  | Flujo:<br>1 mL/min      | 6°C/min -<br>240°C<br>-10 min |                       |
|                                      | Flujo:<br>31.9 mL/min | Velocidad:<br>19 cm/sec | Limpieza:<br>250°C - 2<br>min |                       |

Una vez establecidas las condiciones de operación para cada aceite esencial, se realizó la limpieza con flujo de aire para eliminar impurezas o trazos de analitos remanentes en la columna; después se realizó una corrida con el blanco ( $\text{CHCl}_3$ ) para arrastrar todos aquellos restos de muestras que se hayan quedado adheridos en la columna; seguido de la adición de 4  $\mu\text{L}$  de  $\text{CHCl}_3$  para obtener el espectro base y 4  $\mu\text{L}$  de la muestra a analizar. Para ello, previamente se diluyeron 4  $\mu\text{L}$  de aceite esencial en 1000  $\mu\text{L}$  de cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ).

Es necesario limpiar con  $\text{CHCl}_3$  la jeringuilla de inyección para evitar contaminar las muestras y el blanco, se purga y se equilibra 10 veces y cada vez que se tome muestra.

## **8.9 ANÁLISIS POR INFRARROJO (IR) DE ACEITES ESENCIALES**

La técnica de espectroscopia de Infrarrojo permite la identificación de grupos funcionales presentes en un compuesto. Esto debido a la absorción de la radiación infrarroja, provocando incrementar la vibración de enlaces con alto momento dipolar; generando señales con frecuencias que corresponden a la vibración de un enlace específico y así observar que tipos de compuestos son los más frecuentes en los aceites esenciales. Los espectros infrarrojos (IR) fueron obtenidos en el equipo Thermo Scientific NICOLET Is10 con dispositivo ATR.

## CAPITULO 9

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 9.1 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTUFA SOLAR

Se utilizó un contenedor de caja simple (0.32 m x 0.47 m) con altura frontal de 0.32 m y parte posterior de 0.57 m. Placa colectora 0.42 m x 0.24 m de acero galvanizado pintado en negro mate (superficie superior) para absorber los rayos solares. La espuma de poliestireno se usó como aislante con un espesor de 3 cm entre el contenedor y placas de poliestireno estirado las cuales se colocaron en cada lado del contenedor y entre el colector y el contenedor.

Todos los lados interiores de la caja fueron cubiertos con láminas de cartón recubiertos con papel de aluminio como reflector. Como cubierta transparente se colocaron dos vidrios de 3 mm de espesor (0.30 m x 0.47 m) en la parte superior de la caja separados por 5 mm entre sí. Se utilizó como reflector adicional la parte posterior de la caja, la cual fue cubierta con papel aluminio articulado en la parte superior para reflejar la radiación solar difusa presente (figura 27).

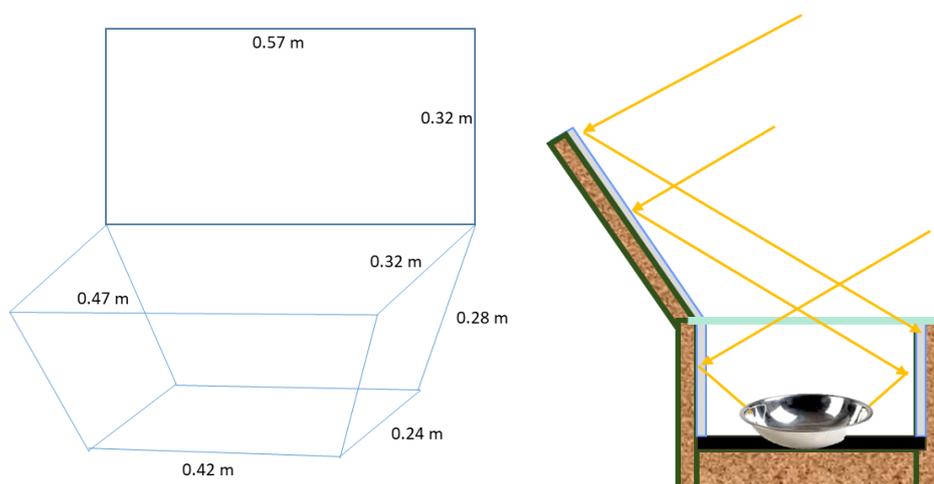
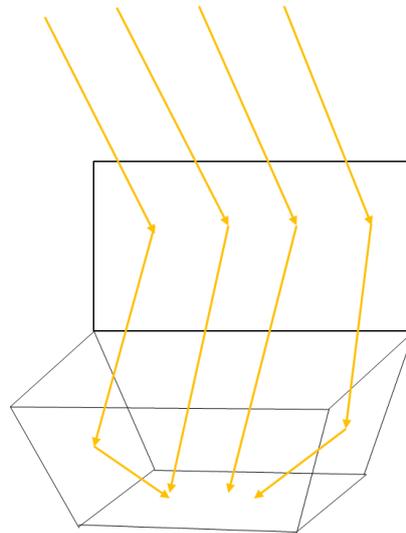


Figura 27. **Prototipo de una estufa solar de tipo caja para extraer aceites esenciales.** Medias de prototipo en metros.

## 9.2 GEOMETRÍA DE LA ESTUFA SOLAR

El diseño de la estufa solar debe permitir captar la máxima radiación solar posible y a su vez esta pueda ser re-dirigida al recipiente de cocción, el prototipo de destilador, para esto:

El tamaño de la caja cuenta con espacio suficiente para colocar el dispositivo de destilación y el concentrador parabólico, además, el tamaño permite que el movimiento y re-orientación de ésta no sea una tarea difícil. El área de captación solar, fue diseñada de tal manera que las pérdidas de calor a través de las paredes de la estufa sean mínimas, asegurando mantener altas temperaturas para el proceso. El diseño de estufa solar es rectangular (figura 28) porque al ser orientada hacia el sol del mediodía al ser más larga en la dimensión este/oeste se hace un mejor uso del reflector durante un periodo de destilación de varias horas. A medida que el sol viaja a través del cielo, esta configuración resulta en una temperatura de cocción más consistente.



*Figura 28. Diseño rectangular de la estufa solar.*

### 9.3 DISEÑO DEL REFLECTOR

Se emplean uno o más reflectores para enviar luz adicional a la estufa solar para aumentar las temperaturas de cocción. Aunque es posible cocinar con energía solar sin reflectores, los reflectores aumentan significativamente el rendimiento de la cocción.

El uso de los reflectores se basa básicamente, en que la luz del sol llegará a la estufa solar en rayos paralelos (36). Los rayos solares llegarán al reflector en un ángulo particular y luego serán re-dirigido hacia el recipiente o colector en el mismo ángulo (figura 29).



*Figura 29. El ángulo que refleja el rayo de sol en el reflector es el mismo que el ángulo en que llegó.*

Al tener en cuenta lo anterior, se debe tener en consideración que los rayos solares que se reflejan en la parte superior del reflector deben tocar su objetivo en el lado opuesto de la estufa, esto garantiza que todos los rayos sean re-dirigidos hacia la superficie objetivo (figura 30).

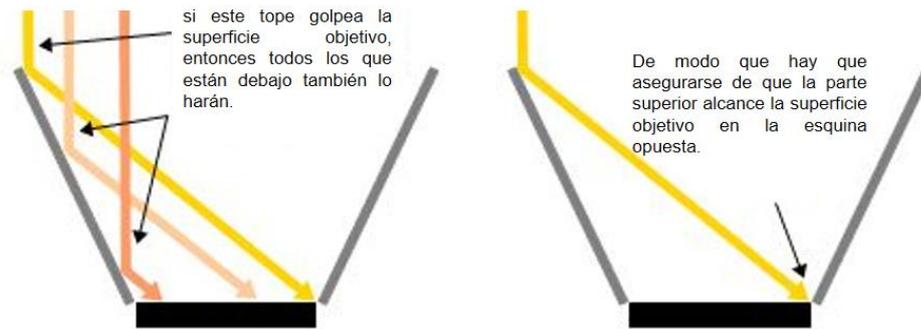


Figura 30. Dirección de los rayos solares hacia la superficie objetivo.

Para conocer el ángulo exacto al cual el reflector re-direcciona la mayor cantidad de rayos solares hacia el colector, se realizó el siguiente cálculo (37) para encontrar el ángulo óptimo del reflector, el cual permite que el reflector cubra toda el área objetivo.

$$A_i = 90^\circ + \text{Sen}^{-1} \left[ -\frac{LR}{4(AS)} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{LR^2}{AS^2} + 8} \right] \quad (1)$$

Donde:

$A_i$ = Ángulo Interno

LR= Longitud del reflector (cm)

AS= Ancho de la superficie destino (cm)

$$A_e = 180^\circ - A_i \quad (2)$$

Donde:

$A_e$ = Ángulo exterior

$A_i$  = Ángulo Interno

De tal manera que sustituyendo los datos de las medidas de la estufa solar se obtiene la estufa tipo caja de acuerdo a la figura 31.

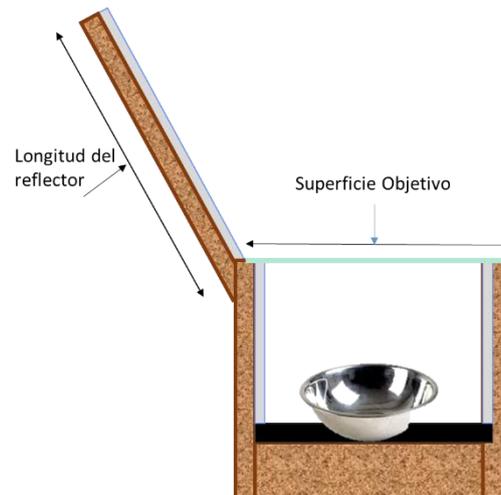


Figura 31. Ancho de la superficie objetivo y longitud del reflector.

Retomando la **ecuación # 1**:

$$A_i = 90^\circ + \text{Sen}^{-1} \left[ -\frac{27}{4(27)} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{27^2}{27^2} + 8} \right]$$

$$A_i = 90^\circ + \text{Sen}^{-1} \left[ -\frac{27}{108} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{729}{729} + 8} \right]$$

$$A_i = 90^\circ + \text{Sen}^{-1} \left[ -0.25 + \frac{1}{4} \sqrt{1 + 8} \right]$$

$$A_i = 90^\circ + \text{Sen}^{-1} \left[ -0.25 + \frac{1}{4} \sqrt{9} \right]$$

$$A_i = 90^\circ + \text{Sen}^{-1} \left[ -0.25 + \frac{1}{4} \times 3 \right]$$

$$A_i = 90^\circ + \text{Sen}^{-1} [-0.25 + 0.75]$$

$$A_i = 90^\circ + \text{Sen}^{-1} [0.5]$$

$$A_i = 90^\circ + 30^\circ = 120^\circ$$

Una vez obtenido este valor, se aplica la **ecuación # 2** y se sustituye en el valor encontrado:

$$A_e = 180^\circ - 120^\circ$$

$$A_e = 60^\circ$$

Así el ángulo óptimo del reflector es  $120^\circ$  como ángulo interno y  $60^\circ$  de manera externa (ver figura 32).

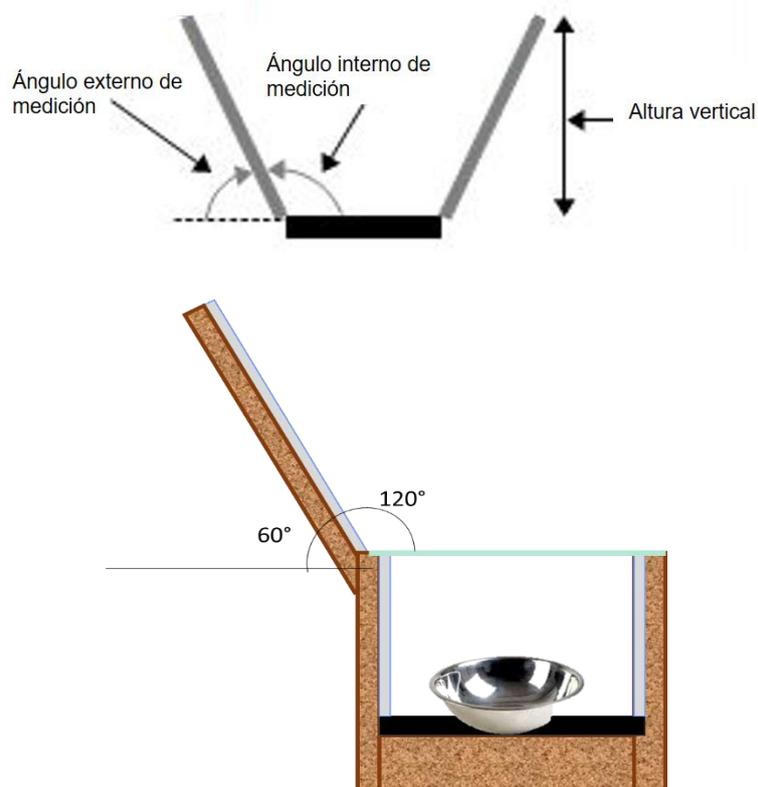


Figura 32. Ángulos del reflector.

Para mayor precisión, se calculó la altura vertical del reflector (figura 32) así se asegura una máxima captación de rayos solares, para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$AVR = \text{Sen} (Ae) \times (LR) \quad (3)$$

Donde:

AVR= Altura vertical del reflector

Ae= Ángulo exterior

LR= Longitud del reflector (cm)

Sustituyendo valores encontramos:

$$AVR = \text{Sen} (60^\circ) \times (27)$$

$$AVR = (0.8660)(27)$$

$$AVR = 23.38 \text{ cm}$$

Lo cual indica que el ángulo óptimo es de  $120^\circ$  con una elevación de 23.38 cm (ver figura 33).

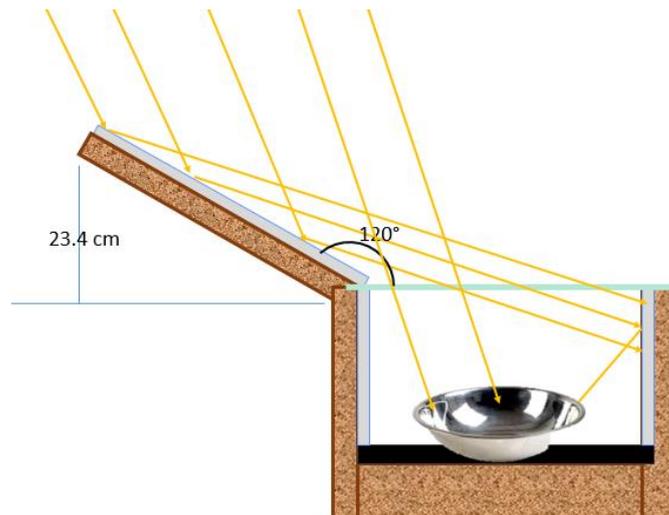


Figura 33. Diseño optimizado de la estufa solar.

## 9.4 DISPOSITIVO DE DESTILACIÓN

La mayoría de los aceites esenciales están compuestos por moléculas fotosensibles, por lo cual se construyó un prototipo de destilación (figura 34) utilizando un recipiente de acero inoxidable grado alimenticio, el cual se sella cuando es utilizado, generando un efecto invernadero mayor que el mismo que generaría por sí sola en la estufa solar. La tubería de cobre que funciona como salida de vapor se eligió por su alta conductividad térmica y mantenga el agua en fase gaseosa hasta el condensador, el condensador es una esfera de vidrio soplado que permite un enfriamiento rápido del vapor para condensarse en líquido rápidamente lo cual permite una recolección más rápida de la muestra sin utilizar energía adicional para este propósito (ver conductividades térmicas en tabla 4).



*Figura 34. Propuesta de hidrodestilador solar.*

## 9.5 PERFIL DE TEMPERATURAS

Primero se realizaron pruebas con solo agua para medir las temperaturas alcanzadas por la estufa solar y el agua dentro del dispositivo de destilación, logrando temperaturas altas por más tiempo poco más de 100°C por lo menos 1 hora (figura 35) con la generación de vapor a partir de los 70°C.

