



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA-SOLAR FOTOTÉRMICA

EVALUACIÓN TÉRMICA DEL PROCESO DE SECADO SOLAR DE PLANTAS
AROMÁTICAS Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA EN ENERGÍA

PRESENTA:
ING. ANA MARÍA LUCHO GÓMEZ

TUTORES PRINCIPALES
DR. OCTAVIO GARCÍA VALLADARES
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM

DR. ALFREDO DOMÍNGUEZ NIÑO
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM

TEMIXCO, MORELOS. SEPTIEMBRE 2023

Jurado asignado

Presidente: Dr. Víctor Hugo Gómez Espinoza

Secretario: Dr. Alfredo Domínguez Niño

1er. Vocal: Dr. Octavio García Valladares

2do. Vocal: Dra. Rosa María Chávez Santos

3er. Vocal: Dra. Paulina Guillén Velázquez

Lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Energías Renovables, UNAM, Temixco, Morelos

Instituto de Química UNAM, Ciudad de México

Tutores de tesis:

Dr. Octavio García Valladares

Dr. Alfredo Domínguez Niño

Dedicatoria

A mis padres, Irma y Juan Manuel
por su apoyo incondicional.

A Juan Pablo
por su apoyo, compañía y amor.

Agradecimientos

Agradezco a mi tutor el Dr. Octavio García Valladares por el apoyo y consejos brindados durante el tiempo que se desarrolló mi tesis.

Mi más sincero agradecimiento a mi cotutor, el Dr. Alfredo Domínguez Niño quién a lo largo de estos años me ha brindado su apoyo, consejos, confianza y una valiosa amistad.

A la Dra. Rosa María Chávez Santos que durante mi estancia en el Instituto de Química fue una gran asesora, siempre dispuesta a ayudarme y también por brindarme su amistad.

Al Dr. Roberto Martínez por el acceso a su laboratorio 2-11 en el Instituto de Química para realizar mis experimentos.

Al Mtro. Antonio Nieto Camacho por ayudarme a realizar los experimentos de actividad antioxidante en mis muestras.

A mis padres Irma y Juan Manuel, que siempre han confiado en mí y me han brindado su apoyo incondicional en cada paso de mi vida académica, sin ellos nada de esto fuera posible.

A mis hermanos, Nayeli, Lorena y Luis Manuel, que a pesar de todo y aún a la distancia siempre me brindaron palabras de aliento para continuar con mi sueño de estudiar.

A Juan Pablo por su apoyo, compañía y amor. Por siempre darme ánimos cuando lo necesitaba, porque cuando sentía que no podía siempre estuvo a mi lado para que no me diera por vencida.

A mi sobrino Isidro Emmanuel, que también se desveló conmigo cuando tenía que hacer tareas.

A mis amigos, Elena, Víctor, Gabriel y Daniel, por brindarme su amistad y ayudarme en mis experimentos.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo financiero durante estos años de estudio.

Al proyecto CONAHCYT 319188 “Centro comunitario para el deshidratado solar de productos agropecuarios de pequeños productores indígenas de Hueyapan, Morelos” y al proyecto PAPIIT IN103021 “Secado solar de productos agropecuarios”, por el financiamiento parcial de la infraestructura y equipo experimental.

Resumen

México es un país que posee una gran riqueza natural; actualmente, se han descrito 23,314 especies de plantas vasculares nativas, donde las plantas aromáticas y sus aceites esenciales son de relevancia dado a sus aplicaciones medicinales, gastronómicas y como conservadores alimenticios, sin embargo; uno de los desafíos que se enfrentan en su proceso de estudio y comercialización es prolongar la vida de anaquel de la herbolaria, dado que las plantas requieren un acondicionamiento especial en su proceso de deshidratación, siendo el secado una alternativa factible que proporciona la conservación del producto por un tiempo prolongado, donde se busca disminuir la humedad en el material vegetal hasta porcentajes que impiden su fermentación, el desarrollo de los microorganismos y consecuentemente la pérdida de los principios activos. Dentro de la clasificación de técnicas de secado encontramos el secado solar, que es un método poco explorado para la conservación de las plantas aromáticas y medicinales, por esa razón el presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar térmicamente el proceso de secado solar de 4 plantas aromáticas para definir las condiciones óptimas sobre las propiedades fisicoquímicas. Para este estudio se utilizó un secador solar mixto tipo gabinete de mediana capacidad y las 4 plantas aromáticas que se secaron fueron toronjil (*Agastache mexicana*), romero (*Rosmanirus officinalis*), epazote (*Dysphania ambrosoides*) y ruda (*Ruta graveolens*). Las corridas experimentales se realizaron bajo un diseño de experimentos donde se consideraron 3 factores, los cuales fueron la malla sombra, el ventilador y el tipo de cubierta de colector, con 2 niveles (alto y bajo), que fueron con y sin malla sombra, con y sin ventilador, y colector con cubierta de vidrio y colector con cubierta de policarbonato; para después analizar su efecto sobre las variables de respuesta propuestas (contenido de humedad, actividad de agua, diferencia de color y actividad antioxidante). Además, se realizó el análisis energético para cada planta a las diferentes condiciones de secado. Las cinéticas de secado mostraron un comportamiento similar para las 4 plantas, ya que todas tuvieron tiempos de secado menores a 7 horas, además de que al no usar la malla sombra en la cámara de secado los tiempos se redujeron considerablemente, dejando a este ensayo con los tiempos de secado más cortos. Para el contenido de humedad se reportaron valores finales menores al 10% en todos los casos, mientras que para la actividad de agua todas las plantas tuvieron un valor menor a 0.6, ambas variables de respuesta se vieron favorecidas cuando no se usó la malla sombra. La diferencia de color para cada planta fue fluctuante, siendo la ruda (4.46-13.35) y el epazote (4.7-13.70) las que presentaron menor diferencia después del secado, mientras que la diferencia más notoria en color fue para el toronjil (6.01-21.34) y el romero (12.87-30.15); al contrario del contenido de humedad y la actividad de agua, se notó que esta variable se vio favorecida al usar la malla sombra, ya que esta no permitió la entrada directa de la radiación solar, evitando así el cambio de color en las muestras. Las plantas que tuvieron el mayor porcentaje de actividad antioxidante en las pruebas de DPPH fueron el toronjil con valores entre 88 y 93% (100 µg/ml), y el romero con valores entre 88 y 92% (100 µg/ml). Finalmente, en el análisis energético se obtuvieron eficiencias bajas cuando no se usó la malla sombra debido a que al entrar mayor energía al sistema sólo una parte era utilizada y la energía restante se perdía; sin embargo, cuando se usó la malla sombra la eficiencia incrementó, debido a que la poca energía que ingresó al sistema se aprovechó en su totalidad. Con el presente trabajo se da la oportunidad de mostrar la utilidad de las nuevas tecnologías solares en la conservación de plantas aromáticas y medicinales de forma eficiente y amigable con el ambiente, dado que existen escasos reportes en la literatura sobre este proceso de secado solar.

Abstract

Mexico is a country that has great natural wealth; currently, 23,314 species of native vascular plants have been described, where aromatic plants and their essential oils are relevant given their medicinal, gastronomic and food preservative applications, however; One of the challenges faced in its study and commercialization process is to prolong the shelf life of the herbal medicine, since the plants require special conditioning in their dehydration process, drying being a feasible alternative that provides the conservation of the product. for a long time, where the aim is to reduce the humidity in the plant material to percentages that prevent its fermentation, the development of microorganisms and consequently the loss of active ingredients. Within the classification of drying techniques, we find solar drying, which is a little explored method for the conservation of aromatic and medicinal plants, for this reason the present work had the objective of thermally characterizing the process of solar drying of 4 aromatic plants to define the optimal conditions on the physicochemical properties. For this study, a medium-capacity cabinet-type mixed solar dryer was used and the 4 aromatic plants that were dried were lemon balm (*Agastache mexicana*), rosemary (*Rosmanirus officinalis*), epazote (*Dysphania ambrosoides*) and rue (*Ruta graveolens*). The experimental runs were carried out under an experimental design where 3 factors were considered, which were the shade mesh, the fan and the type of collector cover, with 2 levels (high and low), which were with and without shade mesh, with and without fan, and collector with glass cover and collector with polycarbonate cover; to later analyze its effect on the proposed response variables (moisture content, water activity, color difference and antioxidant activity). In addition, the energy analysis was carried out for each plant under the different drying conditions. The drying kinetics showed a similar behavior for the 4 plants, since they all had drying times of less than 7 hours, in addition to not using the shade mesh in the drying chamber, the times were considerably reduced, leaving this trial with the shortest drying times. For moisture content, final values of less than 10% were reported in all cases, while for water activity all plants had a value of less than 0.6, both response variables were favored when the shade mesh was not used. The difference in color for each plant fluctuated, with rue (4.46-13.35) and epazote (4.7-13.70) showing the least difference after drying, while the most noticeable difference in color was for lemon balm (6.01- 21.34) and rosemary (12.87-30.15); Contrary to the moisture content and water activity, it was noted that this variable was favored when using the shade mesh, since it did not allow the direct entry of solar radiation, thus avoiding the color change in the samples. The plants that had the highest percentage of antioxidant activity in the DPPH tests were lemon balm with values between 88 and 93% (100 µg/ml), and rosemary with values between 88 and 92% (100 µg/ml). Finally, in the energy analysis, low efficiencies were obtained when the shade mesh was not used because when more energy entered the system, only a part was used and the remaining energy was lost; however, when the shade mesh was used, the efficiency increased, since the little energy that entered the system was fully used. With the present work the opportunity is given to show the usefulness of the new solar technologies in the conservation of aromatic and medicinal plants in an efficient and friendly way with the environment, since there are few reports in the literature on this process of solar drying.

Índice general

Agradecimientos	3
Índice de tablas	10
Índice de figuras	11
Capítulo I: Introducción.....	14
Introducción	14
Planteamiento del problema.....	16
Justificación	16
Objetivos.....	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos.....	17
Capítulo II: Marco teórico	18
Plantas aromáticas y medicinales.....	18
Uso de las plantas aromáticas y medicinales	19
Antioxidantes	19
Toronjil	19
Botánica.....	19
Taxonomía.....	20
Morfología.....	20
Distribución y hábitat	20
Composición química.....	21
Usos en la medicina tradicional mexicana	21
Romero.....	22
Botánica.....	22
Taxonomía.....	22
Morfología.....	22
Distribución y hábitat	23
Composición química.....	23

Uso en la medicina tradicional mexicana.....	23
Epazote.....	23
Botánica.....	23
Taxonomía.....	24
Morfología.....	24
Distribución y hábitat	24
Composición química.....	25
Uso en la medicina tradicional mexicana.....	25
Ruda	25
Botánica.....	25
Taxonomía.....	26
Morfología.....	26
Distribución y hábitat	27
Composición química.....	27
Uso en la medicina tradicional mexicana.....	27
Conservación de alimentos	27
Causas de deterioro	28
Métodos de conservación	30
Secado	30
Estado del agua en los alimentos.....	31
Distribución de agua en los alimentos.....	31
Actividad del agua.....	32
Estabilidad en los alimentos.....	33
Métodos de secado.....	34
Fundamentos de secado	34
Curva de secado	35
Secado solar	36
Clasificación de los secadores solares	36
Secadores solares de convección natural	37
Secadores solares de convección forzada.....	37
Secadores solares híbridos	38
Secadores solares directos.....	38

Secadores solares indirectos.....	38
Secadores solares tipo mixto.....	38
Análisis energético.....	39
Eficiencia energética del colector solar.....	39
Eficiencia energética del secador solar.....	39
Eficiencia energética total del secado.....	39
Insolación.....	40
Capítulo III: Marco metodológico.....	41
Diseño de experimentos.....	41
Procesamiento de la muestra.....	41
Secado.....	42
Instrumentación.....	42
Color.....	43
Actividad de agua.....	44
Humedad.....	44
Actividad antioxidante.....	44
Eficiencia.....	45
Capítulo IV: Resultados y discusión.....	47
Toronjil.....	47
Cinética de secado.....	47
Resultados de las variables de respuesta.....	48
Contenido de humedad final del toronjil.....	48
Actividad de agua final del toronjil.....	51
Diferencia de color del toronjil (ΔE).....	53
Actividad antioxidante del toronjil.....	57
Romero.....	61
Cinéticas de secado.....	61
Resultados de las variables de respuesta.....	62
Contenido de humedad final del romero.....	62
Actividad de agua final del romero.....	65
Diferencia de color del romero (ΔE).....	67

Actividad antioxidante del romero.....	71
Epazote.....	75
Cinéticas de secado	75
Resultados de las variables de respuesta.....	75
Contenido de humedad final del epazote	76
Actividad de agua final del epazote	79
Diferencia de color del epazote (ΔE)	81
Actividad antioxidante del epazote	85
Ruda.....	89
Cinéticas de secado	89
Resultados de las variables de respuesta.....	89
Contenido de humedad final de la ruda.....	90
Actividad de agua final de la ruda.....	92
Diferencia de color de la ruda (ΔE).....	95
Actividad antioxidante de la ruda.....	98
Datos ambientales	102
Eficiencia	108
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones	112
Conclusiones.....	112
Recomendaciones y trabajo a futuro.....	113
Referencias.....	115

Índice de tablas

Tabla 1. Algunas hierbas de olor y especias utilizadas en México	18
Tabla 2. Constituyentes de aceites esenciales de <i>Agastache mexicana</i> subsp. mexicana y <i>Agastache mexicana</i> subsp. xolocotziana.....	21
Tabla 3. Organismos que provocan la descomposición de los alimentos	28
Tabla 4. Principales mecanismos de pérdida de calidad	29
Tabla 5. Actividad de agua de algunos alimentos	33
Tabla 6. Valores mínimos de la actividad del agua para el crecimiento de microorganismos de importancia en alimentos	34
Tabla 7. Diseño de experimentos con factores y niveles.....	41
Tabla 8. Corridas experimentales	41
Tabla 9. Valores utilizados en las ecuaciones	46
Tabla 10. Resultados obtenidos para las variables de respuesta en el toronjil	48
Tabla 11. Análisis de varianza para la humedad final del toronjil	49
Tabla 12. Análisis de varianza de la actividad de agua final del toronjil	51
Tabla 13. Análisis de varianza de la diferencia de color de muestras de toronjil	55
Tabla 14. Resultados obtenidos para la actividad antioxidante del toronjil	58
Tabla 15. Análisis de varianza para la actividad antioxidante del toronjil.....	59
Tabla 16. Resultados obtenidos para las variables de respuesta en el romero	62
Tabla 17. Análisis de varianza de la humedad del romero	63
Tabla 18. Análisis de varianza de la actividad de agua final del romero	65
Tabla 19. Análisis de varianza de la diferencia de color del romero.....	69
Tabla 20. Resultados obtenidos para la actividad antioxidante del romero	72
Tabla 21. Análisis de varianza para la actividad antioxidante	73
Tabla 22. Resultados obtenidos para las variables de respuesta en el epazote.....	76
Tabla 23. Análisis de varianza de la humedad final del epazote.....	77
Tabla 24. Análisis de varianza para la actividad de agua final del epazote	79
Tabla 25. Análisis de varianza de la diferencia de color del epazote	82
Tabla 26. Resultados obtenidos para la actividad antioxidante del epazote.....	86
Tabla 27. Análisis de varianza para la actividad antioxidante del epazote	87
Tabla 28. Resultados obtenidos para las variables de respuesta en la ruda.....	90
Tabla 29. Análisis de varianza de la humedad final de la ruda	91
Tabla 30. Análisis de varianza de la actividad de agua final de la ruda.....	93
Tabla 31. Análisis de varianza para la diferencia de color de la ruda	95
Tabla 32. Resultados obtenidos para la actividad antioxidante de la ruda	99
Tabla 33. Análisis de varianza para la actividad antioxidante de la ruda.....	100
Tabla 34. Condiciones ambientales promedio de los días de prueba	108
Tabla 35. Eficiencias obtenidas para el toronjil	109
Tabla 36. Eficiencias obtenidas para el romero.....	110
Tabla 37. Eficiencias obtenidas para el epazote	110
Tabla 38. Eficiencias obtenidas para la ruda	111

Índice de figuras

Figura 1. <i>Agastache mexicana</i> subespecie mexicana	20
Figura 2. <i>Rosmarinus officinalis</i> L.	22
Figura 3. <i>Dysphania ambrosioides</i>	24
Figura 4. <i>Ruta graveolens</i> L.	26
Figura 5. Diagrama de métodos de conservación	30
Figura 6. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua. a) Oxidación de lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos g) crecimiento de levaduras, y h) crecimiento de bacterias	32
Figura 7. Curvas típicas de secado (contenido de agua versus tiempo de secado): (a) con un período de retraso, (b) sin un período de retraso.	35
Figura 8. Curvas típicas de velocidad de secado: (a) velocidad de secado versus tiempo de secado, (b) velocidad de secado versus contenido de agua	36
Figura 9. Clasificación de los sistemas de secado solar	37
Figura 10. Secadores solares de gabinete con colector solar, a) Colector con cubierta de policarbonato, b) Colector con cubierta de vidrio.	42
Figura 11. Secador solar de gabinete instrumentado	43
Figura 12. Muestras de epazote liofilizadas	44
Figura 13. Placa de 96 pozos, con extractos de plantas a diferentes concentraciones y solución etanólica de DPPH 133 μM	45
Figura 14. Cinéticas de secado obtenidas para el toronjil	47
Figura 15. Gráfica de efectos principales para la humedad final del toronjil.....	49
Figura 16. Gráfica de interacción para la humedad final del toronjil.....	50
Figura 17. Gráfica de superficie de respuesta para la humedad final del toronjil	50
Figura 18. Gráfica de efectos principales para la actividad de agua final del toronjil	52
Figura 19. Gráfica de interacción para la actividad de agua final del toronjil	52
Figura 20. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad de agua final del toronjil... ..	53
Figura 21. Muestras de toronjil secas comparadas con la muestra fresca	54
Figura 22. Gráfica de efectos principales para la diferencia de color del toronjil.....	55
Figura 23. Gráfica de interacción para la diferencia de color del toronjil.....	56
Figura 24. Gráfica de superficie de respuesta para la diferencia de color del toronjil	57
Figura 25. Actividad antioxidante en las diferentes muestras de toronjil	58
Figura 26. Gráfica de efectos principales para la actividad antioxidante del toronjil	59
Figura 27. Gráfica de interacción para la actividad antioxidante del toronjil	60
Figura 28. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad antioxidante del toronjil....	60
Figura 29. Cinéticas de secado obtenidas para el romero.....	61
Figura 30. Gráfica de efectos principales para la humedad final del romero	63
Figura 31. Gráfica de interacción para la humedad final del romero	64
Figura 32. Gráfica de superficie de respuesta para la humedad final del romero	64
Figura 33. Gráfica de efectos principales para la actividad de agua final del romero.....	66
Figura 34. Gráfica de interacción para la actividad de agua del romero	66

Figura 35. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad de agua del romero	67
Figura 36. Muestras de romero secas comparadas con la muestra fresca	68
Figura 37. Gráfica de efectos principales para la diferencia de color del romero	70
Figura 38. Gráfica de interacción para la diferencia de color del romero	70
Figura 39. Gráfica de superficie de respuesta para la diferencia de color del romero	71
Figura 40. Actividad antioxidante en las diferentes muestras de romero.....	71
Figura 41. Gráfica de efectos principales para la actividad antioxidante del romero	73
Figura 42. Gráfica de interacción para la actividad antioxidante del romero.....	74
Figura 43. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad antioxidante del romero	74
Figura 44. Cinéticas de secado obtenidas para el epazote	75
Figura 45. Gráfica de efectos principales para la humedad final del epazote	77
Figura 46. Gráfica de interacción para la humedad final del epazote	78
Figura 47. Gráfica de superficie de respuesta para la humedad final del epazote.....	78
Figura 48. Gráfica de efectos principales para la actividad de agua final del epazote.....	80
Figura 49. Gráfica de interacción para la actividad de agua final del epazote	80
Figura 50. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad de agua final del epazote ..	81
Figura 51. Gráfica de efectos principales para la diferencia de color del epazote	82
Figura 52. Muestras de epazote secas comparadas con la muestra fresca.....	83
Figura 53. Gráfica de interacción para la diferencia de color del epazote	84
Figura 54. Gráfica de superficie de respuesta para la diferencia de color del epazote.....	84
Figura 55. Actividad antioxidante en las diferentes muestras de epazote	85
Figura 56. Gráfica de efectos principales para la actividad antioxidante del epazote.....	87
Figura 57. Gráfica de interacción para la actividad antioxidante del epazote	88
Figura 58. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad antioxidante del epazote ...	88
Figura 59. Cinéticas de secado obtenidas para la ruda	89
Figura 60. Gráfica de efectos principales para la humedad final de la ruda.....	91
Figura 61. Gráfica de interacción para la humedad final de la ruda.....	92
Figura 62. Gráfica de superficie de respuesta para la humedad final de la ruda	92
Figura 63. Gráfica de efectos principales para la actividad de agua final de la ruda	93
Figura 64. Gráfica de interacción para la actividad de agua final de la ruda	94
Figura 65. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad de agua final de la ruda.....	94
Figura 66. Muestras de ruda secas comparadas con la muestra fresca.....	96
Figura 67. Gráfica de efectos principales para la diferencia de color de la ruda.....	97
Figura 68. Gráfica de interacción para la diferencia de color de la ruda.....	97
Figura 69. Gráfica de superficie de respuesta para la diferencia de color de la ruda	98
Figura 70. Actividad antioxidante en las diferentes muestras de ruda	99
Figura 71. Gráfica de efectos principales para la actividad antioxidante de la ruda	100
Figura 72. Gráfica de interacción para la actividad antioxidante de la ruda	101
Figura 73. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad antioxidante de la ruda....	102
Figura 74. Datos ambientales registrados del día 25 de octubre del 2022	103
Figura 75. Datos ambientales registrados del día 16 de noviembre del 2022	103
Figura 76. Datos ambientales registrados del día 14 de noviembre del 2022	104
Figura 77. Datos ambientales registrados del día 25 de noviembre del 2022	105

Figura 78. Datos ambientales registrados del día 08 de noviembre del 2022	105
Figura 79. Datos ambientales registrados del día 22 de noviembre del 2022	106
Figura 80. Datos ambientales registrados del día 10 de noviembre del 2022	107
Figura 81. Datos ambientales registrados del día 30 de noviembre del 2022	107

Capítulo I: Introducción

Introducción

Las plantas que producen compuestos fragantes se conocen como plantas aromáticas y medicinales. Estas tienen la capacidad de biosintetizar metabolitos primarios y secundarios en una o más partes de la planta [1]. Las plantas aromáticas se han utilizado regularmente como ingredientes de medicamentos, alimentos y cosméticos, su uso se remonta a los grupos nómadas, incluso antes de que la agricultura surgiera como forma de subsistencia [2]. México posee un enorme capital natural, actualmente se han registrado 23,314 especies de plantas vasculares nativas, distribuidas en 2,854 géneros, 297 familias y 73 órdenes; esta flora incluye 1,039 especies de helechos y licofitas, 149 gimnospermas y 22,126 angiospermas [3]. A pesar de que las plantas aromáticas y sus aceites esenciales son parte importante de esta riqueza, el conocimiento que se tiene sobre estas es limitado [4]. A pesar de ello, estas plantas están en una demanda creciente por sus componentes activos que forman parte del mercado competitivo [5]. Además de sus propiedades aromáticas, como el sabor y olor, sus componentes químicos activos hacen que estas hierbas sean muy útiles para la fabricación de diversos aditivos [2]. Sin embargo, el uso directo e indirecto de las hierbas aromáticas requiere un acondicionamiento y secado especial [6].

Para almacenar alimentos se han implementado métodos de conservación temporales y permanentes. Los métodos temporales se pueden describir como enfriar o almacenar los alimentos en refrigeradores, también aislarlos de la humedad y el aire. Por otro lado, dentro de los métodos permanentes o de larga duración se encuentra el secado [7]. Mediante este método se elimina el agua de las materias primas agrícolas perecederas, a un nivel que se inhibe el crecimiento de microorganismos y retarda las reacciones bioquímicas enzimáticas y no enzimáticas indeseables, que dan como resultado una vida útil prolongada de los productos frescos [8]. Además, ofrece una densidad reducida y un bajo costo de transporte [6], siendo el método más apropiado para conservar los principios activos de las plantas aromáticas cuando se aplican los tratamientos adecuados [9]. Un proceso inadecuado induce a la volatilización de los principios activos, así como cambios desfavorables en el color, el olor y reduce la calidad del producto [5]. Un factor limitante es la sensibilidad térmica de los compuestos activos [10], ya que una temperatura baja provoca una reacción oxidativa y la formación de nuevos compuestos, mientras que una temperatura más alta provoca la degradación y pérdida de algunos compuestos [8]. En las hierbas se puede degradar la clorofila y alterar el color de la mayoría de las hojas, lo que influye en el atractivo final y la aceptación [9].

Desde hace muchos años ha habido una investigación importante enfocada en el aprovechamiento de las diferentes fuentes de energía renovable, debido al enorme consumo de combustibles y al deterioro del medio ambiente. Entre todas las fuentes de energía renovable disponibles, la energía solar es la preferida, debido a su naturaleza, abundante disponibilidad y limpieza. Las aplicaciones térmicas solares se pueden utilizar para secar, calentar, enfriar, cocinar y generar energía. Diversos grupos de investigación se han centrado en las actividades de exploración y desarrollo de los secadores solares debido a que los métodos de secado mayormente utilizados son un gran consumidor de energía, la industria de producción de alimentos deshidratados consume entre 10 y 25% de la energía total

empleada en la industria alimentaria [11]. En los últimos años se ha explorado la aplicación de secadores solares para el secado de hierbas medicinales [6], por ejemplo, secadores de túnel para el secado de tomillo y menta [2], secadores de gabinete para el secado de hierbabuena [12] y secadores con ventilador para el secado de manzanilla [13]. El desarrollo de un secador solar de buen rendimiento tiene una importancia económica significativa [14]. Se han llevado a cabo diversos estudios experimentales sobre los procesos de secado de productos agrícolas, como la menta [2], albahaca [7], perejil [15], manzanilla [13], por mencionar algunos; para esta investigación se realizó el proceso de secado solar de cuatro plantas aromáticas (toronjil, romero, epazote y ruda).

El epazote (*Dysphania ambrosioides*) es una planta anual o perenne de vida corta, que llega a crecer en promedio 1.2 m, es apreciada tanto por su sabor como por sus propiedades medicinales [16]. La producción anual en México es de más de dos mil toneladas [17] y en la gastronomía mexicana se usa en múltiples platillos como frijoles, esquites, quesadillas, tamales, sopas de mariscos, caldos, guisados, etc.

El romero (*Rosmanirus officinalis* L) es una planta leñosa de hojas fragantes, perteneciente a la familia Lamiaceae, que contiene muchos compuestos volátiles [18]. Es ampliamente conocida por las diversas aplicaciones que tiene en el campo alimentario, pero también por su creciente interés en sus propiedades farmacéuticas [19]. En la cocina sus ramas secas se utilizan para los asados de carne, mientras que en aromaterapia y perfumería se emplea el aceite esencial ya que resulta un buen reconfortante [20].

La ruda (*Ruta graveolens*) es una planta herbácea perenne o semiarbusciva, alcanza de 60 a 75 cm de altura, tiene un olor fuerte y desagradable [21]. Es una planta con un alto contenido de vitamina C y por esa razón se considera antiescorbútica, tiene usos culinarios y medicinales. Debido a su ligero toque picante y amargo se emplea en la cocina, aunque por su aroma se utiliza en diferentes salsas o mezclas alcohólicas [22]. Y algunos de los sus usos medicinales que se le dan son como antiséptico, estimulante, utilizado contra dolores reumáticos, cólicos, entre otros [23].

El toronjil (*Agastache mexicana*) es una planta vascular y perenne nativa de México [24]. Está dividida en dos subespecies: *Agastache mexicana* subsp. mexicana y *Agastache mexicana* subsp. xolocotziana, conocidas comúnmente como “toronjil morado” y toronjil blanco” [25]. Se cultiva en varias regiones de México, como Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla, Veracruz y Ciudad de México. Su uso medicinal consiste en preparar agua hirviendo como infusión o decocción, para tratar trastornos nerviosos, cardiovasculares e insomnio, de igual forma se usa para tratar dolor de estómago y enfermedades gastrointestinales [26].

A pesar de ser plantas conocidas en nuestro país, en la literatura no se han reportado estudios sobre el efecto del secado solar sobre ellas. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del secado solar utilizando un secador de gabinete tipo mixto de mediana capacidad a diferentes condiciones, para posteriormente analizar el efecto sobre sus propiedades fisicoquímicas como el contenido de humedad, actividad de agua, color y actividad antioxidante.

Planteamiento del problema

El secado de plantas aromáticas a menudo es un método mal controlado y costoso para los productores. El contenido de humedad de una planta aromática debe disminuirse rápidamente para su conservación, pero a baja temperatura para evitar el deterioro de sus compuestos activos. El proceso de secado influye en sus componentes, en la calidad y cantidad del producto final. Un proceso inadecuado puede inducir a cambios desfavorables en el color, olor y la calidad del producto final. Al agotarse la clorofila y alterar el color de las hojas aromáticas, influye en el atractivo final y en la aceptación del producto seco. Por lo que usar la técnica correcta de secado ayudaría a disminuir los problemas mencionados anteriormente.

Justificación

El secado es un proceso que se utiliza principalmente para la conservación de los alimentos; sin embargo, la forma convencional requiere grandes cantidades de energía, las cuales representan entre el 10% y 15% del consumo total de energía en la industria alimentaria. Una alternativa son las energías renovables, de esta forma pueden reducirse los costos, evitar el uso de combustibles fósiles y ayudar al medio ambiente. Por esa razón el secado solar es una alternativa para la industria alimentaria, porque no usa combustibles fósiles, además de que al hacer uso de un buen secador solar los alimentos se protegen de las condiciones ambientales y de la radiación solar directa; por otro lado, la eficiencia de secado puede ser mayor y el alimento obtiene un valor agregado. México es un país que recibe suficiente radiación solar durante todo el año, por lo tanto, se pueden satisfacer las demandas energéticas para el proceso de secado.

Este método se considera el más apropiado para conservar los principios activos de las plantas aromáticas, siempre que se apliquen los tratamientos adecuados, por ello en los últimos años se ha explorado la aplicación de secadores solares, ya que si se desarrolla un secador solar que tenga un buen rendimiento, este tendrá una importancia económica significativa. Pero encontrar las condiciones óptimas es un reto, debido a que un proceso inadecuado puede llevar a cambios que no beneficien el color, olor y reducir la calidad de las plantas.

Por esas razones en este trabajo se buscó encontrar las condiciones más adecuadas de secado para el toronjil, romero, epazote y ruda, utilizando un secador solar mixto tipo gabinete de mediana capacidad bajo diferentes condiciones de operación, que incluyen el uso de malla sobra, ventilador y tipo de cubierta del colector. Para posteriormente evaluar su efecto sobre propiedades como el contenido de humedad, actividad de agua, color y actividad antioxidante.

A pesar de que existen estudios sobre el secado solar de diversas plantas aromáticas, para las plantas de estudio que se mencionan no se han reportado trabajos en la literatura, por lo cual la información que se obtenga en este estudio puede ser de gran utilidad para entender mejor el proceso de secado y de esta forma se pueda realizar de forma eficiente.

Objetivos

- **Objetivo general**

Caracterizar térmicamente el proceso de secado solar de 4 plantas aromáticas para definir las condiciones de deshidratación más adecuadas para conservar sus propiedades fisicoquímicas.

- **Objetivos específicos**

Caracterizar fisicoquímicamente las plantas aromáticas frescas (epazote, ruda, romero y toronjil).

Establecer las condiciones del proceso de secado solar de hierbas aromáticas.

Evaluar térmicamente un secador solar tipo gabinete de mediana capacidad.

Evaluar el proceso de secado solar de las plantas aromáticas de estudio.

Caracterizar fisicoquímicamente las plantas aromáticas deshidratadas (epazote, ruda, romero y toronjil).

Evaluar la actividad antioxidante de las plantas aromáticas frescas y deshidratadas (epazote, ruda, romero y toronjil).

Capítulo II: Marco teórico

Plantas aromáticas y medicinales

Las plantas se han utilizado en sus diferentes versiones (ornamentales, comestibles, aromáticas y medicinales) para adornar, tranquilizar y acompañar a las personas alrededor del mundo. Se conoce como plantas aromáticas y medicinales a aquellas que producen compuestos fragantes. Estas se cuentan por miles alrededor del mundo y se caracterizan por tener la capacidad de sintetizar compuestos (metabolitos secundarios), en una o más partes de la planta como la raíz, tallo, hojas, flores, frutos o semillas. Estos metabolitos secundarios que se producen en las plantas tienen propiedades organolépticas y bioquímicas específicas que permiten su uso con fines terapéuticos, aromáticos y alimenticios [1].

El uso de las plantas medicinales a través de la medicina tradicional es ancestral [27]. En México tiene su origen en la época precolombina y es una práctica que contribuye a la atención de enfermedades que afectan a los mexicanos [28]. Lo más común es usar las hojas y las flores, aunque algunas veces también se utiliza el tallo o la raíz. Dichas plantas se consumen directamente o pueden prepararse como infusiones [27].

México cuenta con una enorme variedad de plantas de uso medicinal. Tiene una amplia riqueza florística y ocupa el segundo lugar mundial en el registro de plantas de uso medicinal, después de China. El Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) tiene documentadas 3,000 especies de plantas medicinales, a pesar de que en México se cuenta con 4,500.

El 90% de la población mexicana ha usado o usa alguna planta medicinal, sin embargo, sólo el 5% de las especies cuenta con estudios científicos, por lo que muchas se usan, pero se desconoce si en realidad sirven para determinado fin. Se estima que alrededor de 250 especies (nativas y exóticas) se comercializan y en su mayoría provienen del medio silvestre [29].

Actualmente, las plantas medicinales y aromáticas usadas en nuestro país son una combinación de especies nativas e introducidas de distintas partes del mundo (Tabla 1) [1].

Tabla 1. Algunas hierbas de olor y especias utilizadas en México

Nombre común	Nombre científico	Parte aprovechada	Origen geográfico
Laurel mexicano	<i>Litsea glaucescens</i>	Hojas	México
Laurel europeo	<i>Laurus nobilis</i>	Hojas	Mediterráneo
Lavanda	<i>Lavandula</i> spp.	Inflorescencias y hojas	Mediterráneo
Orégano	<i>Lippia</i> spp.	Hojas	México
Pimienta gorda	<i>Pimenta dioica</i>	Frutos secos	México y Centroamérica
Vainilla	<i>Vanilla planifolia</i>	Frutos fermentados y secos	México
Pápalo	<i>Porophyllum ruderale</i>	Hojas	México
Romero	<i>Rosmarinus officinalis</i>	Hojas	Europa Mediterránea y norte de África
Hierbabuena	<i>Mentha</i> spp.	Hojas	Europa
Menta	<i>Mentha piperita</i>	Hojas	Asia central
Perejil	<i>Petroselinum crispum</i>	Hojas	Italia
Cilantro	<i>Coriandrum sativum</i>	Hojas y semillas	Mediterráneo oriental
Clavo	<i>Syzygium aromaticum</i>	Flores	Indonesia
Canela	<i>Cinnamomum</i> spp.	Corteza	Sri Lanka
Pimienta negra	<i>Piper nigrum</i>	Fruto	India
Manzanilla	<i>Matricaria recutita</i>	Flores y hojas	Europa occidental
Epazote	<i>Dysphania ambrosioides</i>	Hojas	México

Fuente: Aguirre Dugua [1].

Uso de las plantas aromáticas y medicinales

Se ha incrementado el interés en encontrar antioxidantes provenientes de fuentes naturales, para su uso en alimentos o en fármacos, con el fin de reemplazar los antioxidantes sintéticos, los cuales están cada vez más restringidos [30]. Por ello, en la industria alimentaria y en la investigación científica, se ha prestado más atención a las plantas aromáticas y sus extractos, esto debido a sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas, las cuales les permiten competir con otros antioxidantes naturales y sintéticos [31]. Estas plantas se consideran fuentes de antioxidantes naturales, como las sustancias fenólicas, que son componentes presentes de hierbas y plantas. Un gran número de plantas aromáticas tienen acciones antiinflamatorias, antialérgicas, antivirales y vasodilatadoras [32]. Actualmente en la industria alimentaria un pequeño número de plantas se usan como antioxidantes [33], ya que sus componentes funcionan como agentes conservantes de alimentos [31].

Antioxidantes

Un antioxidante es una molécula que inhibe, detiene o controla la oxidación de un sustrato; puede ser un compuesto orgánico o inorgánico [34]. En la industria alimentaria, un antioxidante se define como una sustancia que es capaz de prevenir o retrasar, de forma significativa, la oxidación de materiales fácilmente oxidables, como las grasas [35].

Los antioxidantes se clasifican de acuerdo con su origen en dos grandes grupos: sintéticos y naturales. En los antioxidantes naturales se encuentran los tocoferoles, flavonoides, ácidos fenólicos y ácido ascórbico; mientras que en los antioxidantes sintéticos se encuentran BHA (Butilhidroxianisol), BHT (Butilhidroxitolueno), TBHQ (Terbutilhidroquinona) y ésteres de ácido gálico [36]. Los compuestos fenólicos son antioxidantes naturales que se encuentran presentes en los alimentos vegetales [34], constituyen una de las principales clases de metabolitos secundarios de las plantas [33].

Toronjil

Botánica

El *Agastache* mexicano pertenece a la familia Lamiaceae, la octava familia de plantas más diversa en México. Su uso y comercialización para la medicina tradicional mexicana lo convierten en el miembro más importante de este género en México. La especie *Agastache mexicana* se divide en dos subespecies, esto de acuerdo con sus características anatómicas y composición química: toronjil rojo, *Agastache mexicana* subespecie mexicana (Figura 1), y toronjil blanco, *Agastache mexicana* subespecie xolocotziana [24].

Taxonomía

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Subclase: Asteridae

Orden: Lamiales

Familia: Lamiaceae

Género: *Agastache*

Especie: *Agastache mexicana*



Figura 1. *Agastache mexicana* subespecie mexicana

Morfología

El toronjil es una planta aromática de unos 40 a 60 cm, aunque algunos reportes informan una altura de hasta 1.5 m. Tiene tallos cuadrados, hojas en forma de lanza con bordes dentados y con pelos por el envés. En sus racimos terminales tiene de 5 hasta 20 flores, con forma tubular, de color rojo vivo o rojo-morado y sus frutos son color café [37].

Distribución y hábitat

El toronjil es originario de México; se encuentra en climas cálidos, semicálidos y templados. Está asociada a bosques tropicales caducifolios, subcaducifolios y perennifolios, y a bosques espinosos, mesófilos de montaña, de encino, de pino y mixto de encino-pino [37].

La especie se distribuye en los Estados de Guanajuato, Michoacán, Puebla, Querétaro, Hidalgo, Veracruz, Morelos y Tlaxcala, así como en la Ciudad de México [38].

Composición química

Las especies de *Agastache*, típicamente para Lamiaceae, son abundantes en metabolitos especializados de fenilpropanoides y terpenoides. El primer grupo incluye flavonoides, ácidos fenólicos libres y dépsidos, así como lignanos. El segundo grupo principal: los terpenoides están contenidos en fracciones volátiles, así como en varios órganos como no volátiles [39]. Una de las flavonas típicas reportadas en *A. mexicana* es un glucósido de acacetina (5,7 dihidroxi-4'-metoxiflavona): tilianina (acacetin-7-O-β-D glucopiranosido) la cual se encuentra presente en las partes aéreas y raíces [39].

Las subespecies del *Agastache* se clasificaron debido a sus diferencias morfológicas, sin embargo, aunque *A. mexicana* subsp. *xolocotziana* comparte algunos componentes químicos comunes con *A. mexicana* subsp. *mexicana*, también produce breviflorina, un diterpeno de tipo clerodano, flavonoides de crisina y pratol, y un aceite esencial formado principalmente por acetato de bornilo. El género *Agastache* se define químicamente por la presencia de metil chavicol, estragol y limoneno en sus aceites esenciales, así como por flavonoides derivados de la 4',5,7-trihidroxi flavona en sus constituyentes polares [25].

En la Tabla 2 se muestran los aceites esenciales presentes en las dos subespecies de *Agastache*. De acuerdo con el análisis químico *A. mexicana* subsp. *mexicana* proporcionó metil chavicol (86.78%) y limoneno (11.24%) como compuestos principales, mientras que en *A. mexicana* subsp. *xolocotziana* los compuestos principales que se detectaron fueron la pulegona (80.07%) y limoneno (9.49%) [25].

Tabla 2. Constituyentes de aceites esenciales de *Agastache mexicana* subsp. *mexicana* y *Agastache mexicana* subsp. *xolocotziana*

Compuesto	Abundancia (%)	
	<i>A. mexicana</i> subsp. <i>mexicana</i>	<i>A. mexicana</i> subsp. <i>xolocotziana</i>
Limoneno	11.24	9.49
Linalol	1.98	-
Mentona	-	7.91
Isopulegona	-	2.53
Metil chavicol	86.78	-
Pulegona	-	80.07

Fuente: Estrada Reyes [25].

Usos en la medicina tradicional mexicana

En estados como México, Hidalgo, Michoacán, Morelos y Puebla, esta planta se usa frecuentemente para tratar del espanto, producto de cualquier episodio traumático que amenace la integridad física y/o emocional de un individuo. Con este propósito se emplean diversos preparados, generalmente acompañados de otros componentes [37]. La infusión que combina *A. mexicana* subsp. *mexicana* y subsp. *xolocotziana* se bebe para tratar principalmente dolores gastrointestinales, menstruales y nerviosos [40].

Romero

Botánica

Rosmarinus officinalis L. (Figura 2) es una importante planta medicinal de la familia Lamiaceae. Esta planta perenne es leñosa con hojas fragantes y muchos compuestos volátiles.

Taxonomía

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Subclase: Asteridae

Orden: Lamiales

Familia: Lamiaceae

Género: *Rosmarinus*

Especie: *Rosmarinus officinalis* L.



Figura 2. *Rosmarinus officinalis* L.

Morfología

Es un arbusto aromático, perennifolio, de hasta 2 m de altura; tiene tallos leñosos y erectos, ramificado. Sus hojas son firmes de tipo lineal casi agujas, color verde oscuras por el haz y blanquecinas por el envés, provistas de abundantes glándulas de esencia. También tiene flores que cambian su tonalidad dependiendo la zona donde se cultiva, desde azules vivos hasta el color lila suave, casi blanco en algunas ocasiones [20].

Distribución y hábitat

El romero es originario de la Región Mediterránea y se encuentra en climas cálido, semicálido, semiseco y templado. Crece en sitios con vegetación perturbada de bosques tropicales caducifolio, subcaducifolio y perennifolio, matorral xerófilo subtropical, pastizal y bosques de encino, de pino y mixto de pino-encino [41].

En México es utilizado como planta medicinal y crece en los Estados de Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, México, Morelos, Oaxaca, Puebla, Sonora, Tlaxcala, y Veracruz [42].

Composición química

En los aceites esenciales del romero se han reportado diferentes moléculas activas. Se han identificado la presencia de α -pineno, β -pineno, canfeno, ésteres terpénicos como el 1,8-cineol, alcanfor, linalol, verbinol, terpineol, carnosol, rosmanol, isorosmanol, 3-octanona, isobanil-acetato y β -carioileno; los ácidos vanílico, caféico, clorogénico, rosmarínico, carnósico, ursólico, oleanólico, butilínico, betulínico, betulina, α -amirina, β -amirina, borneol, y acetato de bornilo. En sus hojas prevalece un alto contenido de ácido rosmarínico y su derivado rosmaricina, también se encuentra el ácido carnósico el cual se caracteriza por ser inestable.

El romero es una planta con un alto contenido de antioxidantes. Los compuestos activos que presentan mayor actividad antioxidante son los ácidos fenólicos, flavonoides, pigmentos naturales (capsaicina y curcumina) y terpenos (rosmanol, ácido carnósico, carnosol, epirosmanol e isorosmanol). Sin embargo, la actividad antioxidante en el romero se debe particularmente a los ácidos caféico y rosmarínico [42].

Uso en la medicina tradicional mexicana

Los usos medicinales que se les da a esta planta incluyen varios trastornos del aparato digestivo como dolor de estómago, indigestión, úlcera, diarrea, gastritis, colitis, apéndice y como desinflamatoria del estómago. De acuerdo con la zona del país, cambian sus usos; en Oaxaca se utiliza para tratar desórdenes ginecológicos, particularmente en casos de retención de la placenta y para hacer lavados después del parto. En los estados de Hidalgo, Michoacán, Morelos y Puebla, se usa para propiciar la fertilidad de la mujer, para evitar el aborto y aliviar el flujo vaginal. También se utiliza para tratar problemas de la piel, cicatrizar heridas, sarampión, evitar la caída del pelo. Además, se usa para dolores musculares, de espalda, caderas, huesos, por golpes, inflamación de articulaciones y artritis. Otro uso que se le da es para aliviar enfermedades respiratorias como catarro, anginas, resfriado, bronquitis, tos ferina y tos [41].

Epazote

Botánica

El epazote es una planta herbácea, vivaz o perenne, de la familia de las Quenopodiáceas [16]. La *Dysphania ambrosioides* (Figura 3) antes conocida como *Chenopodium ambrosioides* es una hierba nativa de América del Sur [43].

Taxonomía

Reino: Plantae

Clase: Magnoliopsida

Orden: Caryophyllales

Familia: Amaranthaceae

Subfamilia: Chenopodioideae

Género: *Dysphania*

Especie: *Dysphania ambrosioides*



Figura 3. *Dysphania ambrosioides*

Morfología

El epazote es una planta aromática anual o perenne de vida corta que puede llegar a crecer en promedio 1.2 m, tiene el tallo muy ramificado, con ramas de desarrollo irregular y hojas oblongo-lanceoladas de hasta 12 cm de longitud. Tiene flores pequeñas de color amarillento o verdoso que nacen en racimos y originan semillas negras. La planta tiene un fuerte olor no muy agradable [16].

Distribución y hábitat

Esta planta es originaria de América, está adaptada a distintos hábitats de clima cálido, semicálido, semiseco y templado. Crece en terrenos asociados a bosques tropicales caducifolio, subcaducifolio y perennifolio; así como a bosques espinoso, mesófilo de

montaña, de encino, de pino, mixto de encino-pino, bosque junípero y pastizal de zona templada [44].

Esta planta se encuentra en la mayoría de los Estados del país como en Aguascalientes, Baja California Norte, Baja California Sur, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Colima, Ciudad de México, Durango, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luís Potosí, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Yucatán [45].

Composición química

El aceite esencial de las hojas del epazote está compuesto principalmente por monoterpenos [46]. Sin embargo, los monoterpenoides, sesquiterpenoides y flavonoides son los principales constituyentes químicos responsables de su sabor, propiedades antihelmínticas y toxicidad para humanos cuando se consumen como aceite esencial o en grandes cantidades [47].

El componente principal de esta planta es el ascaridol (42-90% de la esencia), la concentración de este varía con la época de recolección, la temperatura y la humedad. También tiene otros compuestos como aritasona, alcanfor, β -carofileno, p-cimol, p-cimeno, n-docosano, geraniol, γ -gurjuneno, n-hentriacontano, n-heptacosano, limoneno, mirceno, n-octacosano, felandreno, α - y β -pineno, pinocarvona, safrol, espinasterol, α -terpineno, α - y γ -terpineol, terpinil-acetato, terpinil-salicilato, timol y alcohol triacontílico.

De igual forma contiene saponinas (planta entera), ácidos orgánicos (butírico, cítrico, ferúlico, málico, succínico, tartárico, vainílico), taninos (partes aéreas), anetol, kaempferol, quercetina, santonina (frutos), betaína, quenopodiósidos, heterósidos (raíces), entre otros [48].

Uso en la medicina tradicional mexicana

El epazote es una de las plantas indígenas más preciadas en México, tanto por su sabor como por sus propiedades medicinales. Dentro de sus propiedades medicinales destacan el disminuir los dolores estomacales e intestinales, así como los cólicos menstruales. De igual forma se utiliza para eliminar los parásitos, calmar el nerviosismo excesivo, descongestionar las vías respiratorias y aumentar la producción de leche materna [17].

Ruda

Botánica

La ruda (*Ruta graveolens*) (Figura 4) es una planta herbácea de olor desagradable, miembro de la familia Rutaceae [49].

Taxonomía

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Sapindales

Familia: Rutaceae

Subfamilia: Rutoideae

Género: *Ruta*

Especie: *Ruta graveolens* L.



Figura 4. *Ruta graveolens* L.

Morfología

Ruta graveolens es un arbusto pequeño, perenne y semileñoso. Mide entre 0.6 a 0.9 m de altura. Cerca de la base los tallos se vuelven leñosos, pero permanecen herbáceos cerca de las puntas. Sus hojas miden de 7.6 a 12.7 cm de largo, se diseccionan pinnadamente en segmentos oblongos o en forma de cuchara. Su follaje verde tiene un olor fuerte y bastante desagradable. Tiene pequeñas flores amarillas que aparecen en verano, por encima del follaje y cada flor mide aproximadamente 1.3 cm de ancho con cuatro pétalos [50].

Distribución y hábitat

Originaria del Sur de Europa, está presente en climas cálido, semicálido, semiseco, muy seco y templado. Crece en bosques tropicales caducifolio, subcaducifolio y perennifolio, matorral xerófilo, bosques de encino, de pino, mixto de pino-encino y bosques de juníferos [51].

Composición química

Estudios químicos han informado que la ruda contiene furanocumarinas, alcaloides de acridona y quinolona, y flavonoides. Dichos compuestos tienen una actividad biológica significativa [52]. Los principales flavonoides activos son la rutina y la quercetina. La rutina se aisló de las hojas de *R. graveolens*. En el aceite volátil se encuentra un alto contenido de ácidos alifáticos, alcoholes y cetonas. Los componentes principales de las partes aéreas florales de la planta son 2-undecanona (33.9%), acetato de 2-heptanol (17.5%), 1-dodecanol (11%), geyreno (10.4%), 2-nonanona (8.8%), 2-decanona (1.9%), geijereno (1.6%), óxido de trans-piperitenona (1.4%), óxido de cis-piperitenona (1.2%), 2-metil-undecanal (1.1%), 2-dodecanona (1.1 %), 2-nonanol (1.1 %) y elemol (1.1 %).

De la raíz se han aislado alcaloides como la rutacridona, el epóxido de rutacridona y el gravacridondiol, mientras que de las hojas se ha aislado el alcaloide graveolina [50].

Uso en la medicina tradicional mexicana

Su uso es principalmente para el dolor de estómago. Sin embargo, tiene diferentes usos dependiendo del estado del país. En Michoacán se usa para tratar el padecimiento matzarani, el cual se atribuye a la abundante ingestión de alimentos. Mientras que, en el Estado de México, Oaxaca y Baja California Sur, se usa para malestares causados por un coraje. En estados como Guerrero, Michoacán y Morelos se utiliza con frecuencia para aliviar el dolor de oído.

Otros usos que tiene son para tratar diversos problemas de tipo ginecológico, como cólicos menstruales. Para ayudar en la labor de parto, regularizar la menstruación, como abortivas, espasmolíticas y para estimular la lactancia. De igual forma puede usarse para casos de calambres en el estómago, dolor de barriga, gripe, resfriado, tos, artritis, heridas, varices y dolor de cabeza [51].

Conservación de alimentos

La conservación de alimentos tiene como objetivo extender la vida útil de los alimentos para permitir su almacenamiento. La actividad de los microorganismos es la fuente más peligrosa de limitación de la vida útil. Por ello, el objetivo principal de la conservación de los alimentos es eliminar a los microbios y evitar sus actividades que amenazan la salud. Procesos como la concentración, la deshidratación y la congelación, tienen como base común limitar la disponibilidad de agua para los microorganismos. Estos procesos reducen la disponibilidad de agua al reducir el contenido total de agua del alimento.

El agua, además de controlar la actividad microbiana, tiene una profunda influencia en los procesos físicos y químicos que afectan la vida útil. Por esta razón, la gestión del agua es un aspecto clave de la tecnología alimentaria [53].

Los puntos que se deben tener en cuenta en la conservación de los alimentos son:

- Nivel de calidad deseado
- Duración de la conservación
- Grupo para el que se conservan los productos

Después de almacenar un alimento en conserva por un período determinado, algunos atributos de calidad pueden alcanzar un estado indeseable. La calidad se define como el grado de aptitud para el uso o la condición que indica el nivel de satisfacción de los consumidores. Un alimento llega al final de su vida útil cuando se ha deteriorado a tal punto que se considera inadecuado para el consumo. La pérdida de calidad depende de los tipos de alimentos y su composición, formulación, envasado y condiciones de almacenamiento. Cuando la conservación falla, se tienen consecuencias como la pérdida de color, que es un deterioro menor, hasta que los alimentos se vuelven extremadamente peligrosos para el consumo humano [54].

Causas de deterioro

Las principales causas del deterioro de los alimentos son los efectos mecánicos, físicos, químicos y microbianos. Las cuatro fuentes de contaminantes microbianos son el suelo, el agua, el aire y los animales (insectos, roedores, aves y humanos) (Tabla 3).

Tabla 3. Organismos que provocan la descomposición de los alimentos

1. Microorganismos a. Hongos: moho y levadura b. bacterias c. fagos d. protozoos
2. Insectos y ácaros a. Directamente al comer (infestación) b. Indirectamente al propagar enfermedades (mosca de la fruta, mosca doméstica)
3. Roedores a. Directamente al consumir alimentos b. Indirectamente al propagar enfermedades

Fuente: Rahman [54].

En la Tabla 4 se muestran las principales causas de la pérdida de calidad de los alimentos.

Tabla 4. Principales mecanismos de pérdida de calidad

Microbiológico	Enzimático	Químico	Físico	Mecánico
Crecimiento de microorganismos	Pardeamiento	Pérdida de color	Caída	
Mal sabor	Cambio de color	Pérdida de sabor	Liberación controlada	Magulladuras por vibración
Producción de toxinas	Mal sabor	Pardeamiento no enzimático	Cristalización	Agrietamiento
		Pérdida de nutrientes	Encapsulación de sabores	Daños por presión
		Oxidación-reducción	Cambios de fase	
		Rancidez	Recristalización	
			Encogimiento	

Fuente: Rahman [54].

Los alimentos están expuestos a una gran variedad de condiciones ambientales durante su almacenamiento y distribución. Los factores ambientales como la presión, la temperatura, la humedad, el oxígeno y la luz pueden provocar varias reacciones para favorecer la degradación de los alimentos. En consecuencia, los alimentos se pueden alterar hasta el punto de ser rechazados o dañinos para quien los consume.

Los microorganismos tienen una temperatura óptima a la que crecen mejor, una temperatura mínima por debajo de la cual ya no crecen y una temperatura máxima por encima de la cual también se suprime todo desarrollo. Pero tienen la capacidad de multiplicarse a altas tasas cuando se presentan las condiciones favorables. Una preocupación de seguridad importante en el procesamiento y manipulación de los alimentos es la patogenicidad de ciertos microorganismos, ya que producen sustancias químicas que son tóxicas para los humanos.

Otros contaminantes que también son motivo de preocupación en el deterioro de alimentos son los microbianos o químicos. Los cambios químicos pueden hacer que los alimentos se deterioren al reducir su calidad sensorial y nutricional. La calidad de los alimentos puede cambiar por las reacciones enzimáticas. La presencia de oxígeno en las inmediaciones de los alimentos aumenta la tasa de oxidación. Algunas reacciones químicas son inducidas por la luz, como la pérdida de vitaminas.

Otra de las principales causas del cambio de calidad y la degradación del contenido nutricional en los alimentos es el pardeamiento no enzimático. Este tipo de reacción se produce por la interacción entre los azúcares reductores y los aminoácidos, lo que lleva a la pérdida de solubilidad de las proteínas, el oscurecimiento de los productos secos de color claro y desarrollo de sabores amargos. También tienen una influencia en el pardeamiento no enzimático los factores ambientales como la temperatura, la actividad de agua y el pH [54].

Métodos de conservación

Las principales técnicas de conservación de los alimentos se pueden categorizar como: inhibir el deterioro químico y el crecimiento microbiano, inactivar directamente bacterias, levaduras, mohos o enzimas, y evitar la contaminación antes y después del procesamiento. En la Figura 5 se muestran las técnicas o métodos mencionados anteriormente.

A pesar de que actualmente continúan usándose los métodos de conservación tradicionales, recientemente se han realizado esfuerzos para mejorar la calidad de los productos alimenticios para cumplir con los requisitos de los consumidores, evitando así el uso extremo de una sola técnica. Los métodos de conservación dependen del origen de los alimentos, en particular si son de origen vegetal o animal [54].

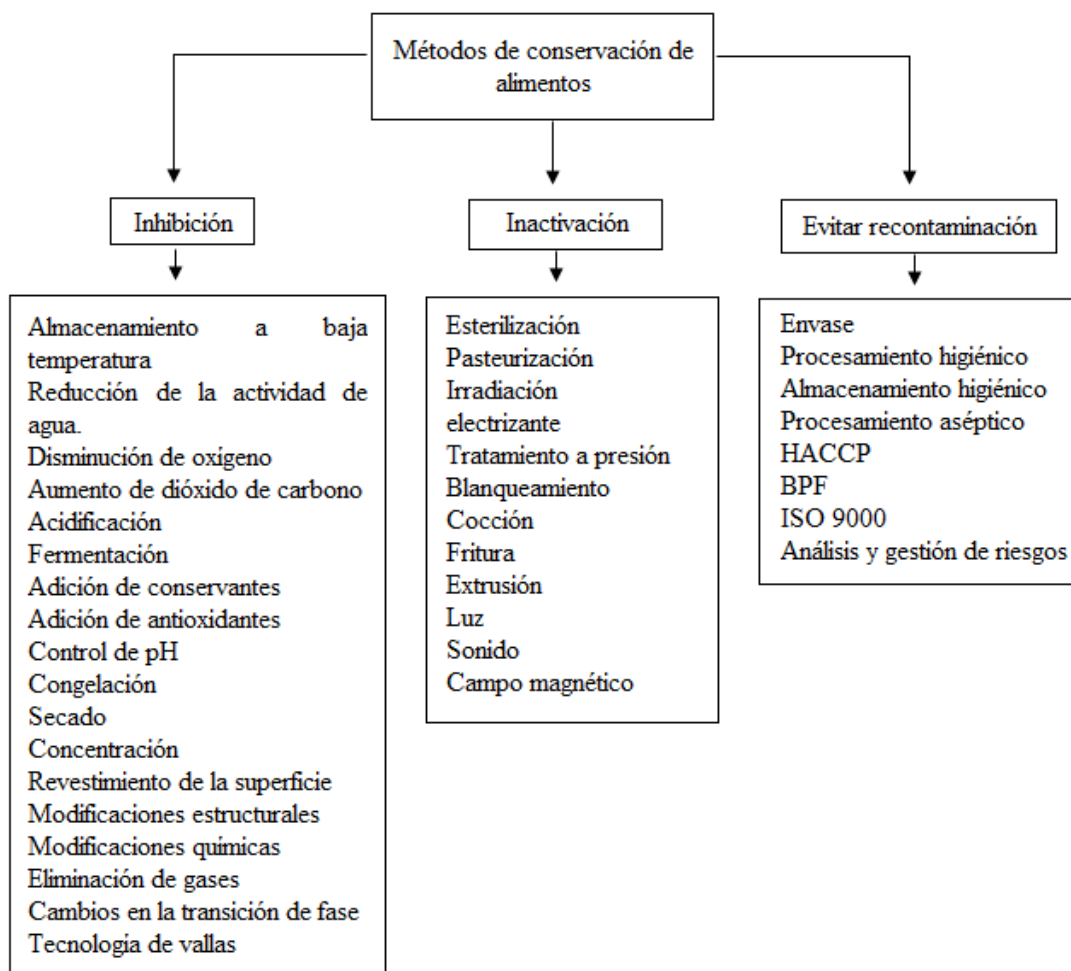


Figura 5. Diagrama de métodos de conservación. Fuente: Rahman [54].

Secado

El secado es un método de conservación de alimentos tradicional y más común utilizado por los seres humanos y la industria de procesamiento de alimentos. Hoy en día se utilizan muchos tipos de equipos y métodos sofisticados para deshidratar alimentos. Durante los últimos años, se han hecho esfuerzos para comprender algunos de los cambios químicos y

bioquímicos que ocurren durante el proceso y de esta forma desarrollar métodos para prevenir pérdidas de calidad indeseables. En función del valor agregado a través del procesamiento por secado, los alimentos se pueden dividir en tres grandes grupos. Para el caso de los cereales, leguminosas y tubérculos, el valor agregado por kilogramo procesado es poco. Sin embargo, para alimentos como verduras, frutas y pescado se agrega más valor por unidad de masa; y en cultivos como especias, hierbas, plantas medicinales, nueces, es considerablemente más alto valor [55].

Modo de conservación

El método de secado reduce la actividad de agua, de esta forma se preservan los alimentos al evitar el crecimiento microbiano y las reacciones químicas de descomposición. Los efectos del calor sobre los microorganismos y la actividad de las enzimas también son importantes durante este proceso. Para poder conservar los alimentos por el método de secado, es importante maximizar la inactivación de los microorganismos y enzimas para prevenir el deterioro, mejorar la seguridad y reducir los componentes responsables del deterioro. Por ello, los efectos perjudiciales del secado pueden ser deseables o indeseables, dependiendo del propósito del proceso de secado [55].

Estado del agua en los alimentos

A partir de los principios de secado se han desarrollado los conceptos de agua ligada y agua libre, que son importantes para los productos secos, por su estabilidad durante el procesamiento y el almacenamiento. En los alimentos el agua se encuentra en diferentes formas o estados [55].

Distribución de agua en los alimentos

El contenido de agua en un alimento se refiere, a toda el agua de manera global. Sin embargo, en los tejidos animal y vegetal, el agua no está distribuida uniformemente por muchas razones. Por ejemplo, debido a los complejos hidratados que se producen con proteínas, a los hidratos de carbono, a las diversas estructuras internas propias de cada tejido, a los microcapilares que forman, a su incompatibilidad con los lípidos que no permiten su presencia, entre otros; el citoplasma de las células presenta un alto porcentaje de polipéptidos capaces de retener más agua que los organelos que carecen de macromoléculas hidrófilas semejantes. Debido a estas razones, en los alimentos el agua se encuentra en diferentes estados energéticos, esto significa que, no toda el agua de un producto tiene las mismas propiedades fisicoquímicas y esto se comprueba fácilmente por las diversas temperaturas de congelamiento que se observan [56].

Estas consideraciones han llevado a que se empleen términos como agua ligada y agua libre, para hacer referencia a la forma y al estado energético que dicho líquido guarda en un alimento. Se considera que el agua ligada es aquella porción que no congela a -20°C , por lo que también se le llama agua no congelable. Por otra parte, el agua libre, también llamada agua congelable y agua capilar, es la que se volatiliza fácilmente, se pierde en el calentamiento, se congela primero y es la principal responsable de la actividad del agua [57]. Entre el agua libre y ligada existe una relación de concentraciones que se incrementa en la

medida en que el producto contiene más agua, mientras que, en los deshidratados, esta relación se reduce considerablemente [56].

En la Figura 6 se muestran las tres zonas hipotéticas en las que se puede dividir el agua contenida en un producto. La zona III se integra por el agua “libre”, que es la más abundante, se encuentra en macrocapilares y forma parte de las soluciones que disuelven las sustancias de bajo peso molecular; es fácil de congelar y evaporar, y su eliminación reduce la actividad de agua a 0.8. En la zona II, es más difícil quitar el agua que en la zona anterior, ya que el agua se localiza en diferentes capas más estructuradas y en microcapilares; pero al lograr quitarla se obtienen valores de actividad de agua de aproximadamente 0.25. Esta fracción, junto con la monocapa corresponden al agua “ligada”.

Por último, la más difícil de eliminar en los procesos comerciales de secado, el agua en la zona I que equivale a la capa monomolecular; se puede reducir parcialmente en la deshidratación, pero esto no es recomendable, ya que, requiere mucha energía y se daña el alimento [56].

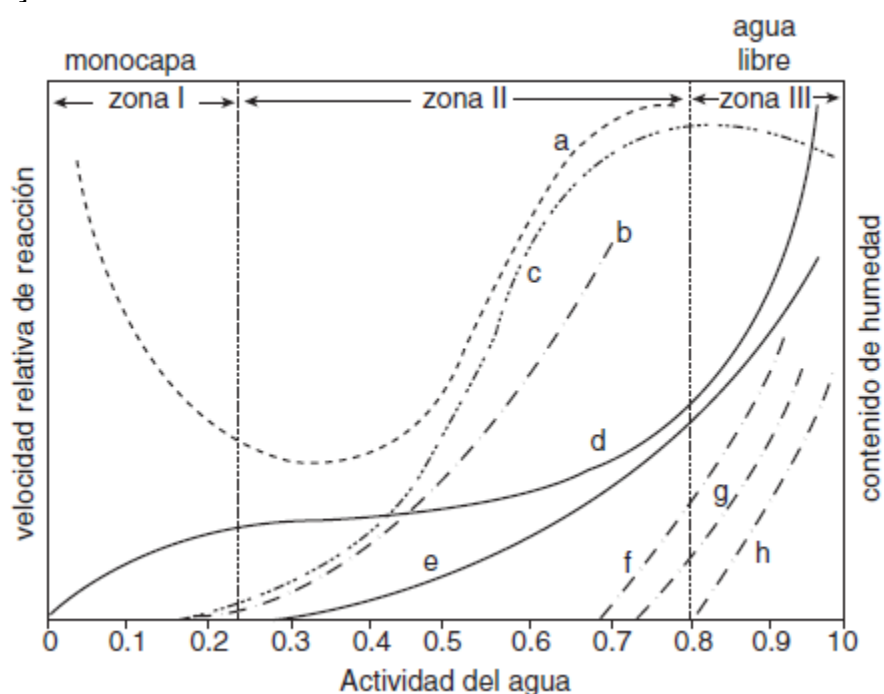


Figura 6. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua. a) Oxidación de lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos g) crecimiento de levaduras, y h) crecimiento de bacterias. Fuente: Badui Dergal [56].

Actividad del agua

En un alimento las propiedades coligativas, reológicas y de textura dependen de su contenido de agua. Como ya se mencionó anteriormente, el agua se dividió en “libre” y en “ligada”, la primera es la única que está disponible para el crecimiento de los microorganismos y para intervenir en las otras transformaciones. La actividad del agua a_w , es sólo una fracción del agua capaz de propiciar estos cambios y es aquella que tiene movilidad o disponibilidad. Con base en este valor empírico se puede predecir la estabilidad o vida útil de un producto, y no con su contenido de agua [58].

La a_w es la presión de vapor de las moléculas de agua en el espacio de cabeza en un recipiente cerrado, comparada con la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura, después de alcanzar el equilibrio. Los valores varían desde 1.0 para el agua pura, hasta cero en un producto seco [56].

Existe mucha información sobre los valores de la actividad del agua de un gran número de alimentos (Tabla 5). Los alimentos como las frutas, las hortalizas, la carne y muchos enlatados tienen valores de actividad de agua de aproximadamente 0.97; mientras que los productos deshidratados van de 0.3 a 0.6 [57].

Tabla 5. Actividad de agua de algunos alimentos

Alimento	a_w
Frutas frescas y enlatadas	0.97
Verduras	0.97
Jugos	0.97
Huevos	0.97
Carne	0.97
Queso	0.95
Pan	0.94
Mermeladas	0.82
Frutas secas	0.72
Miel	0.70
Galletas, cereales	0.35
Azúcar	0.10

Fuente: Duarte Castillo [57].

Estabilidad en los alimentos

La actividad del agua es de fundamental importancia y con base en ella se puede conocer el comportamiento de un producto. Mientras más alta sea la a_w y más se acerque a 1, mayor será su inestabilidad, por esa razón las carnes, frutas y vegetales frescos requieren refrigeración. Por el contrario, los alimentos bajos en a_w , son estables a temperatura ambiente. El contenido de agua por sí solo no proporciona información sobre la estabilidad de un alimento, dicha estabilidad se predice mejor con la actividad del agua [56].

Para que puedan crecer los microorganismos necesitan condiciones propicias de pH, de nutrimentos, de oxígeno, de presión, de temperatura y de actividad del agua; esta última tendrá que ser mayor a medida que los otros parámetros se vuelvan menos favorables. Las bacterias son las que requieren más agua (>0.91), después las levaduras (>0.88), y luego los hongos (>0.80); de todos, los que más la necesitan para su desarrollo son los patógenos (Tabla 6) [58].

Tabla 6. Valores mínimos de la actividad del agua para el crecimiento de microorganismos de importancia en alimentos

Organismo	Mínima
Mayoría de bacterias dañinas	0.91
Mayoría de levaduras dañinas	0.88
Mayoría de hongos dañinos	0.80
Bacteria halófila	0.75
Levadura osmófila	0.60
<i>Salmonella</i>	0.95
<i>Clostridium botulinum</i>	0.95
<i>Escherichia coli</i>	0.96
<i>Staphylococcus aureus</i>	0.86
<i>Bacillus subtilis</i>	0.95

Fuente: Díaz Neira [58].

Métodos de secado

Según el método de eliminación de agua aplicado, los procesos de secado pueden clasificarse como secado térmico, deshidratación osmótica y deshidratación mecánica. En el secado térmico, se utiliza un medio gaseoso o vacío para eliminar el agua del material; se puede dividir en tres tipos: secado con aire, secado en ambiente con poco aire y secado en atmósfera modificada. En la deshidratación osmótica, se aplica un solvente o solución para eliminar el agua, mientras que en la deshidratación mecánica se usa la fuerza física. Para seleccionar un proceso de secado se deben considerar muchos factores. Estos factores son el tipo de producto a secar, las propiedades deseadas del producto final, la tolerancia a la temperatura permisible, la susceptibilidad del producto al calor, los pretratamientos requeridos, el capital y costos de procesamiento, y los factores ambientales. No existe una técnica de secado que sea aplicable a todos los productos [55].

Fundamentos de secado

El secado se considera un proceso de transporte tanto de calor como de masa dentro y fuera de los materiales alimentarios. Por lo tanto, hay transferencia de calor y transferencia de masa. En el período de velocidad constante, se considera que existe una película delgada de agua sobre la rebanada y no hay resistencia de transferencia de masa interna o externa. Por lo tanto, el secado está controlado por transferencia de calor externa. Durante el período de velocidad descendente, el secado está controlado por la resistencia de transferencia de masa interna. El contenido de humedad crítico puede considerarse cuando en el período de secado el contenido de humedad cambia de una tasa constante a una decreciente; este depende de las características del alimento y de las condiciones de secado. Cuando hay un alto contenido de humedad, domina el flujo de líquido debido a las fuerzas capilares; pero al disminuir el contenido de humedad, la cantidad de líquido en los poros también disminuye y se acumula una fase gaseosa, lo que provoca una disminución en la permeabilidad del líquido. La transferencia de masa se hace cargo de la difusión de vapor en una estructura porosa. En el punto de saturación, el líquido ya no está disponible en los poros y la transferencia de masa se hace cargo por completo de la difusión de vapor.

En los materiales sólidos, la humedad se transfiere por difusión o mecanismo capilar. En la difusión el gradiente de concentración es la fuerza impulsora. La difusión del agua puede ser en forma de líquido o vapor. En la difusión de líquidos, la presión osmótica podría ser la fuerza motriz del movimiento del agua. En el caso del mecanismo capilar, la humedad se mueve debido a la tensión superficial y no se ajusta a las leyes de difusión. En un material poroso se encuentra una red complicada de poros y canales interconectados que se extienden hacia la superficie exterior. Cuando se elimina el agua, se forma un menisco a través de cada poro, el cual establece fuerzas capilares por la tensión interfacial entre el agua y el sólido. Las fuerzas capilares actúan en una dirección perpendicular a la superficie del sólido. Dependiendo de la curvatura del menisco, será la intensidad de las fuerzas capilares en un punto dado de un poro. Los poros pequeños desarrollan fuerzas capilares mayores que los grandes; por ello, los poros grandes tienen a vaciar primero su contenido de agua. Las fuerzas capilares son pequeñas en los poros grandes [55].

Curva de secado

La curva de secado muestra la velocidad de secado contra el tiempo de secado o contenido de humedad. En la curva se pueden observar tres etapas principales:

1. Etapa temprana transitoria: durante esta etapa el producto se está calentando (período transitorio).
2. Período constante o primer período: en esta etapa la humedad es comparativamente fácil de eliminar (período de tasa constante).
3. Período descendente o segundo período: la humedad se une o retiene dentro de la matriz sólida (período de tasa de caída).

En las Figuras 7 y 8 se muestran las curvas típicas de velocidad de secado. Generalmente se observan dos períodos de velocidad decreciente para sólidos higroscópicos y no higroscópicos. El primer período de velocidad decreciente depende de las velocidades de transferencia de masa interna y externa; en el segundo período, el secado es mucho más lento, esto depende de la resistencia interna a la transferencia de masa. Los comportamientos de secado de los alimentos dependen de la porosidad, la homogeneidad y las propiedades higroscópicas [55].

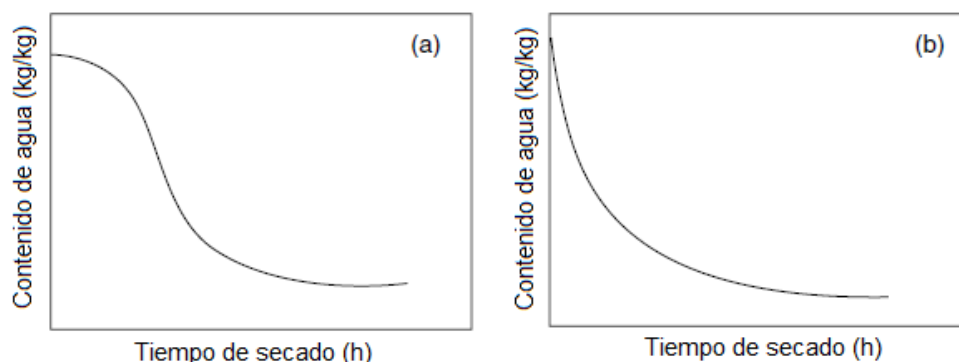


Figura 7. Curvas típicas de secado (contenido de agua versus tiempo de secado): (a) con un período de retraso, (b) sin un período de retraso.

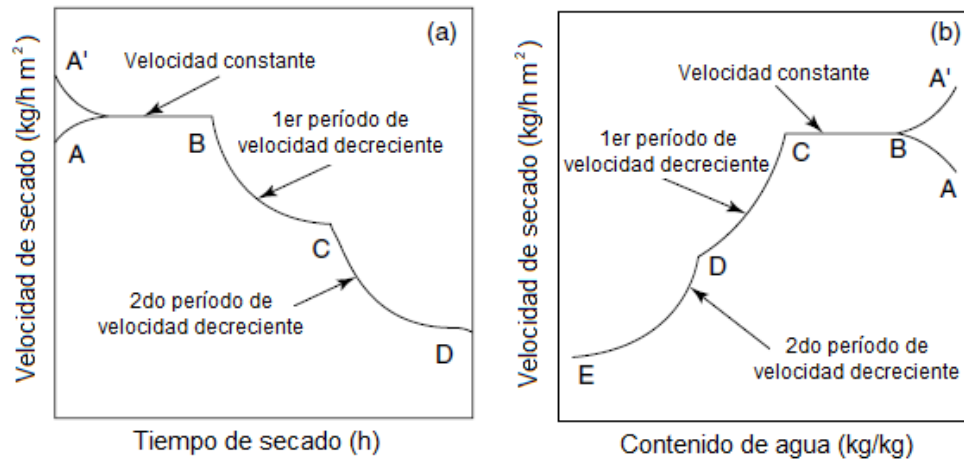


Figura 8. Curvas típicas de velocidad de secado: (a) velocidad de secado versus tiempo de secado, (b) velocidad de secado versus contenido de agua. Fuente: Rahman y Perera [55].

Secado solar

El secado solar se refiere al uso de la radiación solar como fuente de energía para disminuir la cantidad de agua presente en un material; se considera una de las aplicaciones de la energía solar más antiguas [59].

El secado al aire libre bajo el sol es uno de los métodos de aprovechamiento de la energía solar para la conservación de los alimentos. Desde tiempos prehistóricos se ha utilizado la insolación como fuente de energía térmica para secar una gran variedad de alimentos; este método todavía se practica ampliamente en muchos países. Sin embargo, los alimentos se encuentran en el suelo y estos se contaminan con polvo e insectos y sufren pérdidas por roedores, pájaros y otros animales. Y esto lleva a una pérdida en la calidad del producto final. Por esta razón, se ha implementado el uso de secadores solares; estos pueden generar temperaturas de secado más altas y una humedad relativa más baja, dando como resultado mejores tasas de secado y contenidos de humedad más bajos en los productos secos. Además de esta forma se mejora la calidad del producto final y se pueden reducir las pérdidas de cosecha, esto mediante una técnica de secado adecuada [60].

Clasificación de los secadores solares

En diferentes regiones se han diseñado, desarrollado y probado diferentes tipos de secadores solares. En el proceso, la energía solar se utiliza como fuente primaria o como fuente adicional de calor. El flujo de aire de secado puede operarse mediante convección natural o forzada, y el aire precalentado podría pasar a través del producto sin exposición directa a la insolación o de forma directa. Es posible la combinación de ambos modos. Para la selección final de un secador influyen varios criterios, como las características de secado del producto, los requisitos de calidad y los gastos de secado [60].

Los secadores solares se pueden clasificar en dos grandes categorías [61]:

- Sistemas de secado solar pasivo (circulación natural)
- Sistemas de secado solar activo (convección forzada)

Existen tres subclases distintas de sistemas de secado solar activos o pasivos. Estas varían principalmente en la disposición de diseño de los componentes del sistema y el modo de uso del calor solar. Las subclases son [61]:

- Secadores solares de tipo integral
- Secadores solares de tipo distribuido
- Secadores solares de tipo mixto

En la Figura 9 se muestra la clasificación general de los sistemas de secado solar [60].