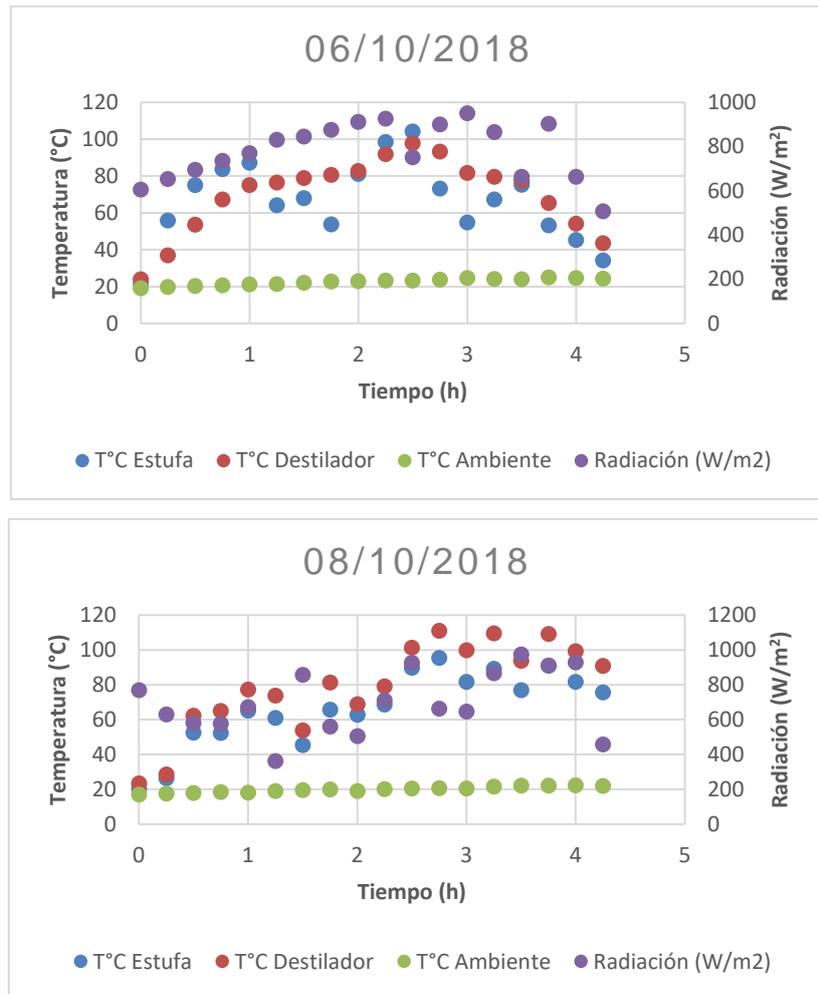


Figura 35. Temperaturas registradas durante el proceso de destilación con 175 ml de agua.

Una vez alcanzada la temperatura adecuada, se procedió a hacer una prueba de destilación con materia vegetal, de tal manera, que se cargaron 12.5 g de Orégano con 175 mL de agua. Con lo cual, se logró obtener un volumen significativo de destilado similar al que se obtiene en laboratorio: 15 mL (figura 36).

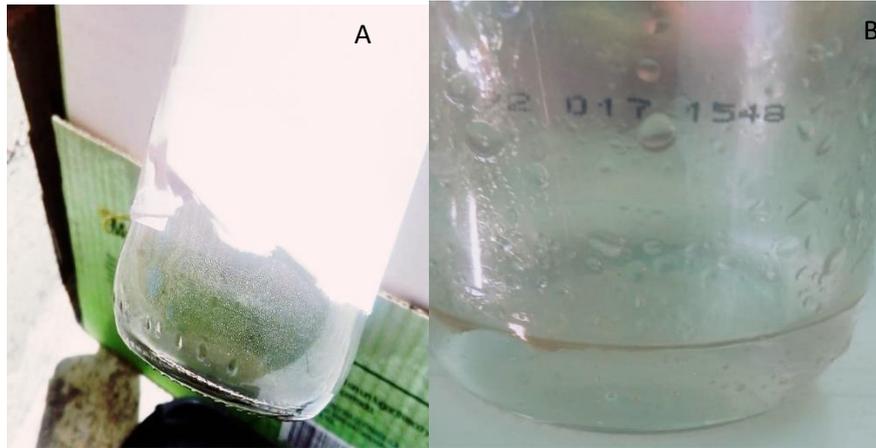


Figura 36. Destilado obtenido. (A) Formación de gotas de vapor condensado en las paredes del frasco (B) Volumen de destilado final agua + aceite esencial de orégano. Nota: Del destilado obtenido no se obtuvo el aceite esencial debido a contaminación de la muestra.

Al obtener volúmenes deseados del destilado, se construyeron 2 réplicas de la estufa solar bajo las mismas especificaciones para poder obtener triplicados de muestra por día (figura 37).



Figura 37. Prototipos de estufa solar con sistema de destilación para extracción de aceites esenciales.

El monitoreo de la temperatura alcanzada con carga para los tres dispositivos de estufa solar, con 175 mL de agua sin carga vegetal, mostraron máximos de temperatura similares y oscilando entre 85-90°C (figura 38).

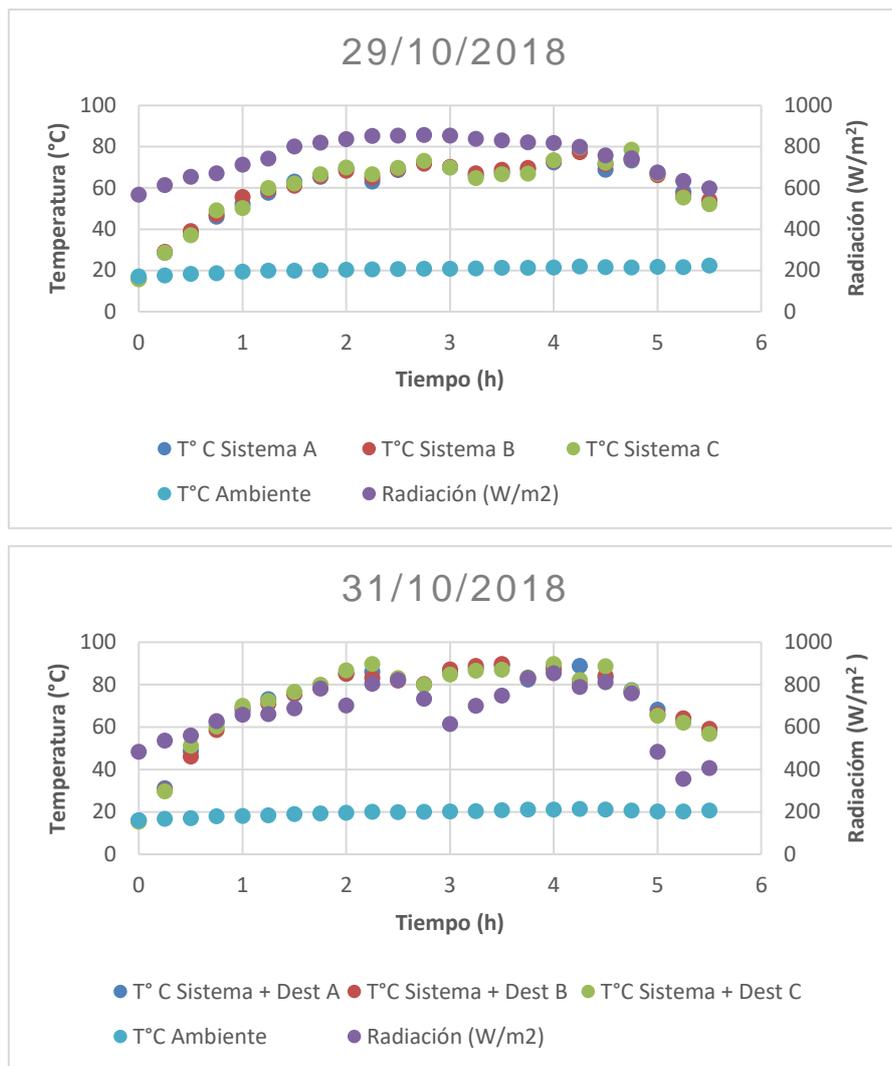


Figura 38. Temperaturas registradas por las tres estufas solares en simultaneo con 175 mL de agua dentro del destilador. Nota: Debido al cambio de horario el monitoreo comenzó a las 9 am terminando a las 14:30 pm por cuestiones de sombreado en el área de trabajo, además del cambio en la declinación solar.

Una vez estandarizadas las temperaturas en las estufas solares, se procedió a extraer aceite esencial; cada dispositivo de destilación se cargó con 175 mL de agua purificada y  $12.5 \pm 0.3$  g de orégano, se monitoreó la temperatura alcanzada por las estufas solares durante el proceso de destilación, pero no la temperatura alcanzada en el interior de los destiladores debido a que están sellados completamente para evitar pérdidas de vapor; alcanzando valores máximos de 70 a 80°C, en un día parcialmente nublado y de 85 a 95°C, en un día completamente soleado (figura 39).

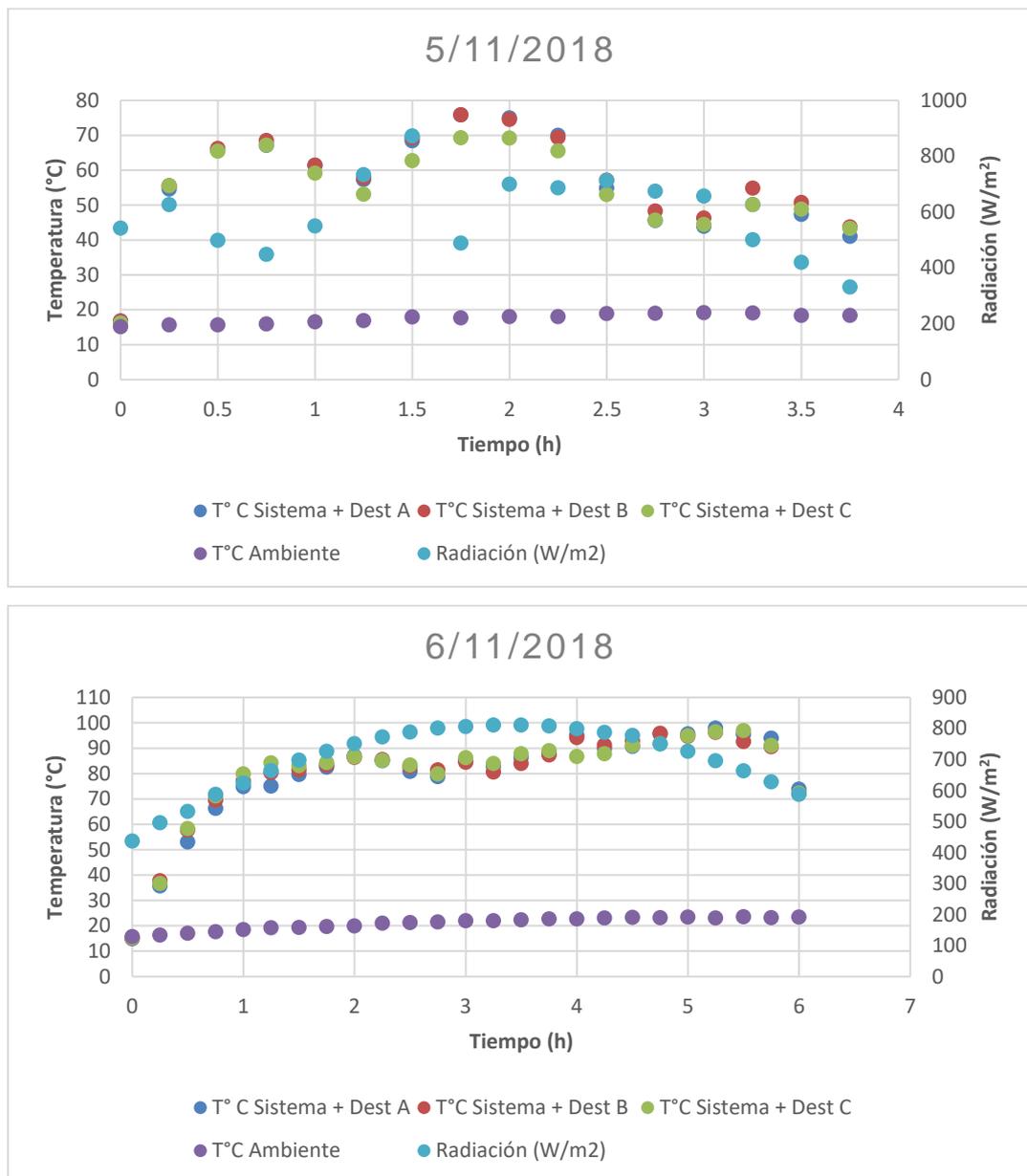


Figura 39. Temperaturas registradas por las tres estufas solares en simultaneo con 175 ml de agua + 12.5 ± 0.3 gr de orégano dentro del destilador en dos de las estufas y en otra solo 175 ml de agua para evaluar la calidad del destilado. Nota: Debido al cambio de horario el monitoreo comenzó a las 9 am terminando a las 14:30 pm por cuestiones de sombreado en el área de trabajo, además del cambio en la declinación solar.

El primer día de prueba con carga vegetal no se obtuvo un volumen de destilado significativo debido a las variaciones en la radiación solar, dadas por las condiciones climáticas. El segundo día de prueba totalmente soleado, se obtuvieron volúmenes de destilado similares a laboratorio, sin embargo, el aceite de orégano resultó contaminado con partículas desconocidas que le otorgaron

un color café intenso al aceite, en comparación con una muestra de laboratorio, notándose una marcada diferencia en los extractos (figura 40).



*Figura 40. Muestras de destilado obtenidas de estufa solar. Derecha, se observa las tres muestras obtenidas; dos de aceite esencial de orégano y una tercera de solo agua, se aprecia por la coloración restos de cobre. Izquierda aceite esencial sobre el agua con partículas de cobre dada la coloración, en el fondo un precipitado de cobre.*

Al obtener muestras contaminadas, no se pudo obtener un rendimiento para compararlo con el del laboratorio, por lo cual se procedió a repetir el procedimiento para obtener el aceite esencial.

## 9.6 EFICIENCIA TÉRMICA GENERAL

Para calcular la eficiencia térmica general del dispositivo solar, se tomó el tiempo que tardó el agua en llegar a su máxima temperatura, así como la variación de la temperatura en el colector. A su vez se registró la temperatura ambiente y radiación solar. De tal manera que se obtuvieron las eficiencias mostradas en la tabla 8.

*Tabla 8. Eficiencia de la estufa solar.*

| <b>Día de prueba</b> | <b>% Eficiencia</b> |
|----------------------|---------------------|
| 29/01/2019*          | 23.94%              |
| 30/01/2019**         | 11.67%              |
| 01/02/2019***        | 17.74%              |
| 05/02/2019***        | 15.35%              |
| 06/02/2019**         | 11.28%              |
| 08/02/2019***        | 18.45%              |
| 11/02/2019***        | 15.36%              |
| 15/02/2019*          | 24.83%              |
| 16/02/2019*          | 21.51%              |

Día totalmente soleado \*, Día mayormente nublado \*\*, Día parcialmente nublado \*\*\*

La baja eficiencia de la estufa solar tipo caja podría atribuirse a pérdidas de calor en el entorno debido al gradiente de temperaturas, sobre todo, tomando en cuenta que cada día toma un tiempo diferente llevar el agua hasta un máximo de temperatura, a causa de la variada radiación incidente (días mayormente nublados) en los días de monitoreo, temperaturas bajas registradas en los últimos días por la estación del año (invierno); Sin embargo, podemos ver un incremento de la eficiencia cuando los días\* son totalmente soleados.

El incremento en la eficiencia se atribuye a una redirección de los rayos solares directos hacia el interior de la estufa solar ya que en días nublados la radiación difusa que si bien proporciona energía suficiente para calentar el agua lo hace

en un periodo de tiempo más largo, en cambio, la radiación directa concentra energía de manera más rápida, lo que incrementa la eficiencia de la estufa solar, de tal manera que la eficiencia tiene una relación directa con la radiación solar.

De acuerdo con (38) las eficiencias de las estufas solares tipo caja van de 3.2% a 36% lo cual nuestro modelo está dentro del rango relativamente funcional, lo cual hace que sea óptimo para el proceso a desarrollar.

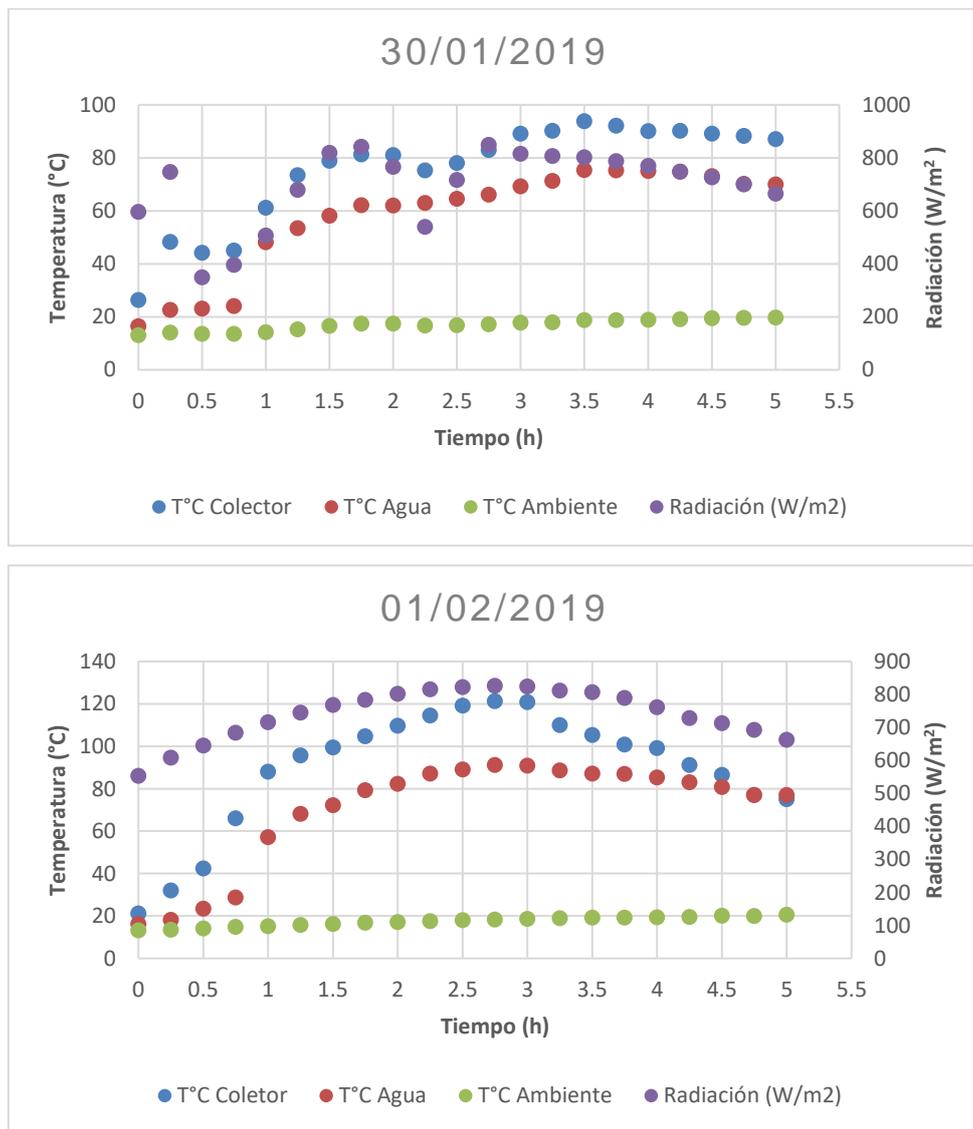


Figura 41. Comportamiento de temperaturas registradas en diferentes días bajo diversas condiciones climáticas.

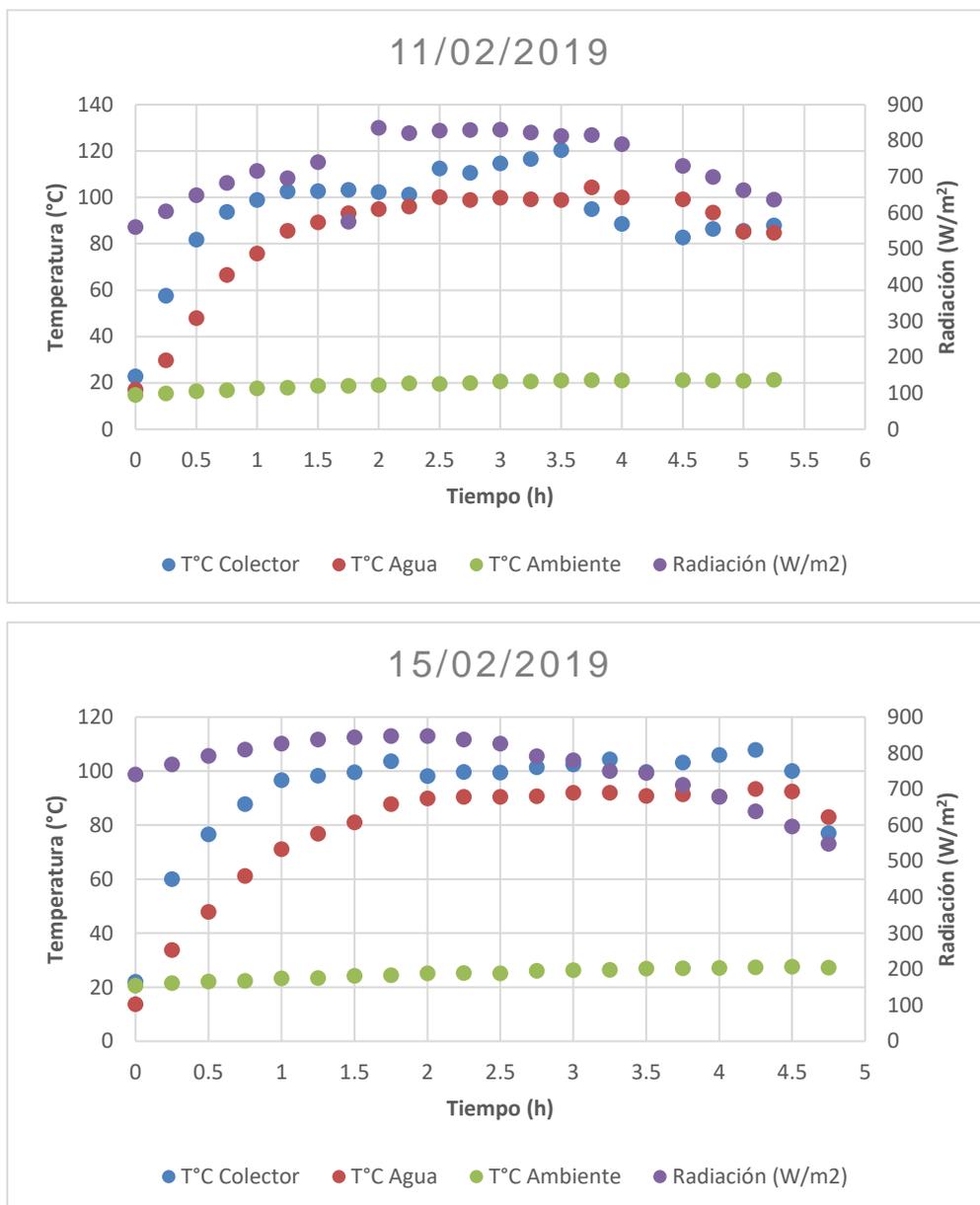


Figura 42. Comportamiento de temperaturas registradas en diferentes días bajo diversas condiciones climáticas.

De acuerdo con los datos obtenidos en las gráficas (figura 41 y 42), se observa el incremento de temperaturas tanto del colector como del agua en función de la radiación solar; sin embargo, a pesar de esto, si se compara con la eficiencia calculada, ésta disminuye, debido a que cada día elevar la temperatura del agua de temperatura ambiente a la temperatura máxima alcanzada, se lleva un periodo de tiempo diferente lo que influye también en la eficiencia (además de la radiación directa).

Por otra parte, a pesar de existir un ambiente frío que provoca un calentamiento lento del agua y la pérdida del calor mismo, la temperatura óptima para lograr la destilación, fue alcanzada y mantenida por lo menos 3 horas, aunque con eficiencia baja a pesar de tener una radiación constante (tabla 5 y figura 41). Sin embargo, no es suficiente para el proceso ya que entre más se tarde en calentar el agua, menos se aprovechará al máximo las horas solares con mayor radiación, por lo que el volumen de destilado será menor y por consecuencia el rendimiento del aceite esencial disminuirá.

Una vez calculada la eficiencia alcanzada por el modelo se procedió a buscar el volumen óptimo de agua con el cual se obtienen las temperaturas óptimas por más tiempo con lo cual se monitoreó la temperatura de diferentes volúmenes de agua durante días completamente soleados para observar el comportamiento de estos (figura 43).

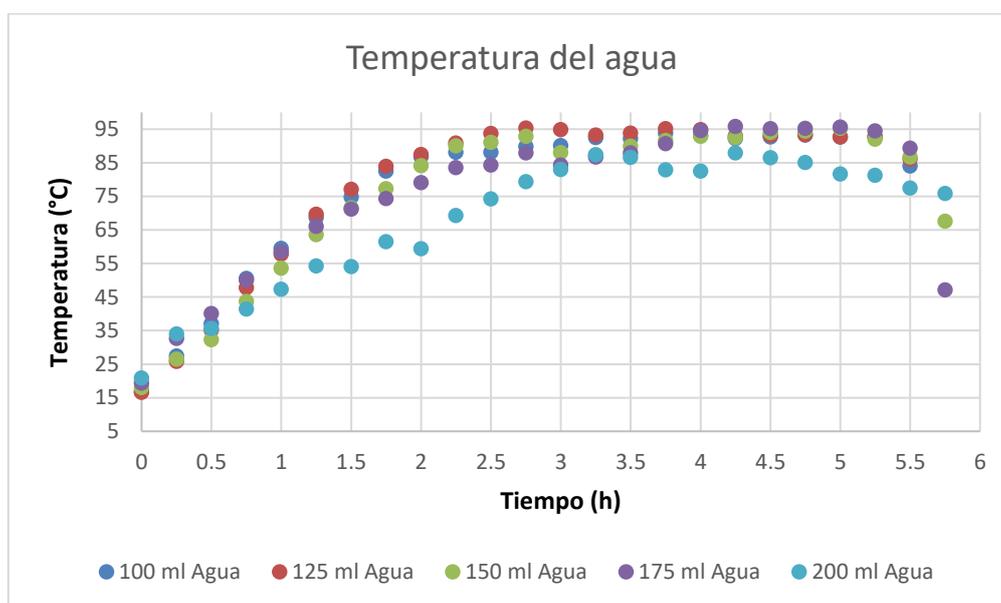


Figura 43. Comportamiento de temperaturas registradas con diferentes volúmenes de agua.

Los resultados en la figura 43, no muestran diferencias significativas en los valores de temperaturas registradas para 100, 125 y 150 mL de agua, sin embargo, la producción de vapor se mantiene con mayor estabilidad con 125 mL de agua, para un clima frío, mientras para un clima cálido, con 175 mL de agua es posible la formación de vapor de manera constante.

## 9.7 RENDIMIENTO DE LOS ACEITES ESENCIALES

Una vez recuperado el aceite esencial, se deja reposar a temperatura ambiente para asegurar que los restos del disolvente volatilicen y permanezca sólo la muestra. El cálculo del rendimiento, se realizó utilizando la siguiente relación matemática:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{g aceite obtenido}}{\text{g masa vegetal}} \times 100 \quad (4)$$

De esta forma, se obtuvieron los valores de rendimiento, mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. % Rendimiento de los aceites esenciales por ambos métodos

| <i>Planta</i>                 | <i>% Rendimiento Laboratorio</i> | <i>% Rendimiento Estufa Solar</i> | <i>% Rendimiento reportado</i>                            |
|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| <i>Origanum vulgare</i>       | 1.84<br>1.44<br>1.28             | 1.52<br>1.52<br>0.84              | 0.4-1.6 (39)  |
| <i>Citrus sinensis</i>        | 0.40<br>0.36<br>0.46             | 0.14<br>0.28<br>0.16              | 0.24 (40)   |
| <i>Cinammomun sp.</i>         | 0.79<br>0.70<br>0.79             | 0.75<br>0.50<br>0.73              | 0.96-1.1 (41)   |
| <i>Rosmarinus officinalis</i> | 1<br>0.8<br>0.8                  | 0.6<br>0.75<br>0.9                | 0.33-1.47 (42)  |
| <i>Cymbopogon citratus</i>    | 1.56<br>0.8<br>1.04              | 0.7<br>0.89<br>0.4                | Método Laboratorio:<br>1.30<br>Método Solar: 1.28<br>(43) |
| <i>Laurus nobilis</i>         | 0.66<br>0.68<br>0.70             | 0.95<br>0.61<br>0.80              | 0.87-2.1 (44)   |
| <i>Mentha piperita</i>        | 0.25<br>0.25<br>0.35             | 0.35<br>0.38<br>0.34              | 0.69-2.33 (45)  |

De acuerdo a los datos encontrados en la literatura de las plantas utilizadas, existe una variación marcada en los valores de rendimiento aquí obtenidos (ver tabla 8), a pesar de utilizar condiciones similares. Sin embargo, las variaciones no corresponden solamente a las buenas prácticas del laboratorio, sino también

a la variación propia de la planta: cambio genético, la variedad de plantas, la nutrición, la aplicación de fertilizantes, la ubicación geográfica, el clima circundante, las variaciones estacionales, el estrés durante el crecimiento o la madurez, el secado y almacenamiento después de la cosecha (16) y la técnica de extracción utilizada así como su desarrollo. Aunado a ello, algunos procesos de extracción de aceites esenciales se realizan a partir del material vegetal fresco, como es el caso de las cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) que utiliza presión en frío, aunque ya se han reportado extracciones de cáscaras secas deshidratadas en horno mejorando el rendimiento de extracción (40) ya que las muestras en fresco por hidroestilación también mostraron rendimientos bajos.

En el caso del aceite esencial a partir de *Cymbopogon citratus* el rendimiento obtenido por el dispositivo solar aquí empleado, disminuyó con respecto al obtenido en el laboratorio, el cual contrasta con los valores obtenidos por Yuan y colaboradores (43), laboratorio y energía solar (captación por paneles solares y transformado en energía eléctrica). No obstante, se realizó un calentamiento directo del dispositivo, por lo que depende mucho de las condiciones climatológicas.

Por otro lado, se ha reportado que la cantidad y calidad de aceite esencial se ve afectada por la estación del año en que se coseche la planta y se extraiga el aceite esencial, como es el caso del aceite esencial de *Laurus nobilis*. Bahmanzadegan y colaboradores (44) reportan la variación del rendimiento de la extracción así como el contenido de los metabolitos principales presentes en el aceite esencial dependiente de la época del año.

Para comparar los métodos de extracción utilizados, se aplicó el análisis estadístico T-Student para los triplicados de cada extracción, mostrando las posibles diferencias en el método de extracción (tabla 10).