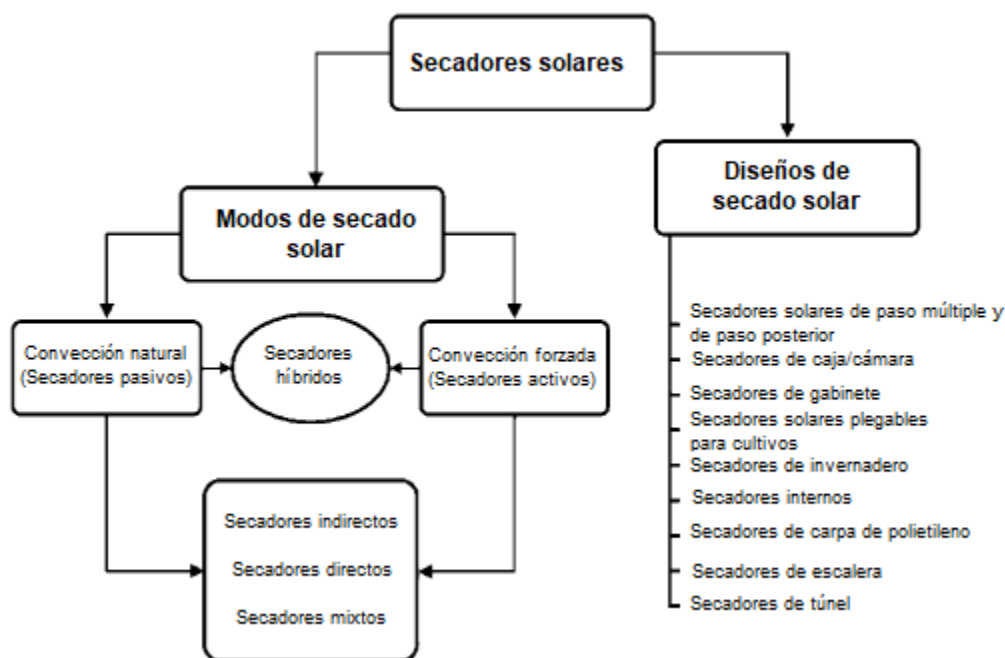


Figura 9. Clasificación de los sistemas de secado solar. Fuente: Prakash y Kumar [60]

Secadores solares de convección natural

En los secadores solares de convección natural, el aire se calienta y circula naturalmente por la fuerza de flotación o por la presión del viento. Un secador típico de este tipo consta de: un colector solar de calentamiento de aire, una cámara de secado y una chimenea. Estos secadores pasivos están diseñados para secar pequeños lotes de frutas y verduras. El período de secado es más corto con un mayor rendimiento en comparación con el secado al aire libre. Se han diseñado numerosos tipos de secadores solares pasivos en diferentes partes del mundo [60].

Secadores solares de convección forzada

Un secador solar de convección forzada depende de la energía solar como fuente de calor principal y utiliza ventiladores para garantizar la circulación del aire en la cámara de secado. Usar un ventilador mejora el flujo de aire y brinda tasas de secado más altas. El flujo de aire puede ser suministrado por un ventilador eléctrico, sin embargo, el requerimiento de energía eléctrica es muy bajo y puede ser operado por un módulo fotovoltaico independiente de la red eléctrica.

Un secador de este tipo constaría de las siguientes unidades: un colector de energía solar de calentamiento de aire, una cámara de secado y un ventilador. Los secadores solares activos son adecuados para secar productos agrícolas con un mayor contenido de humedad [60].

Secadores solares híbridos

Los secadores solares híbridos son secadores en los que la energía solar solo es una más de las fuentes de energía usadas para calentar el aire de secado [62]. Emplean energía solar con sistemas de calefacción y ventiladores eléctricos adicionales para garantizar la circulación del aire. Comúnmente estos secadores funcionan en modo de convección forzada.

El secador híbrido típico consta de un colector solar, una cámara de secado, un ventilador para garantizar la circulación del aire y una fuente de calor auxiliar que generalmente funciona con una fuente de energía convencional como el gas LP [60].

Secadores solares directos

En los secadores solares directos o también denominados secadores solares de tipo integral, los productos se colocan en una cámara de secado transparente que permite la transmisión de la radiación solar durante el proceso de secado; así la radiación solar incide directamente sobre el producto que se está secando [63]. La humedad relativa del aire de secado se reduce con el calor, lo que aumenta la capacidad de humedad y evapora el agua del producto. Estos secadores son de construcción simple, ya que no requieren estructuras complicadas, como colectores y conductos de calentamiento de aire separados. Por esta razón son menos costosos en comparación con los indirectos para una capacidad de carga similar [60].

Secadores solares indirectos

También denominados secadores solares de tipo distribuido. En estos secadores el producto se coloca en charolas dentro de una cámara de secado cerrada no transparente y se calienta con aire circulante, durante su flujo a través de un colector solar [64]. Se recomienda el uso de este tipo de secador para productos sensibles, como hierbas, especias y frutas, en las que el contenido de vitamina C podría verse afectado negativamente por la exposición directa del producto a la radiación solar. Los secadores suelen ser estructuras más complejas y por ello requieren una mayor inversión de capital [60].

Secadores solares tipo mixto

Los secadores solares tipo mixto combinan las características de los secadores solares de tipo directo e indirecto. En el proceso de secado se usa la combinación de la radiación solar que incide sobre el producto y el aire precalentado en el colector solar [59]. Su diseño es igual al del tipo distribuido; sin embargo, las paredes de la cámara de secado son transparentes y de esta forma la radiación solar incide directamente sobre el producto como en el caso de los secadores directos [60].

Análisis energético

Eficiencia energética del colector solar

En un colector solar la eficiencia térmica instantánea se define como la relación entre la energía útil suministrada por el colector y la energía solar incidente [65].

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_{da} C p_{da} (T_{out,C} - T_{in,C})}{A_C I_T} \quad (1)$$

Donde \dot{m}_{da} es el flujo másico del aire, $C p_{da}$ el calor específico del aire a presión constante a una temperatura promedio entre la entrada y la salida del colector solar, $T_{out,C}$ y $T_{in,C}$ es la temperatura a la salida y entrada del colector, respectivamente. Mientras que I_T es la irradiancia solar incidente sobre el plano del colector y A_C es el área bruta del colector solar.

Eficiencia energética del secador solar

En un secador solar la eficiencia energética relaciona la energía utilizada para la evaporación de la humedad contenida en los alimentos a una temperatura determinada, con la energía total suministrada al secador [66].

$$\eta_E = \frac{m_w h_{fg}}{(A_C * I_{PI}) + A_{G_T} (I_{PI} * F_{EI}) + A_{G_V} (I_{PV} * F_{EI}) + W_{vent}} \quad (2)$$

Donde m_w es la masa de agua evaporada, h_{fg} el calor latente de vaporización, A_C es el área bruta del colector solar, A_{G_T} que es el área inclinada de la cámara de secado correspondiente al techo, I_{PI} es la irradiancia solar en el plano del colector. Siendo A_{G_V} el área vertical de la cámara correspondiente a la parte frontal multiplicada por I_{PV} que es la irradiancia solar en el plano vertical, W_{vent} es la potencia del ventilador y F_{EI} es la fracción de energía incidente.

Eficiencia energética total del secado

La eficiencia del secado relaciona la energía utilizada para calentar el alimento y evaporar el agua presente en este, con la energía que se suministra al dispositivo de secado [66]. Y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\eta_D = \frac{m_p C p_p (T_{p,t+dt} - T_{p,t}) + m_w h_{fg}}{(A_C \eta_C * I_{PI}) + (I_{PI} * F_{EI})(A_{G_T} \tau_G) + A_{G_V} (I_{PV} * F_{EI}) \tau_G} \quad (3)$$

Donde m_p y $C p_p$ son la masa y el calor específico del alimento, respectivamente. $T_{p,t+dt}$ es la temperatura del producto en el siguiente paso de tiempo, $T_{p,t}$ es la temperatura en ese momento, m_w es la masa de agua evaporada y h_{fg} el calor latente de vaporización. I_{PI} es la irradiancia solar en el plano del colector, A_C el área bruta del colector, η_C es la eficiencia del colector, A_{G_T} que es el área inclinada de la cámara de secado correspondiente al techo, τ_G es la transmitancia de la cubierta de la cámara de secado, I_{PV} que es la irradiancia solar en el

plano vertical, A_{GV} el área vertical de la cámara correspondiente a la parte frontal y F_{EI} es la fracción de energía incidente.

Insolación

La insolación solar se define como la cantidad de energía térmica recibida por el secador [55]. Y se calcula con la siguiente ecuación:

$$Insolación\ total = [(I_p * (A_C + A_{SS})) + (I_V * A_{SV})] \quad (4)$$

Donde I_p es la irradiancia solar en el plano del colector, A_C es el área bruta del colector, A_{SS} es el área inclinada de la cámara de secado correspondiente al techo, I_V es la irradiancia solar en el plano vertical y A_{SV} es el área vertical frontal de la cámara de secado.

Capítulo III: Marco metodológico

La parte experimental de secado se llevó a cabo en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM en Temixco, Morelos. Mientras que las pruebas de actividad antioxidante se realizaron en el Instituto de Química de la UNAM, en la Ciudad de México.

Diseño de experimentos

El diseño de experimentos seleccionado fue un 2^3 , las condiciones válidas para las pruebas que se realizaron fueron los días soleados. En la Tabla 7 se muestran los factores y niveles del diseño, el cual se utilizó para las 4 hierbas de estudio.

Tabla 7. Diseño de experimentos con factores y niveles

Factor	Nivel bajo (-1)	Nivel alto (+1)
Malla sombra (X_1)	Sin malla	Con malla
Ventilador (X_2)	Sin ventilador	Con ventilador
Tipo de cubierta del colector (X_3)	Policarbonato celular	Vidrio

En la Tabla 8 se muestran las corridas experimentales con sus respectivos factores y diferentes niveles.

Tabla 8. Corridas experimentales

Corrida	Malla sombra	Ventilador	Colector
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Procesamiento de la muestra

Las muestras frescas de las 4 plantas aromáticas se obtuvieron en el mercado de Cuernavaca, Morelos. Primero se lavaron y desinfectaron, posteriormente se cortaron las hojas, ya que los tallos al ser más gruesos tardarían más en secarse. Para el caso del toronjil, también se utilizaron sus flores.

Después de tener únicamente las hojas, se colocaron 100 g de muestra en mallas de teflón, las cuales se llevaron a las charolas dentro del secador.

Secado

El proceso de secado se llevó a cabo en un secador solar mixto tipo gabinete de mediana capacidad; este consta de una cámara de secado con 10 charolas (43 cm x 63 cm), un ventilador y un colector solar. Debido a que el tipo de cubierta del colector era un factor en el diseño de experimentos, se utilizaron dos secadores con diferentes colectores, uno con cubierta de policarbonato celular (Figura 10a) y otro con cubierta de vidrio (Figura 10b), de un espesor de 6 mm y 4 mm, respectivamente; a través de los cuales pasaba el aire por convección natural o semi asistido por un pequeño ventilador con potencia de 10 W y era calentado hasta llegar a la cámara de secado.

Es importante mencionar que el ventilador funcionaba con un panel fotovoltaico y tenía la función de extraer el aire húmedo dentro de la cámara de secado, favoreciendo el proceso. Además, sobre la cámara de secado se colocó la malla sombra (70% de sombreo), esto para atenuar la radiación solar y también disminuir la temperatura dentro del secador.

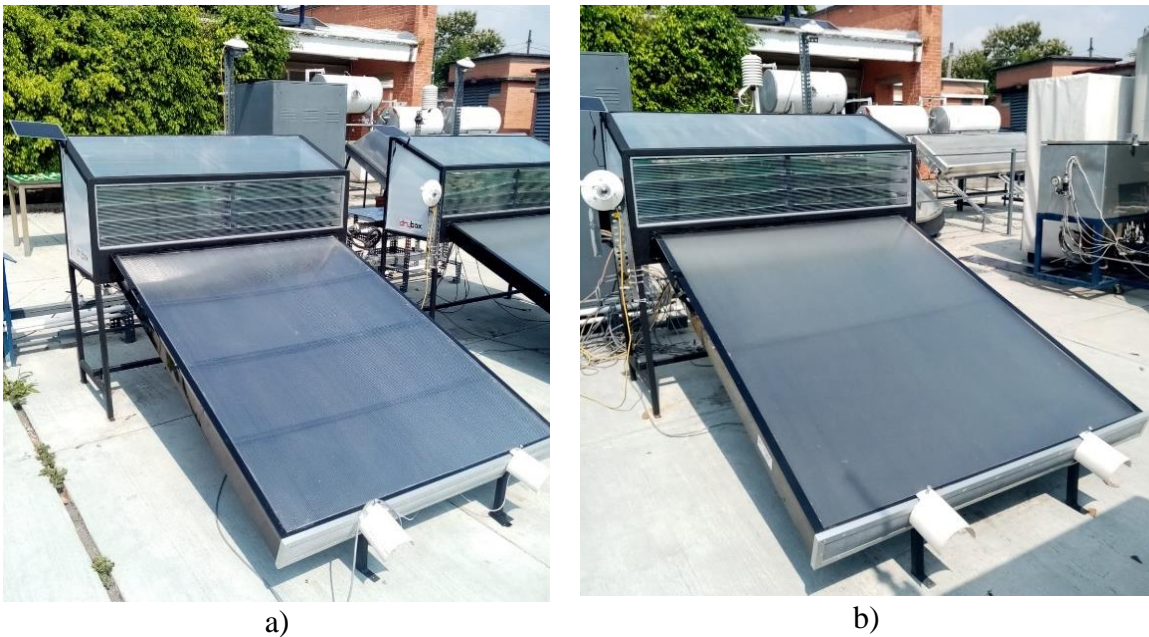


Figura 10. Secadores solares de gabinete con colector solar, a) Colector con cubierta de policarbonato, b) Colector con cubierta de vidrio.

Instrumentación

Cada secador se instrumentó para poder obtener los datos necesarios y hacer el análisis posterior. Se colocaron dos piranómetros (Kipp & Zonen, $\pm 0.5 \text{ W/m}^2$), para medir la irradiancia los días de secado, uno inclinado en el plano del colector y otro vertical para el área frontal de la cámara de secado. De igual forma, se colocaron 16 sensores de temperatura pt1000 ($\pm 0.5^\circ\text{C}$), 2 en la entrada y 2 a la salida del colector, 10 en las charolas dentro del secador y 2 a la salida de la cámara de secado. El secador también contaba con un sensor para medir la temperatura ambiente. Las mediciones se registraron automáticamente

mediante un adquisidor de datos (Keysight, 34972A), cada 30 segundos. En la Figura 11 se puede observar el secador instrumentado.

El secador no contaba con anemómetros, por lo tanto, la velocidad del aire se midió manualmente con dos anemómetros; un anemómetro digital de aleta (Dwyer modelo 473B, ± 0.1 m/s) para medir la velocidad de aire del ventilador y un anemómetro de hilo caliente (Dwyer modelo 471B, ± 0.1 m/s) para la velocidad de aire en las rejillas de salida. Los datos de la humedad relativa ambiente se tomaron de la estación meteorológica del instituto (ESOLMET).

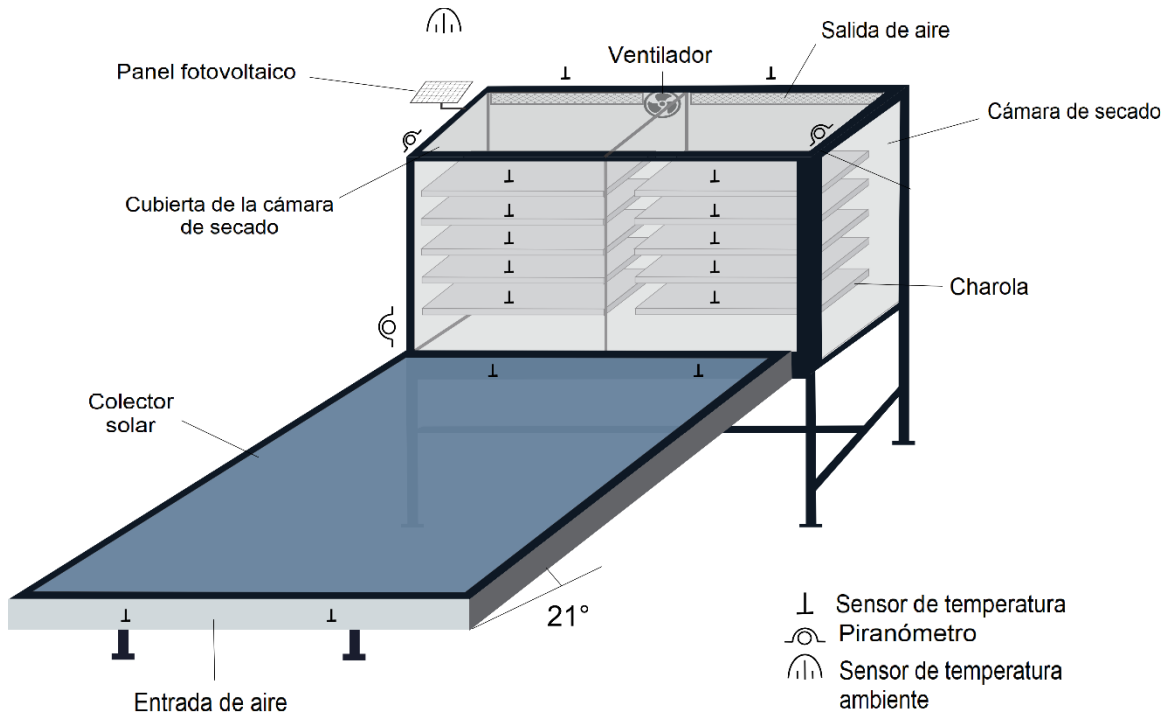


Figura 11. Secador solar de gabinete instrumentado

Color

El parámetro de color se midió con ayuda de un colorímetro portátil (NR60CP ± 0.03), para ello se tomó una muestra representativa de cada planta al principio y final de la prueba. Los valores se expresaron como L (luminosidad), a (rojo-verde), b (amarillo-azul), H (ángulo de matiz) y C (saturación cromática). Con los resultados obtenidos se pudo calcular la diferencia de color (ΔE) entre las muestras frescas y secas, croma y ángulo de tonalidad:

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$C = \sqrt{(a)^2 + (b)^2} \quad (6)$$

$$H = \arctg\left(\frac{b}{a}\right) \quad (7)$$

Donde ΔL es la diferencia en luz y oscuridad, Δa diferencia en rojo y verde y Δb diferencia en amarillo y azul.

Actividad de agua

Para determinar este parámetro en las muestras, se utilizó un medidor de actividad de agua (Rotronic Hygrolab C1, $\pm 0.008 a_w$) a 25°C , en el cual se colocó una pequeña muestra de cada planta durante 20 minutos, este procedimiento se hizo al inicio y final del experimento.

Humedad

El contenido de humedad se midió con una termobalanza (OHAUS, MB45, $\pm 0.3\%$) a 105°C . Se colocaron 3 g de muestra en una charola de aluminio, al inicio y final de los experimentos. El valor obtenido se expresó en porcentaje.

Actividad antioxidante

Para realizar esta prueba, primero fue necesario preparar la muestra. Para ello, se pesaron 20 g de muestra, se le agregaron 200 ml de agua destilada y se llevó a un calentamiento moderado, sin dejar hervir, esto para evitar la pérdida de los principios activos por volatilización. Después se dejaron enfriar y se filtraron. Posteriormente, se congelaron con nitrógeno líquido para finalmente liofilizarlas. Los sólidos que se obtuvieron de la liofilización se colocaron en un vial (Figura 12).



Figura 12. Muestras de epazote liofilizadas

La actividad antioxidante de los extractos fue determinada utilizando el método de la actividad atrapadora del radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), descrita por Chaves [67].

Como primer paso se prepararon las soluciones de 20 mg/ml de los extractos. Para esto se pesaron de 1.5 a 2 mg de muestra, usando agua desionizada como disolvente. El ensayo se realizó en placas de 96 pozos (Figura 13). En estos pozos se colocaron 50 μl de la solución a concentraciones crecientes en el rango de 1 a 100 $\mu\text{g/ml}$. Posteriormente se agregaron 150 μl de solución etanólica de DPPH 133 μM (concentración final 100 μM). La placa se llevó a incubación durante 30 minutos a 37°C , en oscuridad y agitación. Pasado ese tiempo, se midió la absorbancia de cada pozo a 515 nm, en un lector de microplacas (Bio-Tek, Elx-808).

La actividad sobre el DPPH se expresa como porcentaje de reducción y se calcula con la fórmula:

$$\% \text{ de reducción} = \left(\frac{C - E}{C} \right) * 100 \quad (8)$$

En dónde:

C= DO (Densidad óptica) del DPPH 100 μ M

E= DO (Densidad óptica) de la mezcla DPPH 100 μ M + muestra

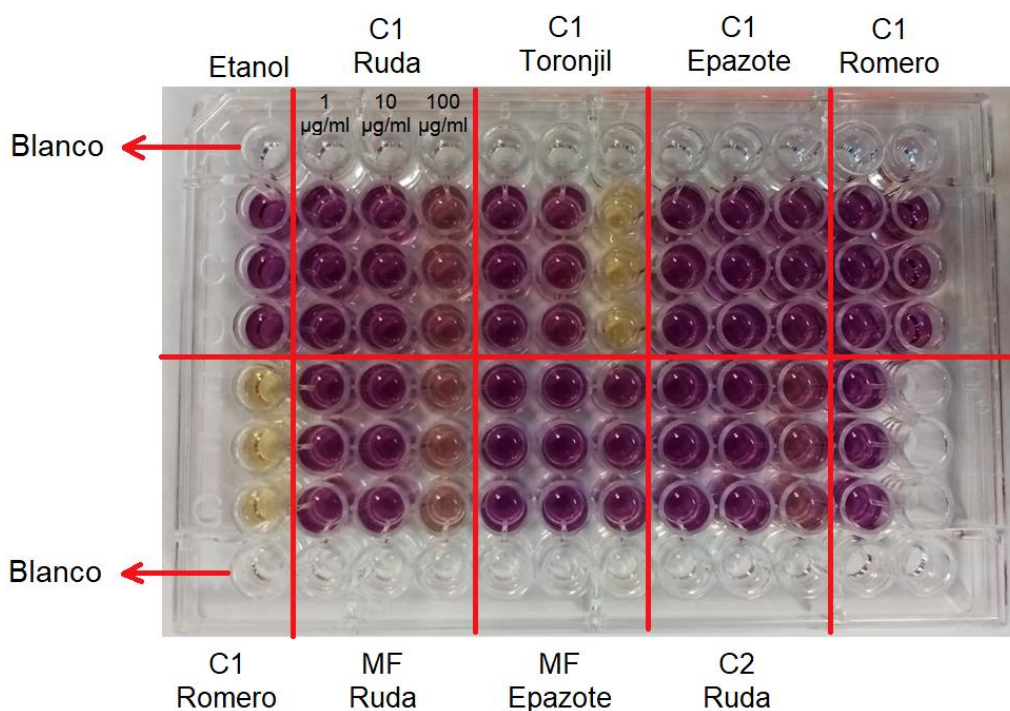


Figura 13. Placa de 96 pozos, con extractos de plantas a diferentes concentraciones y solución etanólica de DPPH 133 μ M

Eficiencia

Para realizar los cálculos de las eficiencias del colector, secador y secado, se utilizaron los datos de temperatura e irradiancia recopilados por el adquisidor, mientras que las áreas correspondientes al colector y la cámara de secado se midieron directamente. La eficiencia del colector se calculó con la ecuación 1, para la eficiencia del secador se utilizó la ecuación 2 y finalmente para la eficiencia total del secado se usó la ecuación 3. En la Tabla 9 se muestran los datos utilizados para las ecuaciones correspondientes.

Tabla 9. Valores utilizados en las ecuaciones

Variables	Valor utilizado
A_C Área bruta del colector	1.69 m ²
A_{GT} Área inclinada de la cámara de secado correspondiente al techo	0.572 m ²
A_{GV} Área vertical de la cámara de secado correspondiente a la parte frontal	0.332 m ²
F_{EI} Fracción de energía incidente	0.3 y 1*
τ_G Transmitancia de la cubierta de la cámara	0.84
W_{vent} Potencia del ventilador	10 W

*0.3 cuando se usó malla sombra y 1 cuando no se usó malla sombra.

Capítulo IV: Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las diferentes plantas de estudio.

Toronjil

Cinética de secado

En la Figura 14 se muestran las cinéticas de secado para los diferentes experimentos, se puede observar que el experimento 3 y 7 fueron los que registraron el tiempo de secado más corto con 4.5 horas. Las condiciones que se utilizaron fueron con ventilador y sin malla sombra, para ambos. La única diferencia fue la cubierta del colector, que para el experimento 3 fue de policarbonato y para el 7 de vidrio. Mientras que el tiempo más largo se registró para el experimento 8 con 6.5 horas, utilizando el colector con cubierta de vidrio, con ventilador y con malla sombra. En la literatura no se han reportado estudios sobre el secado solar de toronjil morado, pero Shamekhi Amiri [68] estudió el comportamiento de secado de hojas del toronjil (*Melissa officinalis*) en un sistema de secado solar de convección forzada de lecho empacado de doble paso directo, y reportó tiempos de secado de 3.5 y 5.5 horas, similares a los reportados en este estudio, cabe mencionar que son diferentes especies de plantas.

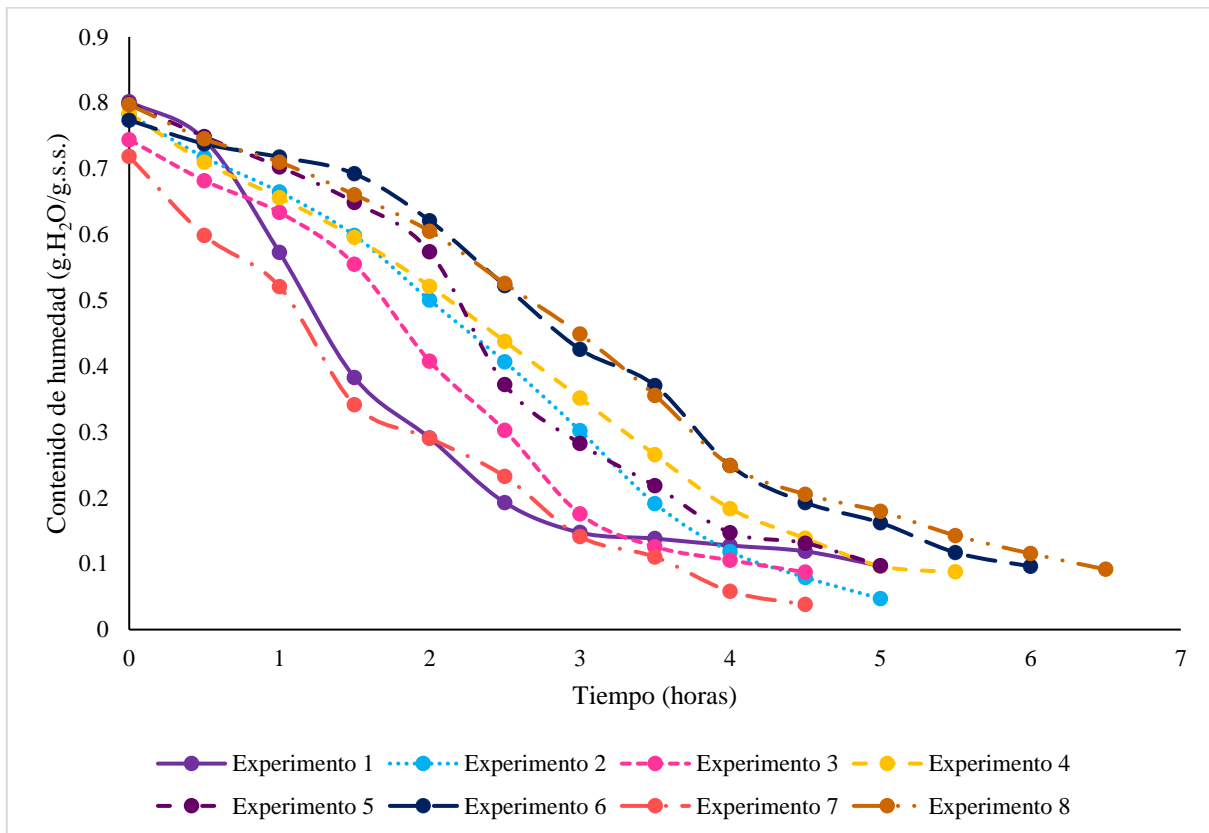


Figura 14. Cinéticas de secado obtenidas para el toronjil

Resultados de las variables de respuesta

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos para las variables de respuesta a las diferentes condiciones experimentales. En ella se observan los tiempos de secado, el contenido de humedad final (%), la actividad de agua final, y los parámetros de color (L, a, b y ΔE). A partir de estos datos se realizó el análisis estadístico de cada uno.

Tabla 10. Resultados obtenidos para las variables de respuesta en el toronjil

Corridas	Factores			Tiempo de secado (horas)	Humedad final (%)	Actividad de agua final	Variables de respuesta			
	X ₁	X ₂	X ₃				Parámetros de color			
							L	a	b	ΔE
1	-1	-1	-1	5	9.6	0.535	22.29	-1	6.29	16.76
2	+1	-1	-1	5	4.7	0.374	26.51	0.33	10.36	17.86
3	-1	+1	-1	4.5	8.7	0.389	26.56	-3.56	9.87	13.35
4	+1	+1	-1	5.5	8.7	0.495	38.56	-2.36	16.8	7.94
5	-1	-1	+1	5	9.7	0.405	28.11	-2	10.31	16.18
6	+1	-1	+1	6	9.6	0.383	31.14	-4.2	17.3	8.23
7	-1	+1	+1	4.5	3.8	0.349	18.44	0.25	4.15	21.34
8	+1	+1	+1	6.5	9.1	0.357	28.88	-4.53	14.3	6.01

L (Luminosidad), a (Verde-Rojo), b (Amarillo-Azul), ΔE (Diferencia de color), X₁=Malla sombra, X₂= Ventilador, X₃= Tipo de cubierta del colector

Contenido de humedad final del toronjil

De acuerdo con los datos obtenidos, que se muestran en la Tabla 10, el contenido de humedad final para todas las muestras estuvo por debajo del 10%, lo cual nos indica que disminuyó considerablemente ya que la muestra fresca tuvo entre 71 y 80% de humedad. Shamekhi Amiri [68] reportó valores cercanos al 80% para el toronjil fresco (*Melissa officinalis*), mientras que Vallino [69] reportó un contenido de humedad final menor al 12% utilizando un horno a 40°C durante 24 horas.

Análisis de Varianza

Con los datos que se recabaron para esta variable de respuesta, se realizó el análisis estadístico, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 11. El análisis se hizo tomando en cuenta los factores puros que fueron la malla sombra, el ventilador y el tipo de cubierta del colector; así como las interacciones entre estos y es importante mencionar que el valor de α utilizado fue 0.05. Como se observa en la Tabla 11, el valor de p para los factores puros y las interacciones fue menor a 0.05, por lo tanto, esto nos indicó que si tuvieron un efecto significativo sobre el resultado del contenido de humedad.

Tabla 11. Análisis de varianza para la humedad final del toronjil

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	116.092	19.3487	3508.57	0.000
Lineal	3	4.211	1.4038	254.55	0.000
X ₁ : Malla sombra	1	0.034	0.0337	6.12	0.024*
X ₂ : Ventilador	1	4.084	4.0838	740.52	0.000*
X ₃ : Tipo de cubierta colector	1	0.094	0.0937	17.00	0.001*
Interacciones de 2 términos	3	111.881	37.2937	6762.60	0.000
X ₁ *X ₂	1	39.784	39.7837	7214.12	0.000*
X ₁ *X ₃	1	38.254	38.2538	6936.68	0.000*
X ₂ *X ₃	1	33.844	33.8437	6137.00	0.000*
Error	17	0.094	0.0055		
Falta de ajuste	1	0.094	0.0938		
Error puro	16	0.000	0.0000		
Total	23	116.186			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

Se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 15), en donde se muestran los tres factores puros, malla sombra (X₁), ventilador (X₂) y tipo de cubierta del colector (X₃), en sus dos niveles, bajo (-1) y alto (1). Se observó que los valores más bajos de contenido de humedad se obtuvieron cuando no se usó malla sombra (nivel bajo), se usó el ventilador (nivel alto) y se utilizó el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo).

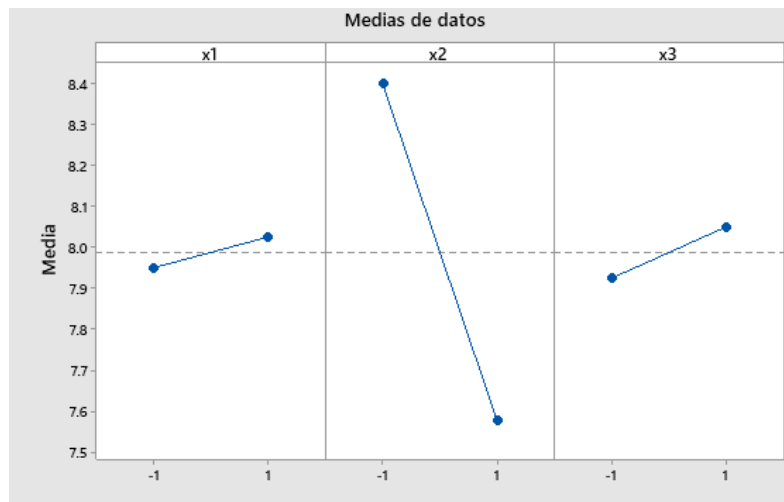


Figura 15. Gráfica de efectos principales para la humedad final del toronjil

En la Figura 16 se muestra la gráfica de interacción entre los factores. Para la primera interacción entre la malla sombra (X₁) y el ventilador (X₂), se observó que cuando la malla sombra estuvo en su nivel bajo, es decir, que no se usó y se usó el ventilador (nivel alto), se obtuvo el contenido de humedad más bajo. Ahora para la siguiente interacción entre la malla

sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), se tuvieron dos resultados similares, ya que el contenido de humedad bajo se registró cuando se usó el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo) y la malla sombra (nivel alto); pero también cuando se usó el colector con cubierta de vidrio (nivel alto) y sin malla sombra (nivel bajo). Finalmente, para la interacción entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), el contenido de humedad más bajo se obtuvo cuando se usó el ventilador (nivel alto) y el colector con cubierta de vidrio (nivel alto).

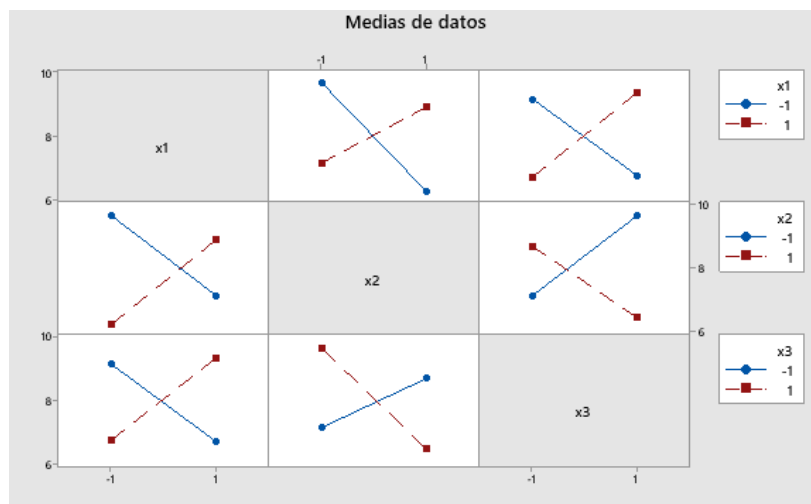


Figura 16. Gráfica de interacción para la humedad final del toronjil

Se realizó la gráfica de superficie de respuesta (Figura 17), en donde se observaron a detalle las condiciones adecuadas para obtener el valor más bajo del contenido de humedad. De acuerdo con lo que se muestra en esta gráfica y lo descrito anteriormente en la gráfica de interacciones, las mejores condiciones para poder obtener valores bajos de humedad son sin utilizar malla sombra, con ventilador y usando el colector con cubierta de vidrio. Este comportamiento puede atribuirse a que cuando no se usó malla sombra las temperaturas dentro de la cámara de secado fueron más altas, ayudando a eliminar mejor la humedad.

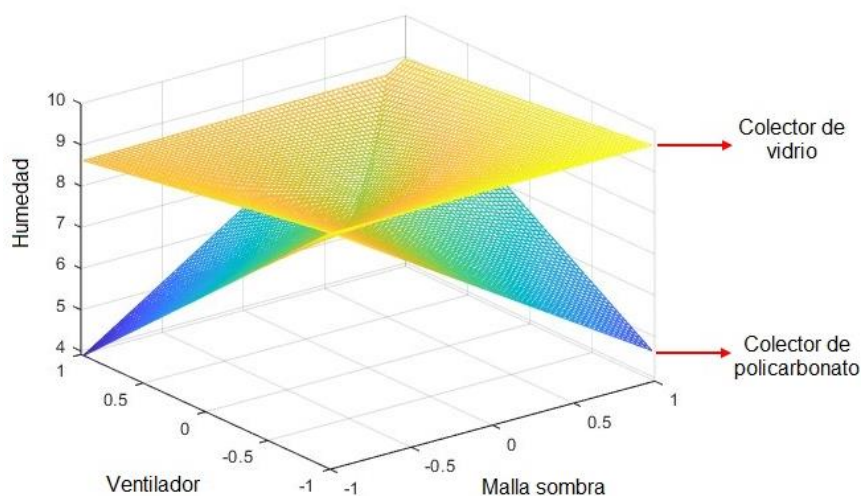


Figura 17. Gráfica de superficie de respuesta para la humedad final del toronjil

Actividad de agua final del toronjil

El valor de la actividad de agua para la muestra inicial fue 0.98, pero después de pasar por el proceso de secado se obtuvieron valores por debajo del 0.6, como se muestra en la Tabla 10, lo cual nos indica que esta hierba podrá conservarse por más tiempo ya que la actividad de agua se encuentra en un rango donde los microorganismos no podrán desarrollarse.

Análisis de Varianza

Se realizó el análisis estadístico obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 12. Se observó que, sólo hubo dos valores de p menores a 0.05; en los factores puros fue el tipo de cubierta del colector (X_3) y en las interacciones fue entre la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2).

Tabla 12. Análisis de varianza de la actividad de agua final del toronjil

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	0.074503	0.012417	6.68	0.001
Lineal	3	0.039773	0.013258	7.13	0.003
X_1 : Malla sombra	1	0.001751	0.001751	0.94	0.345
X_2 : Ventilador	1	0.004347	0.004347	2.34	0.145
X_3 : Tipo de cubierta colector	1	0.033675	0.033675	18.11	0.001*
Interacciones de 2 términos	3	0.034730	0.011577	6.23	0.005
$X_1 * X_2$	1	0.032930	0.032930	17.71	0.001*
$X_1 * X_3$	1	0.000610	0.000610	0.33	0.574
$X_2 * X_3$	1	0.001190	0.001190	0.64	0.435
Error	17	0.031614	0.001860		
Falta de ajuste	1	0.020945	0.020945	31.41	0.000
Error puro	16	0.010669	0.000667		
Total	23	0.106117			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

Se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 18) para los factores puros y de acuerdo con el resultado del análisis de varianza sólo el factor del tipo de cubierta del colector (X_3) fue significativo. Al igual que con el contenido de humedad, se esperaba que la actividad de agua final fuera baja y ese valor se obtuvo cuando se usó el colector con cubierta de vidrio (nivel alto); sin embargo, se notó que a pesar de que los otros factores (malla sombra y ventilador) no tuvieron efecto significativo, cuando ambos estaban en su nivel alto la actividad de agua fue menor.