Tabla 10. Análisis estadístico de las extracciones.

| Aceite esencial               |     | Me    | DS    | Prueba T |
|-------------------------------|-----|-------|-------|----------|
| <i>Origanum vulgare</i>       | Lab | 1.52  | 0.288 | 0.4654   |
|                               | ES  | 1.29  | 0.392 |          |
| <i>Citrus sinensis</i>        | Lab | 0.4   | 0.05  | 0.015*   |
|                               | ES  | 0.19  | 0.75  |          |
| <i>Cinammomun sp.</i>         | Lab | 0.76  | 0.051 | 0.3077   |
|                               | ES  | 0.66  | 0.138 |          |
| <i>Rosmarinus officinalis</i> | Lab | 0.86  | 0.115 | 0.3458   |
|                               | ES  | 0.75  | 0.15  |          |
| <i>Cymbopogon citratus</i>    | Lab | 1.13  | 0.388 | 0.1517   |
|                               | ES  | 0.66  | 0.24  |          |
| <i>Laurus nobilis</i>         | Lab | 0.68  | 0.02  | 0.3421   |
|                               | ES  | 0.786 | 0.17  |          |
| <i>Mentha piperita</i>        | Lab | 0.283 | 0.057 | 0.1072   |
|                               | ES  | 0.356 | 0.02  |          |

Me: Media, DS: Desviación estándar; \* P<0.05

De acuerdo a los valores obtenidos en el análisis estadístico, la extracción del aceite esencial de naranja empleando la estufa solar, fue el método menos adecuado (figura 44); no obstante, para el resto de las extracciones no presentó diferencia significativa entre uno u otro método (tabla 10).

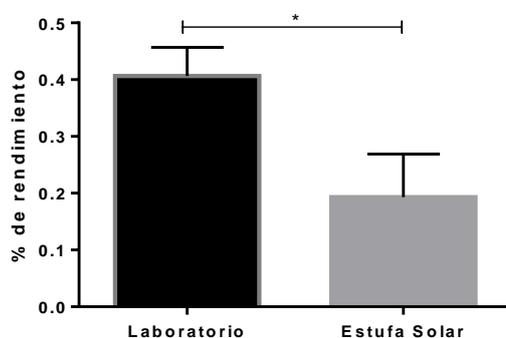


Figura 44. Rendimiento del aceite esencial de *Citrus sinensis*. Se observa que en especies donde se utiliza el material vegetal en fresco el método de extracción por medio de estufa solar no es mejor que el método convencional de laboratorio, mostrando una diferencia significativa marcada de acuerdo al rendimiento obtenido.

En algunos casos, las extracciones de los aceites esenciales mostraron tendencias a favor del método por medio del uso de la estufa solar, sin embargo, se tendrían que realizar mayor número de extracciones para poder corroborar esta tendencia a favor de dicho método, como es el caso de los aceites esenciales de *Laurus nobilis* o la *Mentha piperita* (figura 45).

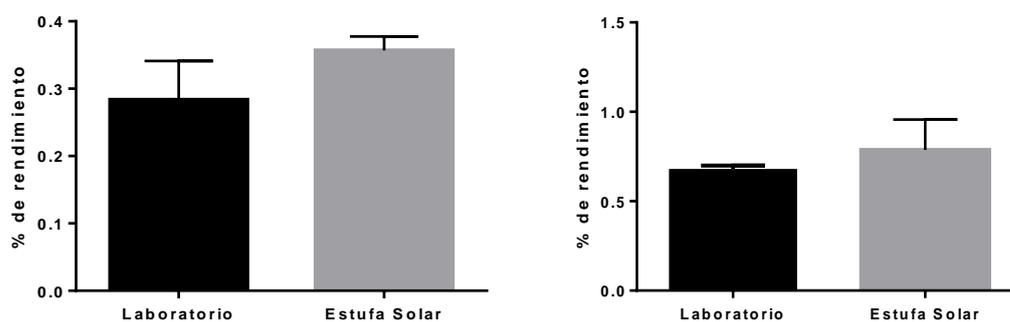


Figura 45. Rendimientos de los aceites esenciales de *Mentha piperita* y *Laurus nobilis* respectivamente. Se observa una tendencia a un mejor rendimiento por el método de extracción de estufa solar.

## 9.8 CÁLCULO DEL CONSUMO DE ENERGÍA

Para evaluar el impacto ambiental producido por realizar extracciones por hidrodestilación en laboratorio, se utilizó la siguiente ecuación de consumo de energía (46):

$$\text{Energía Consumida (kWh)} = \frac{P \times T}{1000} \quad (5)$$

Donde:

P= Potencia consumida en el proceso de extracción (W)

T= Tiempo de extracción (h)

La potencia consumida en el proceso de extracción por la mantilla de calentamiento utilizada es de 250 W y la bomba de recirculación utiliza 8 W según la información del fabricante en un proceso que dura 3 horas, por lo que sustituyendo en la ecuación 5 tenemos:

$$\text{Energía Consumida (kWh)} = \frac{(250 + 8 \text{ W}) \times 3 \text{ h}}{1000}$$

$$\text{Energía Consumida (kWh)} = \frac{258 \text{ W} \times 3 \text{ h}}{1000}$$

$$\text{Energía Consumida (kWh)} = \frac{774 \text{ Wh}}{1000}$$

$$\text{Energía Consumida (kWh)} = 0.774 \text{ kWh}$$

Utilizando la fórmula en cada extracción de aceites esenciales por triplicado se obtienen los resultados mostrados en la tabla 11.

*Tabla 11. CO<sub>2</sub> producido en relación con la energía consumida en el proceso.*

| <b>Planta</b>                 | <b>Tiempo de destilación (h)</b> | <b>Energía Consumida (kWh)</b> | <b>CO<sub>2</sub> Producido (g/kWh)</b> |
|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| <i>Origanum vulgare</i>       | 3                                | 0.774                          | 677.25                                  |
| <i>Citrus sinensis</i>        |                                  |                                |   |
| <i>Cymbopogon citrus</i>      |                                  |                                |   |
| <i>Rosmarinus officinalis</i> |                                  |                                |   |
| <i>Cinnamomum spp.</i>        | 2                                | 0.516                          | 451.5                                   |
| <i>Laurus nobilis.</i>        |                                  |                                |   |
| <i>Mentha piperita</i>        |                                  |                                |   |
| Total triplicado              | 54 h                             | 13.932 kWh                     | 12.1905 Kg                              |

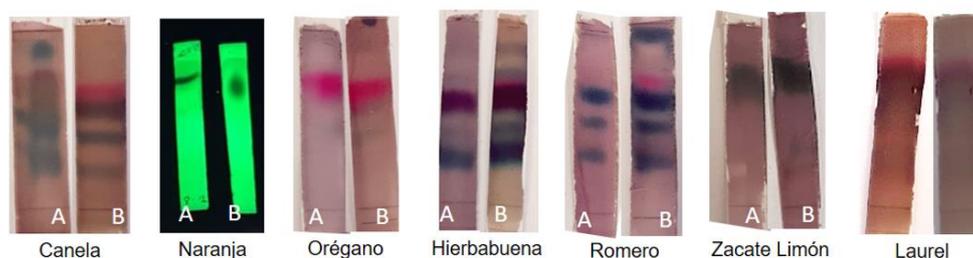
De acuerdo con Yu (47), el coeficiente de emisión de carbono es de 875 g por 1 kWh de energía consumida; siendo el CO<sub>2</sub> es el principal compuesto de emisión de gases de efecto invernadero y el de emisión directa con mayor abundancia. Por lo cual, la relación de emisión para cada extracción corresponde a 677.25 g de CO<sub>2</sub> emitidos en cada extracción (tabla 11) con duración de 3 horas, mientras que 451.5 g de CO<sub>2</sub> por cada extracción por 2 horas. Por consiguiente, para cada extracción que se realizó por triplicado, se generaron 2 kg de CO<sub>2</sub> por planta, con lo cual en total de las extracciones generaron 12 kg de CO<sub>2</sub>, más lo que no se contabiliza por errores en la ejecución de la técnica.

## 9.9 ANÁLISIS FITOQUÍMICO CUALITATIVO

Complementario a los objetivos aquí propuestos, se realizó el análisis fitoquímico de los aceites obtenidos, con la finalidad de evaluar cualitativamente la calidad del aceite obtenido, descartando cualquier efecto de degradación provocado por la radiación solar. Mostrando los siguientes resultados.

### 9.9.1 VAINILLINA EN ÁCIDO SULFÚRICO 98%P/V

La prueba con vainillina (48), permite determinar la presencia de taninos en la muestra, observándose como una mancha roja intensa, así como algunos compuestos terpénicos, azul-violeta (49). Para el cual, se utilizó el método comúnmente empleada: se disolvieron 4g de vainillina en 100mL de ácido sulfúrico concentrado en la cabina de extracción. Se aplicó sobre la placa cromatografía ya desarrollada y se calentó a 105°C en el horno por 5 min para revelar los metabolitos secundarios presentes. La formación de puntos violeta sobre la placa da positivo para compuestos terpénicos.



*Figura 46. Metabolitos presentes en cada aceite esencial. A representa muestras extraídas en laboratorio y B representa muestras extraídas por estufa solar. Solo el aceite esencial de naranja se observan las bandas con luz UV directamente sin aplicar calor.*

Una vez reveladas las placas cromatograficas, se calcula el Rf; El símbolo Rf significa “Relación de frentes” (figura 47), es una relación de distancias, y se expresa como el cociente entre la distancia recorrida por la sustancia y la distancia recorrida por el disolvente hasta el frente del eluyente.

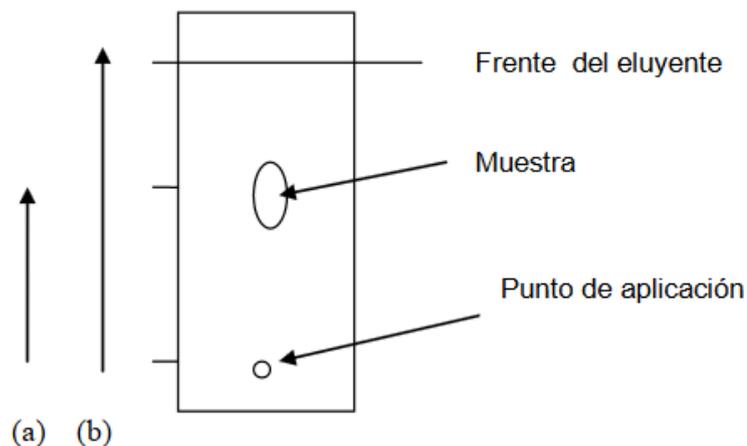


Figura 47. Cromatografía en capa fina.

$$Rf = \frac{\text{(a) Distancia que recorre la muestra desde el punto de aplicación}}{\text{(b) Distancia que recorre el disolvente hasta el frente del eluyente}} \quad (6)$$

El valor de Rf depende de las condiciones en las cuales se corre la muestra: tipo de adsorbente, eluyente, así como las condiciones de la placa, temperatura, vapor de saturación, etc. Tiene una reproducibilidad de  $\pm 20\%$ , por lo que es mejor correr duplicados de la misma placa.

Tabla 12. **Relación de frentes.** Metabolitos presentes en cada aceite esencial

| Materia Vegetal         | Rf          |              | Materia Vegetal               | Rf          |              |
|-------------------------|-------------|--------------|-------------------------------|-------------|--------------|
|                         | Laboratorio | Estufa Solar |                               | Laboratorio | Estufa Solar |
| <i>Origanum vulgare</i> | 0.71        | 0.67         | <i>Rosmarinus officinalis</i> | 0.29        | 0.21         |
|                         | 0.48        | 0.46         |                               | 0.48        | 0.46         |
|                         |             | 0.54         |                               | 0.64        | 0.58         |
| <i>Citrus sinensis</i>  | 0.82        | 0.81         |                               | 0.98        | 0.69         |
|                         |             |              |                               |             | 0.92         |
| <i>Cinammomun sp.</i>   | 0.91        | 0.63         | <i>Laurus nobilis</i>         | 0.26        | 0.26         |
|                         | 0.8         | 0.55         |                               | 0.42        | 0.46         |
|                         | 0.65        | 0.38         |                               | 0.55        | 0.6          |
|                         | 0.51        | 0.2          |                               | 0.71        | 0.78         |
|                         | 0.25        |              |                               |             |              |
| <i>Mentha piperita</i>  | 0.22        | 0.35         | <i>Cymbopogon citratus</i>    | 0.14        | 0.2          |
|                         | 0.38        | 0.45         |                               | 0.28        | 0.31         |
|                         | 0.57        | 0.64         |                               | 0.68        | 0.72         |
|                         | 0.71        | 0.74         |                               | 0.85        | 0.91         |
|                         | 0.85        | 0.88         |                               |             |              |

En general,  $R_f$  encontrados en los experimentos realizados por CCF presentan poca similitud en cuanto a los reportados en la literatura, lo cual es por el cambio de fase móvil pues se obtuvo mejor separación de compuestos con la relación Tolueno/Acetato de etilo 8:2 que con otras fases móviles que se sugerían en la literatura.

### 9.9.2 REACTIVO DE DRAGGENDORF

Todos los aceites esenciales fueron analizados por CCF para determinar la presencia de alcaloides. Las manchas color naranja oscuro se monitorearon por 24 h y si aún permanecían igual, la prueba se tomó como positiva.

El método tradicional sugiere realizar lo siguiente: Se prepararon dos soluciones A y B; La solución A se preparó disolviendo 0.85 g de subnitrato de bismuto en una mezcla v/v de 10 mL de ácido acético glacial y 40 mL de agua destilada. La solución B se preparó disolviendo 8 g de yoduro de potasio en 20 mL de agua destilada. El reactivo de Dragendorff se preparó mezclando 5 mL de disolución A con 5 mL de disolución B más 20 mL de ácido acético glacial y se aforó a 100 mL con agua destilada. El reactivo de Dragendorff se utilizó como revelador en CCF.

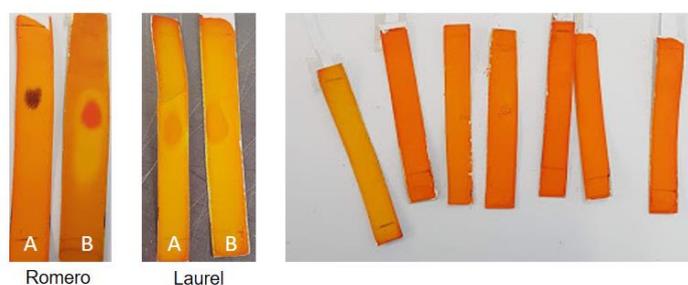


Figura 48. **Alcaloides.** A representa muestras extraídas en laboratorio y B representa muestras extraídas por estufa solar. De las cuales solo dio positivo el aceite esencial de *Rosmarinus officinalis* con una presencia bastante marcada  $R_f$  0.66 y  $R_f$  0.60 respectivamente y una presencia tenue en el aceite esencial de *Laurus nobilis*  $R_f$  0.53 y  $R_f$  0.56 respectivamente.

En el aceite esencial de *Rosmarinus officinalis* se ha descrito en la literatura la presencia de la Rosmaricina el alcaloide encontrado en mayor proporción en los extractos(50) hasta un 0.33%, sin embargo, dependerá del tipo de extracto. Al igual que en aceite esencial de Romero, el de Laurel también presenta alcaloides en su composición tal como algunos autores reportan en la literatura(51), sin embargo, no se identificaron (figura 48).

Para el resto de los aceites esenciales obtenidos, la cantidad de alcaloides fueron mínimas, por lo que no fue posible determinar su contenido en ellas.

### **9.9.3 CAPACIDAD ANTIOXIDANTE (DPPH)**

Para determinar la presencia de polifenoles presentes en los aceites esenciales, se utilizó el radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (CAS: 1898-66-4) también conocido como DPPH para llevar a cabo la presencia de polifenoles. Se preparó una solución de DPPH 0.4 mM, pesando 0.001 g de DPPH y disolviendo poco a poco en alcohol etílico absoluto (EtOH), para un volumen final de 1 mL. La disolución se guardó al abrigo de la luz y se refrigeró inmediatamente después de ser preparada.

Una vez desarrolladas las placas cromatograficas se aplicó la solución de DPPH 0.4 mM, para observar de manera inmediata la aparición de manchas amarillas que indican presencia de polifenoles.

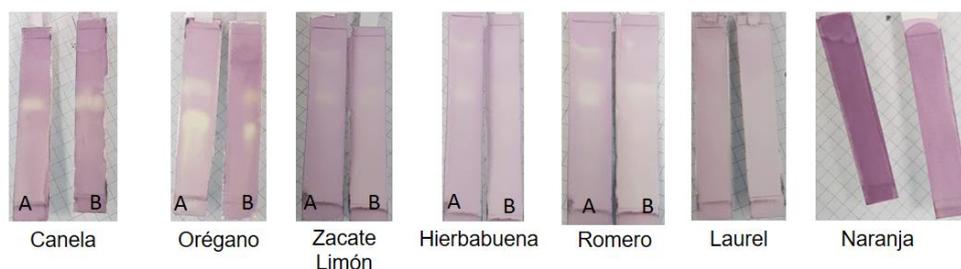


Figura 49. **Polifenoles.** A representa muestras extraídas en laboratorio y B representa muestras extraídas por estufa solar.

En el aceite esencial de canela solo apareció una banda para ambos casos presentando Rf 0.53 y Rf 0.48 respectivamente, para el caso del aceite esencial de *Origanum vulgare* aparecieron dos bandas Rf 0.48, 0.65 y Rf 0.46, 0.63 respectivamente, siendo los aceites de mayor respuesta a polifenoles. Para el caso de los aceites esenciales de *Cymbopogon citratus* (Rf 0.60, 0.86 y Rf 0.68, 0.92), *Mentha piperita* (Rf 0.50 y Rf 0.59) y *Rosmarinus officinalis* (Rf 0.59, 0.65, 0.86 y Rf 0.43, 0.68, 0.91), se presentaron bandas tenues, indicando poca presencia de polifenoles. Mientras que, para los aceites esenciales de *Laurus nobilis* y *Citrus sinensis* no se detectaron polifenoles en las muestras (figura 49).

## 9.10 DETERMINACIÓN CUALITATIVA DE ESTEROLES

### 9.10.1 PRUEBA DE SALKOWSKI

La prueba de Salkowski, se utilizó como complementaria para la determinación de esteroides y se llevó a cabo con todos los aceites esenciales. 4  $\mu$ L de cada aceite esencial se disolvieron en 400  $\mu$ L de cloroformo y se puso en contacto con 2 gotas de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) concentrado en tubos de microcentrífuga de 2 mL. La prueba se consideró positiva para triterpenos al observarse cambios de coloración a rojo o amarillo.

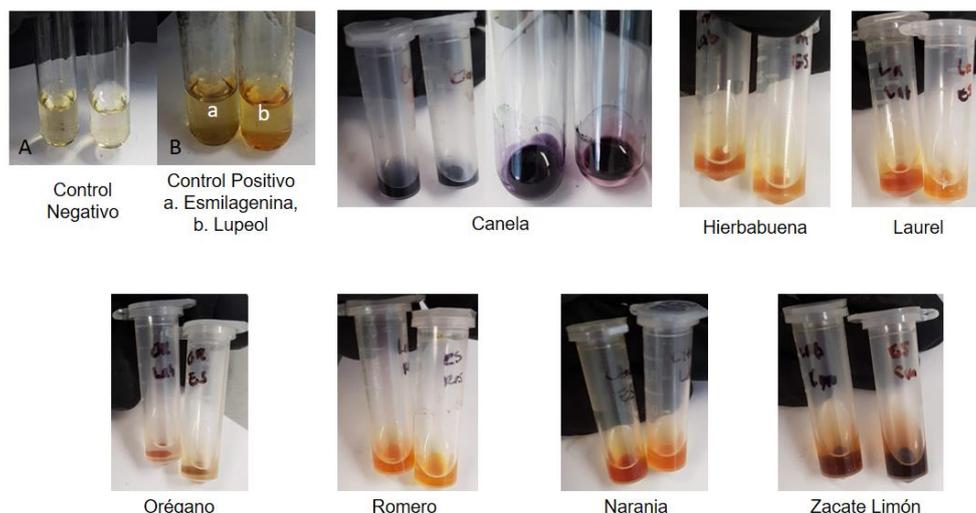


Figura 50. **Esteroles.** A: control negativo Cloroformo + aceite esencial, B: control positivo Cloroformo + Esmilagenina/ Lupeol+  $H_2SO_4$  concentrado; Aceites esenciales muestra de laboratorio y estufa solar respectivamente.

Se usó esmilagenina y lupeol como controles positivos ya que son compuestos triterpénicos.

## 9.11 RESULTADOS DE GC DE LOS ACEITES ESENCIALES

Se realizó la cromatografía de gases (GC) de todos los aceites esenciales para corroborar la cantidad de metabolitos presentes en los aceites esenciales extraídos tanto por el método de laboratorio, como por el método de estufa solar.

Los datos aquí mostrados, son sin procesar (crudos), sin embargo, aporta información correspondiente a la cantidad de metabolitos en cada una de las muestras, además, de los tiempos de retención que permiten realizar la comparación entre muestras, así como el número de señales-pico proporcionales a los diferentes metabolitos en cada muestra, aunque sin la identificación detallada.

A continuación, se muestran algunos cromatogramas representativos de los resultados arrojados para algunos aceites esenciales.

En la figura 49 se observa una superposición de cromatogramas obtenido por análisis en el cromatografo de gases; cada duplicado tiene similitud en señales

registradas, para observar las diferencias y/o similitudes de los aceites esenciales obtenidos por ambos métodos, sin embargo, la altura de los picos señal se incrementa en las extracciones realizadas por medio de estufa solar.

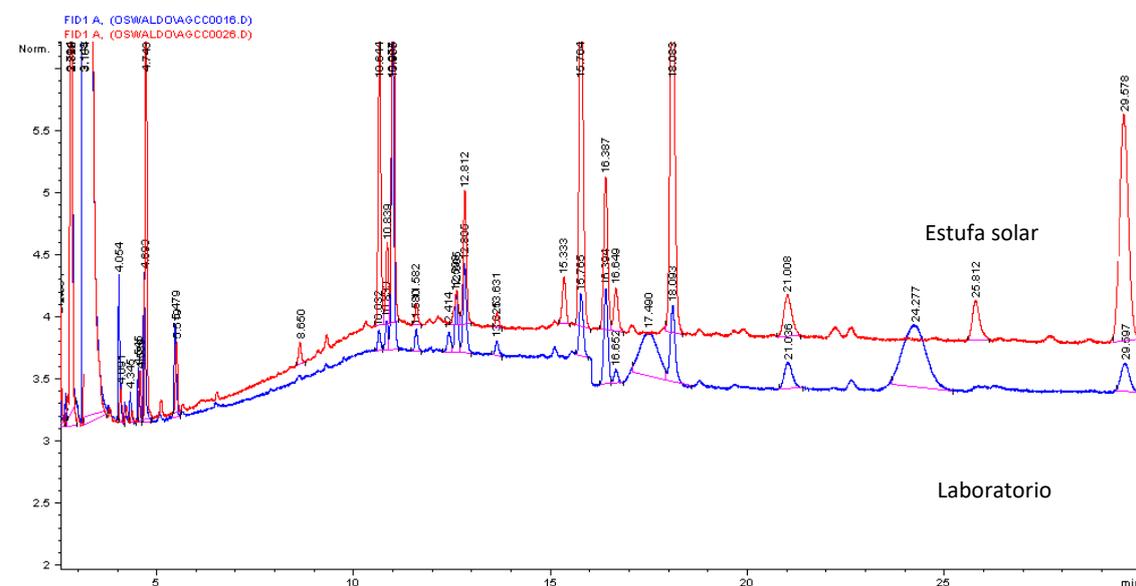


Figura 49. Comparación de cromatogramas de aceite esencial de canela.

De acuerdo con los datos obtenidos se obtuvieron alrededor de 25 señales para el aceite esencial obtenido por laboratorio y 30 señales para el aceite esencial obtenido por estufa solar (ver anexo). La mayoría de los tiempos de retención son similares entre sí presentando variaciones mínimas.

En la figura 50 se presentan los cromatogramas del aceite esencial de orégano al realizar la superposición de cromatogramas de ambos métodos, se aprecian más los picos señales del cromatograma de aceite esencial extraído por estufa solar, indicando mayor intensidad de metabolitos presentes.

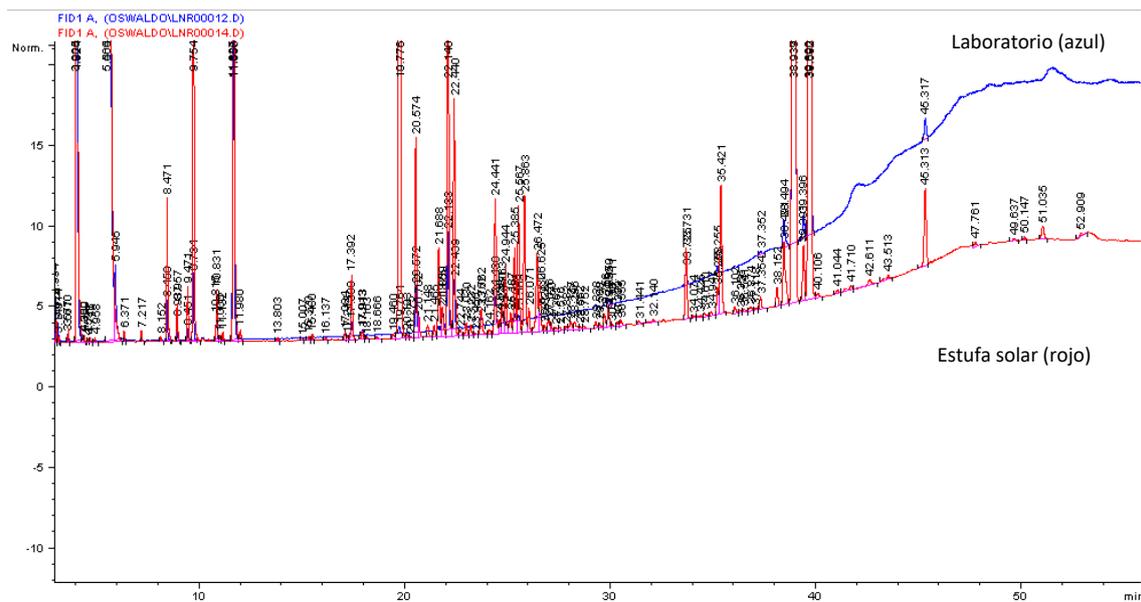


Figura 50. Comparación de cromatogramas de aceite esencial de Orégano.

Después de realizado el análisis, se encontró un total de 36 señales para el cromatograma del aceite esencial extraído en laboratorio y 69 señales en el cromatograma del aceite esencial extraído por medio de estufa solar, lo que indica que se preservan más metabolitos durante la extracción, sin embargo, al ser datos crudos y no contar con los estándares de los metabolitos reportados en la literatura que son comunes en el aceite esencial de orégano no se puede afirmar con certeza si pudieran referirse a la misma presencia de metabolitos o alguna degradación de los mismos metabolitos de la muestra, ya que en nuestro resultado es casi el doble de metabolitos que se detectan en el aceite esencial extraído por medio de estufa solar.

Para el caso del aceite esencial de *Rosmarinus officinalis* se observa cierta similitud en el cromatograma en ambos métodos de extracción (ver figura 51) se observa una intensidad de picos señales similar sin embargo en el método de estufa solar se observa mayor intensidad de los picos señal que se superponen en las señales del cromatograma del aceite esencial extraído en laboratorio.

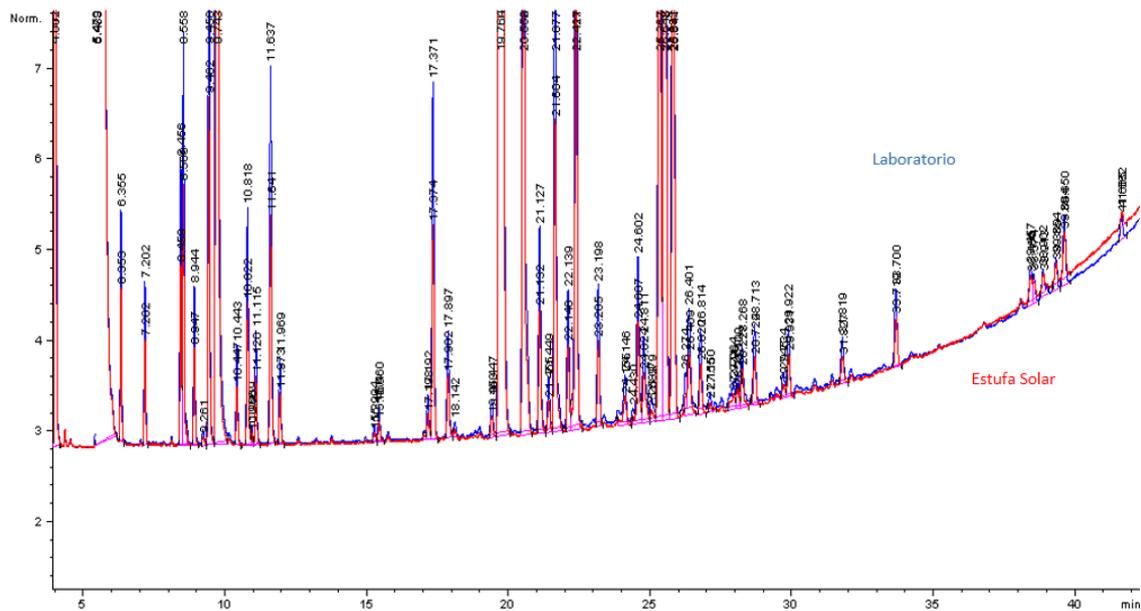


Figura 51. Comparación de cromatogramas de aceite esencial de Romero.

Al analizar los cromatogramas, se encontró un total de 58 señales en el cromatograma del aceite esencial extraído en laboratorio y 57 señales en el cromatograma del aceite esencial extraído por medio de estufa solar, lo que se sugiere que se preserva la misma cantidad de metabolitos presentes en ambos aceites esenciales, sin embargo, al no contar con estándares de referencia no podemos corroborar cuales serían esos metabolitos.

## 9.12 ANÁLISIS POR INFRARROJO (IR) DE ACEITES ESENCIALES

Como prueba complementaria al GC se realizó un análisis por infrarrojo de los aceites esenciales. El espectro infrarrojo (IR) permite detectar la presencia de grupos hidroxilo, carbonilo, anillos aromáticos, enlaces dobles C=C cis y trans, etc.