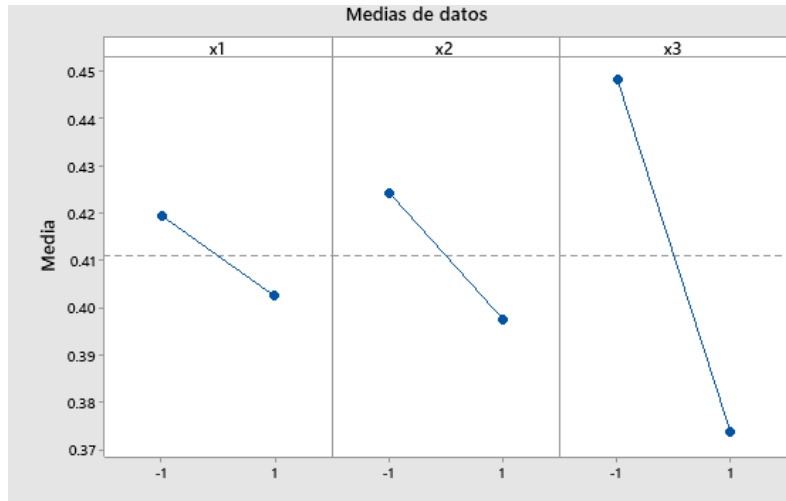


Figura 18. Gráfica de efectos principales para la actividad de agua final del toronjil

De igual forma se realizó la gráfica de interacción (Figura 19), donde la interacción entre la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2), que fue la que sí tuvo un valor de p con significancia, fue la que presentó unas líneas cruzadas, mientras que las demás interacciones presentaron líneas paralelas. Por lo tanto, para esta interacción el valor más bajo de actividad de agua se obtuvo cuando no se usó la malla sombra, pero sí el ventilador.

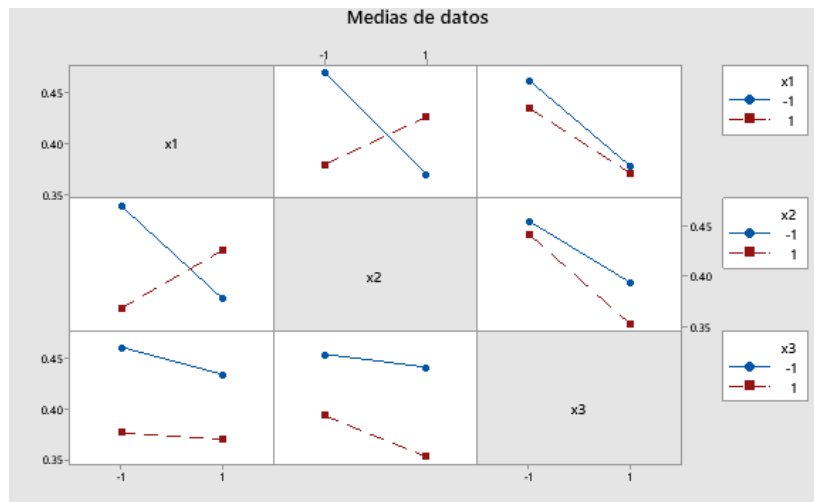


Figura 19. Gráfica de interacción para la actividad de agua final del toronjil

En la Figura 20 se muestra la gráfica de superficie de respuesta, donde se observa que cuando se usó el colector con cubierta de vidrio la actividad de agua fue menor que cuando se utilizó el colector con cubierta de policarbonato. Por lo tanto, se confirma lo descrito anteriormente, las mejores condiciones para obtener una a_w baja son sin malla sombra, con ventilador y con el colector con cubierta de vidrio.

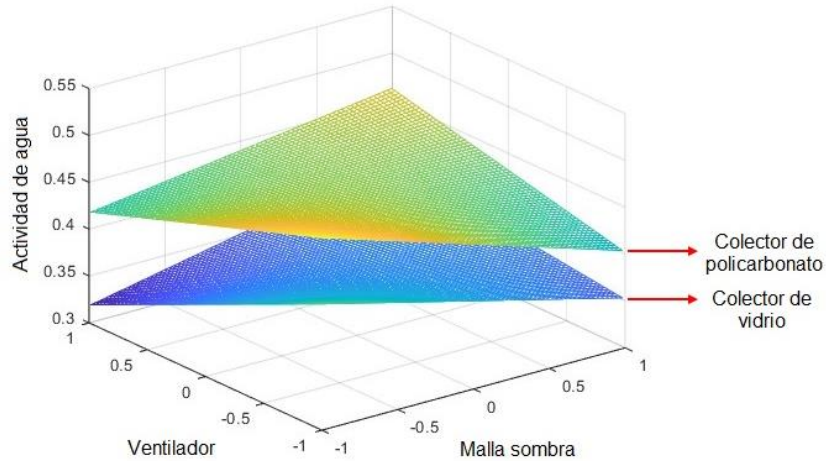


Figura 20. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad de agua final del toronjil

Diferencia de color del toronjil (ΔE)

Un parámetro que se considera importante durante el proceso de secado es el color, en la Figura 21 se observa la muestra seca de toronjil bajo las diferentes condiciones, comparadas con la muestra fresca; de acuerdo con la imagen, las muestras que presentaron un mejor color fueron las que se secaron bajo las condiciones de la corrida 4 (con ventilador, con malla sombra y colector con cubierta de policarbonato), corrida 6 (sin ventilador, con malla sombra y colector con cubierta de vidrio) y corrida 8 (con ventilador, con malla sombra y colector con cubierta de vidrio). En la Tabla 10 se reportan los valores obtenidos para la diferencia de color, estos coinciden con lo que se observa en la Figura 21, ya que los valores más bajos fueron 7.94, 8.23 y 6.01, los cuales corresponden a las corridas 4, 6 y 8, respectivamente.

Orphanides [70] menciona que el principal cambio cromático en las plantas aromáticas es la conversión de verde brillante a marrón oliva durante el procesamiento y la formación de los pigmentos marrones se acelera con temperaturas más altas; y como se observa en la Figura 21 los cambios más notorios de color se dieron cuando no se usó la malla sombra, ya que al no hacer uso de ella las temperaturas fueron más elevadas en la cámara de secado, y con respecto a lo mencionado anteriormente esto favoreció el oscurecimiento del toronjil. En el estudio realizado por Vallino [69] se reportó que las muestras secadas en frío tendieron a mostrar valores de brillo más altos y una mayor tendencia a verde y amarillo, mientras que las muestras secadas convencionalmente (en estufa a 40°C) tuvieron un cambio de color más notorio, lo cual se atribuye a la temperatura a la que secó el toronjil.

Muestra fresca



Colector con cubierta de policarbonato

Sin malla sombra

Con malla sombra

Sin ventilador



Con ventilador



Colector con cubierta de vidrio

Sin malla sombra

Con malla sombra

Sin ventilador



Con ventilador



Figura 21. Muestras de toronjil secas comparadas con la muestra fresca

Análisis de Varianza

Con los datos mencionados se realizó el análisis estadístico, obteniendo los resultados de la Tabla 13. En todos los factores puros y las interacciones el valor de p fue menor a 0.05, por lo tanto, todos tuvieron un efecto significativo sobre la variable de respuesta.

Tabla 13. Análisis de varianza de la diferencia de color de muestras de toronjil

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	679.881	113.313	57.09	0.000
Lineal	3	352.855	117.618	59.26	0.000
X ₁ : Malla sombra	1	310.392	310.392	156.38	0.000*
X ₂ : Ventilador	1	31.809	31.809	16.03	0.001*
X ₃ : Tipo de cubierta colector	1	10.653	10.653	5.37	0.033*
Interacciones de 2 términos	3	327.026	109.009	54.92	0.000
X ₁ *X ₂	1	60.579	60.579	30.52	0.000*
X ₁ *X ₃	1	152.258	152.258	76.71	0.000*
X ₂ *X ₃	1	114.188	114.188	57.53	0.000*
Error	17	33.743	1.985		
Falta de ajuste	1	0.036	0.036	0.02	0.898
Error puro	16	33.707	2.107		
Total	23	713.623			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha=0.05$

Se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 22), donde se muestran los tres factores puros, malla sombra (X₁), ventilador (X₂) y tipo de cubierta del colector (X₃). De acuerdo con la gráfica, se observó que la menor diferencia de color se obtuvo cuando se usó malla sombra (nivel alto), ventilador (nivel alto) y colector con cubierta de vidrio (nivel alto).

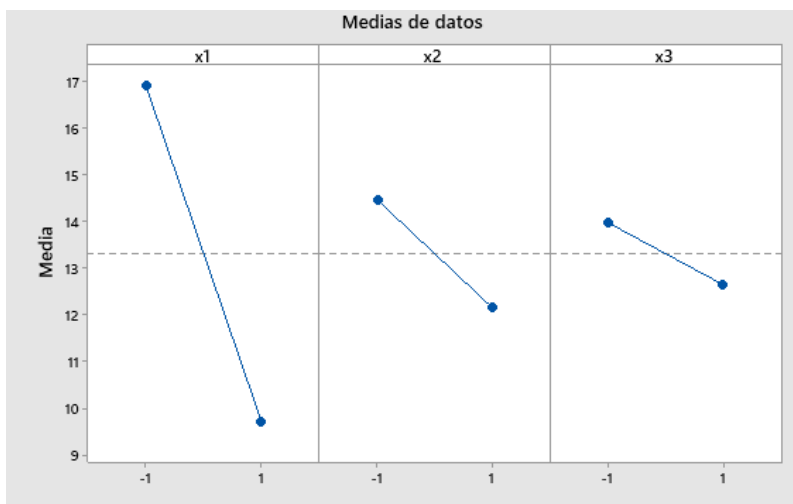


Figura 22. Gráfica de efectos principales para la diferencia de color del toronjil

En la Figura 23 se muestra la gráfica de interacción entre los factores. Para este caso todas tuvieron significancia, por lo tanto, se analizaron las 3. Para la primera interacción entre la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2), se observó que la diferencia de color más baja se obtuvo cuando se usó la malla sombra y el ventilador, es decir ambos factores estaban en su nivel alto. Para la segunda interacción entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), cuando se usó el colector con cubierta de vidrio y la malla sombra, de nuevo ambos factores en su nivel alto, la diferencia de color fue baja. Por último, para la interacción entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), se obtuvieron resultados similares con dos condiciones diferentes, en la primera cuando se usó el ventilador y el colector con cubierta de policarbonato y la otra opción fue sin ventilador y con el colector con cubierta de vidrio.

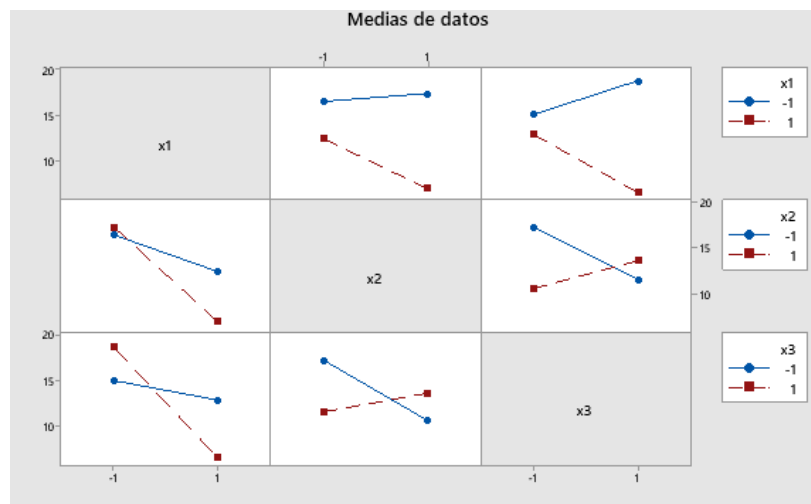


Figura 23. Gráfica de interacción para la diferencia de color del toronjil

En la Figura 24 se muestra la gráfica de superficie de respuesta donde se observa mejor el comportamiento mencionado anteriormente, cuando se usó el colector con cubierta de policarbonato con malla sombra y sin ventilador, se obtuvo una diferencia de color alta, pero la diferencia de color disminuyó cuando no se usó la malla sombra, pero si se usó el ventilador. Cuando se usó el colector con cubierta de vidrio, la malla sombra, pero no se usó el ventilador, la diferencia de color fue baja, por lo tanto, estas se consideran las mejores condiciones para que el toronjil no sufra tantos cambios en su coloración.

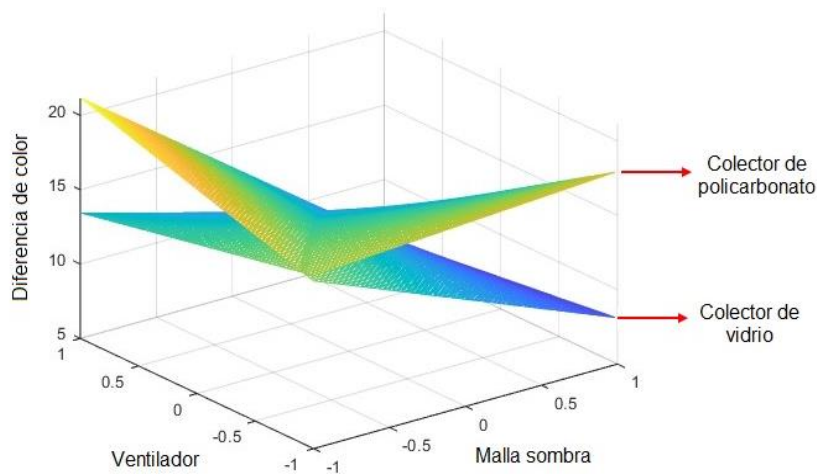


Figura 24. Gráfica de superficie de respuesta para la diferencia de color del toronjil

Actividad antioxidante del toronjil

Como se mencionó en la metodología, el experimento se realizó a diferentes concentraciones y en la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos. Se observó que el porcentaje de reducción del DPPH aumentó conforme a la concentración, por ejemplo, para la muestra fresca, cuando se tenía una concentración de 1 $\mu\text{g/ml}$ el porcentaje de reducción del DPPH fue 1.89%; en cambio cuando la concentración fue de 100 $\mu\text{g/ml}$ el porcentaje de reducción fue del 63%. Para los análisis posteriores únicamente se tomó en cuenta el porcentaje obtenido a la concentración más alta. La muestra fresca tuvo una actividad antioxidante del 63%, sin embargo, cuando se sometió al proceso de secado ese porcentaje aumentó para todas las corridas experimentales; se obtuvieron valores entre 88 y 93% de actividad antioxidante. De acuerdo con lo mencionado por Kwaśniewska-Karolak [71] este comportamiento puede atribuirse a que cuando una hierba aromática se somete a un proceso de secado, este provoca la liberación de compuestos activos adicionales, aumentando la actividad antioxidante en las muestras secas. Mientras que en un estudio realizado por Zielińska [39] se observó un alto contenido de flavonoides durante el período inicial de floración; estos compuestos son responsables en gran parte de la actividad antioxidante de las plantas, por lo tanto, los valores altos reportados para la actividad antioxidante en este estudio pueden estar relacionados con la presencia de estos flavonoides, ya que como se mencionó, también se usaron las flores del toronjil.

En la Figura 25 se muestra la actividad antioxidante en el toronjil fresco comparada con las muestras secas a diferentes condiciones. Se puede observar lo descrito anteriormente, que la actividad antioxidante aumentó en las muestras secas y que no varió mucho en cada corrida.

Tabla 14. Resultados obtenidos para la actividad antioxidante del toronjil

Corrida	Concentración (µg/ml)	DO (Densidad óptica) 515 nm	% Reducción del DPPH
Muestra fresca	1	0.632	1.890
	10	0.608	5.489
	100	0.238	63.076
1	1	0.642	2.628
	10	0.565	14.351
	100	0.068	89.641
2	1	0.614	0.433
	10	0.598	3.029
	100	0.049	92.050
3	1	0.670	2.093
	10	0.662	3.262
	100	0.045	93.379
4	1	0.604	2.001
	10	0.596	3.245
	100	0.071	88.534
5	1	0.639	1.440
	10	0.560	13.632
	100	0.073	88.735
6	1	0.642	0.874
	10	0.588	9.311
	100	0.069	89.300
7	1	0.660	3.651
	10	0.587	14.265
	100	0.077	88.754
8	1	0.652	4.771
	10	0.527	23.028
	100	0.047	93.087

DO= Densidad óptica

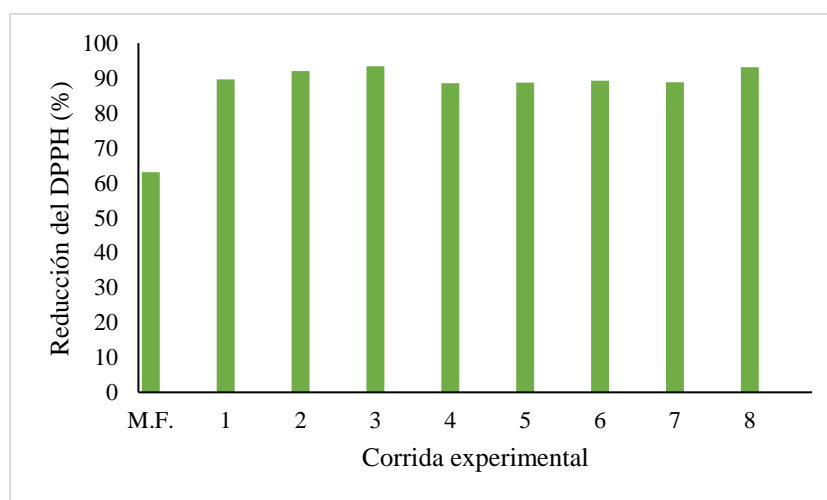


Figura 25. Actividad antioxidante en las diferentes muestras de toronjil

Análisis de Varianza

Como se mencionó anteriormente para el análisis estadístico se utilizaron únicamente los porcentajes más altos. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 15, donde el único valor de p menor a 0.05 fue en la interacción entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3).

Tabla 15. Análisis de varianza para la actividad antioxidante del toronjil

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	54.000	9.0000	2.83	0.042
Lineal	3	18.000	6.0000	1.89	0.170
X_1 : Malla sombra	1	6.000	6.0000	1.89	0.187
X_2 : Ventilador	1	6.000	6.0000	1.89	0.187
X_3 : Tipo de cubierta colector	1	6.000	6.0000	1.89	0.187
Interacciones de 2 términos	3	36.000	12.0000	3.78	0.030
$X_1 * X_2$	1	6.000	6.0000	1.89	0.187
$X_1 * X_3$	1	24.000	24.0000	7.56	0.014*
$X_2 * X_3$	1	6.000	6.0000	1.89	0.187
Error	17	54.000	3.1765		
Falta de ajuste	1	54.000	54.0000		
Error puro	16	0.000	0.0000		
Total	23	108.000			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

Se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 26), sin embargo, a pesar de que las líneas se ven con una pendiente pronunciada los valores fueron muy cercanos y de acuerdo con el análisis estadístico ningún factor puro tuvo un efecto significativo sobre la variable de respuesta.

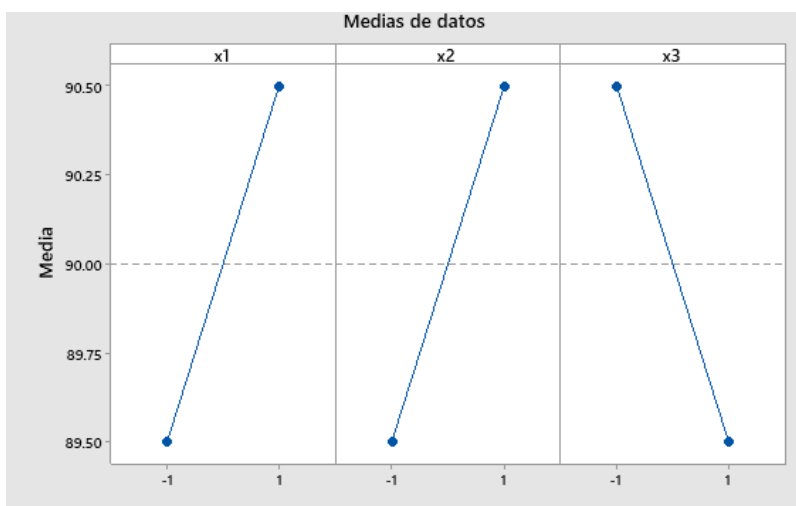


Figura 26. Gráfica de efectos principales para la actividad antioxidante del toronjil

En la Figura 27 se muestra la gráfica de interacción entre los tres factores, sin embargo, la única que tuvo significancia fue entre la malla sombra (X_1) y el tipo de colector (X_3). Como lo que se quería era tener un porcentaje alto de la actividad antioxidante, se pudo ver que hubo dos condiciones donde esto se cumplió, la primera fue cuando no se usó malla sombra (nivel bajo) y se usó el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo); mientras que la otra fue cuando se usó malla sombra (nivel alto) y el colector con cubierta de vidrio (nivel bajo).

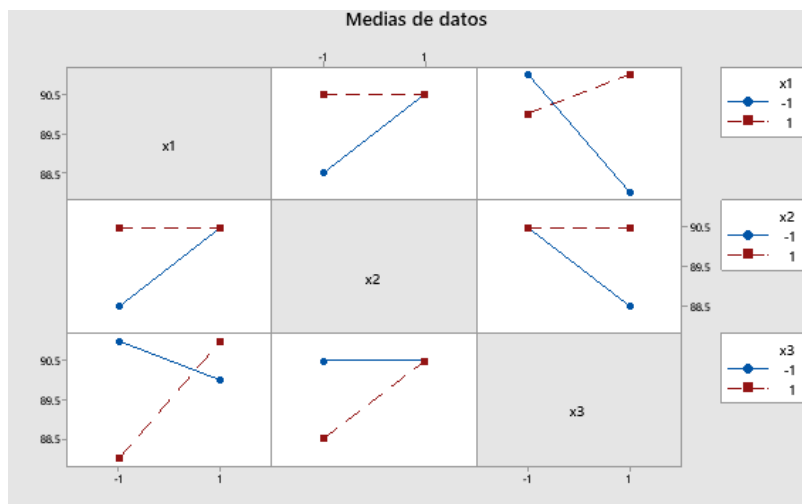


Figura 27. Gráfica de interacción para la actividad antioxidante del toronjil

También se realizó la gráfica de superficie de respuesta (Figura 28) donde se observó lo descrito anteriormente, que hubo dos condiciones adecuadas para poder obtener un porcentaje alto en la actividad antioxidante.

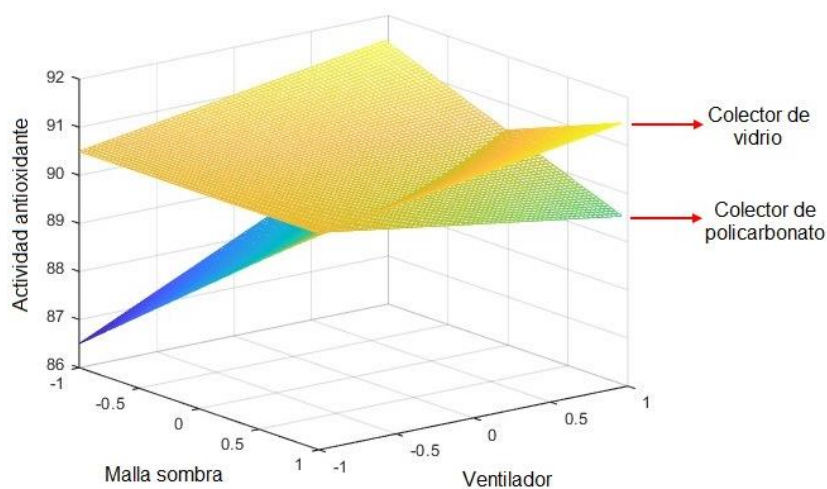


Figura 28. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad antioxidante del toronjil

Romero

Cinéticas de secado

En la Figura 28 se muestran las cinéticas de secado obtenidas para el romero, se puede observar que los tiempos de secado más cortos fueron en los experimentos 1 y 3 con 4 horas. Para ello se utilizó el colector con cubierta de policarbonato y sin malla sombra; teniendo como única diferencia en el experimento 3 el uso del ventilador, mientras que en el 1 no se usó el ventilador. Por otro lado, el tiempo más largo fue 7 horas, utilizando el colector con cubierta de vidrio, con malla sombra y con ventilador (experimento 8). En un estudio realizado por Ali [72] se reportó que para el secado convectivo a 50°C el tiempo de secado fue de 5.5 horas, por lo tanto, los tiempos registrados para el secado solar son buenos, ya que en un menor tiempo se secó el romero. Mientras que Karami [73] al utilizar un secador solar híbrido convectivo forzado reportó tiempos de secado entre 4 y 8 horas, similares a los registrados en este trabajo.

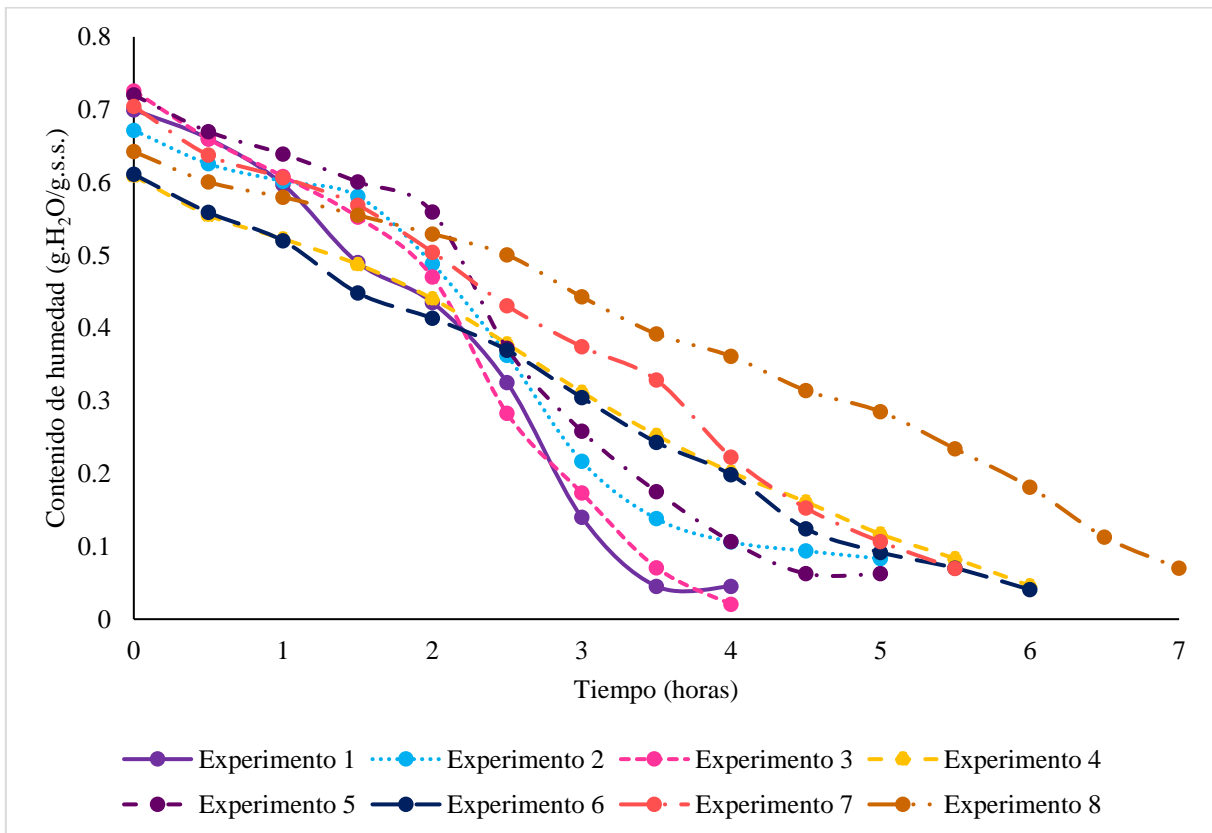


Figura 29. Cinéticas de secado obtenidas para el romero

Resultados de las variables de respuesta

En la Tabla 16 se muestran los resultados que se obtuvieron para las variables de respuesta en las diferentes corridas experimentales. Se reportan los valores para el tiempo de secado, el contenido de humedad final (%), actividad de agua final y los parámetros de color (L, a, b y ΔE).

Tabla 16. Resultados obtenidos para las variables de respuesta en el romero

Corridas	Factores			Variables de respuesta						
	X ₁	X ₂	X ₃	Tiempo de secado (horas)	Humedad final (%)	Actividad de agua final	Parámetros de color			
							L	a	b	ΔE
1	-1	-1	-1	4	4.5	0.5	28.17	0.72	8.7	23.17
2	+1	-1	-1	5	8.3	0.389	26.33	1.2	8.44	17.89
3	-1	+1	-1	4	2	0.323	32.11	-0.19	7.08	23.52
4	+1	+1	-1	6	4.5	0.535	30.61	0.27	12.51	18.88
5	-1	-1	+1	5	6.2	0.37	27.89	-0.78	9.89	25.44
6	+1	-1	+1	6	4	0.309	38.01	0.91	6.84	12.87
7	-1	+1	+1	5.5	6.9	0.574	31.9	1.3	5.81	30.15
8	+1	+1	+1	7	7	0.341	38.48	1.63	10.28	14.94

L (Luminosidad), a (Verde-Rojo), b (Amarillo-Azul), ΔE (Diferencia de color), X₁=Malla sombra, X₂= Ventilador, X₃= Tipo de cubierta del colector

Contenido de humedad final del romero

La muestra fresca de romero tuvo una humedad entre el 64 y 72%; sin embargo, cuando se sometió al proceso de secado se obtuvieron valores por debajo del 10%, como se muestra en la Tabla 16. Resultados similares reportó Mulinacci [19] durante el almacenamiento y secado de hojas de romero, donde la humedad inicial de la muestra osciló entre el 60% y la final estuvo cercana al 5%.

Análisis de Varianza

Con los datos obtenidos para esta variable de respuesta se realizó el análisis estadístico, los resultados se muestran en la Tabla 17. Se observó que los tres factores puros tuvieron un efecto significativo sobre esta variable de respuesta ($p < 0.05$). Mientras que, para el caso de las interacciones, solo dos tuvieron un efecto significativo, estas fueron la interacción entre la malla sombra (X₁) y el tipo de colector (X₃); y entre el ventilador (X₂) y el tipo de cubierta del colector (X₃).

Tabla 17. Análisis de varianza de la humedad del romero

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	82.1250	13.6875	47.88	0.000
Lineal	3	17.7900	5.9300	20.74	0.000
X ₁ : Malla sombra	1	6.6150	6.6150	23.14	0.000*
X ₂ : Ventilador	1	2.5350	2.5350	8.87	0.008*
X ₃ : Tipo de cubierta colector	1	8.6400	8.6400	30.22	0.000*
Interacciones de 2 términos	3	64.3350	21.4450	75.01	0.000
X ₁ *X ₂	1	0.3750	0.3750	1.31	0.268
X ₁ *X ₃	1	26.4600	26.4600	92.56	0.000*
X ₂ *X ₃	1	37.5000	37.5000	131.17	0.000*
Error	17	4.8600	0.2859		
Falta de ajuste	1	4.8600	4.8600		
Error puro	16	0.0000	0.0000		
Total	23	86.9850			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

Se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 30), en la cual se muestran los factores puros, malla sombra (X₁), ventilador (X₂) y tipo de cubierta del colector (X₃), en sus dos niveles, bajo (-1) y alto (1). Se observó que los valores de humedad más bajos se obtuvieron cuando no se usó malla sombra (nivel bajo), se usó el ventilador (nivel alto) y se utilizó el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo).

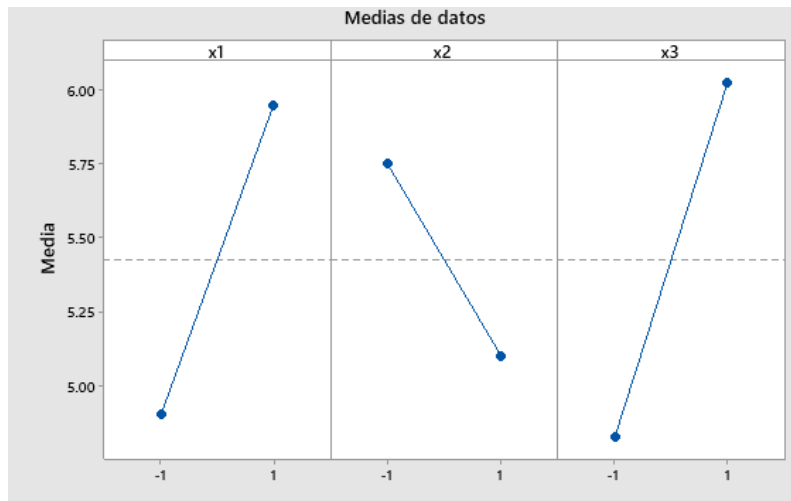


Figura 30. Gráfica de efectos principales para la humedad final del romero

De igual forma se realizó la gráfica de interacción (Figura 31), donde se observó que en las interacciones que tiene efecto significativo las líneas están cruzadas, mientras que en las que no, las líneas son paralelas. Por lo tanto, para la primera interacción que fue entre la malla sombra (X₁) y el tipo de cubierta de colector (X₃), se obtuvo un contenido de humedad bajo

cuando no se usó la malla sombra (nivel bajo) y se usó el colector con cubierta de policarbonato (nivel alto). Para la segunda interacción entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), donde se obtuvo un contenido de humedad final bajo fue cuando se usó el ventilador (nivel alto) y el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo).

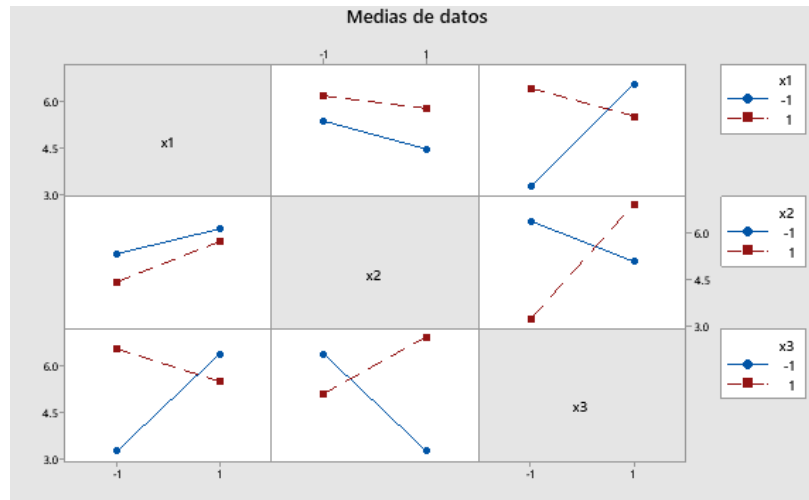


Figura 31. Gráfica de interacción para la humedad final del romero

En la Figura 32 se muestra la gráfica de superficie de respuesta donde se observa lo descrito anteriormente, cuando se usó el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo), el ventilador (nivel alto) y no se usó malla sombra (nivel bajo), el contenido de humedad fue bajo.

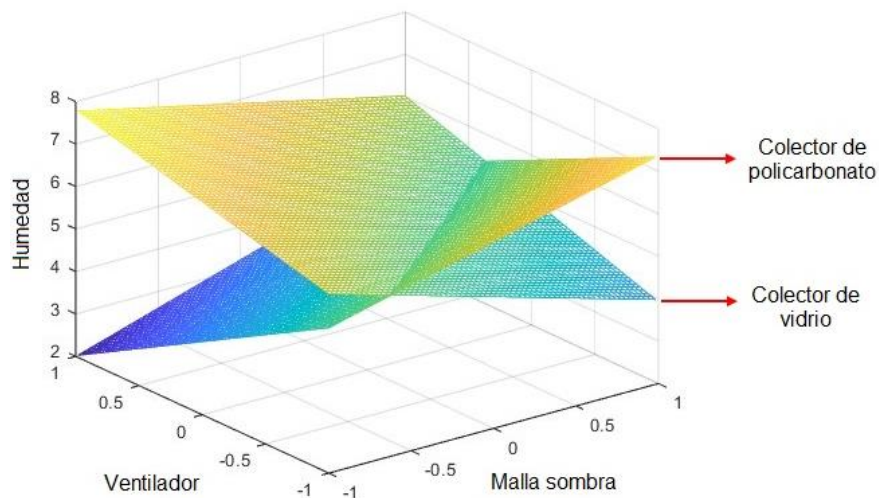


Figura 32. Gráfica de superficie de respuesta para la humedad final del romero

Este comportamiento se debe a que cuando no se utilizó la malla sombra en la cámara de secado se alcanzaron temperaturas altas y de acuerdo con Karami [73] al tener temperaturas de secado más altas se reduce drásticamente el contenido de humedad. Además de que se utilizó el ventilador y este ayudó a eliminar más rápido la humedad en el alimento.

Actividad de agua final del romero

La muestra fresca de romero tuvo un valor de actividad de agua de 0.96, pero cuando se sometió al proceso de secado se obtuvieron valores por debajo del 0.6, lo cual nos indica que se conservará por más tiempo ya que por debajo de ese valor se inhibe el crecimiento de los microorganismos, prolongando así su vida de anaquel. Los resultados se pueden ver en la Tabla 16.

Análisis de Varianza

Se realizó el análisis estadístico y se obtuvieron los datos que se muestran en la Tabla 18. El único valor de p menor a 0.05 fue con la interacción entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3).

Tabla 18. Análisis de varianza de la actividad de agua final del romero

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	0.132812	0.022135	3.37	0.023
Lineal	3	0.038506	0.012835	1.95	0.160
X_1 : Malla sombra	1	0.013968	0.013968	2.12	0.163
X_2 : Ventilador	1	0.015759	0.015759	2.40	0.140
X_3 : Tipo de cubierta colector	1	0.008778	0.008778	1.34	0.264
Interacciones de 2 términos	3	0.094306	0.031435	4.78	0.014
$X_1 * X_2$	1	0.008400	0.008400	1.28	0.274
$X_1 * X_3$	1	0.058905	0.058905	8.96	0.008*
$X_2 * X_3$	1	0.027001	0.027001	4.11	0.059
Error	17	0.111764	0.006574		
Falta de ajuste	1	0.091884	0.091884	73.95	0.000
Error puro	16	0.019879	0.001242		
Total	23	0.244576			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

Se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 33) y a pesar de que ningún factor puro fue significativo, ciertas condiciones favorecieron la actividad de agua baja. Estas condiciones fueron cuando se utilizó la malla sombra (nivel alto), no se usó el ventilador (nivel bajo) y se usó el colector con cubierta de vidrio (nivel alto).

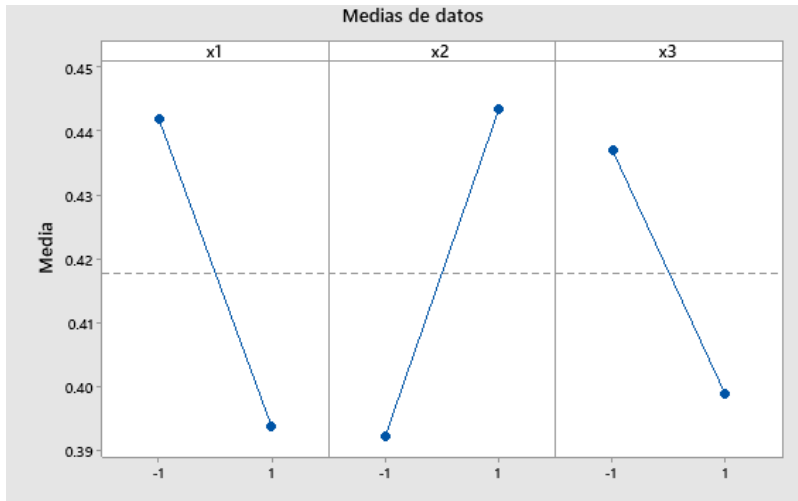


Figura 33. Gráfica de efectos principales para la actividad de agua final del romero

También se realizó la gráfica de interacción (Figura 34), donde si se tuvo una interacción con efecto significativo, que fue entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta de colector (X_3). De acuerdo con lo presentado en la gráfica, cuando se usó malla sombra (nivel alto) y el colector con cubierta de vidrio (nivel alto) se obtuvieron valores de actividad de agua bajos.