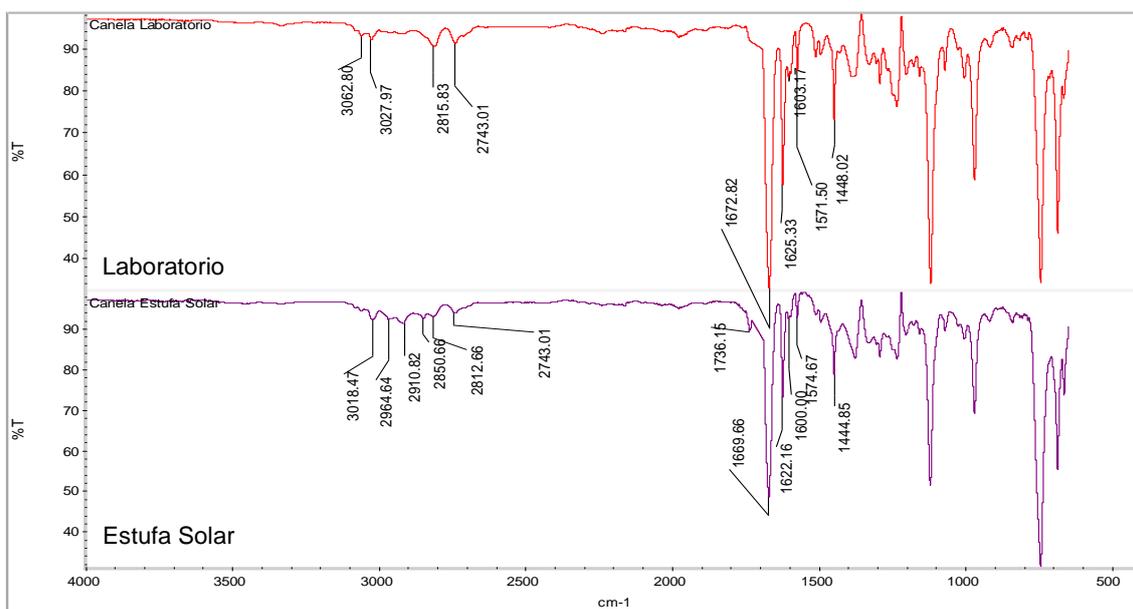


Figura 52. Espectro IR del aceite esencial de *Cinammomun sp.* comparando ambos métodos, en la parte superior el IR del extracto de laboratorio, en la parte inferior el IR del extracto obtenido por medio de estufa solar.

En el espectro infrarrojo del aceite esencial de canela extraído por ambos métodos (figura 52). Las vibraciones presentes en  $1440\text{ cm}^{-1}$  indican presencia C-H alifáticos con torsión de tijera entre sus enlaces C-H<sub>2</sub>. Mientras que la señal a  $1600\text{ cm}^{-1}$  indica movimiento del enlace C=O. Los picos entre  $1575$ ,  $1600$  y  $1700\text{ cm}^{-1}$  indican presencia de enlaces C=C de alquenos y aromáticos. Los picos a  $2700$  y  $2900\text{ cm}^{-1}$  se asignan al estiramiento simétrico de enlaces C-H alifáticos, mientras que a  $3000$  y  $3065\text{ cm}^{-1}$  a C-H de alquenos y compuestos aromáticos con estiramiento simétrico (52).

Comparando HD 1 (Hidrodestilación) y ES (Estufa solar) (tabla 13), muestras aquí obtenidas, el 65% de las señales comparten gran similitud entre ellas, el

35% restantes son el mismo número de picos con un ligero desplazamiento. Estos valores encontrados, corresponden a lo reportado en la literatura por Jeyaratnam y colaboradores(46) al extraer aceite esencial de *Cinnamomun cassia* por hidrodestilación tradicional - microondas y analizados por FTIR (tabla 13).

Tabla 13. Comparación de los grupos funcionales presentes en el aceite esencial de corteza de *Cinammomun sp.*

| HD 1 | ES   | HD 2 | MAE  | Grupo funcional   |
|------|------|------|------|---|
| 687  | 692  | 686  | 687  | C=C vibración del anillo de benceno                                   |
| 741  | 746  | 748  | 745  | C=H vibración del anillo de benceno                                   |
| 970  | 970  | 970  | 970  | C-H Vibración de flexión  |
| 1123 | 1123 | 1119 | 1119 | C-O vibraciones de estiramiento y C-OH vibración de formación.        |
| 1231 | 1231 | 1250 | 1250 | C-O-C expansión simétrica y fenólica y C-OH vibración de estiramiento |
| 1492 | 1289 | 1294 | 1294 | Columpio CH2 y flexión en el plano por absorción de =C-H aromática    |
| 1573 | 1375 | 1449 | 1449 | C-OH vibración de flexión por absorción                               |
| 1600 | 1456 | 1574 | 1574 | C=C Vibración esquelética del anillo aromático.                       |
| 1622 | 1622 | 1623 | 1623 | C=O vibración de estiramiento   |
| 1667 | 1667 | 1668 | 1668 | C=O vibración de estiramiento   |
| 2732 | 1734 |      |      |   |
| 2808 | 2808 |      |      |   |
| 3020 | 2844 |      |      |   |
| 3065 | 2916 |      |      |   |
|      | 3020 |      |      |   |

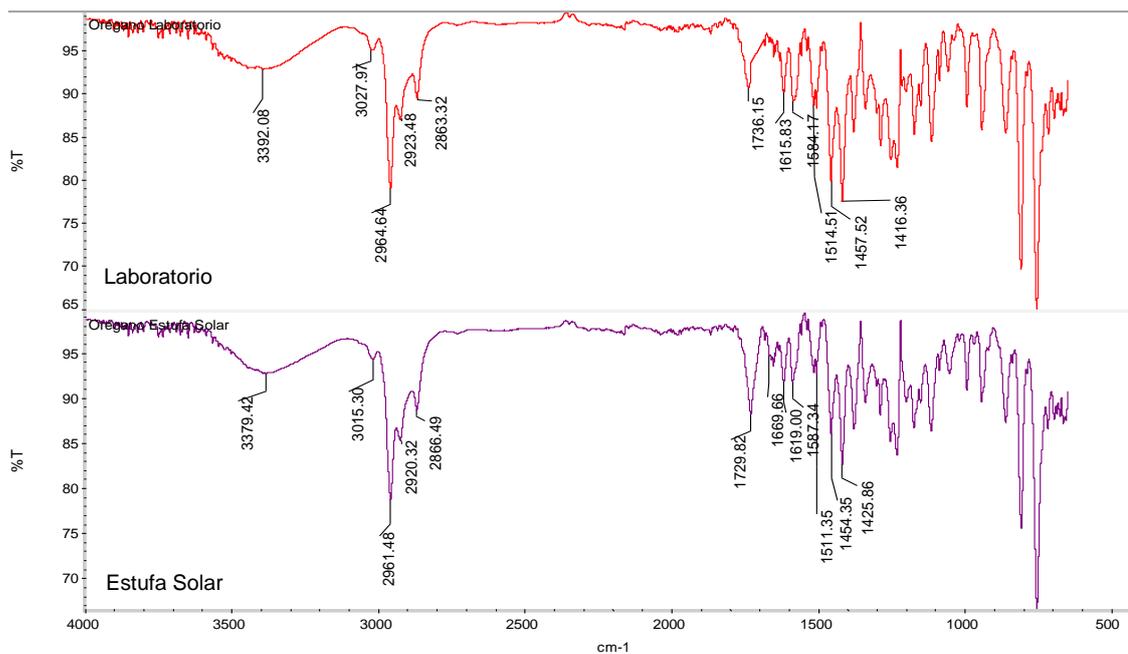


Figura 53. Comparación de espectros IR de aceite esencial de *Origanum vulgare* obtenido por ambos métodos.

En el espectro infrarrojo de los aceites esenciales de *Origanum vulgare* (figura 53), la vibración presente en  $1460\text{ cm}^{-1}$  indica presencia de alifáticos con torsión tijera entre sus enlaces C-H<sub>2</sub>. El pico en  $2853\text{ cm}^{-1}$  se asigna al estiramiento simétrico de enlaces C-H<sub>2</sub>. Los picos entre  $2921$  y  $2961\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a presencia de enlaces C-H de alquenos y compuestos saturados con estiramiento simétrico de metilos. El pico en  $2871\text{ cm}^{-1}$  se asigna al estiramiento simétrico de enlaces C-H<sub>2</sub>. Las señales pico en  $3015$  y  $3024\text{ cm}^{-1}$  indica presencia de enlaces C-H de alquenos y compuestos aromáticos. Las señales pico en  $3379$  y  $3406\text{ cm}^{-1}$  indica grupos -OH.

Al realizar un análisis de espectros IR encontramos que son prácticamente similares en picos la muestra extraída en laboratorio con la muestra extraída en estufa solar (tabla 14), al comparar con lo reportado (HD 2) por Mendoza y colaboradores (53) se encuentra una pequeña similitud en picos en el espectro IR (tabla 14).

Tabla 14. Comparación de los grupos funcionales presentes en el aceite esencial de *Origanum vulgare*.

| HD 1 | ES   | HD 2 | Grupo funcional                                     |
|------|------|------|---|
| 1415 | 1415 | 1423 | Torsión tijera -CH <sub>2</sub> -                   |
| 1460 | 1456 |      |   |
| 1510 | 1510 | 1509 |   |
| 1586 | 1586 | 1577 |   |
| 1608 | 1617 | 1620 | Presencia de C=C de alquenos                        |
| 1734 | 1730 |      |   |
| 2867 | 2871 |      |   |
| 2925 | 2921 |      |   |
| 2961 | 2961 | 2954 | Estiramiento asimétrico de metilos -CH <sub>3</sub> |
| 3015 | 3024 |      |   |
| 3406 | 3379 | 3364 | Grupos -OH de posibles fenoles                      |

En el espectro infrarrojo del aceite esencial de *Mentha piperita* extraído en laboratorio (figura 54). Los picos presentes en 1261 y 1264 cm<sup>-1</sup> representan estiramientos C-O. Los picos señalados en 1660 y 1666 cm<sup>-1</sup> indican presencia de enlaces C=C de alquenos. Los picos en 2849, 2925 y 3060 cm<sup>-1</sup> a presencia de enlaces C-H de alquenos y compuestos aromáticos con estiramiento simétrico.

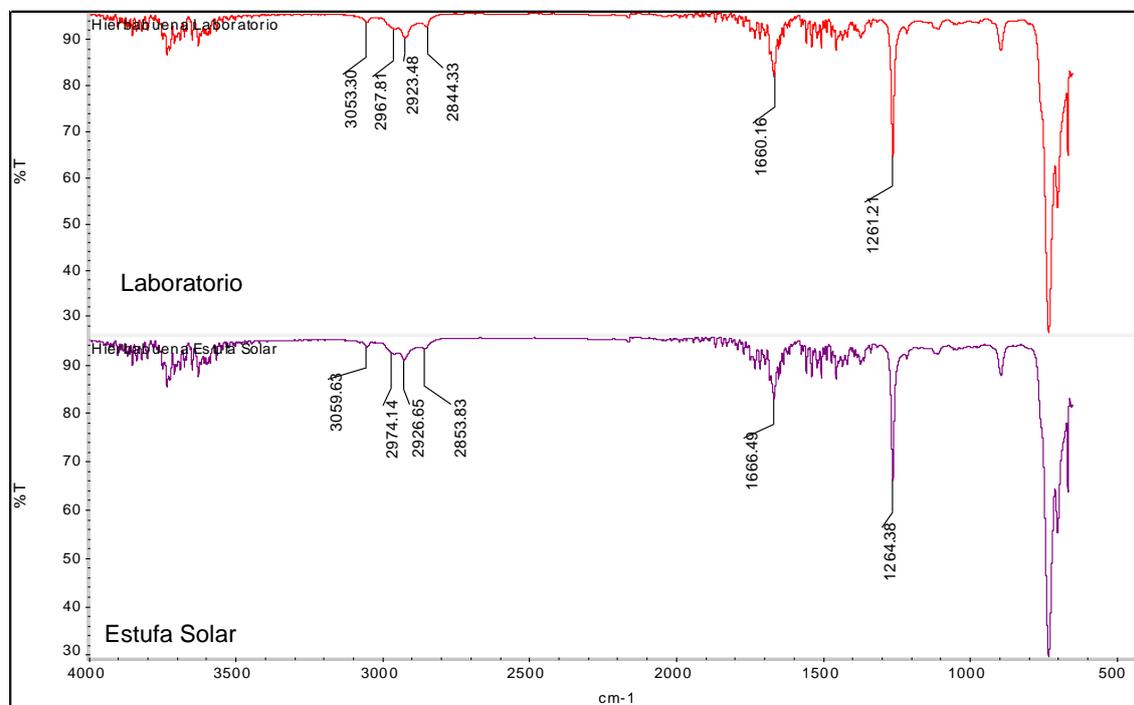


Figura 54. Comparación de espectros IR de aceite esencial de *Mentha piperita* obtenido por ambos métodos.

Al analizar los datos, encontramos ausencia de algunos picos que no están presentes en la extracción de laboratorio con respecto a la extracción con estufa solar, de acuerdo a lo reportado por Benchika y colaboradores (54) se deben presentar 3 picos de gran intensidad en 1710, 2869 y 2925  $\text{cm}^{-1}$  de los cuales solo uno concuerda con lo reportado (tabla 15), los demás valores son cercanos y representan las mismas señales.

*Tabla 15. Comparación de los grupos funcionales presentes en aceite esencial de Mentha piperita.*

| <b>HD 1</b> | <b>ES</b> | <b>HD reportado</b> | <b>Grupo funcional</b> |
|-------------|-----------|---------------------|------------------------|
| 1676        | 1671      | 1710                | vibración C=O cetonas  |
| 2849        | 2849      | 2869                | C-H de alcanos         |
| 2925        | 2925      | 2925                | C-H de alcanos         |
| 3060        | 3060      |                     |                        |
|             |           | 3409                | Grupos -OH             |

Al comparar los espectros IR con otros reportados en la literatura se observó que no son completamente similares, salvo por algunas señales características, pero esto se debe a las variaciones del tipo de planta que se utilizó y las condiciones geográficas y climáticas a las que estuvo expuesta, además de otros factores como la manipulación y el desarrollo del método de extracción descritos a lo largo del trabajo realizado.

## CAPÍTULO 10

### 10.1 CONCLUSIONES

- ✓ Se construyó un modelo de estufa solar tipo caja acoplado con hidrodestilador.
- ✓ Se mejoró el modelo de estufa solar con hidrodestilador y reflectores solares, alcanzando valores de temperatura mayores a los 80°C y manteniéndose por tres horas, permitiendo la extracción de aceites esenciales.
- ✓ Se extrajo aceite esencial de diferentes especies vegetales. Obteniendo rendimientos entre el 0.1 y 1%, el cual es dependiente de la especie vegetal. La comparación entre ambos métodos, indica la poca diferencia entre usar el método de extracción en laboratorio o usar el método de extracción por medio de estufa solar.
- ✓ Adicionalmente, se realizó un análisis fitoquímico cualitativo de los aceites esenciales, identificando presencia de taninos, polifenoles, entre otros. Por otro lado, el uso de la espectroscopia de IR, permitió la identificación de los grupos funcionales correspondientes a hidrocarburos alifáticos, aromáticos, presencia de grupos carbonilos y para algunos de ellos, presencia de OH de ácidos carboxílicos, así como la ausencia de ellos por su pérdida al usar el método de extracción con estufa solar. No obstante, en las muestras extraídas por estufa solar hay una ausencia de señales con respecto a las extraídas en laboratorio, pero con señales con más intensidad que los grupos funcionales presentes en las extracciones con estufa solar, respecto a las extraídas en laboratorio.
- ✓ Así mismo, se realizó el análisis de los aceites esenciales mediante el GC permitiendo comparar la cantidad de señales pico registrados, analizando la posible presencia o ausencia de señales, los cuales fueron dependientes de la especie vegetal; en algunos extractos se registraron más señales picos que otros.

- ✓ Por lo que el dispositivo de destilador solar tipo caja diseñado, permite la extracción de aceites esenciales sin el uso de energía derivada del petróleo, disminuyendo costos y emisiones de gases de efecto invernadero de calidad muy similar a la hidrodestilación realizada en el laboratorio.

## CAPITULO 11

### 11.0 PERSPECTIVAS

1. Realizar precalentamiento del agua para aumentar la eficiencia y disminuir el tiempo de extracción.
2. Complementar la calidad de los aceites esenciales mediante la caracterización de los metabolitos, ya que permitirá conocer con exactitud el contenido de cada aceite esencial y elucidar si existe degradación de los metabolitos por parte del algún método de extracción.