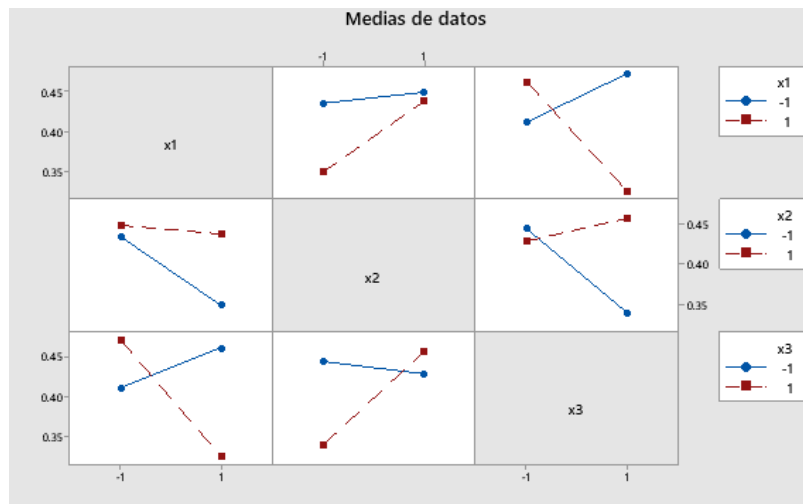


Figura 34. Gráfica de interacción para la actividad de agua del romero

En la gráfica de superficie de respuesta (Figura 35) se observa mejor el comportamiento de la actividad de agua bajo las diferentes condiciones de secado. Cuando se utilizó el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo) y la malla sombra (nivel alto), pero no se usó el ventilador, la actividad de agua que se obtuvo fue alta. En cambio, cuando se usó el colector con cubierta de vidrio (nivel alto) y la malla sombra (nivel alto), la actividad de agua fue más baja, por lo tanto, se consideró que es mejor operar el secador bajo estas condiciones para obtener esos resultados.

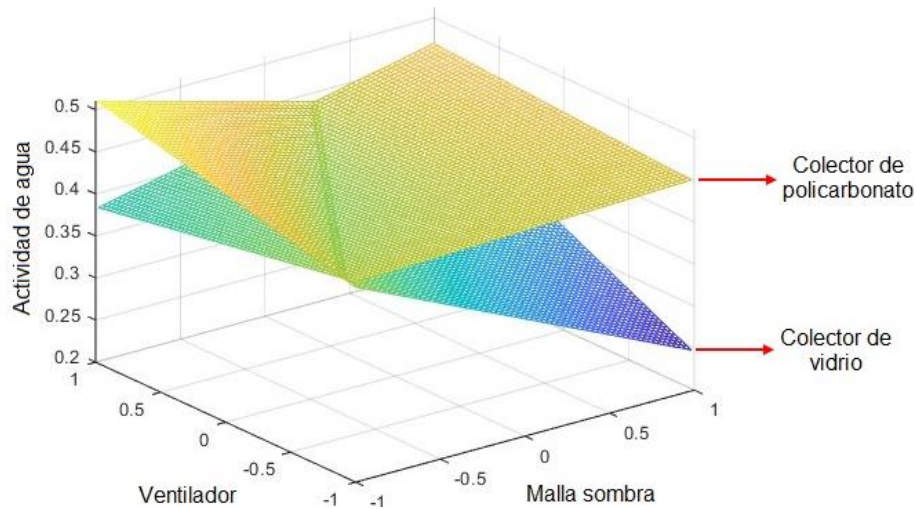


Figura 35. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad de agua del romero

Diferencia de color del romero (ΔE)

El color es un parámetro importante en los productos secos, por esa razón se midió en cada una de las muestras finales, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 16. En los productos secos no es deseable una gran diferencia de color (ΔE), ya que los consumidores prefieren un producto que tenga un color similar al fresco. Un valor de ΔE alto podría indicar un mayor grado de oscurecimiento, de acuerdo con la literatura un ΔE de 2 a 12 se considera una diferencia notable [74]. En los resultados que se muestran en la Tabla 16 se observó que todos fueron mayores a 12, por ello es evidente el cambio de color en las muestras secas. Sin embargo, se notó que la diferencia de color más baja se dio cuando se usó la malla sombra. En la Figura 36 se muestra el romero fresco comparado con el romero seco bajo las diferentes condiciones y se observa mejor la diferencia de color, ya que en los experimentos donde no se usó la malla sombra el romero se ve de un color más café.

Arslan [75] reportó valores similares en los parámetros de L, a y b, en un estudio donde evaluó el efecto de diferentes métodos de secado (al horno a 50°C por 12 horas, al sol por 13 horas y en horno de microondas) sobre el color de las hojas de romero. En este trabajo se observó que, al utilizar el horno, las muestras tenían un color más oscuro que cuando se secó al sol y en el microondas; y este comportamiento se atribuye a la alta temperatura y al largo tiempo de secado.

Las diferencias de color más altas se obtuvieron cuando no se usó la malla sombra y esto puede deberse a lo mencionado anteriormente, ya que al entrar directamente la radiación solar a la cámara de secado las temperaturas eran más elevadas y esto pudo afectar el color final.

Muestra fresca



Colector con cubierta de policarbonato

Sin malla sombra

Con malla sombra

Sin ventilador



Con ventilador



Colector con cubierta de vidrio

Sin malla sombra

Con malla sombra

Sin ventilador



Con ventilador



Figura 36. Muestras de romero secas comparadas con la muestra fresca

Análisis de Varianza

Con los datos recabados se realizó el análisis estadístico y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 19. Los factores puros que tuvieron un valor menor a p fueron la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2), mientras que, en las interacciones, las que tuvieron un valor menor a p fueron entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), y el ventilador (X_2) con el tipo de cubierta del colector (X_3).

Tabla 19. Análisis de varianza de la diferencia de color del romero

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	691.678	115.280	109.96	0.000
Lineal	3	560.940	186.980	178.36	0.000
X_1 : Malla sombra	1	535.532	535.532	510.84	0.000*
X_2 : Ventilador	1	25.400	25.400	24.23	0.000*
X_3 : Tipo de cubierta colector	1	0.008	0.008	0.01	0.930
Interacciones de 2 términos	3	130.738	43.579	41.57	0.000
$X_1 * X_2$	1	1.670	1.670	1.59	0.224
$X_1 * X_3$	1	118.415	118.415	112.95	0.000*
$X_2 * X_3$	1	10.653	10.653	10.16	0.005*
Error	17	17.822	1.048		
Falta de ajuste	1	3.768	3.768	4.29	0.055
Error puro	16	14.053	0.878		
Total	23	709.499			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

Se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 37), donde se observó que la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2) que son los dos factores que tuvieron efecto significativo fueron las que presentaron una pendiente más pronunciada. Por lo tanto, la diferencia de color baja se tuvo cuando se usó la malla sombra (nivel alto) y no se usó el ventilador (nivel bajo). Como el tipo de cubierta del colector (X_3) no tuvo efecto significativo, se pudo ver que no importa cual se use, con ambos se pueden obtener valores bajos.

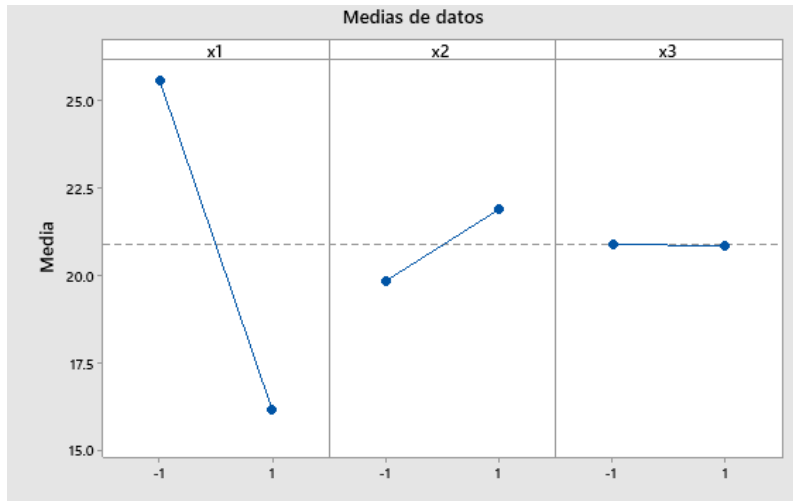


Figura 37. Gráfica de efectos principales para la diferencia de color del romero

Para la gráfica de interacción (Figura 38), se observó que para la interacción que no tuvo efecto significativo las líneas no se cruzaron. Para la interacción entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), la diferencia de color fue baja cuando se usó la malla sombra (nivel alto) y el colector con cubierta de vidrio (nivel alto). Mientras que para la interacción entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), cuando no se usó el ventilador (nivel bajo) y se usó el colector con cubierta de vidrio (nivel alto) la diferencia de color fue baja.

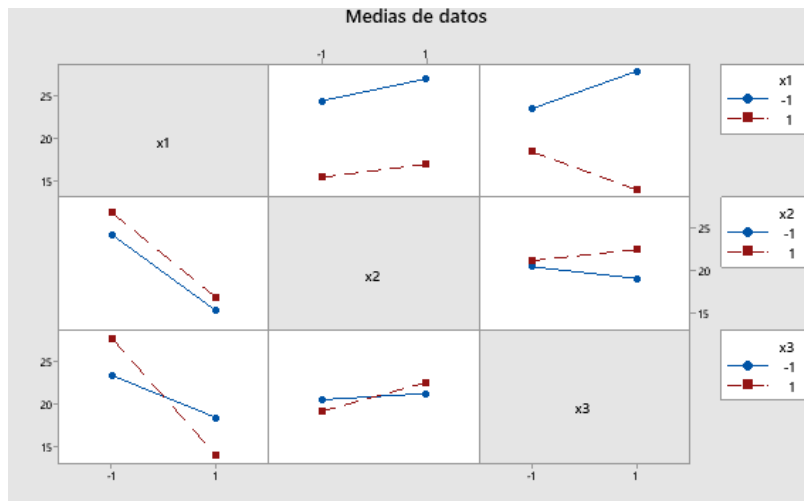


Figura 38. Gráfica de interacción para la diferencia de color del romero

En la Figura 39 se muestra la gráfica de superficie de respuesta donde se observa que cuando se usó la malla sombra (nivel alto) la diferencia de color disminuyó, pero cuando no se usó (nivel bajo) la diferencia de color aumentó. Sin embargo, esta diferencia fue más baja cuando se hizo uso del colector con cubierta de vidrio.

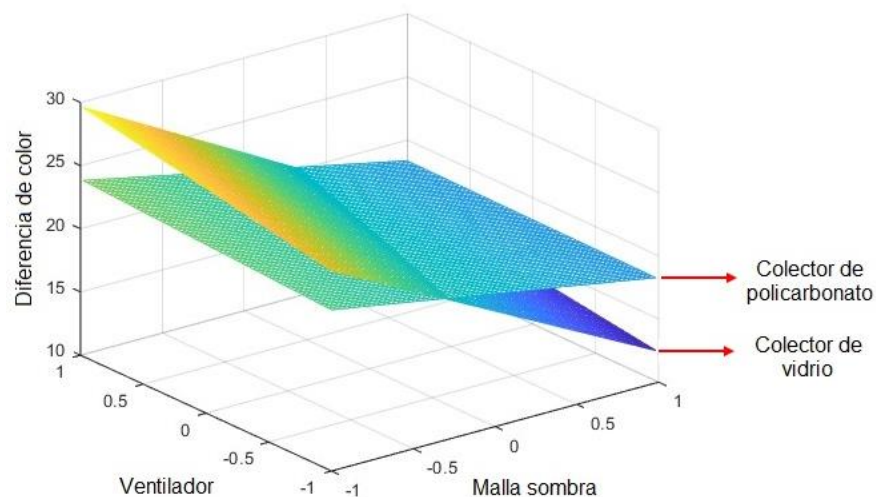


Figura 39. Gráfica de superficie de respuesta para la diferencia de color del romero

Actividad antioxidante del romero

En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos para la actividad antioxidante a diferentes concentraciones. El comportamiento que se observó en el toronjil es el mismo que se presentó con el romero, conforme aumentó la concentración también aumentó el porcentaje de reducción del DPPH. Para el análisis estadístico se tomó en cuenta únicamente el valor más alto en el porcentaje. Se puede observar en la Tabla 20 que para la muestra fresca el porcentaje fue de 91 y para las muestras secas se obtuvieron valores similares, lo cual nos indicó que la actividad antioxidante no se vio afectada por el proceso de secado.

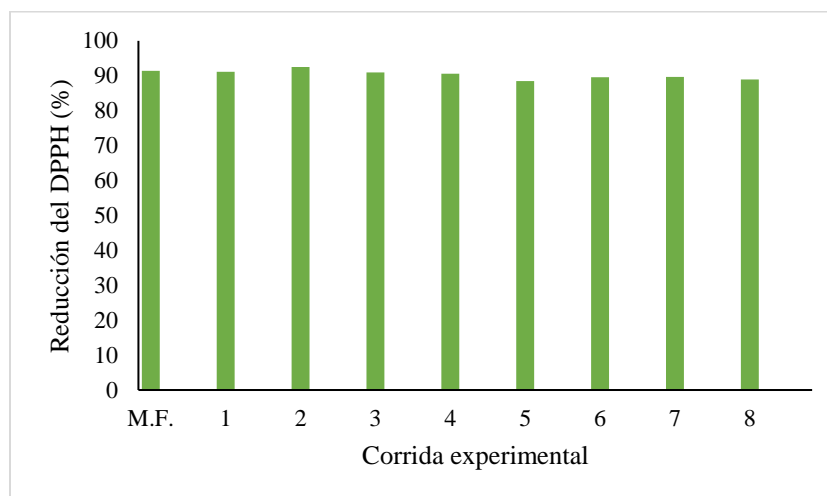


Figura 40. Actividad antioxidante en las diferentes muestras de romero

En la Figura 40 se observa una gráfica con los resultados de la actividad antioxidante cuando se utilizó una concentración de 100 $\mu\text{g/ml}$, donde se comparó la muestra fresca con las muestras secas a diferentes condiciones. Se observó que los resultados para todos los experimentos fueron similares.

Tabla 20. Resultados obtenidos para la actividad antioxidante del romero

Corrida	Concentración ($\mu\text{g/ml}$)	DO 515 nm	% Reducción del DPPH
Muestra fresca	1	0.591	4.110
	10	0.474	23.039
	100	0.053	91.401
1	1	0.658	0.253
	10	0.566	14.149
	100	0.058	91.157
2	1	0.595	3.407
	10	0.489	20.606
	100	0.046	92.482
3	1	0.654	4.985
	10	0.579	15.924
	100	0.062	90.949
4	1	0.639	7.260
	10	0.592	14.037
	100	0.065	90.561
5	1	0.657	4.598
	10	0.611	11.278
	100	0.079	88.480
6	1	0.645	0.309
	10	0.561	13.241
	100	0.067	89.593
7	1	0.662	-2.318
	10	0.598	7.625
	100	0.067	89.696
8	1	0.671	-3.709
	10	0.520	19.578
	100	0.071	88.975

DO= Densidad óptica

En este trabajo no se determinó el parámetro IC_{50} , que da información sobre la concentración de antioxidante que provoca una reducción del 50% de los radicales libres DPPH. Sin embargo, en un estudio realizado por Kwaśniewska-Karolak [71] donde evaluó el efecto de diferentes procesos de secado sobre la actividad antioxidante del romero, indicó que los procesos utilizados tuvieron un impacto positivo sobre el potencial antioxidante ya que estos provocaron la liberación de compuestos activos adicionales.

Análisis de Varianza

Con los datos que se obtuvieron se realizó el análisis estadístico y en la Tabla 21 se muestran los resultados. Los factores puros y las interacciones presentaron un valor de p menor a 0.05, por lo tanto, tuvieron un efecto significativo sobre la variable de respuesta.

Tabla 21. Análisis de varianza para la actividad antioxidante

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	41.2500	6.8750	311.67	0.000
Lineal	3	34.1250	11.3750	515.67	0.000
X ₁ : Malla sombra	1	0.3750	0.3750	17.00	0.001*
X ₂ : Ventilador	1	3.3750	3.3750	153.00	0.000*
X ₃ : Tipo de cubierta colector	1	30.3750	30.3750	1377.00	0.000*
Interacciones de 2 términos	3	7.1250	2.3750	107.67	0.000
X ₁ *X ₂	1	3.3750	3.3750	153.00	0.000*
X ₁ *X ₃	1	0.3750	0.3750	17.00	0.001*
X ₂ *X ₃	1	3.3750	3.3750	153.00	0.000*
Error	17	0.3750	0.0221		
Falta de ajuste	1	0.3750	0.3750		
Error puro	16	0.0000	0.0000		
Total	23	41.6250			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

Se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 41), donde se muestran los factores puros, malla sombra (X₁), ventilador (X₂) y tipo de cubierta del colector (X₃); en ella se pudo observar el nivel de cada factor para obtener una actividad antioxidante alta después del proceso de secado. De acuerdo con esto, los valores altos se obtuvieron cuando se usó malla sombra (nivel alto), no se usó ventilador (nivel bajo) y se utilizó el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo).

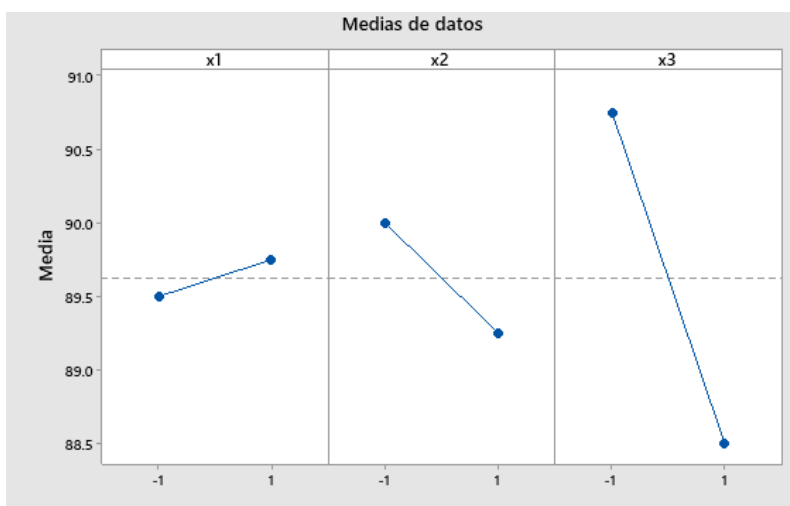


Figura 41. Gráfica de efectos principales para la actividad antioxidante del romero

También se realizó la gráfica de interacción (Figura 42) y como se observó en el análisis de varianza las tres interacciones tuvieron un efecto significativo sobre la variable de respuesta.

Para la primera interacción entre la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2), se notó que cuando se usó la malla sombra (nivel alto), pero sin el ventilador (nivel bajo), la actividad antioxidante fue alta. En la segunda interacción entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), la actividad antioxidante se vio favorecida cuando se usó la malla sombra (nivel alto) y el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo). Por último, en la interacción entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), el valor más alto se obtuvo cuando se usó el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo), pero sin ventilador (nivel bajo).

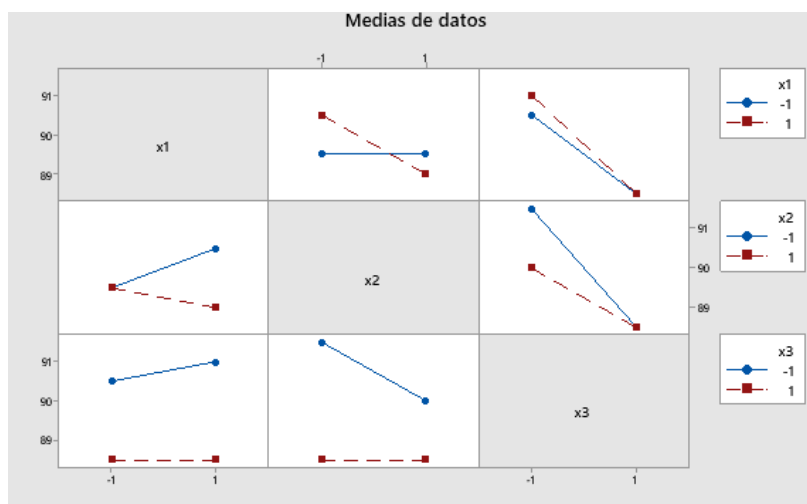


Figura 42. Gráfica de interacción para la actividad antioxidante del romero

En la Figura 43 se muestra la gráfica de superficie de respuesta, en esta se observó que al utilizar el colector con cubierta de vidrio la actividad antioxidante después del proceso de secado fue baja, en cambio esta aumentó cuando se usó el colector con cubierta de policarbonato, pero al mismo tiempo se usó la malla sombra (nivel alto).

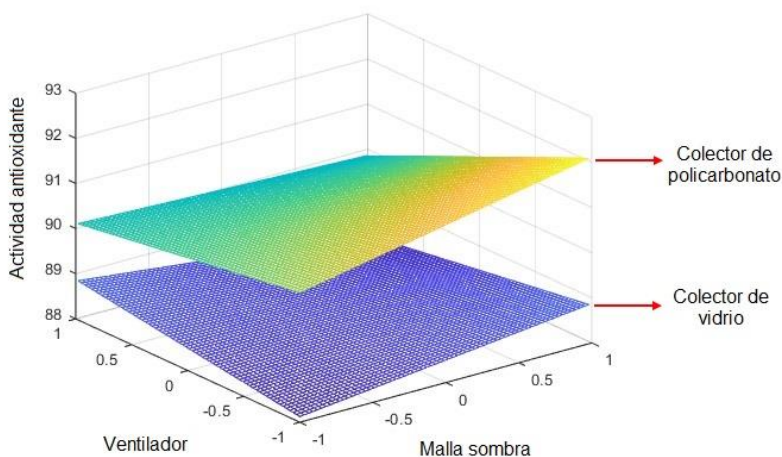


Figura 43. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad antioxidante del romero

Epazote

Cinéticas de secado

En la Figura 44 se muestran las cinéticas de secado obtenidas para el epazote, donde el tiempo más corto se registró para el experimento 3 con 4 horas. Las condiciones que se utilizaron fueron el colector con cubierta de policarbonato, sin malla sombra y con ventilador. Mientras que el tiempo más largo fue en el experimento 8 con 7 horas. En la literatura no se han reportado estudios sobre el secado solar de epazote, pero Orphanides [70] analizó diferentes métodos de secado aplicados a hierbas aromáticas (albahaca, orégano, perejil, menta y tomillo) mencionando tiempos de secado entre 1.5 y 48 horas, por lo tanto, los tiempos registrados en este trabajo fueron buenos ya que en un día las muestras de epazote alcanzaban un contenido de humedad por debajo del 10%. De acuerdo con la literatura, se tiene reportado que cuando las muestras secas alcanzan valores por debajo del 10% son consideradas estables y libres de crecimiento microbiano [76].

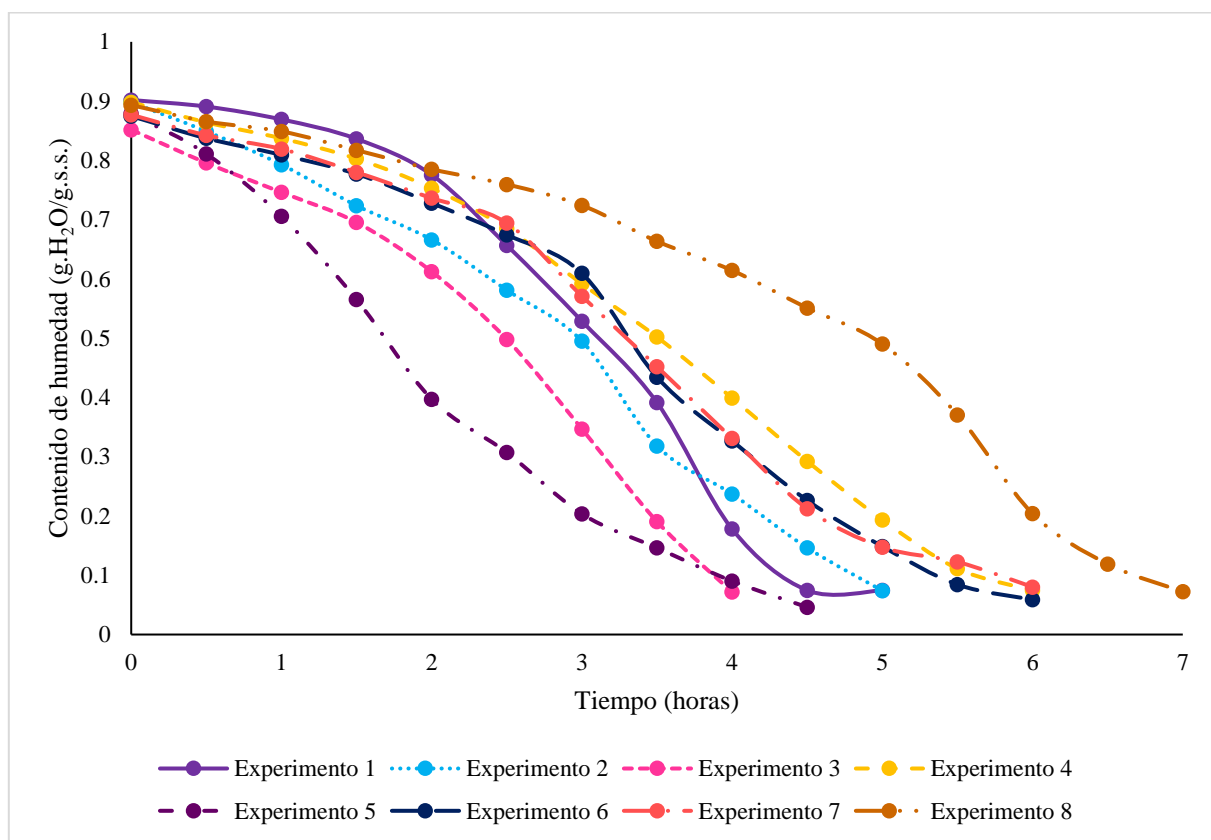


Figura 44. Cinéticas de secado obtenidas para el epazote

Resultados de las variables de respuesta

En la Tabla 22 se muestran los resultados obtenidos para las variables de respuesta en las diferentes corridas experimentales. Se reporta el tiempo de secado, el contenido de humedad final (%), la actividad de agua final y el color (L, a, b y ΔE).

Tabla 22. Resultados obtenidos para las variables de respuesta en el epazote

Factores				Variables de respuesta						
Corridas	X ₁	X ₂	X ₃	Tiempo de secado (horas)	Humedad final (%)	Actividad de agua final	Parámetros de color			
							L	a	b	ΔE
1	-1	-1	-1	5	7.4	0.523	43.67	-2.33	19.85	11.72
2	+1	-1	-1	5	7.4	0.477	46.38	-7.95	23.73	6.75
3	-1	+1	-1	4	7.1	0.432	33.7	-6.18	18.24	4.7
4	+1	+1	-1	6	7.4	0.55	42.42	-6.38	24.63	5.38
5	-1	-1	+1	4.5	4.6	0.492	37.54	-5.44	21.68	12.47
6	+1	-1	+1	6	5.8	0.555	37.98	-7.89	20.65	7.19
7	-1	+1	+1	5.5	8	0.513	42.73	-12.34	22.81	13.7
8	+1	+1	+1	7	7.2	0.423	40.79	-5.81	27.5	7.01

L (Luminosidad), a (Verde-Rojo), b (Amarillo-Azul), ΔE (Diferencia de color), X₁=Malla sombra, X₂= Ventilador, X₃= Tipo de cubierta del colector

Contenido de humedad final del epazote

El contenido de humedad que se registró para el epazote fresco estuvo entre 85 y 90%, sin embargo, cuando se sometió al proceso de secado disminuyó a menos del 10%, por lo tanto, si perdió una gran cantidad de agua durante el proceso, como se observa en la Tabla 22. Con estos datos se realizó el análisis estadístico.

Análisis de Varianza

Los resultados del análisis de varianza se muestran en la Tabla 23, donde se observa que los factores que tuvieron un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la variable de respuesta fueron el ventilador (X₂) y el tipo de cubierta del colector (X₃); para el caso de las interacciones las que tuvieron un efecto significativo fueron entre la malla sombra (X₁) y el ventilador (X₂), y entre el ventilador (X₂) y el tipo de cubierta del colector (X₃).

Tabla 23. Análisis de varianza de la humedad final del epazote

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	23.7525	3.95875	33.93	0.000
Lineal	3	12.9112	4.30375	36.88	0.000
X ₁ : Malla sombra	1	0.1838	0.18375	1.57	0.227
X ₂ : Ventilador	1	7.5937	7.59375	65.08	0.000*
X ₃ : Tipo de cubierta colector	1	5.1337	5.13375	43.99	0.000*
Interacciones de 2 términos	3	10.8413	3.61375	30.97	0.000
X ₁ *X ₂	1	1.0837	1.08375	9.29	0.007*
X ₁ *X ₃	1	0.0037	0.00375	0.03	0.860
X ₂ *X ₃	1	9.7538	9.75375	83.59	0.000*
Error	17	1.9838	0.11669		
Falta de ajuste	1	1.9838	1.98375		
Error puro	16	0.0000	0.00000		
Total	23	25.7363			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

En la gráfica de efectos principales (Figura 45), se observó que los dos factores con efecto significativo que fueron el ventilador (X₂) y el tipo de cubierta del colector (X₃), tuvieron una pendiente más pronunciada, por lo tanto, tomando en cuenta esos dos factores, se obtuvo un contenido de humedad bajo cuando no se usó el ventilador (nivel bajo) y se usó el colector con cubierta de vidrio (nivel alto).

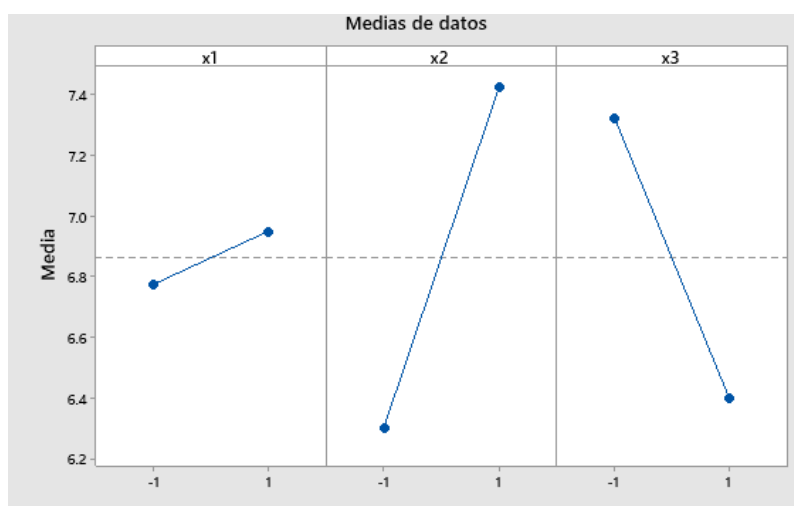


Figura 45. Gráfica de efectos principales para la humedad final del epazote

En la Figura 46 se muestra la gráfica de interacción, para este caso como sólo dos interacciones tuvieron efecto significativo, fueron las que se analizaron. Para la primera interacción entre la malla sombra (X₁) y el ventilador (X₂), el contenido de humedad más bajo se obtuvo cuando no se usó la malla sombra (nivel bajo) ni el ventilador (nivel bajo);

mientras que para la segunda interacción entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), se obtuvo el contenido de humedad más bajo cuando no se usó el ventilador (nivel bajo) y se utilizó el colector con cubierta de vidrio (nivel alto).

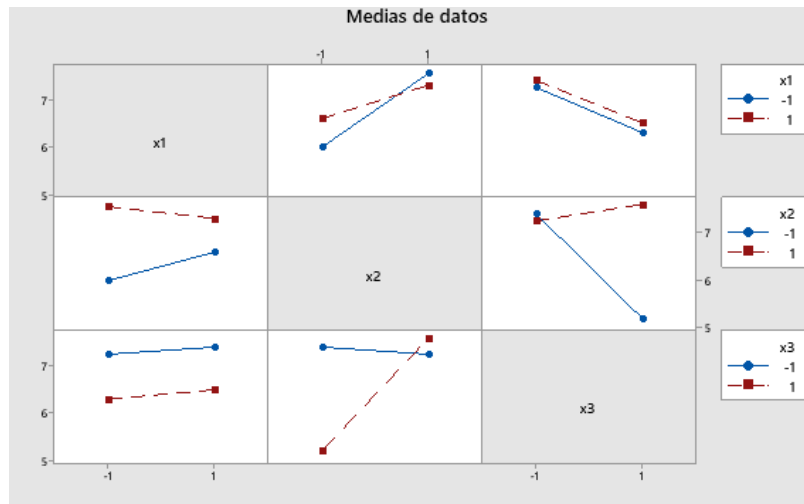


Figura 46. Gráfica de interacción para la humedad final del epazote

En la Figura 47 se muestra la gráfica de superficie de respuesta, donde se observa que cuando se utilizó el colector con cubierta de policarbonato el contenido de humedad de las muestras fue un poco más alto que cuando se usó el colector con cubierta de vidrio. De acuerdo con lo descrito anteriormente en las gráficas de efectos principales y de interacción, y lo observado en la Figura 47, podemos decir que para obtener un contenido de humedad bajo no se debe usar la malla sombra (nivel bajo) ni el ventilador (nivel bajo).

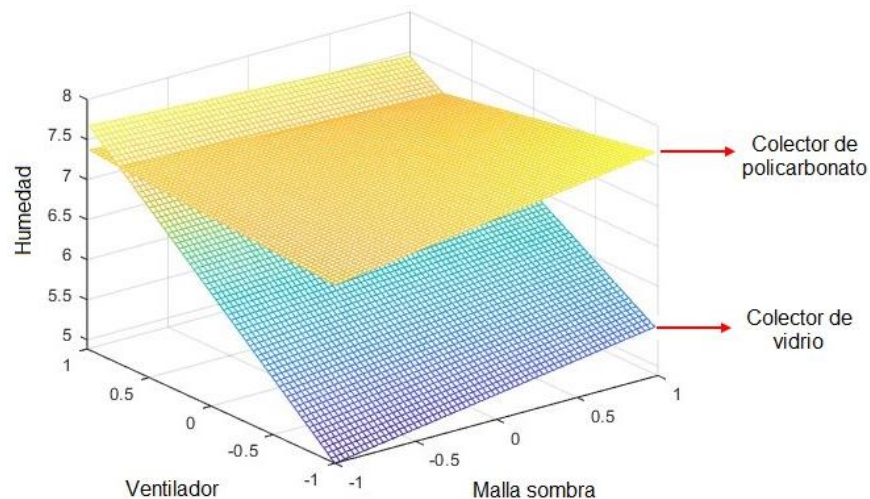


Figura 47. Gráfica de superficie de respuesta para la humedad final del epazote

Actividad de agua final del epazote

Las muestras frescas de epazote tuvieron valores de actividad de agua de 0.98, sin embargo, al someterlas al proceso de secado su valor disminuyó significativamente, ya que los valores finales estuvieron por debajo de 0.6 como se observa en la Tabla 22.

Análisis de Varianza

Se realizó el análisis estadístico y los resultados se muestran en la Tabla 24. De acuerdo con esto ningún factor ni interacción tuvieron un efecto significativo sobre la variable de respuesta, ya que el valor de p fue mayor que 0.05.

Tabla 24. Análisis de varianza para la actividad de agua final del epazote

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	0.013909	0.002318	0.56	0.756
Lineal	3	0.006957	0.002319	0.56	0.649
X ₁ : Malla sombra	1	0.000748	0.000748	0.18	0.676
X ₂ : Ventilador	1	0.006208	0.006208	1.50	0.238
X ₃ : Tipo de cubierta colector	1	0.000000	0.000000	0.00	0.995
Interacciones de 2 términos	3	0.006953	0.002318	0.56	0.649
X ₁ *X ₂	1	0.000038	0.000038	0.01	0.925
X ₁ *X ₃	1	0.003602	0.003602	0.87	0.364
X ₂ *X ₃	1	0.003313	0.003313	0.80	0.384
Error	17	0.070434	0.004143		
Falta de ajuste	1	0.037604	0.037604	18.33	0.001
Error puro	16	0.032829	0.002052		
Total	23	0.084343			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

A pesar de que ningún factor e interacción tuvieron efecto significativo, se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 48), donde se observó que, cuando no se usó la malla sombra (nivel bajo) y se usó el ventilador (nivel alto), la actividad de agua fue menor; pero para el caso del tipo de cubierta de colector fue lo mismo para cualquiera de los dos.

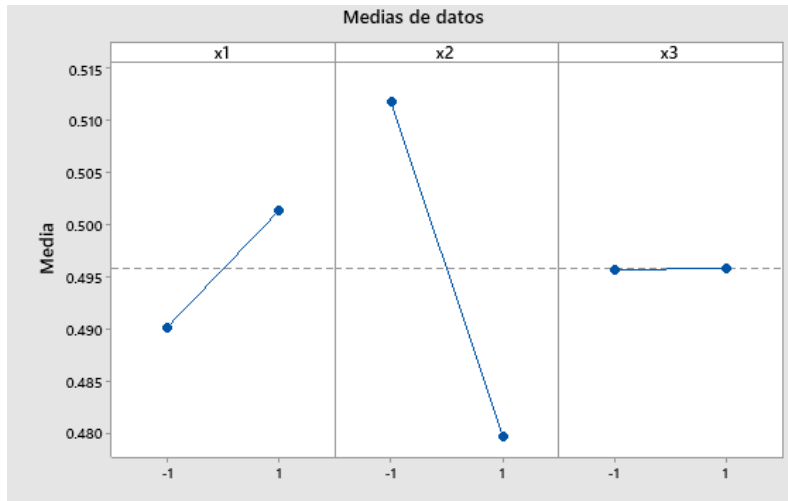


Figura 48. Gráfica de efectos principales para la actividad de agua final del epazote

De igual forma se realizó la gráfica de interacción (Figura 49), donde se observó que para la primera interacción entre la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2), fue mejor no usar malla sombra (nivel bajo) y tampoco ventilador (nivel bajo). En la segunda interacción entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), fue mejor no usar malla sombra (nivel bajo) y usar el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo). Por último, para la tercera interacción que fue entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), fue mejor usar ventilador (nivel alto) y el colector con cubierta de vidrio (nivel alto).

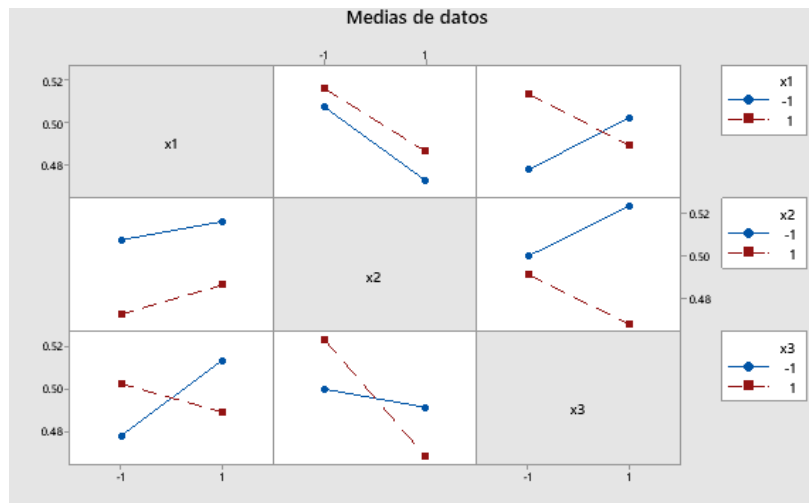


Figura 49. Gráfica de interacción para la actividad de agua final del epazote

En la Figura 50 se muestra la gráfica de superficie de respuesta, donde se observa que para cualquiera de los dos tipos de cubierta del colector se obtuvieron valores de actividad de agua bajos, sin embargo, fue usando el ventilador (nivel alto), pero no la malla sombra (nivel bajo).

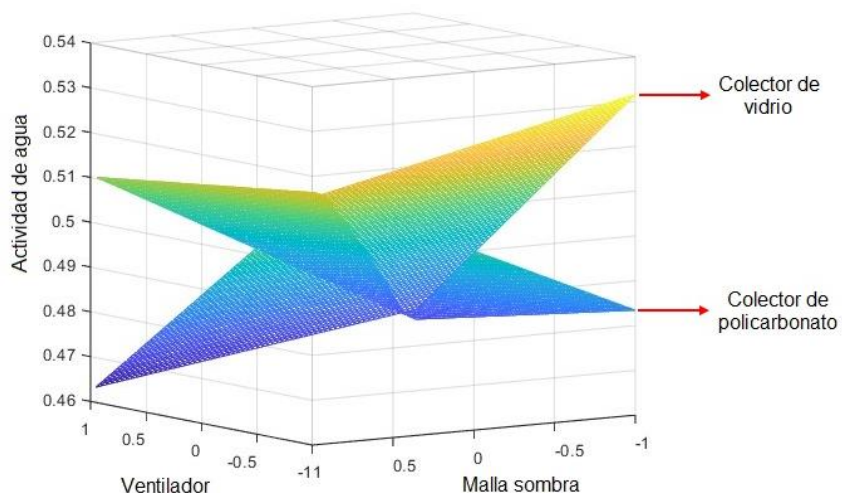


Figura 50. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad de agua final del epazote

Diferencia de color del epazote (ΔE)

Se midió el color para cada una de las muestras secas, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 22. De acuerdo con estos datos la mayoría de las muestras presentó una diferencia de color baja, es decir, su color no varió tanto después de pasar por el secado. La ΔE estuvo entre 4.7 y 13.7, que son valores bajos comparados con los obtenidos para las otras plantas estudiadas. Esto se puede observar en la Figura 52, donde se comparan todas las muestras secas con la muestra fresca y la diferencia de color no es tan evidente. De acuerdo con Orphanides [70] la conservación del color depende de la planta, ya que cada planta tiene diferentes compuestos, que al someterse a un proceso como es el secado pueden verse afectados por las temperaturas alcanzadas.

Análisis de Varianza

Se realizó el análisis estadístico y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 25. Se observó que los tres factores puros tuvieron un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la variable de respuesta que es la diferencia de color. Mientras que para las interacciones sólo dos tuvieron efecto significativo, fueron la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), y el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3).

Tabla 25. Análisis de varianza de la diferencia de color del epazote

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	234.018	39.0031	22.70	0.000
Lineal	3	171.741	57.2469	33.32	0.000
X ₁ : Malla sombra	1	99.145	99.1453	57.70	0.000*
X ₂ : Ventilador	1	20.203	20.2034	11.76	0.003*
X ₃ : Tipo de cubierta colector	1	52.392	52.3921	30.49	0.000*
Interacciones de 2 términos	3	62.278	20.7592	12.08	0.000
X ₁ *X ₂	1	6.742	6.7416	3.92	0.064
X ₁ *X ₃	1	22.118	22.1184	12.87	0.002*
X ₂ *X ₃	1	33.418	33.4176	19.45	0.000*
Error	17	29.209	1.7182		
Falta de ajuste	1	18.691	18.6913	28.43	0.000
Error puro	16	10.518	0.6574		
Total	23	263.228			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

Se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 51), donde se observó que la diferencia de color baja se obtuvo cuando se usó la malla sombra (nivel alto), el ventilador (nivel alto) y el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo).

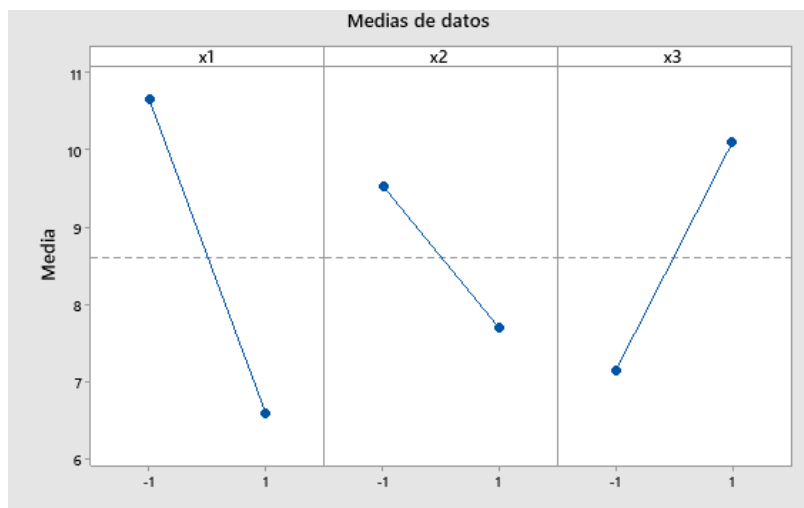


Figura 51. Gráfica de efectos principales para la diferencia de color del epazote

Muestra fresca



Colector con cubierta de policarbonato

Sin malla sombra

Con malla sombra

Sin ventilador



Con ventilador



Colector con cubierta de vidrio

Sin malla sombra

Con malla sombra

Sin ventilador



Con ventilador



Figura 52. Muestras de epazote secas comparadas con la muestra fresca

En la Figura 53 se muestra la gráfica de interacción. Para la interacción entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), resultó mejor usar la malla sombra (nivel alto) y el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo), de esta forma la diferencia de color disminuyó. En la interacción entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), los mejores valores se obtuvieron cuando se usó el ventilador (nivel alto) y el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo).

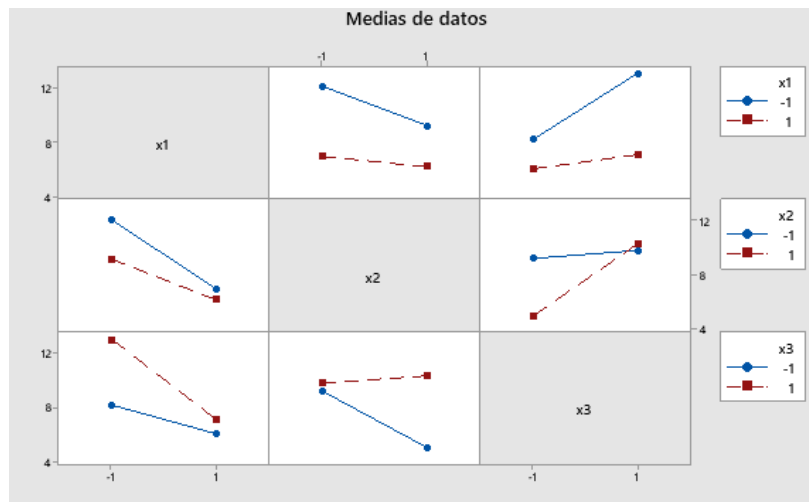


Figura 53. Gráfica de interacción para la diferencia de color del epazote

Finalmente, en la Figura 54 se muestra la gráfica de superficie de respuesta, donde se observó que al utilizar el colector con cubierta de policarbonato se obtuvieron los valores más bajos de diferencia de color, cabe mencionar que también fue mejor usar la malla sombra (nivel alto) y el ventilador (nivel alto). Para el caso del colector con cubierta de vidrio a pesar de que se tuvieron diferencias de color más altas, cuando se utilizó la malla sombra (nivel alto) también se obtuvieron valores bajos.

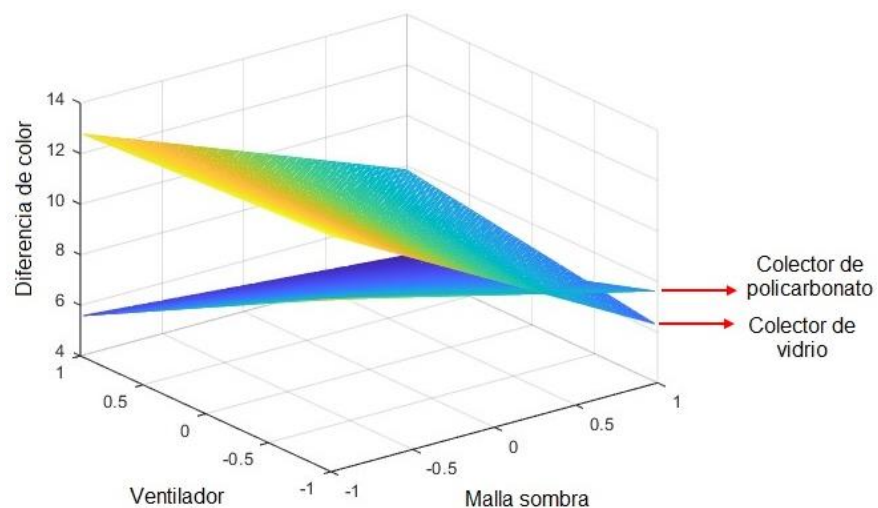


Figura 54. Gráfica de superficie de respuesta para la diferencia de color del epazote

Actividad antioxidante del epazote

En la Tabla 26 se muestran los resultados obtenidos para la actividad antioxidante a diferentes concentraciones. Se observa que para la muestra fresca el porcentaje más alto de reducción de DPPH fue del 14%, esto cuando se tuvo una concentración de 100 µg/ml. Villalobos Delgado [77] reportó un valor del 13% de inhibición del DPPH, similar al obtenido en este estudio. Al comparar estos valores con los obtenidos para las otras plantas de estudio (toronjil, romero, ruda), son bajos y esto se debe a que en la composición química del epazote los compuestos fenólicos que son los que pueden ejercer una actividad antioxidante, están en pequeñas porciones [78]. Tomando en cuenta sólo esta concentración (100 µg/ml) para todas las corridas experimentales se observó que en todas las muestras el porcentaje disminuyó, lo cual puede atribuirse a que los diferentes compuestos que tiene el epazote se vieron afectados por las temperaturas a las que secó. En la Figura 55 se muestran los resultados de las diferentes muestras secas comparadas con la muestra fresca, únicamente para la concentración mencionada.

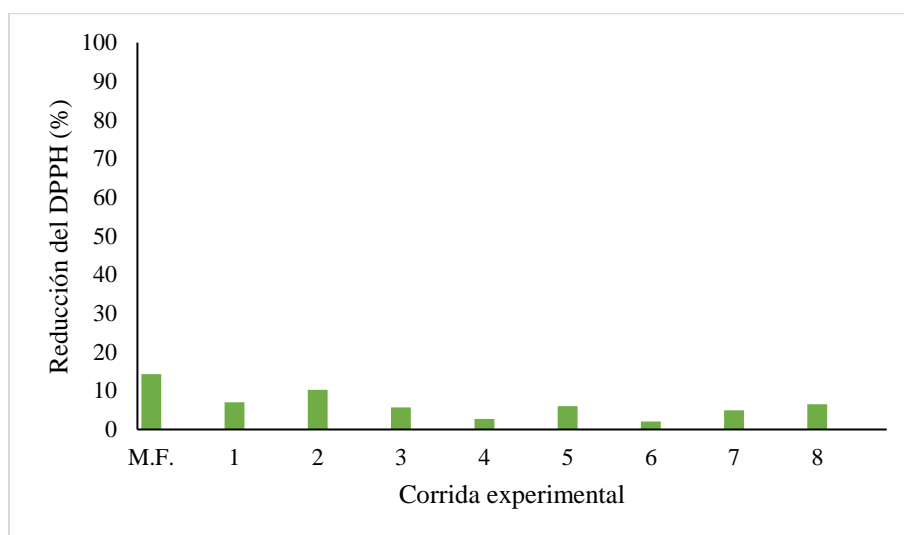


Figura 55. Actividad antioxidante en las diferentes muestras de epazote

Tabla 26. Resultados obtenidos para la actividad antioxidante del epazote

Corrida	Concentración ($\mu\text{g/ml}$)	DO 515 nm	% Reducción del DPPH
Muestra fresca	1	0.651	1.263
	10	0.643	2.577
	100	0.565	14.300
1	1	0.645	2.223
	10	0.656	0.556
	100	0.613	7.024
2	1	0.601	2.542
	10	0.594	3.624
	100	0.553	10.276
3	1	0.648	0.000
	10	0.650	-0.360
	100	0.611	5.658
4	1	0.652	-3.273
	10	0.659	-4.382
	100	0.614	2.746
5	1	0.652	-0.566
	10	0.643	0.720
	100	0.609	6.019
6	1	0.660	-4.593
	10	0.652	-3.326
	100	0.618	2.059
7	1	0.666	-5.438
	10	0.655	-3.696
	100	0.600	4.963
8	1	0.663	-5.016
	10	0.662	-4.805
	100	0.590	6.494

DO= Densidad óptica

Análisis de Varianza

Se realizó en análisis estadístico y los resultados se muestran en la Tabla 27. Se observa que en los factores puros el único que tuvo efecto significativo sobre la variable de respuesta ($p < 0.05$), fue el ventilador (X_2). Mientras que para las interacciones la única que tuvo efecto significativo fue entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3).

Tabla 27. Análisis de varianza para la actividad antioxidante del epazote

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	94.500	15.7500	4.96	0.004
Lineal	3	39.000	13.0000	4.09	0.023
X ₁ : Malla sombra	1	1.500	1.5000	0.47	0.501
X ₂ : Ventilador	1	24.000	24.0000	7.56	0.014*
X ₃ : Tipo de cubierta colector	1	13.500	13.5000	4.25	0.055
Interacciones de 2 términos	3	55.500	18.5000	5.82	0.006
X ₁ *X ₂	1	0.000	0.0000	0.00	1.000
X ₁ *X ₃	1	1.500	1.5000	0.47	0.501
X ₂ *X ₃	1	54.000	54.0000	17.00	0.001*
Error	17	54.000	3.1765		
Falta de ajuste	1	54.000	54.0000		
Error puro	16	0.000	0.0000		
Total	23	148.500			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha= 0.05$

En la Figura 56 se muestra la gráfica de efectos principales, donde se observaron los niveles en que estaban los factores cuando se obtuvo una actividad antioxidante alta. Para el caso del ventilador (X₂), como fue el único que tuvo significancia en el análisis de varianza, fue el que presentó una pendiente más pronunciada y se observó que para tener una actividad antioxidante más alta no debe usarse. Sin embargo, a pesar de que los otros factores no resultaron significativos en el análisis también se vio cual nivel fue mejor; para la malla sombra resultó mejor no usar (nivel bajo) y para el tipo de cubierta del colector, fue mejor usar el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo).

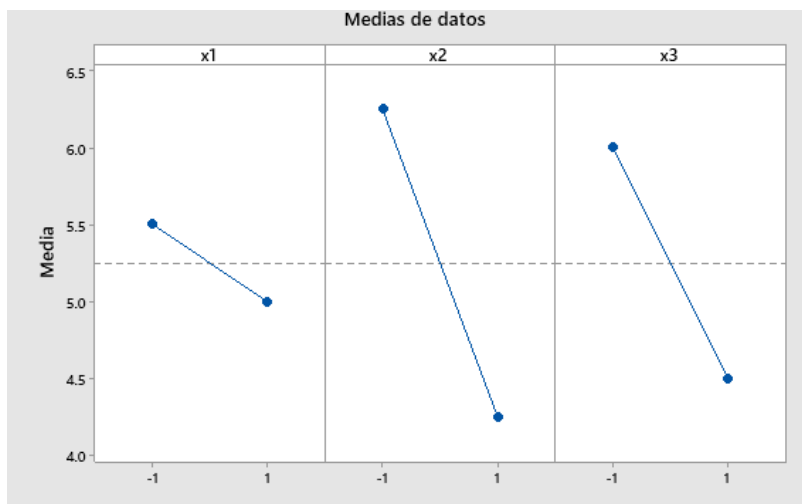


Figura 56. Gráfica de efectos principales para la actividad antioxidante del epazote

También se realizó la gráfica de interacción (Figura 57), donde se observa que para la interacción entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3) como tuvo un efecto significativo sobre la variable de respuesta, las líneas se cruzan. Cuando no se usó el ventilador (nivel bajo) y se usó el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo) se vio favorecida la actividad antioxidante.

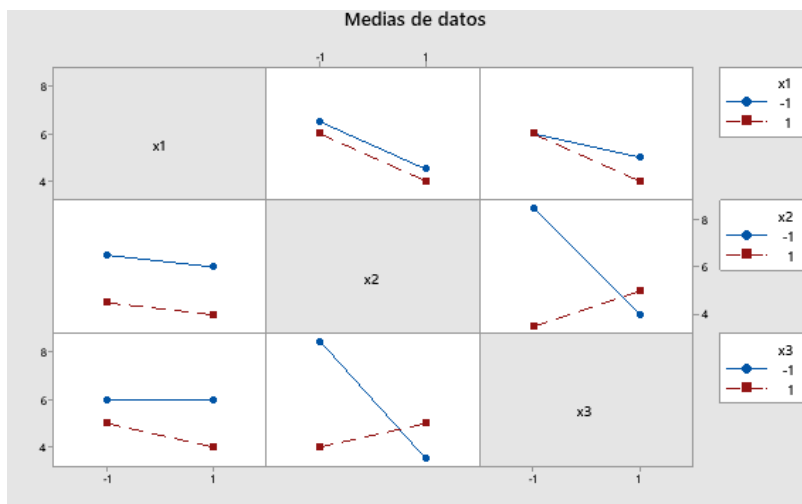


Figura 57. Gráfica de interacción para la actividad antioxidante del epazote

Finalmente, en la Figura 58 se muestra la gráfica de superficie de respuesta, donde se observa que si se usa el colector con cubierta de policarbonato la actividad antioxidante es más alta, en cambio sí se usa el colector con cubierta de vidrio, esta disminuye.

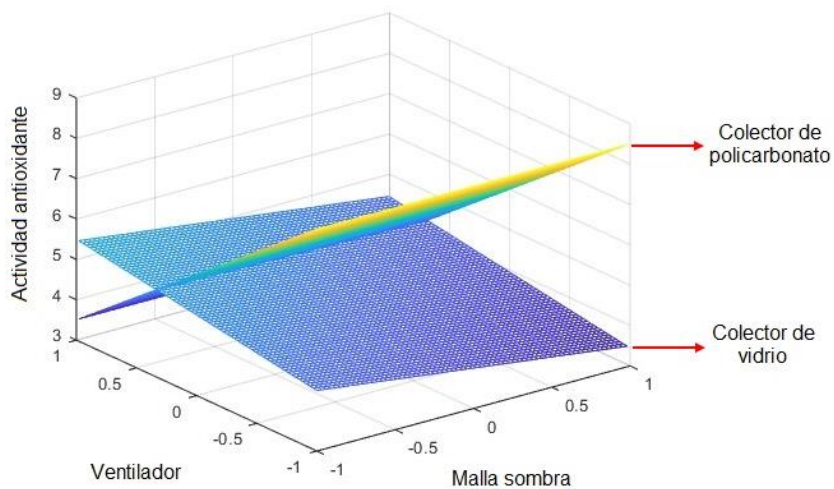


Figura 58. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad antioxidante del epazote

Ruda

Cinéticas de secado

En la Figura 59 se muestran las cinéticas de secado obtenidas para la ruda, se puede observar que el experimento 3 fue el que registró 3.5 horas, siendo el más corto. Para ello se utilizó el colector con cubierta de policarbonato, el ventilador y sin malla sombra. Mientras que el experimento 7 fue el más largo con 7 horas, utilizando el colector con cubierta de vidrio, el ventilador y la malla sombra. Lagunes [79] reportó tiempos de secado de 1 hora al utilizar un deshidratador solar tipo gabinete, cabe mencionar que el contenido de humedad inicial en la planta era menor al reportado en este trabajo, además de que las temperaturas alcanzadas dentro del secador fueron de 75°C, superiores a las que se registraron en este estudio.

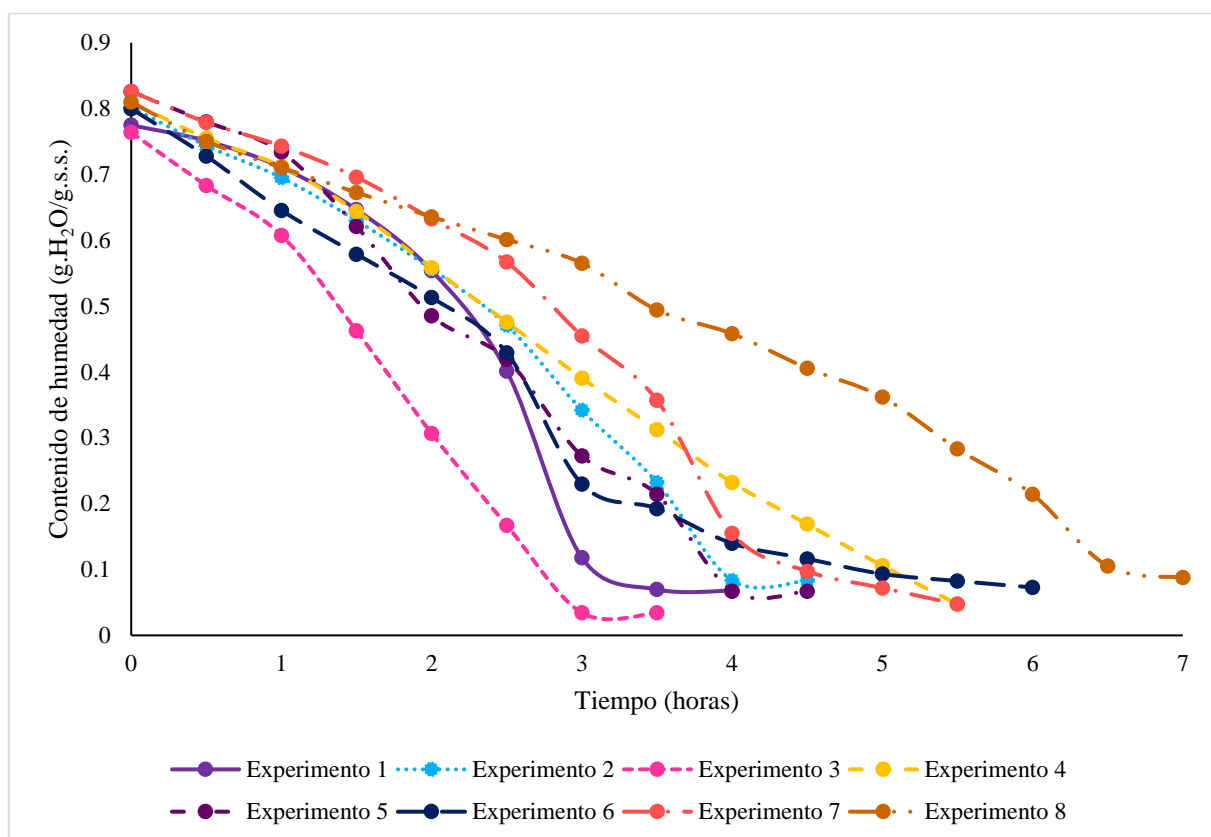


Figura 59. Cinéticas de secado obtenidas para la ruda

Resultados de las variables de respuesta

En la Tabla 28 se muestran los resultados obtenidos para las diferentes variables de respuesta en las corridas experimentales. Se reportan los tiempos de secado, el contenido de humedad final (%), la actividad de agua final y el color (L, a, b y ΔE).

Tabla 28. Resultados obtenidos para las variables de respuesta en la ruda

Factores				Variables de respuesta						
Corridas	X ₁	X ₂	X ₃	Tiempo de secado (horas)	Humedad final (%)	Actividad de agua final	Parámetros de color			
							L	a	b	ΔE
1	-1	-1	-1	4	6.8	0.517	23.94	-4.58	13.14	11.72
2	+1	-1	-1	4.5	8.3	0.443	30.17	-6.53	18.79	10.9
3	-1	+1	-1	3.5	3.4	0.375	26.19	-5.59	16.64	8.96
4	+1	+1	-1	5.5	4.7	0.498	34.73	-5.72	21.23	13.35
5	-1	-1	+1	4.5	6.7	0.471	25.86	-5.91	16.05	11.15
6	+1	-1	+1	6	7.2	0.490	31.61	-6.24	17.4	4.46
7	-1	+1	+1	5.5	4.7	0.492	45.65	-9.19	24.5	12.06
8	+1	+1	+1	7	8.7	0.393	33.08	-4.17	16.31	5.6

L (Luminosidad), a (Verde-Rojo), b (Amarillo-Azul), ΔE (Diferencia de color), X₁=Malla sombra, X₂= Ventilador, X₃= Tipo de colector

Contenido de humedad final de la ruda

La muestra fresca de la ruda tuvo entre 76 y 82% de humedad, pero cuando se sometió al proceso de secado, se obtuvieron valores por debajo del 10%, como se muestra en la Tabla 28. En un estudio realizado por Lagunes [79] se reportó un contenido de humedad inicial de 69%, un poco menor que el reportado en este trabajo, esto puede atribuirse a la zona de donde se cultivó la planta; mientras que el contenido de humedad final fue del 4%.

Análisis de Varianza

Los datos se sometieron a un análisis de varianza para poder ver qué factores tenían un efecto significativo sobre el contenido de humedad. En la Tabla 29 se muestran los resultados, donde se observa que los tres factores puros (malla sombra, ventilador y tipo de cubierta del colector) tuvieron un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la variable de respuesta; mientras que para el caso de las interacciones las que tuvieron un efecto significativo fueron 2, la primera fue entre la malla sombra (X₁) y el ventilador (X₂), y la segunda entre el ventilador (X₂) y el tipo de cubierta del colector (X₃).

Tabla 29. Análisis de varianza de la humedad final de la ruda

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	68.3925	11.3987	37.75	0.000
Lineal	3	47.3813	15.7938	52.30	0.000
X ₁ : Malla sombra	1	19.9838	19.9838	66.17	0.000*
X ₂ : Ventilador	1	21.0938	21.0938	69.85	0.000*
X ₃ : Tipo de cubierta colector	1	6.3037	6.3037	20.87	0.000*
Interacciones de 2 términos	3	21.0112	7.0037	23.19	0.000
X ₁ *X ₂	1	4.0837	4.0837	13.52	0.002*
X ₁ *X ₃	1	1.0837	1.0837	3.59	0.075
X ₂ *X ₃	1	15.8437	15.8437	52.47	0.000*
Error	17	5.1337	0.3020		
Falta de ajuste	1	5.1337	5.1337		
Error puro	16	0.0000	0.0000		
Total	23	73.5262			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha=0.05$

En la Figura 60 se muestra la gráfica de efectos principales, donde se observan los factores puros, malla sombra (X₁), ventilador (X₂) y tipo de cubierta del colector (X₃). De acuerdo con esto, el contenido de humedad se vio favorecido cuando no se usó la malla sombra (nivel bajo), se usó el ventilador (nivel alto) y el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo).

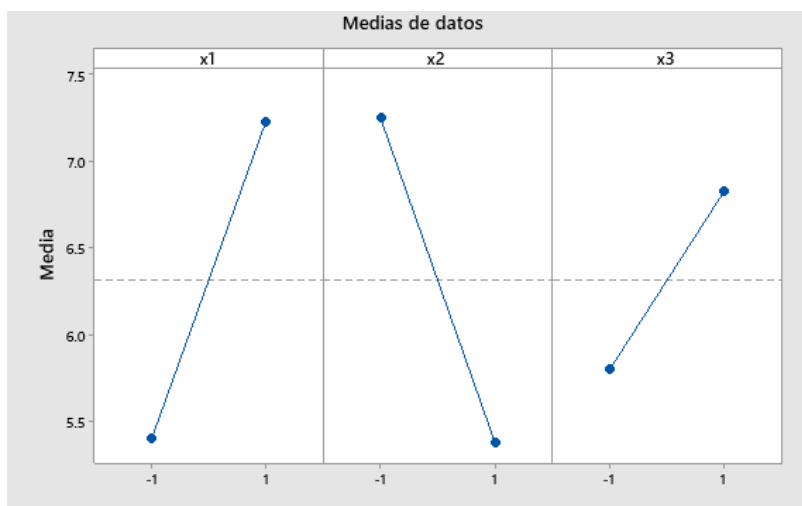


Figura 60. Gráfica de efectos principales para la humedad final de la ruda

Con ayuda de la gráfica de interacción (Figura 61) se analizaron las condiciones a las que la ruda obtuvo un contenido de humedad bajo. Para la primera interacción que fue entre la malla sombra (X₁) y el ventilador (X₂), fue mejor no usar la malla sombra (nivel bajo), pero si el ventilador (nivel alto). Mientras que para la segunda interacción que fue entre el ventilador (X₂) y el tipo de cubierta del colector (X₃), la humedad final se vio favorecida cuando se usó el ventilador (nivel alto) y el colector con cubierta de policarbonato (nivel alto).

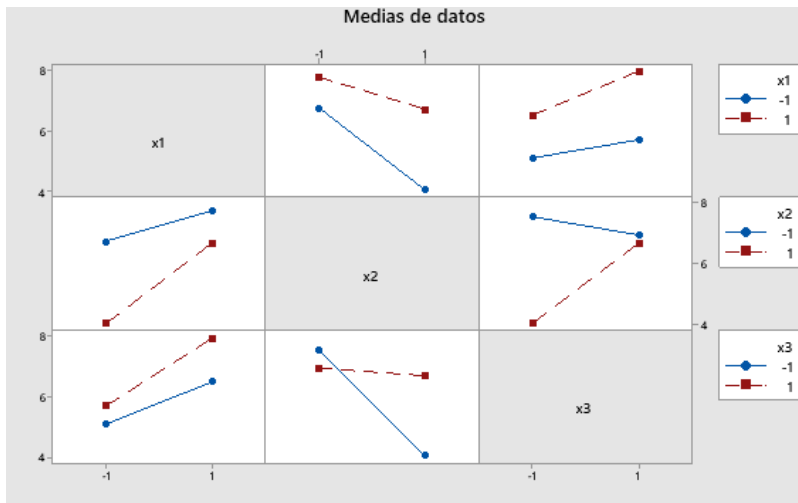


Figura 61. Gráfica de interacción para la humedad final de la ruda

En la Figura 62 se muestra la gráfica de superficie de respuesta donde se observa que cuando se utilizó el colector con cubierta de vidrio el contenido de humedad fue más alto, en cambio los contenidos de humedad más bajos se obtuvieron cuando se usó el colector con cubierta de policarbonato. Esto se debe a que bajo estas condiciones las temperaturas dentro de la cámara de secado fueron altas, lo cual favoreció la pérdida de humedad de la ruda.

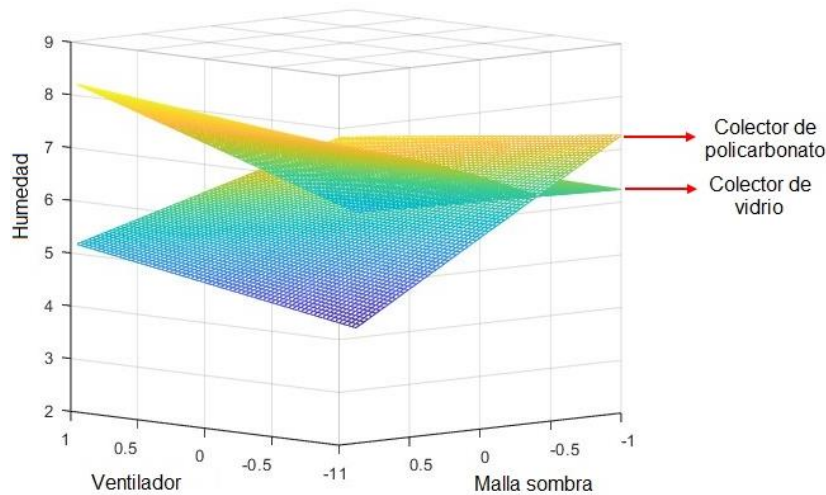


Figura 62. Gráfica de superficie de respuesta para la humedad final de la ruda

Actividad de agua final de la ruda

La muestra fresca de ruda tuvo un valor de actividad de agua de 0.95, sin embargo, después del proceso de secado se registraron valores por debajo del 0.6, como se observa en la Tabla 28, lo cual garantiza que se conservará por más tiempo ya que se inhibe el crecimiento de los microorganismos a esos valores de actividad de agua.

Análisis de Varianza

Se realizó el análisis de varianza y los resultados se muestran en la Tabla 30. Se observó que ningún factor e interacción tuvo un efecto significativo sobre la variable de respuesta.

Tabla 30. Análisis de varianza de la actividad de agua final de la ruda

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	0.018948	0.003158	0.98	0.470
Lineal	3	0.010342	0.003447	1.07	0.389
X ₁ : Malla sombra	1	0.000353	0.000353	0.11	0.745
X ₂ : Ventilador	1	0.009923	0.009923	3.07	0.098
X ₃ : Tipo de cubierta colector	1	0.000067	0.000067	0.02	0.887
Interacciones de 2 términos	3	0.008606	0.002869	0.89	0.467
X ₁ *X ₂	1	0.002360	0.002360	0.73	0.405
X ₁ *X ₃	1	0.006208	0.006208	1.92	0.184
X ₂ *X ₃	1	0.000038	0.000038	0.01	0.915
Error	17	0.054906	0.003230		
Falta de ajuste	1	0.037131	0.037131	33.42	0.000
Error puro	16	0.017775	0.001111		
Total	23	0.073854			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha=0.05$

A pesar de que ningún factor tuvo efecto significativo, se realizó la gráfica de efectos principales (Figura 63), en donde se observó que bajo ciertas condiciones se favoreció la actividad de agua final. De acuerdo con lo observado en la gráfica, las mejores condiciones fueron con malla sombra (nivel alto), con ventilador (nivel alto) y colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo), de esta forma la actividad de agua fue menor.

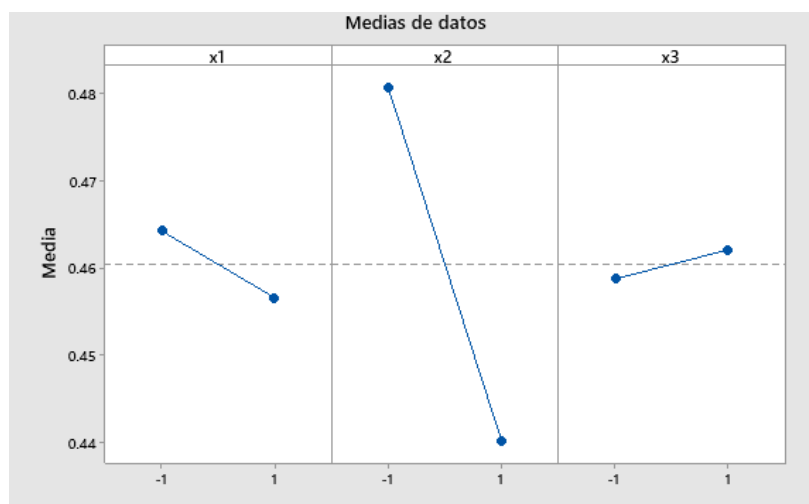


Figura 63. Gráfica de efectos principales para la actividad de agua final de la ruda

También se realizó la gráfica de interacción (Figura 64), donde se puede observar que, a pesar de no haber efecto significativo, ciertas condiciones fueron mejores para obtener una actividad de agua baja. Para la primera interacción entre la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2), usando o no la malla sombra los valores que se obtuvieron fueron muy parecidos, esto usando el ventilador (nivel alto). Para la segunda interacción que fue entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), se tuvieron dos valores iguales a diferentes condiciones, fue sin malla sombra (nivel bajo) y con el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo), y con malla sombra (nivel alto) y el colector con cubierta de vidrio (nivel alto). Y para la última interacción, que fue entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), no importó el tipo de colector, en ambos se obtuvieron valores de actividad de agua bajos, pero usando el ventilador (nivel alto).

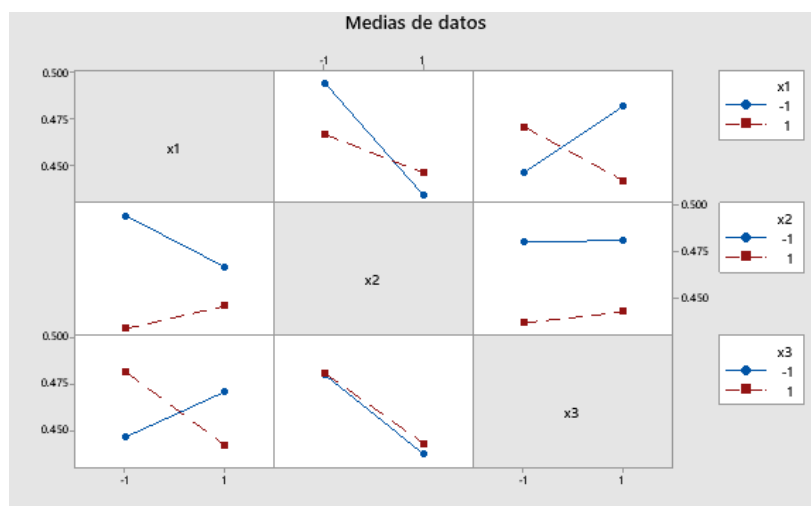


Figura 64. Gráfica de interacción para la actividad de agua final de la ruda

En la gráfica de superficie de respuesta (Figura 65) se observa lo descrito anteriormente, ya que con cualquiera de los dos colectores se pueden obtener valores bajos de actividad de agua.