## 12.0 REFERENCIAS

1. Dima C, Dima S. Essential oils in foods: Extraction, stabilization, and toxicity. *Curr Opin Food Sci* [Internet]. 2015;5:29–35. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cofs.2015.07.003>
2. Tongnuanchan P, Benjakul S. Essential Oils: Extraction, Bioactivities, and Their Uses for Food Preservation. *J Food Sci*. 2014;79(7):1231–49.
3. Asbahani A El, Miladi K, Badri W, Sala M, Addi EHA, Casabianca H, et al. Essential oils: From extraction to encapsulation. *Int J Pharm* [Internet]. 2015;483(1–2):220–43. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpharm.2014.12.069>
4. Fornari T, Vicente G, Vazquez E, Garcia-Risco M, Reglero G. Isolation of essential oil from different plants and herbes by supercritical fluid extraction. *J Chromatogr A* [Internet]. 2012;1250(1):34–48. Available from: %5C%5CRobsr-05%5Creference manager%5CArticles%5C15458.pdf
5. Chemat F, Vian MA, Cravotto G. Green extraction of natural products: Concept and principles. *Int J Mol Sci*. 2012;13(7):8615–27.
6. Cuce E, Cuce PM. A comprehensive review on solar cookers. *Appl Energy* [Internet]. 2013;102:1399–421. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.002>
7. Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2011;15(3):1513–24. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>
8. Sedighi M, Zakariapour M. A Review of Direct and Indirect Solar Cookers. *Sustain Energy* [Internet]. 2014;2(2):44–51. Available from: <http://pubs.sciepub.com/rse/2/2/2/index.html>
9. Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. State of the art of solar cooking: An overview. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2012;16(6):3776–85. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.026>
10. Rathore MM, Warkhedkar RM. A Review of Solar Cookers. *Int J Mod Trends Eng Res* [Internet]. 2015;2(7):1997–2004. Available from:

[http://www.ijmter.com/published\\_special\\_issues/07-02-2015/a-review-of-solar-cookers.pdf](http://www.ijmter.com/published_special_issues/07-02-2015/a-review-of-solar-cookers.pdf)

11. Do TKT, Hadji-Minaglou F, Antoniotti S, Fernandez X. Authenticity of essential oils. *TrAC - Trends Anal Chem* [Internet]. 2015;66(October 2017):146–57. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2014.10.007>
12. Khayyat SA, Roselin LS. Recent progress in photochemical reaction on main components of some essential oils. *J Saudi Chem Soc* [Internet]. 2018; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.01.008>
13. Bayala B, Bassole IH, Scifo R, Gnoula C, Morel L, Lobaccaro J-MA, et al. Anticancer activity of essential oils and their chemical components - a review. *Am J Cancer Res* [Internet]. 2014;4(6):591–607. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25520854> <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC4266698>
14. Turek C, Stintzing FC. Stability of essential oils: A review. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2013;12(1):40–53.
15. Gao X, Lv S, Wu Y, Li J, Zhang W, Meng W, et al. Volatile components of essential oils extracted from Pu-erh ripe tea by different extraction methods. *Int J Food Prop* [Internet]. 2017;20(1):S240–53. Available from: <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1295256>
16. Raut JS, Karuppayil SM. A status review on the medicinal properties of essential oils. *Ind Crops Prod* [Internet]. 2014;62:250–64. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.05.055>
17. Chemat F, Boutekedjiret C. Extraction // Steam Distillation☆ [Internet]. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering. Elsevier Inc.; 2015. 1–12 p. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124095472115574>
18. Stashenko EE. *Aceites Esenciales*. División de Publicaciones UIS. 2009. 180 p.
19. Li Y, Abert-vian M. Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds. 2013;(January). Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-4830-3>
20. Rajbhar K, Dawda H, Mukundan U. Polyphenols : Methods of Extraction. *Sci*

- Revs Chem Commun [Internet]. 2015;5(1):1–6. Available from:  
<http://www.tsijournals.com/articles/polyphenols-methods-of-extraction.pdf>
21. Ji J, Yao H, Zheng W, Suo Z, Shi Y, Xu Y, et al. Preparation and Properties of Asphalt Binders Modified by THFS Extracted From Direct Coal Liquefaction Residue. *Appl Sci* [Internet]. 2017;7(11):1155. Available from:  
<http://www.mdpi.com/2076-3417/7/11/1155>
  22. Khaw KY, Parat MO, Shaw PN, Falconer JR. Solvent supercritical fluid technologies to extract bioactive compounds from natural sources: A review. *Molecules*. 2017;22(7).
  23. Wrona O, Rafińska K, Możejki C, Buszewski B. Supercritical Fluid Extraction of Bioactive Compounds from Plant Materials. *J AOAC Int* [Internet]. 2017;1624–35. Available from: <http://www.ingentaconnect.com/content/10.5740/jaoacint.17-0232>
  24. Zhou Y, Zheng J, Gan RY, Zhou T, Xu DP, Li H Bin. Optimization of ultrasound-assisted extraction of antioxidants from the mung bean coat. *Molecules*. 2017;22(4):1–13.
  25. Md Salehan NA, Sulaiman AZ, Ajit A. Effect of temperature and sonication on the extraction of gallic acid from *Labisia Pumila* (Kacip Fatimah). *ARPN J Eng Appl Sci*. 2016;11(4):2193–8.
  26. Kusuma HS, Syahputra ME, Parasandi D, Altway A, Mahfud M. Optimization of microwave hydrodistillation of dried patchouli leaves by response surface methodology. *Rasayan J Chem*. 2017;10(3):861–5.
  27. Chemat F, Strube J. Green Extraction of Natural Products. Co. W-VVG&, editor. 2015. 375 p.
  28. Filly A, Fabiano-Tixier AS, Louis C, Fernandez X, Chemat F. Water as a green solvent combined with different techniques for extraction of essential oil from lavender flowers. *Comptes Rendus Chim*. 2016;19(6):707–17.
  29. Alemán-Nava GS, Casiano-Flores VH, Cárdenas-Chávez DL, Díaz-Chavez R, Scarlat N, Mahlkecht J, et al. Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2014;32:140–53. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.004>

30. Rodríguez LB, Arcos EV, Álvarez LAM, Aguilar JSR, Bueno MAR, Álvarez SG, et al. Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2017. 2017; Available from:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279723/Informe\\_Renovables\\_2017\\_11122017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279723/Informe_Renovables_2017_11122017.pdf)
31. Herez A, Ramadan M, Khaled M. Review on solar cooker systems: Economic and environmental study for different Lebanese scenarios. *Renew Sustain Energy Rev.* 2018;81(May 2017):421–32.
32. Yettou F, Azoui B, Malek A, Gama A, Panwar NL. Solar cooker realizations in actual use : An overview. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2014;37:288–306. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.018>
33. Balakrishnan M, Claude A, Arun Kumar DR. Engineering, design and fabrication of a solar cooker with parabolic concentrator for heating, drying and cooking purposes. *Sch Res Libr Arch Appl Sci Res.* 2012;4(4):1636–49.
34. Aalfs M. Principles of Solar Box Cooker Design [Internet]. March. 2015 [cited 2018 May 17]. Available from:  
[http://solarcooking.wikia.com/wiki/Principles\\_of\\_Solar\\_Box\\_Cooker\\_Design](http://solarcooking.wikia.com/wiki/Principles_of_Solar_Box_Cooker_Design)
35. El-Sebaili AA, Ibrahim A. Experimental testing of a box-type solar cooker using the standard procedure of cooking power. *Renew Energy.* 2005;30(12):1861–71.
36. Dufresne S. How to design solar reflectors for solar cookers [Internet]. 2011 [cited 2019 Feb 26]. Available from:  
[https://rimstar.org/renewnrg/how\\_design\\_solar\\_cooker\\_sun\\_reflector.htm](https://rimstar.org/renewnrg/how_design_solar_cooker_sun_reflector.htm)
37. Omick D. SOLAR OVEN DESIGN [Internet]. 2012 [cited 2019 Feb 26]. Available from: [http://www.omick.net/solar\\_ovens/solar\\_oven\\_design.htm](http://www.omick.net/solar_ovens/solar_oven_design.htm)
38. Estrada Jaramillo M, Vera Romero I, Martínez Reyes J, Ortíz Soriano A. ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EXERGICA DE UN HORNO. 2014;1122–7.
39. Pensel PE, Maggiore MA, Gende LB, Eguaras MJ, Denegri MG, Elissondo MC. Efficacy of essential oils of *Thymus vulgaris* and *Origanum vulgare* on *Echinococcus granulosus*. *Interdiscip Perspect Infect Dis.* 2014;2014.
40. M KG, F A, I HA, N S, Y AM. Yield and chemical composition of Citrus essential

- oils as affected by drying pretreatment of peels. *Int Food Res J*. 2011;18(4):1275–82.
41. Kamaliroosta L. Extraction of cinnamon essential oil and identification of its chemical compounds. *J Med Plants Res*. 2012;6(4):609–14.
  42. Meziane-Assami D, Tomao V, Ruiz K, Meklati BY, Chemat F. Geographical Differentiation of Rosemary Based on GC/MS and Fast HPLC Analyses. *Food Anal Methods*. 2013;6(1):282–8.
  43. Yen HY, Lin YC. Industrial Crops & Products Green extraction of Cymbopogon citrus essential oil by solar energy. *Ind Crop Prod* [Internet]. 2017;108(April):716–21. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.039>
  44. Atefeh Bahmanzadegan, Vahid Rowshan, Faraneh Zareian, Reza Alizadeh, Mohammad Bahmanzadegan. Seasonal Variation in Volatile Oil, Polyphenol Content and Antioxidant Activity in Extract of *Laurus nobilis* Grown in Iran. *J Pharm Pharmacol*. 2015;3(5):223–31.
  45. Pavela R., Kaffková K. KM. Chemical Composition and Larvicidal Activity of Essential Oils from Different *Mentha L.* and *Pulegium* Species against *Culex quinquefasciatus* Say (Diptera : Culicidae ). *Plant Prot Sci*. 2014;50(1):36–42.
  46. Jeyaratnam N, Nour AH, Kanthasamy R, Nour AH, Yuvaraj AR, Akindoyo JO. Essential oil from *Cinnamomum cassia* bark through hydrodistillation and advanced microwave assisted hydrodistillation. *Ind Crops Prod* [Internet]. 2016;92:57–66. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.07.049>
  47. Yu S. CEEP - BIT WORKING PAPER SERIES Carbon emission coefficient measurement of the coal - to - power energy chain in China. 2012;
  48. Burri J, Graf M, Lambelet P, Löliger J. Vanillin: More than a flavouring agent—a potent antioxidant. *J Sci Food Agric* [Internet]. 1989 Jan 1;48(1):49–56. Available from: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740480107>
  49. Gardner RO. Vanillin-Hydrochloric Acid as a Histochemical Test for Tannin. *Stain Technol* [Internet]. 1975 Jan 1;50(5):315–7. Available from: <https://doi.org/10.3109/10520297509117081>
  50. Alonso de Villar Ruiz de la Torre J, Melo-Herraiz E. Guía de plantas medicinales

del Magreb . Establecimiento de una conexión intercultural. Vol. 18, Cuadernos de la Fundacion Dr. Antonio Esteve. 2010. 112 p.

51. Mansour O, Darwish M, Ismail G, Dourgham M, Daoud R, Hamdan Y. Phytochemical Study of *Laurus Nobilis* in Syria. *J Chem Pharm Sci.* 2018;11(01):49–52.
52. Mondragón Cortez P. Espectroscopia de infrarrojo para todos ...y 51 espectros de alimentos consumidos en México [Internet]. 1st ed. D.R. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Guadalajara, Jalisco, México; 2017. 200 p. Available from: [https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion\\_5a43b7c09fdc1.pdf](https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b7c09fdc1.pdf)
53. Mendoza J, Ganem A, Camacho B, Álvarez C. Actividad bactericida del aceite esencial de orégano y dos derivados fenólicos sobre *Listeria innocua*. *Rev Iberoam Ciencias* [Internet]. 2018;5(4):19–31. Available from: <http://www.reibci.org/publicados/2018/ago/2900105.pdf>
54. Benchikha N, Djazi F, Lanez T. Chemical composition and in vitro antimicrobial activity of essential oils of *Mentha piperita*. *J Pharm Chem.* 2008;2(1):82–7.

## 13.0 ANEXOS

### 13.1 ESTADÍSTICAS DE LOS ACEITES ESENCIALES

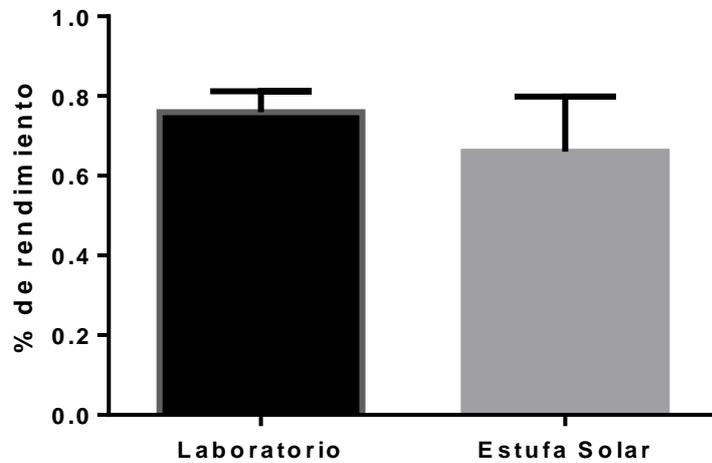


Figura 55. Rendimiento del aceite esencial de *Cinammomun sp.* Se observa una ligera tendencia que podría indicar que el método de extracción por estufa solar no es mejor que el método de laboratorio para obtener aceite esencial de canela.

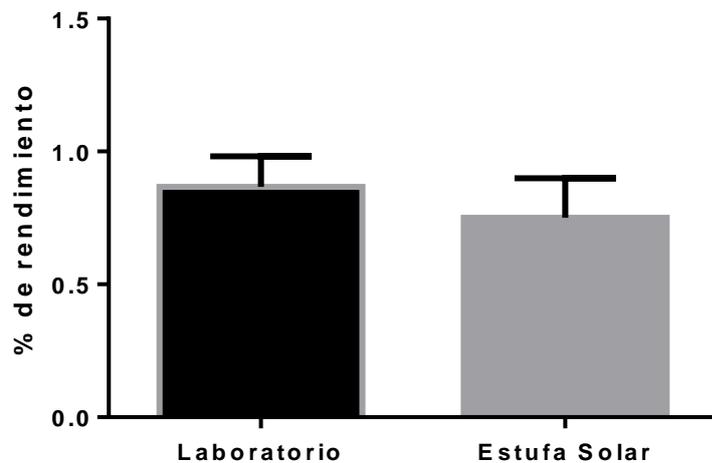


Figura 56. Rendimiento del aceite esencial de *Rosmarinus officinalis*. Muestra una tendencia por el método de laboratorio.

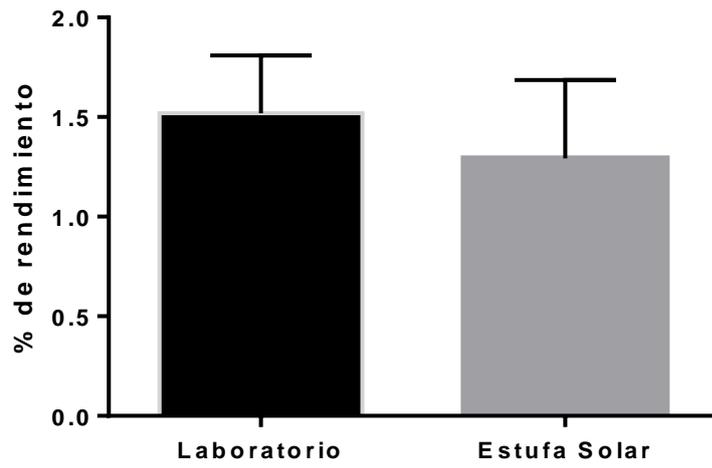


Figura 57. Rendimiento del aceite esencial de *Origanum vulgare*.