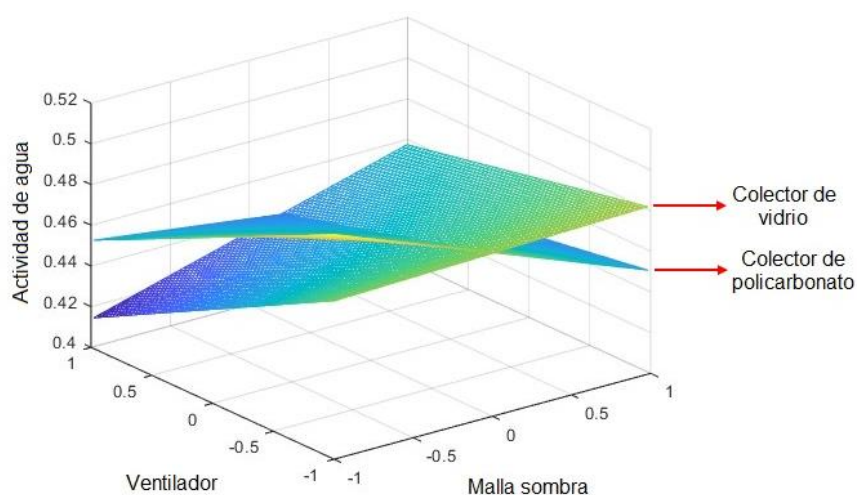


Figura 65. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad de agua final de la ruda

Diferencia de color de la ruda (ΔE)

Durante el proceso de secado el color es uno de los parámetros de calidad más importantes, puede considerarse un indicador de la degradación del pigmento de compuestos importantes por reacciones enzimáticas y no enzimáticas [80]. Por ello después del secado se midió el color de las muestras, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 28. De acuerdo con estos datos la mayoría de las muestras presentó una diferencia de color baja, sin embargo, cuatro de ellas tuvieron la menor diferencia de color, que son las de las corridas 2, 3, 6 y 8. En la Figura 66 se observa de una mejor forma esto, ya que se compararon las muestras secas con la muestra fresca, y se notó que las muestras no presentaron tanto cambio en su color final. De acuerdo con Tarasevičienė [81] el color de las plantas depende de la cantidad de pigmentos, su descomposición y el oscurecimiento enzimático en curso. En general, las altas temperaturas y la larga duración del secado provocan daños en el color [70], sin embargo, para la ruda los tiempos de secado fueron cortos y las temperaturas dentro de la cámara no estuvieron por arriba de los 60°C, por ello el color no cambió tanto en la muestra seca.

Análisis de Varianza

Con los datos obtenidos se realizó el análisis estadístico, los resultados se muestran en la Tabla 31, donde los tres factores puros tuvieron un valor de p menor a 0.05, por lo tanto, si tuvieron un efecto significativo sobre la diferencia de color. Mientras que para las interacciones sólo una tuvo efecto significativo ($p < 0.05$) que fue entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3).

Tabla 31. Análisis de varianza para la diferencia de color de la ruda

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	198.952	33.159	41.06	0.000
Lineal	3	56.556	18.852	23.35	0.000
X_1 : Malla sombra	1	18.533	18.533	22.95	0.000*
X_2 : Ventilador	1	6.902	6.902	8.55	0.009*
X_3 : Tipo de cubierta colector	1	31.122	31.122	38.54	0.000*
Interacciones de 2 términos	3	142.395	47.465	58.78	0.000
$X_1 * X_2$	1	3.132	3.132	3.88	0.065
$X_1 * X_3$	1	139.250	139.250	172.45	0.000*
$X_2 * X_3$	1	0.014	0.014	0.02	0.898
Error	17	13.727	0.807		
Falta de ajuste	1	2.214	2.214	3.08	0.099
Error puro	16	11.513	0.720		
Total	23	212.679			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Muestra fresca



Colector con cubierta de policarbonato

Sin malla sombra

Con malla sombra

Sin ventilador



Con ventilador



Colector con cubierta de vidrio

Sin malla sombra

Con malla sombra

Sin ventilador



Con ventilador



Figura 66. Muestras de ruda secas comparadas con la muestra fresca

La gráfica de efectos principales (Figura 67) muestra los factores puros (malla sombra, ventilador y tipo de cubierta del colector) en sus dos niveles. En ella se observaron cuáles fueron las mejores condiciones para obtener una diferencia de color baja, en este caso fueron cuando se usó malla sombra (nivel alto), sin ventilador (nivel bajo) y el colector con cubierta de vidrio (nivel alto).

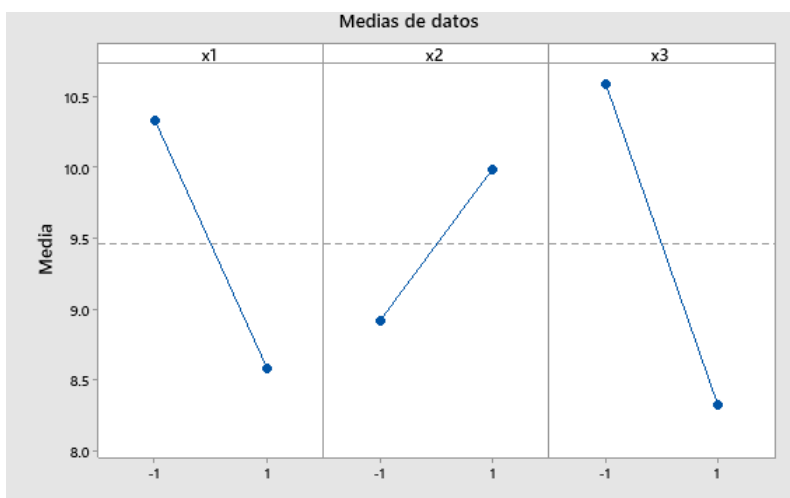


Figura 67. Gráfica de efectos principales para la diferencia de color de la ruda

Analizando la gráfica de interacción (Figura 68), se observó que para la primera interacción que fue entre la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2), no importó el uso del ventilador, ya que la diferencia de color fue baja en ambos, pero sí el uso de la malla sombra, ya que al usarse (nivel alto) se favoreció la conservación del color. Para la segunda interacción entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), lo mejor fue usar la malla sombra (nivel alto) y el colector con cubierta de vidrio (nivel alto), de esta forma se obtuvo una diferencia de color baja. Y para la última interacción entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), no importó el uso del ventilador, la diferencia de color fue baja, pero usando el colector con cubierta de vidrio (nivel alto).

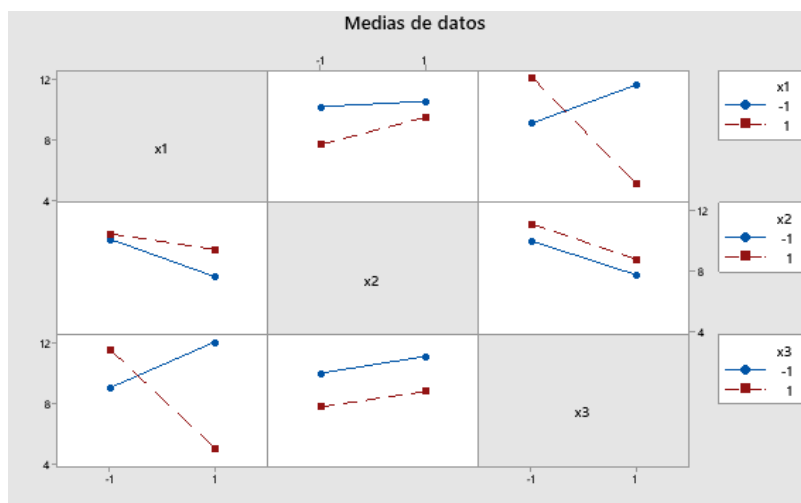


Figura 68. Gráfica de interacción para la diferencia de color de la ruda

Y finalmente en la gráfica de superficie de respuesta (Figura 69) se observa mejor lo descrito anteriormente, ya que usando el colector con cubierta de policarbonato la diferencia de color fue más alta, pero cuando se usó el colector con cubierta de vidrio la diferencia de color disminuyó, siempre usando la malla sombra. Este comportamiento se debe a que cuando se usó la malla sombra las temperaturas fueron más altas, y como menciona Orphanides [70] los cambios en el color se ven favorecidos por temperaturas altas y tiempos de secado largos.

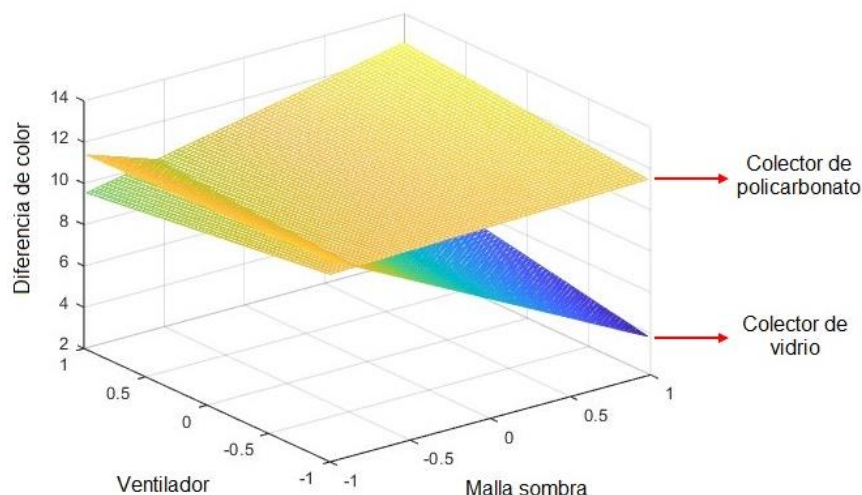


Figura 69. Gráfica de superficie de respuesta para la diferencia de color de la ruda

Actividad antioxidante de la ruda

En la Tabla 32 se muestran los resultados obtenidos para la actividad antioxidante a diferentes concentraciones. Para la muestra fresca el porcentaje más alto de reducción del DPPH fue del 51% cuando se tuvo una concentración de 100 $\mu\text{g/ml}$. En un estudio realizado por Diwan [82] sobre la composición fitoquímica y potencial antioxidante de líneas de cultivo *In vitro* de la ruda, se reportaron valores entre 86.4% y 89.1 % de reducción del DPPH al analizar los brotes de un cultivo *In vitro*, pero para el caso de las raíces y brotes se obtuvieron valores entre 50% y 64%, similares a los reportados en este estudio, pero en nuestro caso se utilizaron únicamente las hojas. Mientras que Castro [83] reportó una actividad antioxidante del 55%, la cual atribuye a que no hay presencia de compuestos terpénicos, sesquiterpénicos y aromáticos, obteniéndose así una actividad relativamente baja.

Para el análisis posterior se tomó en cuenta únicamente el porcentaje a la concentración más alta. En la Figura 70 se muestran los resultados de las diferentes muestras secas comparadas con la muestra fresca y en ella se observa que la actividad antioxidante disminuyó en la mayoría, excepto en las corridas experimentales 3 y 4.

Tabla 32. Resultados obtenidos para la actividad antioxidante de la ruda

Corrida	Concentración (µg/ml)	DO 515 nm	% Reducción del DPPH
Muestra fresca	1	0.642	2.729
	10	0.611	7.327
	100	0.318	51.743
1	1	0.644	2.324
	10	0.603	8.641
	100	0.460	30.268
2	1	0.642	2.678
	10	0.637	3.436
	100	0.459	30.369
3	1	0.665	2.921
	10	0.663	3.165
	100	0.328	52.093
4	1	0.676	1.315
	10	0.645	5.842
	100	0.318	53.554
5	1	0.665	3.437
	10	0.646	6.196
	100	0.492	28.509
6	1	0.662	3.921
	10	0.645	6.389
	100	0.442	35.770
7	1	0.659	4.356
	10	0.644	6.438
	100	0.456	33.833
8	1	0.657	4.550
	10	0.642	6.728
	100	0.473	31.268

DO= Densidad óptica

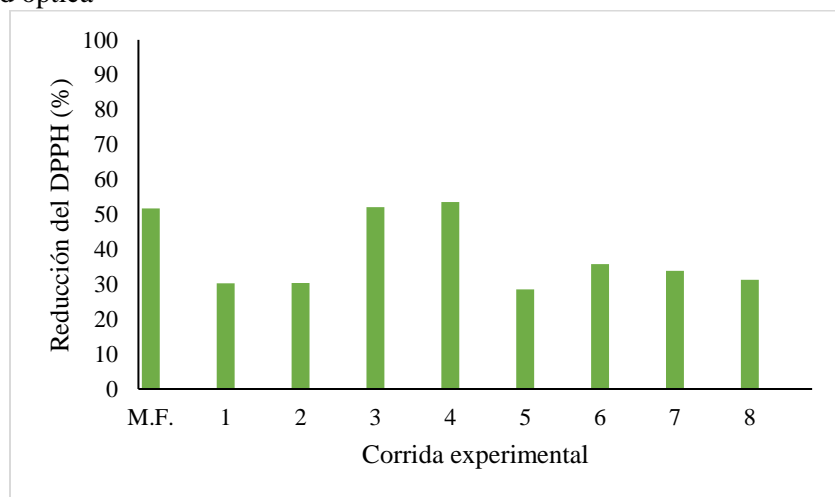


Figura 70. Actividad antioxidante en las diferentes muestras de ruda

Análisis de Varianza

Con los datos mencionados anteriormente se realizó el análisis estadístico, los resultados se muestran en la Tabla 33. Se observó que para el caso de los factores puros todos tuvieron un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la actividad antioxidante. Mientras que, para las interacciones, solo dos de ellas tuvieron efecto significativo, que fueron entre la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2), y entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3).

Tabla 33. Análisis de varianza para la actividad antioxidante de la ruda

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	2104.50	350.750	159.01	0.000
Lineal	3	1348.50	449.500	203.77	0.000
X_1 : Malla sombra	1	13.50	13.500	6.12	0.024*
X_2 : Ventilador	1	793.50	793.500	359.72	0.000*
X_3 : Tipo de cubierta colector	1	541.50	541.500	245.48	0.000*
Interacciones de 2 términos	3	756.00	252.000	114.24	0.000
$X_1 * X_2$	1	24.00	24.000	10.88	0.004*
$X_1 * X_3$	1	6.00	6.000	2.72	0.117
$X_2 * X_3$	1	726.00	726.000	329.12	0.000*
Error	17	37.50	2.206		
Falta de ajuste	1	37.50	37.500		
Error puro	16	0.00	0.000		
Total	23	2142.00			

GL= grados de libertad, SC= suma de cuadrados, MC= Media de cuadrados, *Significativamente diferente con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Analizando la gráfica de efectos principales (Figura 71) se pudo observar que se obtuvo una actividad antioxidante alta cuando se usó la malla sombra (nivel alto), el ventilador (nivel alto) y el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo).

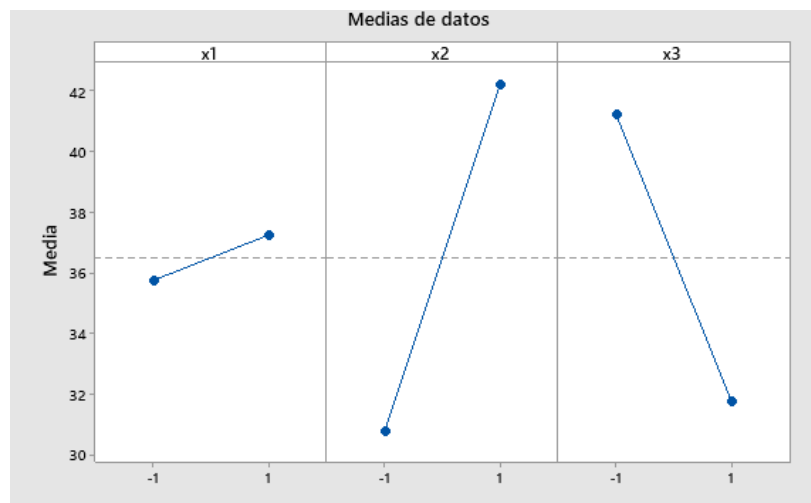


Figura 71. Gráfica de efectos principales para la actividad antioxidante de la ruda

Se realizó la gráfica de interacción (Figura 72), donde se observó que para la primera interacción entre la malla sombra (X_1) y el ventilador (X_2), al usar el ventilador (nivel alto) se obtuvieron resultados muy parecidos, ocupando o no la malla sombra. Para la segunda interacción entre la malla sombra (X_1) y el tipo de cubierta del colector (X_3), sucedió algo similar, usando o no la malla sombra el resultado fue muy parecido, pero usando el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo). Finalmente, para la tercera interacción entre el ventilador (X_2) y el tipo de cubierta del colector (X_3), lo mejor fue usar el ventilador (nivel alto) y el colector con cubierta de policarbonato (nivel bajo).

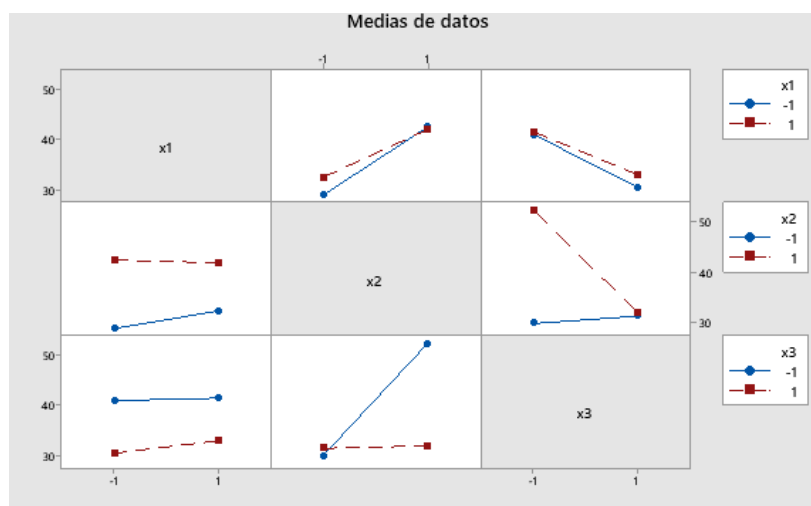


Figura 72. Gráfica de interacción para la actividad antioxidante de la ruda

En la Figura 73 se muestra la gráfica de superficie de respuesta donde se observó que, al utilizar el colector con cubierta de policarbonato, el ventilador (nivel alto) y la malla sombra (nivel alto) se obtuvo una actividad antioxidante alta. Mientras que, al utilizar el colector con cubierta de vidrio bajo las diferentes condiciones, la actividad antioxidante se vio más afectada durante el proceso de secado. Este comportamiento puede atribuirse a que cuando se usó el colector con cubierta de policarbonato bajo las condiciones antes mencionadas, la temperatura dentro del secador no fue tan alta y el tiempo de secado fue menor.

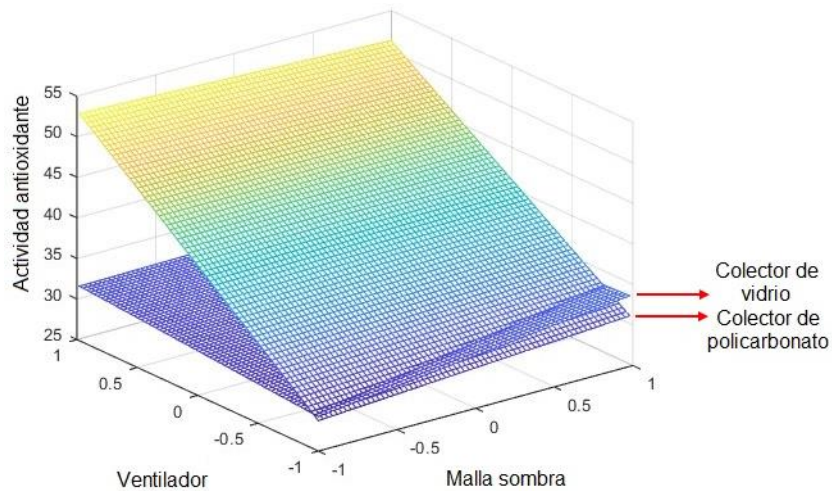


Figura 73. Gráfica de superficie de respuesta para la actividad antioxidante de la ruda

Datos ambientales

El secado solar es un proceso en el cual no se puede controlar la temperatura, por lo que debe hacerse un registro de esta dentro de la cámara de secado, para que se pueda conocer a que temperaturas estuvo expuesto el alimento. También debe registrarse la temperatura ambiente, la irradiancia solar y la humedad relativa ambiente, ya que estos datos son necesarios para poder realizar el análisis energético del sistema. En estudios sobre secado solar de alimentos como pera [65] y tomate [66], donde se realizó un análisis energético, se reportan los datos ambientales; mientras que, en estudios donde sólo se evaluó el efecto del secado solar sobre los dátiles [84] y hierbas aromáticas [12] también se reportaron dichos datos.

Para todos los días de prueba se registraron los datos de irradiancia solar, temperatura dentro del secador y temperatura ambiente, a continuación, se muestran las gráficas obtenidas de los diferentes días de experimentación. En la Figura 74 se muestran los datos ambientales registrados el día que se realizó el experimento 1, en donde se observa la irradiancia en el piranómetro inclinado (en el plano del colector) y vertical, además de la temperatura ambiente y promedio alcanzada dentro del secador. Para ese día la irradiancia máxima que se registró en el piranómetro inclinado fue 1000 W/m^2 y para el vertical fue de 582 W/m^2 , mientras que la temperatura máxima dentro del secador fue de $67 \text{ }^\circ\text{C}$. Los picos que se observan en la gráfica de la temperatura se deben a que cada media hora el secador se abría para realizar las mediciones de la pérdida de peso, por lo tanto, había una pérdida de calor en el secador.

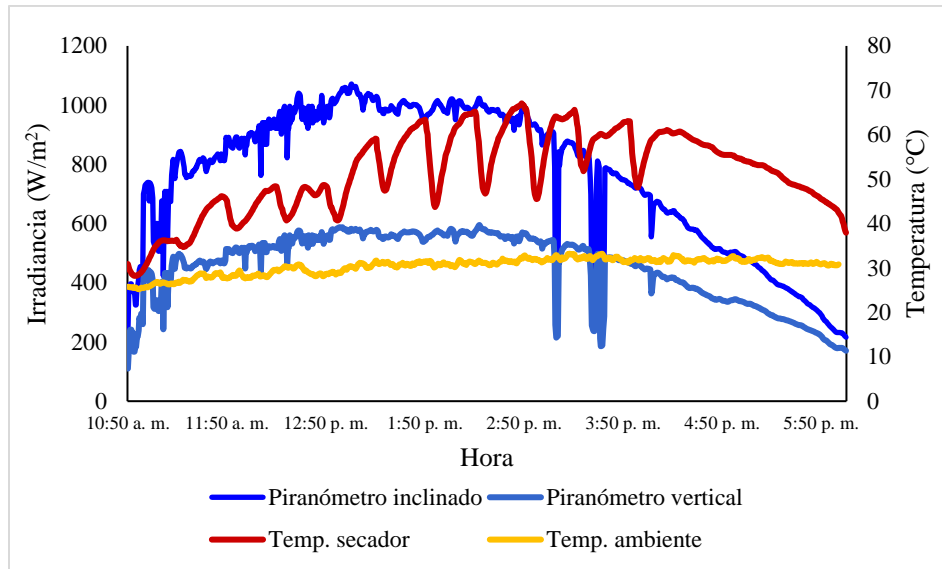


Figura 74. Datos ambientales registrados del día 25 de octubre del 2022

En la Figura 75 se muestran los datos ambientales registrados el día que se realizó el experimento 2. Este día la irradiancia máxima que se registró para el piranómetro inclinado fue de $980 W/m^2$ y para el vertical fue de $674 W/m^2$. Mientras que la temperatura máxima dentro del secador fue de $53^{\circ}C$, comparada con el experimento anterior esta disminuyó; si bien fueron en diferentes días, las condiciones también fueron diferentes ya que en este experimento se utilizó la malla sombra sobre la cámara de secado, haciendo que no pasara toda la radiación solar a la cámara, lo que a su vez provocó la disminución la temperatura dentro de esta. De igual forma se observan los picos en la temperatura, aunque son un poco menos pronunciados, esto debido a que la temperatura al ser menor no cambiaba tanto al abrir la cámara de secado.

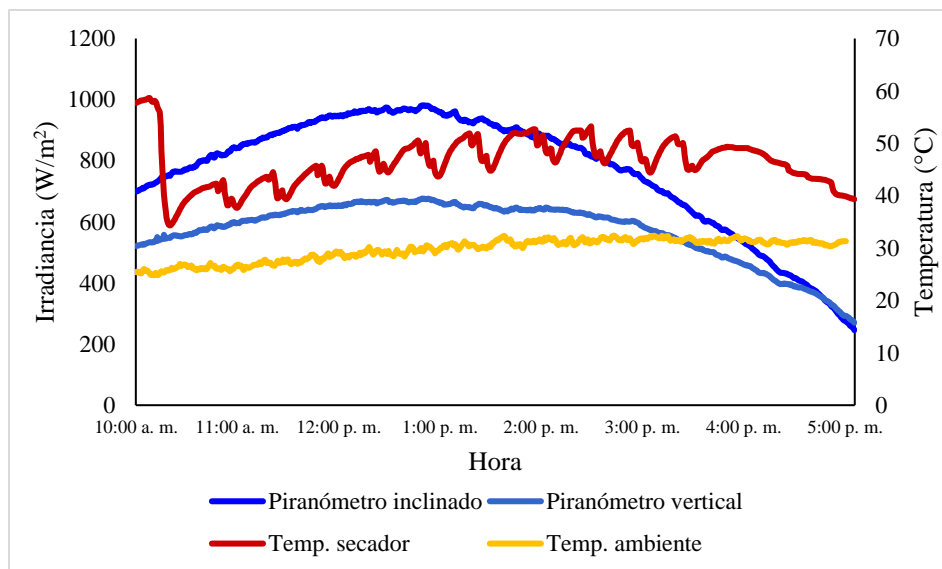


Figura 75. Datos ambientales registrados del día 16 de noviembre del 2022

Los datos ambientales registrados para el día que se realizó el experimento 3 se muestran en la Figura 76. La irradiancia máxima que se registró para el piranómetro inclinado fue de 980 W/m^2 y para el vertical fue de 662 W/m^2 . Para el caso de la temperatura dentro del secador la máxima fue de 59°C. Sin embargo, la temperatura que se alcanzó fue menor a la registrada en el experimento 1 donde tampoco se usó la malla sombra, y esto se debe a que en esta prueba se usó el ventilador, el cual hizo que la temperatura se mantuviera un poco más estable. Se observa que en esta gráfica los picos vuelven a estar más pronunciado, ya que en este experimento no se usó la malla sombra y la radiación solar entraba directamente en la cámara. Por lo tanto, al alcanzar una temperatura alta, cuando se abría la cámara de secado para pesar las muestras había una pérdida de calor significativa.

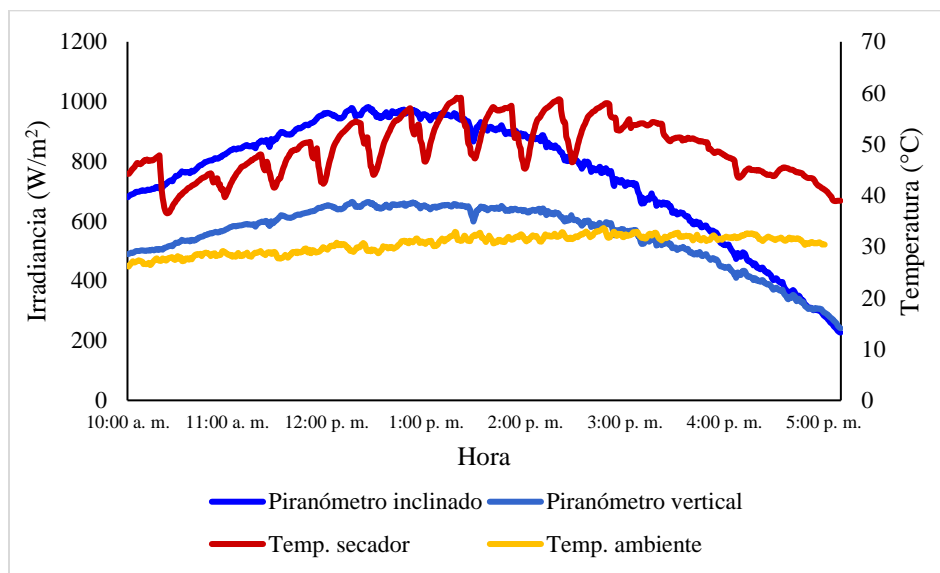


Figura 76. Datos ambientales registrados del día 14 de noviembre del 2022

En la Figura 77 se muestran los datos ambientales registrados para el día que se realizó el experimento 4. La irradiancia máxima registrada para el piranómetro inclinado fue de 943 W/m^2 y para el piranómetro vertical fue de 687 W/m^2 . Mientras que la temperatura máxima alcanzada dentro de la cámara de secado fue de 50°C. Si bien se tuvieron irradiancias altas, la temperatura máxima dentro del secador no fue tan alta comparada con las pruebas anteriores y esto se debe a que, en este experimento, al igual que el 2, se utilizó la malla sombra, impidiendo la entrada directa de la radiación solar y haciendo que no se elevara tanto la temperatura. Sin embargo, otro factor que hizo que la temperatura disminuyera un poco más fue el uso del ventilador, por eso la temperatura se mantiene un poco más estable y a pesar de que se vea la variación de la temperatura por cada vez que se abría el secador, los picos no son tan pronunciados.

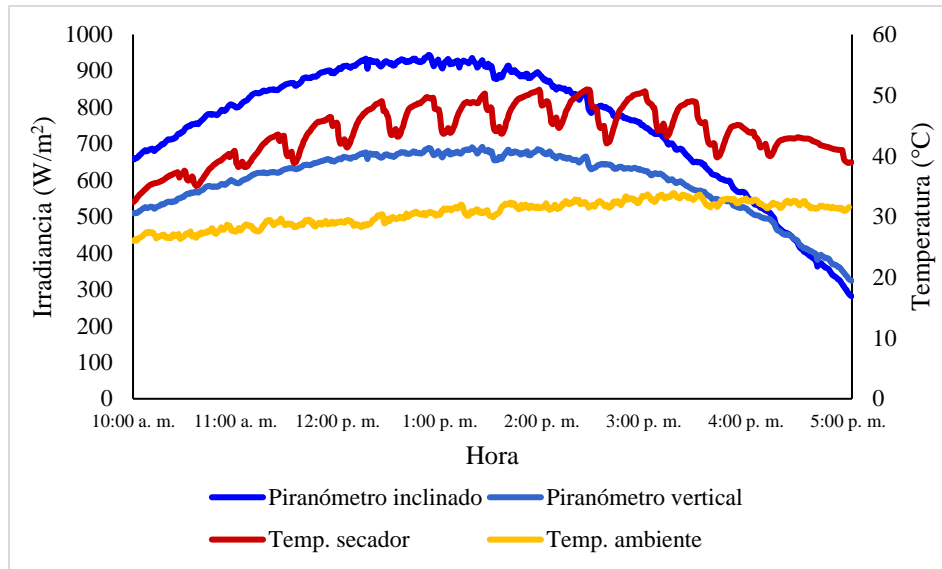


Figura 77. Datos ambientales registrados del día 25 de noviembre del 2022

En la Figura 78 se muestran los datos ambientales registrados del día que se realizó el experimento 5, donde la irradiancia máxima que se registró fue de 964 W/m^2 para el piranómetro inclinado y 634 W/m^2 para el vertical. Mientras que la temperatura máxima que se registró dentro de la cámara de secado fue de 62°C . Para este experimento como no se usó la malla sombra, la radiación solar entraba directamente a la cámara, por dicha razón la temperatura fue elevada. Como en las gráficas anteriores se observan de nuevo los picos en la temperatura, que son de cada vez que se abría el secador; sin embargo, aquí de nuevo se ven más prominentes y eso se debe a que, como se mencionó anteriormente, al no usar la malla sombra y tampoco el ventilador, la temperatura aumentó más dentro de la cámara de secado y al momento de abrirla para pesar las muestras había una gran pérdida de calor.

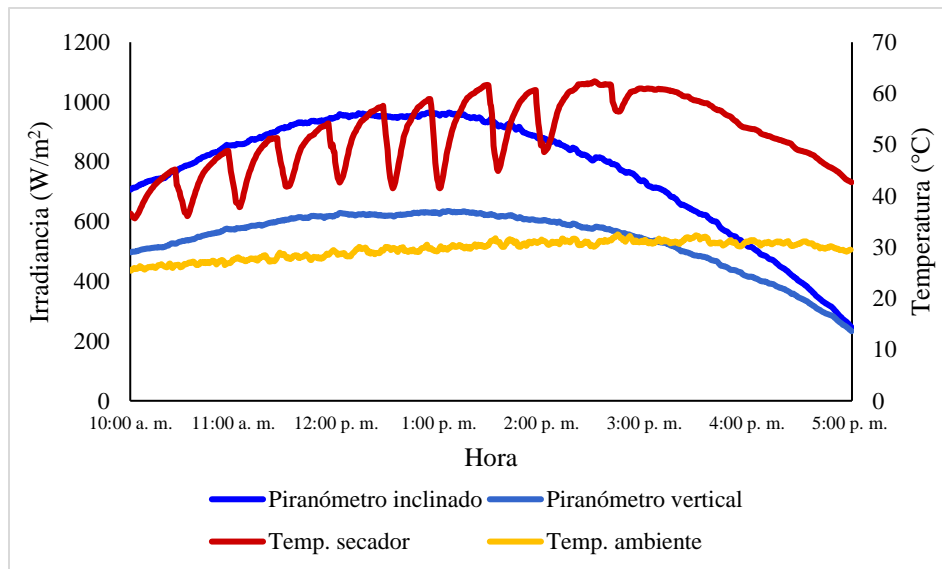


Figura 78. Datos ambientales registrados del día 08 de noviembre del 2022

Los datos ambientales obtenidos para el día que se realizó el experimento 6 se muestran en la Figura 79. La irradiancia máxima que se registró para el piranómetro inclinado fue de 973 W/m² y para el vertical fue de 697 W/m². La temperatura máxima que se registró dentro de la cámara de secado fue de 51°C. Este experimento se realizó utilizando la malla sombra, impidiendo que la radiación solar entrara directamente a la cámara, por esa razón podemos observar que las temperaturas registradas son un poco más bajas, además de que los picos son menos prominentes para este caso.

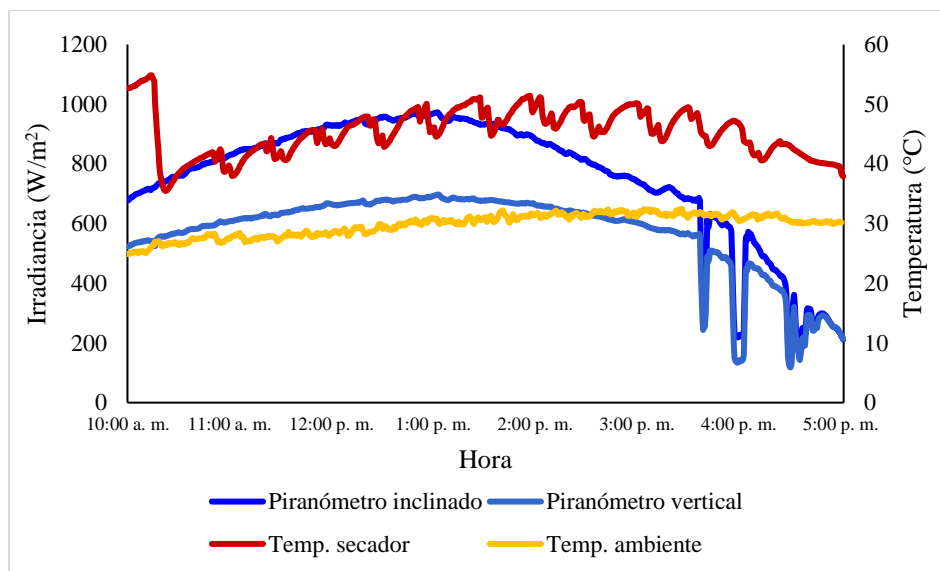


Figura 79. Datos ambientales registrados del día 22 de noviembre del 2022

En la Figura 80 se muestran los datos ambientales obtenidos para el día que se realizó el experimento 7, donde la irradiancia máxima que se registró para el piranómetro inclinado fue de 974 W/m² y para el vertical fue de 643 W/m². Mientras que la temperatura máxima registrada dentro de la cámara de secado fue de 52°C. Para este experimento no se usó la malla sombra, dejando entrar directamente la radiación solar sobre la cámara, por ello la temperatura fue un poco más elevada. Sin embargo, se nota que los picos en la variación de la temperatura son menos prominentes, esto se debe a que se usó el ventilador y este reguló un poco la temperatura dentro de la cámara.

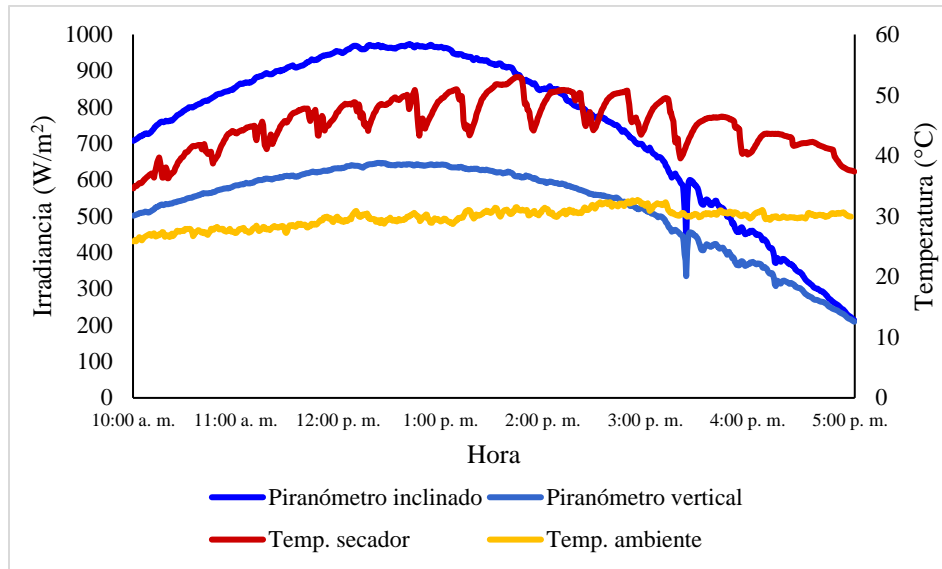


Figura 80. Datos ambientales registrados del día 10 de noviembre del 2022

Los datos ambientales registrados para el día que se realizó el experimento 8 se muestran en la Figura 81. La irradiancia máxima que se registró para el piranómetro inclinado fue de $899 W/m^2$ y para el vertical fue de $685 W/m^2$, este día fue cuando se registró la menor irradiancia comparada con los días anteriores. La temperatura máxima registrada dentro de la cámara de secado fue de $45^{\circ}C$. Para este experimento se usó la malla sombra sobre la cámara de secado, impidiendo el paso directo de la radiación solar, lo que a su vez hizo que no se alcanzaran mayores temperaturas dentro de esta; además se usó el ventilador el cual reguló la temperatura y por esa razón los picos de la variación de la temperatura son menos prominentes.

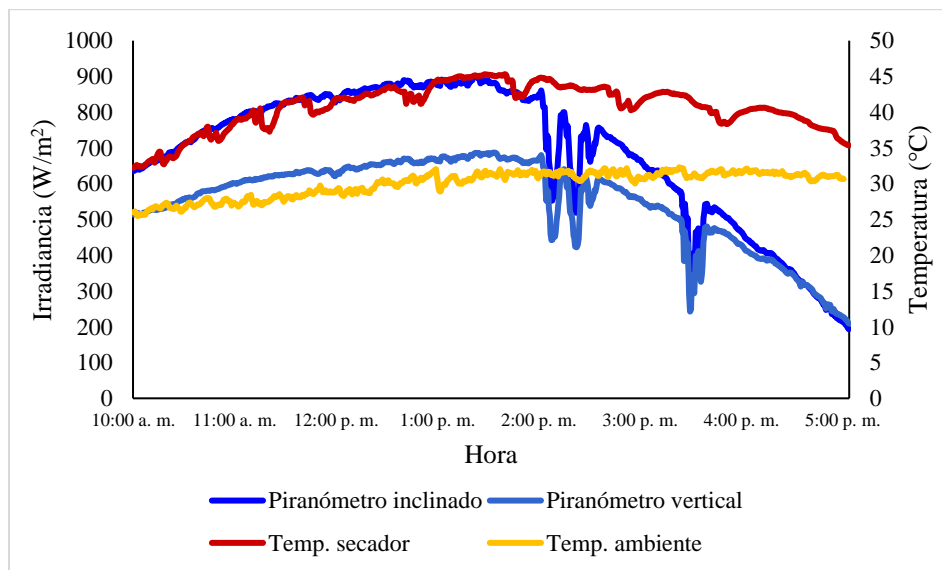


Figura 81. Datos ambientales registrados del día 30 de noviembre del 2022

En la Tabla 34 se muestra el valor promedio de las condiciones ambientales de los días en que se realizaron las corridas experimentales, así como el valor de insolación. Se observó que los valores de las irradiancias fueron muy parecidos para todos los días de prueba, por lo tanto, la energía que recibió el secador fue similar para todos los casos. En esta tabla se notó la influencia de la malla sombra y el ventilador sobre la temperatura dentro de la cámara de secado, ya que la temperatura más alta se registró cuando no se usó malla sombra ni ventilador. Mientras que cuando se usó la malla sombra y el ventilador la temperatura disminuyó.

Tabla 34. Condiciones ambientales promedio de los días de prueba

Corrida	Irradiancia promedio plano inclinado (W/m ²)	Irradiancia promedio plano vertical (W/m ²)	Insolación (MJ)	Humedad relativa ambiente promedio (%)	Temperatura ambiente promedio (°C)	Temperatura promedio en el secador (°C)
1	880	508	2164	57	30	50
2	851	616	2133	39	30	46
3	882	615	2203	48	30	49
4	815	625	2055	47	30	44
5	861	680	2144	41	28	48
6	812	607	2042	37	30	45
7	851	585	2123	44	29	46
8	708	564	1793	45	29	40

Eficiencia

La eficiencia del secador indica su rendimiento térmico, este relaciona la cantidad de energía necesaria para eliminar la humedad de los alimentos y la energía suministrada en el proceso. En los experimentos se utilizaron diferentes condiciones, para los casos donde no se utilizó la malla sombra la energía que se suministró al sistema fue la irradiancia en el plano del colector solar más la irradiancia en la cubierta de policarbonato de la cámara de secado, debido a la forma de la cámara se tomó en cuenta la irradiancia que entraba por la parte inclinada superior (techo) y la parte frontal vertical. Cuando se utilizó la malla sombra la energía que se suministró al sistema fue similar, sólo que para este caso como la radiación solar no incidía directamente en la cámara de secado, sólo se utilizó el 30% de la irradiancia solar del día de prueba, ya que la malla sombra era del 70%.

En la Tabla 35 se muestran los resultados de las eficiencias para las diferentes condiciones cuando se secó toronjil. En las corridas 1 a 4 donde se utilizó el colector con cubierta de policarbonato, se observó que cuando no se utilizó el ventilador la eficiencia fue baja, sin embargo, cuando se usó el ventilador esta eficiencia aumentó; mientras que en las corridas 5 a 8 donde se utilizó el colector con cubierta de vidrio, se observó el mismo comportamiento, pero las eficiencias fueron un poco más altas. En un estudio donde se comparó el rendimiento térmico entre dos colectores solares de aire para un secador solar indirecto [85], se observó

un comportamiento similar, ya que al utilizar convección forzada se alcanzó una eficiencia más alta.

Debido al aumento del flujo másico de aire y al ancho de los cilindros que constituyen el absorbente se produce una mayor transferencia de calor al aire que fluye, dando como resultado una alta eficiencia del colector. Además, la eficiencia del colector mejora al aumentar el flujo másico debido a una mejor transferencia de calor al flujo de aire.

Las eficiencias del secador para las diferentes condiciones estuvieron entre 4.78 y 6.05%, los valores más altos de la eficiencia se obtuvieron cuando se utilizó la malla sombra. Lo mismo ocurrió para los resultados de las eficiencias de secado, que estuvieron entre 14.17 y 44.23%, siendo la eficiencia más alta cuando se usó malla sombra.

Tomando en cuenta el tiempo de secado, la corrida 7 cuando no se usó la malla sombra y se usó el ventilador, fue la más eficiente ya que se secó la misma cantidad de producto en menos tiempo, sin embargo, esta fue la que tuvo una menor eficiencia de secado dado que la energía suministrada para el proceso fue mayor debido a la mayor tasa de flujo de aire, pero no se utilizó por completo.

Tabla 35. Eficiencias obtenidas para el toronjil

Corrida	Condiciones	Eficiencia (%)		
		Colector	Secador (ec. 2)	Secado (ec. 3)
1	SM-SV	4.04	4.79	17.41
2	CM-SV	3.97	6.05	44.23
3	SM-CV	17.20	4.78	18.63
4	CM-CV	18.05	5.87	23.86
5	SM-SV	4.87	4.79	16.56
6	CM-SV	5.11	5.29	35.70
7	SM-CV	24.75	4.83	14.17
8	CM-CV	21.79	5.62	18.80

SM: Sin malla, CM: Con malla, SV: Sin ventilador, CV: Con ventilador

En la Tabla 36 se muestran las eficiencias obtenidas para las diferentes condiciones a las que se secó el romero. Se observa que se repite la misma tendencia que en los resultados del toronjil, cuando no se usó la malla sombra la eficiencia del secador fue mayor y cuando se usó la malla la eficiencia fue menor. Las eficiencias para el secador se registraron entre 3.91 y 5.35%, mientras que para la eficiencia de secado se registraron valores entre 10.82 y 28.41%. Las corridas que tuvieron una eficiencia baja fueron las que registraron menor tiempo de secado.

Tabla 36. Eficiencias obtenidas para el romero

Corrida	Condiciones	Eficiencia (%)		
		Colector	Secador (ec. 2)	Secado (ec. 3)
1	SM-SV	4.04	5.15	18.72
2	CM-SV	3.97	5.42	37
3	SM-CV	17.20	5.35	20.65
4	CM-CV	18.05	4.25	17.78
5	SM-SV	4.87	4.42	15.29
6	CM-SV	5.11	4.58	28.41
7	SM-CV	24.75	3.91	10.82
8	CM-CV	21.79	4.27	14.66

SM: Sin malla, CM: Con malla, SV: Sin ventilador, CV: Con ventilador

Las eficiencias obtenidas para el epazote se muestran en la Tabla 37, se observa que de igual forma cuando no se usó la malla sombra la eficiencia fue más baja que cuando se hizo uso de esta. Las eficiencias registradas para el secador estuvieron entre 4.71 y 7.01%. Los valores de la eficiencia de secado que se obtuvieron para las diferentes corridas estuvieron entre 12.86 y 51.14%.

Tabla 37. Eficiencias obtenidas para el epazote

Corrida	Condiciones	Eficiencia (%)		
		Colector	Secador (ec. 2)	Secado (ec. 3)
1	SM-SV	4.04	5.53	19.9
2	CM-SV	3.97	7.01	51.14
3	SM-CV	17.20	6.25	24.13
4	CM-CV	18.05	6.39	26.2
5	SM-SV	4.87	5.99	20.76
6	CM-SV	5.11	6.11	41.14
7	SM-CV	24.75	4.71	12.86
8	CM-CV	21.79	6.15	20.99

SM: Sin malla, CM: Con malla, SV: Sin ventilador, CV: Con ventilador

En la Tabla 38 se muestran las eficiencias obtenidas para las diferentes condiciones cuando se secó la ruda. Al igual que en las plantas anteriores, se repite la tendencia en los resultados, cuando se usó malla sombra la eficiencia fue más alta que cuando no se hizo uso de la malla. Los resultados que se reportan en la tabla para la eficiencia del secador se encuentran entre 4.67 y 6.75%. Para el caso de la eficiencia de secado los valores se encuentran entre 14.08 y 49.53%.

Tabla 38. Eficiencias obtenidas para la ruda

Corrida	Condiciones	Eficiencia (%)		
		Colector	Secador (ec. 2)	Secado (ec. 3)
1	SM-SV	4.04	5.73	20.59
2	CM-SV	3.97	6.75	49.53
3	SM-CV	17.20	6.42	24.51
4	CM-CV	18.05	6.51	26.58
5	SM-SV	4.87	5.59	19.40
6	CM-SV	5.11	5.77	37.16
7	SM-CV	24.75	4.67	14.08
8	CM-CV	21.79	5.51	18.84

SM: Sin malla, CM: Con malla, SV: Sin ventilador, CV: Con ventilador

Se han realizado estudios donde se evalúa la eficiencia térmica de diferentes secadores. Kaur [86] secó hojas de cilantro utilizando secadores solares domésticos con convección natural, en el cual reportó una eficiencia del 16.85% en modo indirecto y 14.60% en modo directo; mientras que Mealla Sánchez [87] cuando evaluó el comportamiento térmico de secadores solares en régimen pasivo, tuvo eficiencias de 1.8 y 18%, en el modo directo e indirecto, respectivamente. En esos estudios los secadores fueron diferentes a los que se usaron en este trabajo, sin embargo, se observó que las eficiencias obtenidas cuando se operó el secador en modo indirecto fueron más altas, teniendo un comportamiento similar con los valores reportados para el secado de las cuatro plantas aromáticas.

López Vidaña [65] realizó un análisis energético de un secador solar mixto de rodajas de pera (*Pyrus communis* L), en el cual operó el secador bajo 3 condiciones, modo mixto con convección natural, modo mixto con convección forzada y modo indirecto con convección natural. Cuando secó utilizando el modo mixto con convección natural reportó eficiencias de 6.6 y 14%, para el secador y el secado, respectivamente. Al utilizar el modo mixto con convección forzada reportó una eficiencia del 7.5% para el secador y 11.6% para el secado. Mientras que al usar el modo indirecto con convección natural las eficiencias reportadas fueron de 8.2% para el secador y 26.6% para el secado. Las condiciones utilizadas en este estudio fueron similares a las reportadas por López Vidaña [65], pero al comparar los resultados si fueron diferentes; sin embargo, se notó una tendencia similar en estos, ya que cuando se utilizó la malla sombra (condición similar al modo indirecto) la eficiencia del secador y secado fueron más altas. Las diferencias entre los valores pueden atribuirse a que fueron productos diferentes, además de la temporada en la que se realizaron los experimentos no fue la misma y por lo tanto las condiciones ambientales cambiaron, registrando temperaturas máximas superiores a los 70°C.

De acuerdo con López Vidaña [65], los valores altos de eficiencia de secado cuando se usó una cubierta en la cámara se deben a que la energía que llegó al secador fue utilizada en mayor proporción que cuando no se tenía ninguna cubierta, donde las eficiencias fueron menores ya que hay más energía disponible debido a que la radiación solar entra directamente a la cámara de secado.

Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

De acuerdo con los resultados que se obtuvieron para las distintas pruebas realizadas se puede concluir lo siguiente sobre el trabajo:

Los tiempos de secado obtenidos para las diferentes corridas experimentales fueron buenos, ya que en un día con temperaturas ambientales promedio de 30°C y humedades relativas menores a 50%, alcanzaban a secarse todas las plantas; el tiempo más largo que se registró fue de 7 horas y el más corto fue de 3.5 horas. Para las cuatro plantas los tiempos más cortos de secado se registraron para la corrida 3, cuando no se usó malla sombra, se usó el ventilador y el colector con cubierta de policarbonato; a pesar de que el tiempo de secado se vio favorecido bajo esas condiciones, no sucedió lo mismo para todas las variables de respuesta.

Para el proceso de secado del toronjil, las condiciones a las que se debe operar el secador para obtener buenos resultados en las variables de respuesta son usando el ventilador y el colector con cubierta de vidrio; sin embargo, para el caso de la malla sombra puede o no usarse, ya que cuando no se hizo uso de esta se obtuvieron los valores más bajos en la humedad (3.8%) y la actividad de agua final (0.349), en cambio cuando se utilizó la malla sombra la diferencia de color fue baja (6.01) y favoreció la actividad antioxidante (93%).

Para el caso del romero, cuando se utilizó la malla sombra y el colector con cubierta de vidrio, pero no se usó el ventilador, se obtuvieron los mejores valores para la actividad de agua (0.309) y una diferencia de color baja (12.87). Al utilizar el colector con cubierta de policarbonato y el ventilador, pero sin la malla sombra, se obtuvo la humedad más baja con 2%; mientras que al utilizar malla sombra, pero sin ventilador, se vio favorecida la actividad antioxidante, obteniéndose un 92%.

En el proceso de secado del epazote la humedad más baja fue de 4.6%, la cual se obtuvo cuando se utilizó el colector con cubierta de vidrio, sin usar el ventilador ni la malla sombra; cuando se utilizó la misma cubierta del colector, pero ahora usando el ventilador y la malla sombra, se obtuvo un valor de 0.423 para la actividad de agua, siendo este el más bajo. Para la diferencia de color, el valor más bajo que fue 4.7 se obtuvo cuando se utilizó el colector con cubierta de policarbonato, con ventilador, pero sin malla sombra; utilizando la misma cubierta del colector, pero con malla sombra y sin ventilador, se conserva la actividad antioxidante, ya que el valor más alto que fue 10% se obtuvo bajo esas condiciones.

En el secado de ruda los valores más bajos para el contenido de humedad y la actividad de agua fueron 3.4% y 0.375, respectivamente, los cuales se obtuvieron cuando se usó el colector con cubierta de policarbonato, el ventilador, pero sin la malla sombra. El uso de la malla sombra dio buenos resultados para la diferencia de color y la actividad antioxidante, pero el nivel de los otros dos factores fue distinto, ya que cuando se utilizó el colector con cubierta de vidrio, pero sin el ventilador, se obtuvo la diferencia de color más baja con 4.46; mientras que cuando se usó el colector con cubierta de policarbonato y el ventilador, la actividad antioxidante fue de 53%.

De lo mencionado anteriormente, se observó que, para el toronjil, romero y la ruda, cuando se utilizó la malla sombra se obtuvieron buenos resultados para la diferencia de color; la única hierba que presentó una diferencia de color baja cuando no se utilizó la malla sombra fue el epazote, lo cual se puede atribuir a que este valor se obtuvo cuando se registró el menor tiempo, por lo tanto, al estar menos expuesto no se vio tan afectado el color. En los resultados de la actividad antioxidante para las muestras de toronjil y romero, se notó que en todas las corridas los valores fueron altos, sin embargo, al realizar el análisis estadístico este arrojó que es mejor utilizar la malla sombra; para el epazote y la ruda los valores finales si cambiaron, pero al igual que en las otras hierbas, el resultado final se vio favorecido con el uso de la malla sombra. Por lo tanto, lo recomendable es hacer uso de la malla sombra para obtener una actividad antioxidante alta aún después del proceso de secado y que el producto sea atractivo a la vista.

La actividad antioxidante más alta se obtuvo para el toronjil y el romero, con valores mayores al 80%, estos resultados no solo demuestran que estas plantas pueden ser beneficiosas para salud, sino que también podrían ser útiles como conservadores de alimentos; sin embargo, es necesario tener en cuenta que la actividad antioxidante puede variar según la parte de la planta utilizada, la variedad de la planta y el método de extracción, por lo tanto, es importante considerar la fuente y preparación de las muestras a evaluar.

De igual forma se obtuvieron valores de humedad y actividad de agua favorables, ya que todos estuvieron por debajo del 10% para el caso de la humedad y 0.6 para la actividad de agua, lo que nos indica que nuestro producto se puede conservar por más tiempo.

Con respecto a las condiciones ambientales y las temperaturas registradas dentro del secador en las diferentes pruebas realizadas, se observó que cuando se usó la malla sombra y el ventilador la temperatura se reguló un poco más y los picos de variación fueron menores.

Y finalmente en las eficiencias calculadas se observó que al hacer uso de la malla sombra estas eran más altas, que cuando no se usaba, debido a la cantidad de energía que entró en el secador.

Recomendaciones y trabajo a futuro

Es importante que cuando se realice el proceso de secado las condiciones ambientales sean similares para que de esta forma la comparación que se haga sea aún más confiable. De igual forma se debe supervisar que el equipo que se utiliza funcione correctamente ya que esto puede provocar errores durante el proceso.

Durante el secado se debe tener en cuenta que las mallas donde se encuentra el producto deben estar en constante rotación para lograr un secado uniforme, ya que una desventaja del secador es que el producto que se encuentra en la parte inferior tarda más en secarse. Por lo tanto, lo recomendable es que cada hora se roten las mallas que se encuentren en la parte superior a la parte inferior del secador.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se espera que posteriormente se puedan realizar más estudios, como, por ejemplo:

- Un análisis en la parte química para conocer a detalle que más cambios se pudieran tener después del proceso de secado solar de estas plantas y poderlo comparar contra un secado con horno.
- Realizar de nuevo la actividad antioxidante para determinar la IC_{50} de cada muestra.
- Utilizar diferentes partes de la planta para ver si varía la actividad antioxidante.
- Realizar más investigación para determinar la eficacia y seguridad de los antioxidantes naturales como conservadores en la industria alimentaria.
- Durante el proceso de secado, utilizar un ventilador más grande o dos, para incrementar la eficiencia de secado y a su vez disminuir las temperaturas dentro de la cámara de secado.
- Utilizar otros porcentajes de sombreo de la malla sombra (90%, 50%, 30%) para evaluar si afectan de igual forma el resultado.
- Utilizar diferentes cubiertas en la cámara de secado.
- Realizar los experimentos en una temporada diferente, para ver si la temporalidad afecta la eficiencia de secado.

Referencias

- [1] X. Aguirre Dugua, I. Castillo Juárez y L. d. M. Ruiz Posadas, «Usos actuales y potencial de las plantas aromáticas y medicinales,» *Agro-Divulgación*, vol. 2, n° 2, pp. 53-63, 2022.
- [2] M. Özgüven, G. Gülseren y J. Müller, «Investigation of the efficiency of drying conditions for essential oil production from aromatic plants,» *Makara Journal of Science*, vol. 23, n° 3, pp. 148-154, 2019.
- [3] J. L. Villaseñor, «Checklist of the native vascular plants of Mexico,» *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 87, p. 559–902, 2016.
- [4] L. M. Calvo Irabien, «Plantas aromáticas nativas: realidades y retos,» *Herbario CICY*, pp. 9-11, 2016.
- [5] S. Shalaby, M. Darwesh, M. Ghoname, S. E. Salah, Y. Nehela y M. Fetouh, «The effect of drying sweet basil in an indirect solar dryer integrated with phase change material on essential oil valuable components,» *Energy reports*, vol. 6, pp. 43-50, 2020.
- [6] T. S. B. Rao y S. Murugan, «Solar drying of medicinal herbs: A review,» *Solar Energy*, vol. 223, p. 415–436, 2021.
- [7] F. Gulcimen, H. Karakaya y A. Durmus, «Drying of sweet basil with solar air collectors,» *Renewable Energy*, vol. 93, pp. 77-86, 2016.
- [8] B. Mahayothee, T. Thamsala, P. Khuwijitjaru y S. Janjai, «Effect of drying temperature and drying method on drying rate and bioactive compounds in cassumunar ginger (*Zingiber montanum*),» *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, vol. 18, 2020.
- [9] M. C. Ndukwu, M. Simo-Tagne y L. Bennamoun, «Solar drying research of medicinal and aromatic plants: An African experience with assessment of the economic and environmental impact.,» *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, vol. 13, n° 2, pp. 247-260, 2021.
- [10] D. Argyropoulos y J. Müller, «Changes of essential oil content and composition during convective drying of lemon balm (*Melissa officinalis* L.),» *Industrial Crops and Products*, vol. 52, pp. 118-124, 2014.
- [11] N. Ortiz Rodríguez, M. Condorí, G. Durán y O. García Valladares, «Solar drying Technologies: A review and future research directions with a focus on agroindustrial applications in medium and large escale,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 215, 2022.

- [12] M. Castillo Téllez , B. Castillo Téllez , J. C. Ovando Sierra y L. M. Hernández Cruz , «Influencia de las condiciones de secado solar en la coloración de plantas medicinales,» *Revista de Energías Renovables*, vol. 3, n° 9, pp. 28-34, 2019.
- [13] R. A. Mohamed , I. R. Tamer , A. A. Yosry y A. M. Alaa , «Effect of New Solar-Drying Designs for Chamomile Essential Oil Yield and Its Chemical Constituents in Egypt,» *AUJASCI, Arab Univ. J. Agric. Sci.*, vol. 29, n° 1, p. 375 – 385, 2021.
- [14] M. Ayadi, I. Zouari y A. Bellagi, «Simulation and Performance of a Solar Drying Unit with Storage for Aromatic and Medicinal Plants,» *Int. J. Food Eng.*, vol. 11, n° 5, p. 597–607, 2015.
- [15] E. K. Akpinar, «Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants,» *Journal of Food Engineering*, vol. 77, p. 864–870, 2006.
- [16] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, «Monografía de productos agroalimentarios mexicanos: Epazote,» 17 05 2022. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/726661/Epazote_web.pdf. [Último acceso: 2022 12 09].
- [17] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, «Hierba olorosa y sabrosa, es el epazote,» 20 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/hierba-olorosa-y-sabrosa-es-el-epazote>. [Último acceso: 09 Diciembre 2022].
- [18] M. Asadi, «Chemical content of the aerial parts essential oil from rosemary, *Rosmarinus officinalis* L. (Lamiaceae) samples collected from Kermanshah province in the west of Iran,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF PLANT BASED PHARMACEUTICALS*, vol. 2, n° 1, pp. 30-36, 2022.
- [19] N. Mulinacci, M. Innocenti, M. Bellumori, C. Giaccherini, V. Martini y M. Michelozzi, «Storage method, drying processes and extraction procedures strongly affect the phenolic fraction of rosemary leaves: An HPLC/DAD/MS study,» *Talanta*, vol. 85, p. 167–176, 2011.
- [20] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, «Monografía de productos agroalimentarios mexicanos: Romero,» 17 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/726320/Romero.pdf>. [Último acceso: 2022 Diciembre 09].
- [21] S. A. Parray, J. u. Bhat, G. Ahmad, N. Jahan, G. Sofi y S. M. F. Iqbal, «Ruta graveolens: from Traditional System of Medicine to Modern Pharmacology: an Overview,» *American Journal of PharmTech*, vol. 2, n° 2, 2012.

- [22] Instituto de Ecología (INECOL), «Planta del mes: Ruda Ruta graveolens,» [En línea]. Available: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/37-planta-del-mes/1323-ruda>. [Último acceso: 09 Diciembre 2022].
- [23] A. Ivanova, B. Mikhova, H. Najdenski, I. Tsvetkova y I. Kostova, «Antimicrobial and cytotoxic activity of Ruta graveolens,» *Fitoterapia*, vol. 76, p. 344–347, 2005.
- [24] M. Palma Tenango, R. E. Sánchez Fernández y M. Soto-Hernández, «A Systematic Approach to Agastache mexicana Research: Biology, Agronomy, Phytochemistry, and Bioactivity,» *Molecules*, vol. 26, 2021.
- [25] R. Estrada Reyes, E. Aguirre Hernández, A. García Argáez, M. Soto Hernández, E. Linares, R. Bye, G. Heinze y M. Martínez Vázquez, «Comparative chemical composition of Agastache mexicana subsp. mexicana and A. mexicana subsp. xolocotziana,» *Biochemical Systematics and Ecology*, vol. 32, p. 685–694, 2004.
- [26] A. E. González Ramírez , M. E. González Trujano , A. Hernandez Leon , M. G. Valle Dorado , . A. Carballo Villalobos, S. Orozco Suárez , N. Alvarado Vásquez y F. J. López Muñoz, «Limonene from Agastache mexicana essential oil produces antinociceptive effects, gastrointestinal protection and improves experimental ulcerative colitis,» *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 280, 2021.
- [27] S. H. Guzmán Maldonado, R. S. Díaz Huacuz y M. M. González Chavira, «PLANTAS MEDICINALES LA REALIDAD DE UNA TRADICIÓN ANCESTRAL,» Celaya, Guanajato, México, 2017.
- [28] L. L. Ortega Cala, C. Monroy Ortiz, R. Monroy Martínez, H. Colín Bahena, G. Flores Franco, M. Luna Cavazos y R. Monroy Ortiz, «Plantas medicinales utilizadas para enfermedades del sistema digestivo en Tetela del Volcán, Estado de Morelos, México,» *Bol Latinoam Caribe Plant Med Aromat*, vol. 18, n° 6, pp. 106-129, 2019.
- [29] «México, segundo lugar mundial en registro de plantas medicinales,» Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 06 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mexico-segundo-lugar-mundial-en-registro-de-plantas-medicinales?idiom=es>. [Último acceso: 31 Mayo 2023].
- [30] A. Muñoz Acevedo, V. V. Kouznetsov y E. E. Stashenko, «Composición y capacidad antioxidante in-vitro de aceites esenciales ricos en Timol, Carvacrol, trans-Anetol o Estragol,» *Salud UIS*, pp. 287-294, 2009.
- [31] M. Suhaj, «Spice antioxidants isolation and their antiradical activity: a review,» *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 19, p. 531–537, 2006.
- [32] C. Proestos y T. Varzakas, «Aromatic Plants: Antioxidant Capacity and Polyphenol Characterisation,» *Foods*, vol. 6, n° 28, 2017.

- [33] M. G. Gallego Iradi, *Estudio de la actividad antioxidante de diversas plantas aromáticas y/o comestibles*, Barcelona, 2016.
- [34] L. M. Campo y J. S. Ramírez Navas, «Antioxidant capacity in ice cream and dairy products,» *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, vol. 8, n° 1, pp. 23-41, 2021.
- [35] M. M. G. , «Antioxidant activity of medicinal and aromatic plants. A review.,» *Flavour Fragr. J.*, vol. 25, p. 291–312, 2010.
- [36] M. Laguerre , J. Lecomte y P. Villeneuve, «Evaluation of the ability of antioxidants to counteract lipid oxidation: existing methods, new trends and challenges,» *Progress in Lipid Research*, vol. 46, n° 5, pp. 244-282, 2007.
- [37] «Atlas de las Plantas de la Medicina Tradicional Mexicana: Agastache mexicana,» BIBLIOTECA DIGITAL DE LA MEDICINA TRADICIONAL MEXICANA, 2009. [En línea]. Available: www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/apmtm/termino.php?l=3&t=agastache-mexicana. [Último acceso: 31 Mayo 2023].
- [38] M. Martínez Gordillo, B. Bedolla García, G. Cornejo Tenorio, I. Fragoso Martínez, M. d. R. García Peña, J. G. González Gallegos, S. I. Lara Cabrera y S. Zamudio , «Lamiaceae de México,» *Botanical Sciences*, vol. 95, n° 4, pp. 780-806, 2017.
- [39] S. Zielińska y A. Matkowski, «Phytochemistry and bioactivity of aromatic and medicinal plants from the genus Agastache (Lamiaceae),» *Phytochem Rev*, vol. 13, p. 391–416, 2014.
- [40] G. Carrillo Galván, R. Bye, L. E. Eguiarte, S. Cristians, P. Pérez López, F. Vergara Silva y M. Luna Cavazos, «Domestication of aromatic medicinal plants in Mexico: Agastache (Lamiaceae)—an ethnobotanical, morpho-physiological, and phytochemical analysis,» *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, vol. 16, n° 22, 2020.
- [41] «Atlas de las Plantas de la Medicina Tradicional Mexicana: Romero,» BIBLIOTECA DIGITAL DE LA MEDICINA TRADICIONAL , 2009. [En línea]. Available: www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/apmtm/termino.php?l=3&t=rosmarinus-officinalis. [Último acceso: 05 Junio 2023].
- [42] R. Avila Sosa, A. R. Navarro Cruz, O. Vera López, R. M. Dávila Márquez, N. Melgoza Palma y R. Meza Pluma, «Romero (*Rosmarinus officinalis* L.): una revisión de sus usos no culinarios,» *Ciencia y Mar*, vol. 15, n° 43, pp. 23-36, 2011.
- [43] M. E. Ávila Blanco, M. Gerardo Rodríguez, J. L. Moreno Duque, M. Muñoz Ortega y J. Ventura Juárez, «Amoebicidal activity of essential oil of *Dysphania ambrosioides*

- (L.) Mosyakin & Clemants in an amoebic liver abscess hamster model,» *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2014.
- [44] «Atlas de las Plantas de la Medicina Tradicional Mexicana: Epazote,» Biblioteca Digital de la Medicina Tradicional Mexicana , 2009. [En línea]. Available: www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/apmtm/termino.php?l=3&t=epazote. [Último acceso: 08 Junio 2023].
- [45] H. Vibrans, «Epazote,» *Malezas de México*, 16 Julio 2009. [En línea]. Available: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/chenopodiaceae/chenopodium-ambrosioides/fichas/ficha.htm>. [Último acceso: 09 Junio 2023].
- [46] R. D. Sá, A. S. Santana, F. C. Silva, L. A. L. Soares y K. P. Randau, «Anatomical and histochemical analysis of *Dysphania ambrosioides* supported by light and electron microscopy,» *Revista Brasileira de Farmacognosia*, vol. 26, p. 533–543, 2016.
- [47] I. Blanckaert, M. Paredes Flores, F. . J. Espinosa García, D. Piñero y R. Lira, «Ethnobotanical, morphological, phytochemical and molecular evidence for the incipient domestication of Epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.: Chenopodiaceae) in a semi-arid region of Mexico,» *Genet Resour Crop Evol*, vol. 59, p. 557–573, 2012.
- [48] J. A. Hurrell, «*Dysphania ambrosioides* (L.) Mosyakin & Clemants,» de *Medicinal and aromatic plants of South America*, Brasil, Springer, 2018, pp. 197-210.
- [49] P. Ainiwaer, M. Nueraihemaiti , Z. Li, D. Zang, L. Jiang, Y. Li y H. . A. Aisa, «Chemical constituents of *Ruta graveolens* L. and their melanogenic effects and action mechanism,» *Fitoterapia*, vol. 156, 2022.
- [50] J. Asgarpanah y R. Khoshkam, «Phytochemistry and pharmacological properties of *Ruta graveolens* L.,» *Journal of Medicinal Plants Research*, vol. 6, n° 23, pp. 3942-3949, 2012.
- [51] «Atlas de las Plantas de la Medicina Tradicional Mexicana: Ruda,» Biblioteca Digital de la Medicina Tradicional Mexicana , 2009. [En línea]. Available: www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/apmtm/termino.php?l=3&t=ruta-graveolens. [Último acceso: 11 Junio 2023].
- [52] A. L. Hale, K. M. Meepagala, A. Oliva, G. Aliotta y S. O. Duke, «Phytotoxins from the Leaves of *Ruta graveolens*,» *J. Agric. Food Chem.*, vol. 52, pp. 3345-3349, 2004.
- [53] M. Karel y D. B. Lund, «Water Activity and Food Preservation,» de *Physical principles of food preservation*, New York, Marcel Dekker, 2003, pp. 117-167.
- [54] M. S. Rahman, «Food Preservation: Overview,» de *Handbook of food preservation*, Estados Unidos , CRC Press, 2007, pp. 3-17.

- [55] M. S. Rahman y C. O. Perera, «Drying and Food Preservation,» de *Handbook of Food Preservation*, Estados Unidos, CRC Press, 2007, pp. 403-432.
- [56] S. Badui Dergal , *Química de los alimentos*, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2006.
- [57] A. Duarte Castillo , F. O. Díaz y L. F. Mejía, «Calidad en alimentos,» de *Práctica de operaciones unitarias en ingeniería de alimentos*, Manizales, Universidad de Caldas, 2023, pp. 21-24.
- [58] L. S. Díaz Neira , «El agua en los alimentos,» de *Principios Básicos de la Química y Bioquímica de Alimentos* , Chile , Universidad de la Serena, 2010, pp. 13-24.
- [59] C. A. Menchaca Valdez y R. B. Recio Colmenares, «Secado solar de alimentos,» de *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial*, Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2017, pp. 126-133.
- [60] O. Prakash y A. Kumar, «Solar Drying Systems,» de *Solar Drying Technology: Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment*, Singapore, Springer, 2017, pp. 39-68.
- [61] S. Kalogirou , «Industrial Process Heat, Chemistry Applications, and Solar Dryers,» de *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Segunda ed., Academic Press, 2014, pp. 397-429.
- [62] M. A. Condorí , «Secadores solares,» de *Energía solar*, Primera ed., M. A. Laborde y R. Williams, Edits., Buenos Aires, Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2016, pp. 77-87.
- [63] A. Chavan, V. Vitankar, A. Mujumdar y B. Thorat, «Natural convection and direct type (NCDT) solar dryers: a review,» *Drying Technology*, vol. 39, n° 13, p. 1969–1990, 2021.
- [64] A. Mustayen, S. Mekhilef y R. Saidur , «Performance study of different solar dryers: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 463-470, 2014.
- [65] E. C. López Vidaña , A. L. César Munguía , O. García Valladares, O. Salgado Sandoval y A. Domínguez Niño , «Energy and exergy analyses of a mixed-mode solar dryer of pear slices (*Pyrus communis* L),» *Energy*, vol. 220, 2021.
- [66] E. C. López Vidaña , A. L. César Munguía , O. García Valladares , I. Pilatowsky Figueroa y R. Brito Orosco , «Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*),» *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 845-855, 2020.

- [67] N. Chaves, A. Santiago y J. C. Alías , «Quantification of the antioxidant activity of plant extracts: analysis of sensitivity and hierarchization based on the method used,» *Antioxidants*, vol. 9, nº 76, 2020.
- [68] S. Shamekhi Amiri, T. B. Gorji, M. Gorji Bandpy y M. Jahanshahi, «Drying behaviour of lemon balm leaves in an indirect double-pass packed bed forced convection solar dryer system,» *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 12, pp. 677-686, 2018.
- [69] M. Vallino, A. Faccio, G. Zeppa, P. Dolci, E. Cerutti, L. Zaquini, F. Faoro y R. Balestrini, «Impact of drying temperature on tissue anatomy and cellular ultrastructure of different aromatic plant leaves,» *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, vol. 156, nº 4, p. 847–854, 2022.
- [70] A. Orphanides, V. Goulas y V. Gekas, «Drying Technologies: Vehicle to High-Quality Herbs,» *Food Eng Rev*, vol. 8, p. 164–180, 2016.
- [71] I. KWAŚNIEWSKA-KAROLAK y R. MOSTOWSKI, «Effect of different drying processes on an antioxidant potential of three species of the Lamiaceae family,» *Herba Pol*, vol. 67, nº 1, pp. 8-17, 2021.
- [72] A. Ali, C. Choong Oon, B. L. Chua, A. Figiel, C. H. Chong, A. Wojdylo, I. P. Turkiewicz, A. Szumny y J. Łyczko, «Volatile and polyphenol composition, antioxidant, anti-diabetic and anti-aging properties, and drying kinetics as affected by convective and hybrid vacuum microwave drying of *Rosmarinus officinalis* L.,» *Industrial Crops & Products*, vol. 151, 2020.
- [73] H. Karami, M. Kaveh, I. Golpour, E. Khalife, R. Rusinek, B. J. Dobrzanski y M. Gancarz, «Thermodynamic Evaluation of the Forced Convective Hybrid-Solar Dryer during Drying Process of Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) Leaves,» *energies*, vol. 14, 2021.
- [74] A. Domínguez Niño, O. Salgado Sandoval, E. C. López Vidaña , A. L. César Minguíá, I. Pilatowsky Figueroa y O. García Valladares, «Influence of process variables on the drying kinetics and color properties of pear slices (*Pyrus communis*),» *Color Research and Application*, pp. 1-14, 2021.
- [75] D. Arslan y M. M. Ozcan, «Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content and colour characteristics of rosemary leaves,» *Energy Conversion and Management*, vol. 49, p. 1258–1264, 2008.
- [76] O. García Valladares , A. M. Lucho Gómez , E. A. Montiel Baltazar , M. Castañeda Vázquez , C. A. Ortiz Sánchez , B. Castillo Téllez , G. Luna Solano y A. Domínguez Niño, «Effect of Modified Solar Dryers on Colorimetric and Physicochemical Properties of Pumpkin Flower (*Cucurbita maxima*),» *Plant Foods for Human Nutrition*, vol. 78, pp. 139-145, 2023.

- [77] L. H. Villalobos Delgado, E. . G. González Mondragón, A. Y. Salazar Govea, J. T. Santiago Castro y J. Ramírez Andrade, «Efecto antioxidante de epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.) en carne molida cruda de bovino,» *NACAMEH*, vol. 10, n° 2, p. 35-48, 2016.
- [78] B. E. Jaramillo C., E. Duarte R y W. Delgado, «Bioactividad del aceite esencial de *Chenopodium ambrosioides* colombiano,» *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, vol. 17, n° 1, pp. 54-64, 2012.
- [79] F. Lagunes, I. Estrada, J. Guerrero y R. Navarrete, «Cinética de secado solar en productos del huerto familiar huasteco,» *Ciencias de la Ingeniería y Tecnología Handbook*, pp. 113-130, 2013.
- [80] D. P. García Moreira, H. Hernández Guzmán, N. Pacheco, J. . C. Cuevas Bernardino, E. Herrera Pool, I. Moreno y E. C. López Vidaña, «Solar and Convective Drying: Modeling, Color, Texture, Total Phenolic Content, and Antioxidant Activity of Peach (*Prunus persica* (L.) Batsch) Slices,» *Processes*, vol. 11, 2023.
- [81] Ž. Tarasevičienė , A. Velička, E. Jarienė, A. Paulauskienė, A. Kieltyka-Dadasiewicz, B. Sawicka y M. Gajewski, «Comparison of Chemical Composition and Colour Parameters of Different *Mentha* Genus Plants Grown under Organic Conditions,» *Not Bot Horti Agrobo*, vol. 47, n° 1, pp. 92-99, 2018.
- [82] R. Diwan, A. Shinde y N. Malpathak, «Phytochemical Composition and Antioxidant Potential of *Ruta graveolens* L. In Vitro Culture Lines,» *Journal of Botany*, 2012.
- [83] A. J. Castro L, J. R. Juárez E, N. J. Ramos C, S. Suárez C, F. Retuerto P y S. A. Gonzales E, «ELUCIDACIÓN ESTRUCTURAL DEL ACEITE ESENCIAL DE *Ruta Graveolens* L. RUDA, ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE Y BIOENSAYO DE CITOTOXICIDAD,» *Ciencia e Investigación*, vol. 14, n° 1, pp. 25-28, 2011.
- [84] M. Kumar, Shimpy, R. Kumar Sahdev, S. Kumar Sansaniwal, V. Bhutani y H. Manchanda, «Experimental forced convection greenhouse and indirect cabinet drying of date fruits: a comparative study,» *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 148, p. 5437–5454, 2023.
- [85] H. Essalhi, R. Tadili y M. N. Bargach, «Comparison of Thermal Performance Between Two Solar Air Collectors for an Indirect Solar Dryer,» *Journal of Physical Science*, vol. 29, n° 3, p. 55–65, 2018.
- [86] S. Kaur, M. Singh, R. Zalpouri y K. Kaur, «Potential application of domestic solar dryers for coriander leaves: Drying kinetics, thermal efficiency, and quality assessment,» *Environ Prog Sustainable Energy*, vol. 42, 2023.

[87] L. E. Mealla Sánchez y J. D. Morales Olaciregui, «Evaluación del comportamiento térmico de secadores solares en régimen pasivo,» *TecnoLógicas*, vol. 21, nº 41, pp. 29-44, 2018.