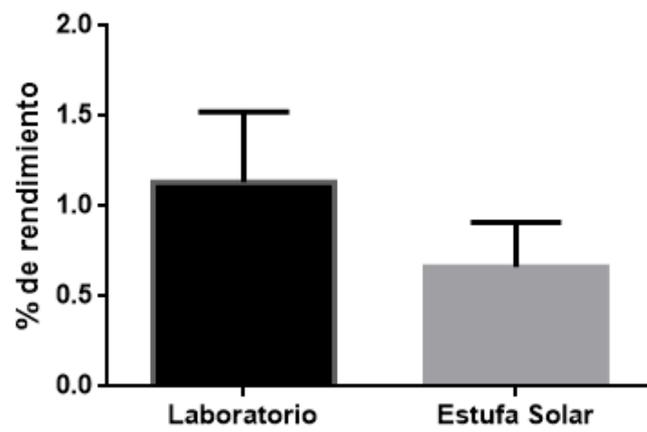


Figura 58. Rendimiento del aceite esencial de *Cymbopogon citratus*.



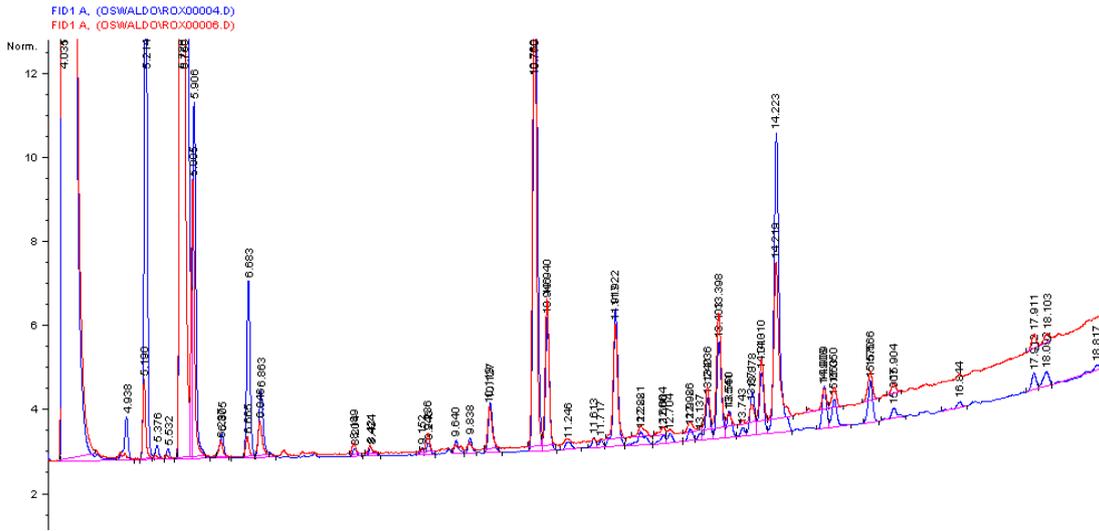
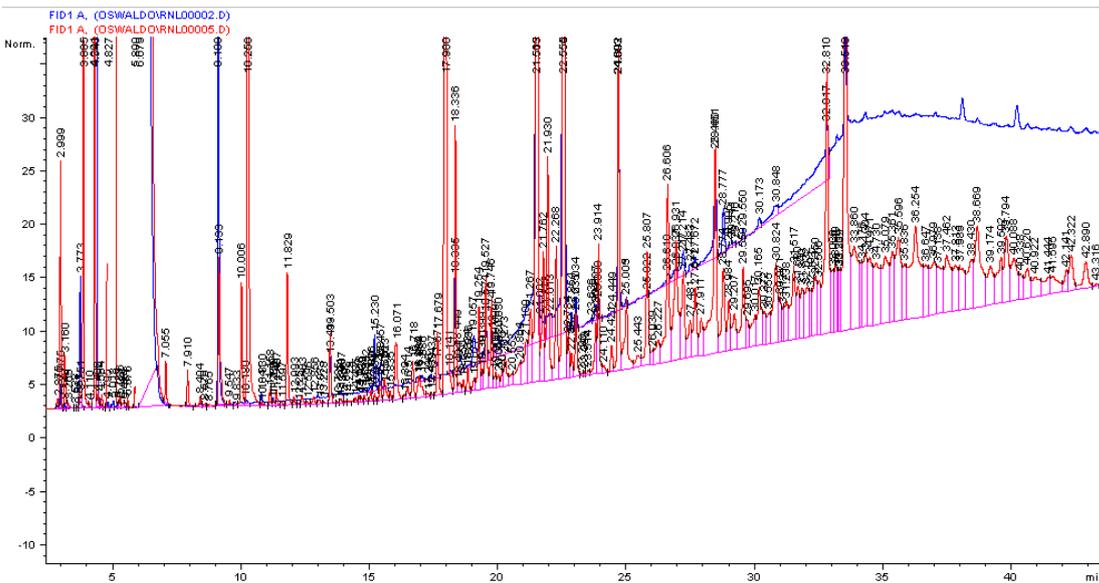


Figura 61. Comparación de cromatogramas del aceite esencial de Citrus sinesis.



### 13.3 INFRARROJOS

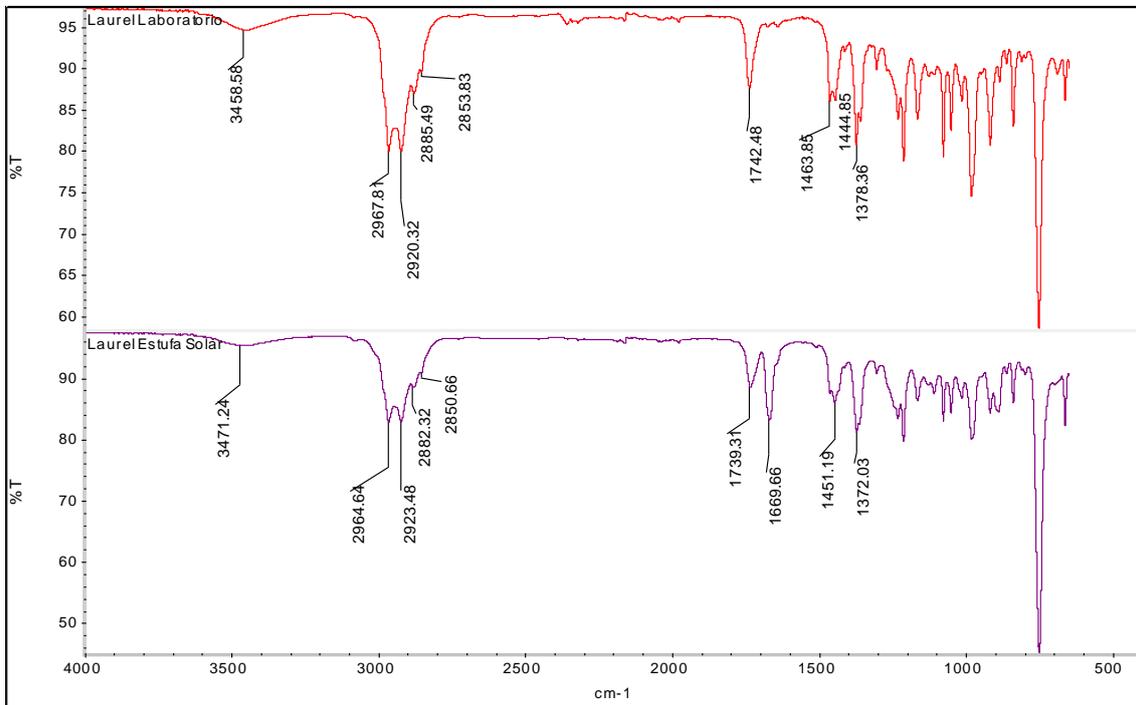


Figura 63. Espectro IR del aceite esencial de *Laurus nobilis* comparando ambos métodos, en la parte superior el IR del extracto de laboratorio, en la parte inferior el IR del extracto obtenido por medio de estufa solar.

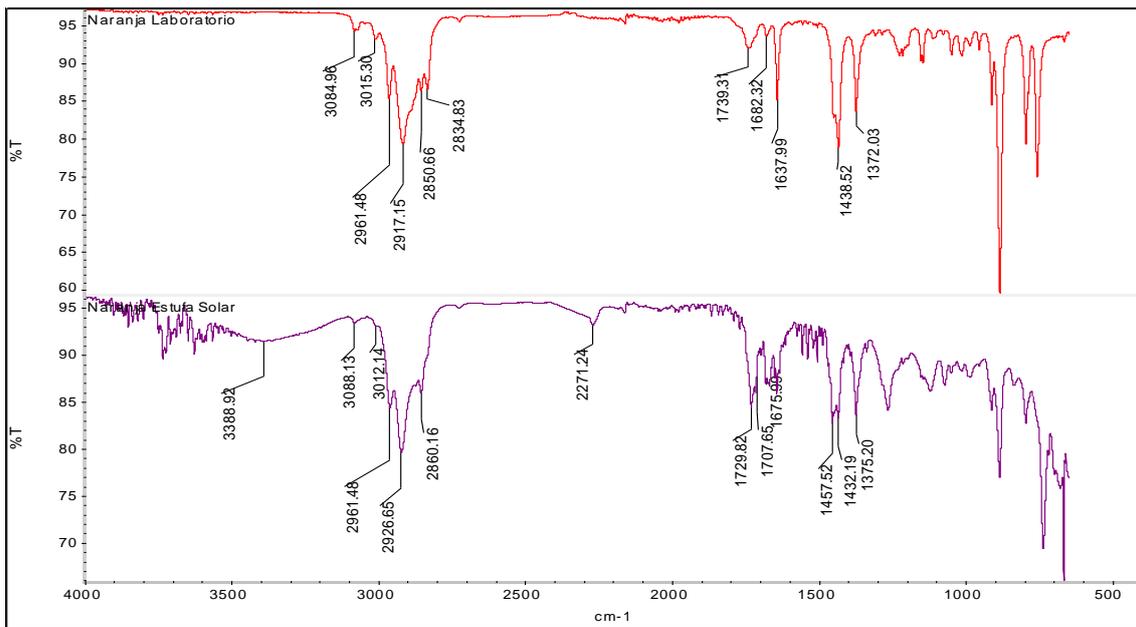


Figura 64. Espectro IR del aceite esencial de *Citrus sinensis* comparando ambos métodos, en la parte superior el IR del extracto de laboratorio, en la parte inferior el IR del extracto obtenido por medio de estufa solar.

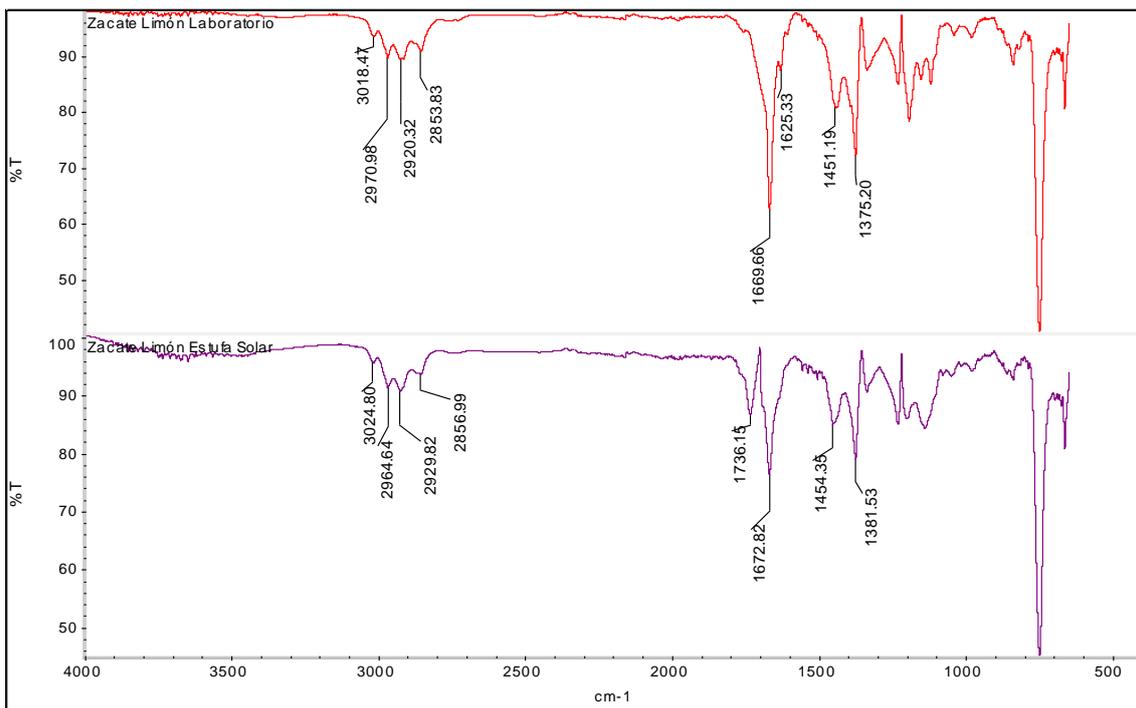


Figura 65. Espectro IR del aceite esencial de *Cymbopogon citratus* comparando ambos métodos, en la parte superior el IR del extracto de laboratorio, en la parte inferior el IR del extracto obtenido por medio de estufa solar.

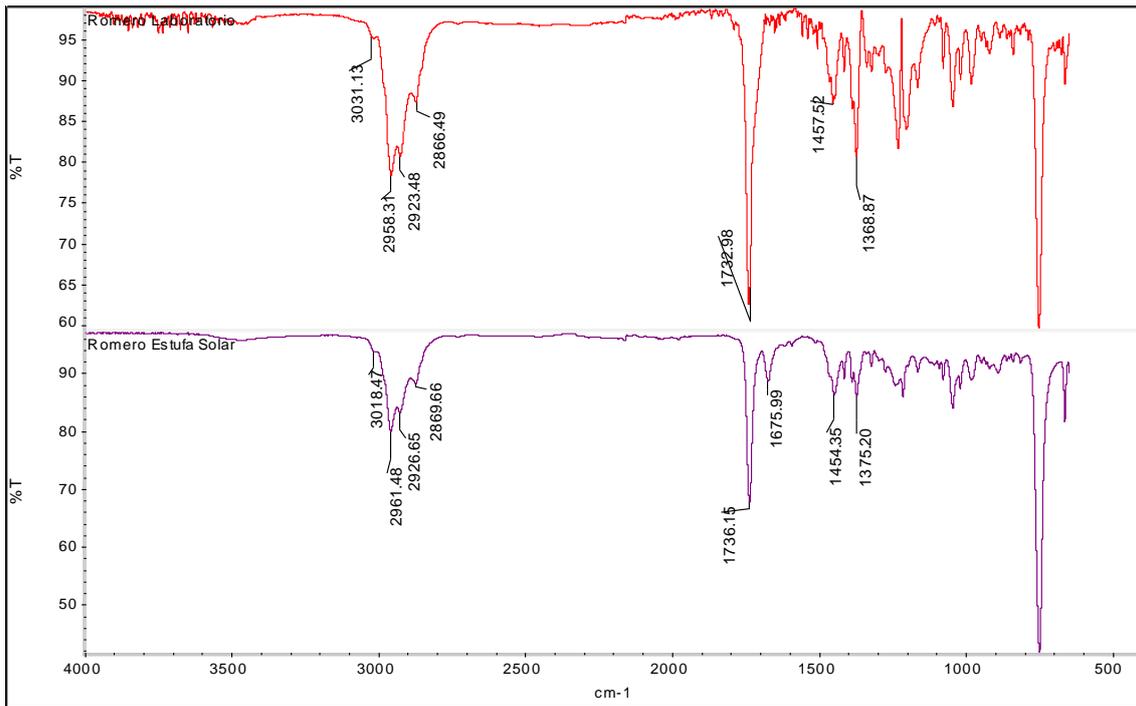


Figura 66. Espectro IR del aceite esencial de *Rosmarinus officinalis* comparando ambos métodos, en la parte superior el IR del extracto de laboratorio, en la parte inferior el IR del extracto obtenido por medio de estufa solar.